ИД «Академия Естествознания»

СОВРЕМЕННЫЕ НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал

№ 10 2026

MODERN HIGH TECHNOLOGIES

Scientific journal

No. 10 2026

PH Academy of Natural History

Современные наукоемкие технологии
Научный журнал

Журнал издается с 2003 года.
Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. **Свидетельство – ПИ № ФС 77-63399** от 16.10.2015.
«Современные наукоемкие технологии» – рецензируемый научный журнал, в котором публикуются статьи, обладающие научной новизной, представляющие собой результаты завершенных исследований, проблемного или научно-практического характера, научные обзоры.
Журнал включен в Единый государственный перечень научных изданий (ЕГПНИ) "Белый список". Уровень 2.
Журнал включен в действующий Перечень рецензируемых научных изданий (**ВАК РФ**). **К1**.
Журнал ориентируется на ученых, преподавателей, инженерно-технических специалистов, сотрудников информационных технологий и информатики, использующих в своих исследованиях междисциплинарный подход. Авторы журнала уделяют особое внимание методологии преподавания технических дисциплин.
Основные научные направления: 1.2. Компьютерные науки и информатика, 2.3. Информационные технологии и телекоммуникации, 2.5. Машиностроение, 5.8. Педагогика.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР
Ледванов Михаил Юрьевич, д.м.н., профессор

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ
Бизенкова Мария Николаевна, к.м.н.

Технический редактор
Доронкина Е. Н.

Корректор
Галенкина Е. С.,
Дудкина Н. А.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

д.х.н. к.ф.-м.н., проф. ***Алоев В. З.*** (Нальчик); д.т.н., проф. ***Ахтулов А. Л.*** (Омск); д.т.н., проф. ***Баёв А. С.*** (Санкт-Петербург); д.п.н., к.х.н., проф. ***Безрукова Н. П.*** (Красноярск); д.п.н., доцент ***Бобыкина И. А.*** (Челябинск); д.г.-м.н. к.т.н., проф. ***Бондарев В. И.*** (Екатеринбург); д.псх.н., проф. ***Долгова В. И.*** (Челябинск); д.псх.н. ***Дубовицкая Т. Д.*** (Сочи); д.т.н., доцент ***Дубровин А. С.*** (Воронеж); д.п.н., доцент ***Евтушенко И. В.*** (Москва); д.п.н. к.ф.-м.н., проф. ***Ефремова Н. Ф.*** (Ростов-на-Дону); д.т.н., проф. ***Иванова Г. С.*** (Москва); д.т.н., проф. ***Калмыков И. А.*** (Ставрополь); д.ф.-м.н. ***Катаева Л. Ю.*** (Нижний Новгород); д.псх.н. к.п.н., доцент ***Кибальченко И. А.*** (Таганрог); д.п.н., к.т.н., проф. ***Козлов О. А.*** (Москва); д.т.н., проф. ***Козлов А. М.*** (Липецк); д.т.н., профессор ***Козловский В. Н.*** (Самара); д.т.н., доцент ***Красновский А. Н.*** (Москва); д.т.н., доцент ***Кузяков О. Н.*** (Тюмень); д.п.н., проф. ***Куликовская И. Э.*** (Ростов-на-Дону); д.ф.-м.н., доцент ***Ломазов В. А.*** (Белгород); д.т.н., доцент ***Лубенцов В. Ф.*** (Краснодар); д.п.н., к.филос.н., проф. ***Матис В. И.*** (Барнаул); д.п.н., проф. ***Микерова Г. Ж.*** (Краснодар); д.т.н., к.ф.-м.н. ***Мишин В. М.*** (Ставрополь); д.п.н., к.б.н., проф. ***Моисеева Л. В.*** (Екатеринбург); д.т.н., проф. ***Мурашкина Т. И.*** (Пенза); д.т.н., проф. ***Надеждин Е. Н.*** (Москва); д.ф.-м.н., проф. ***Никонов Э. Г.*** (Дубна); д.т.н., проф. ***Осипов Г. С.*** (Южно-Сахалинск); д.т.н., проф. ***Пивень В. В.*** (Тюмень); д.т.н. ***Попок В. Н.*** (Москва); д.п.н., проф. ***Рахимбаева И. Э.*** (Саратов); д.т.н., проф. ***Рогачев А. Ф.*** (Волгоград); д.т.н., проф. ***Сердобинцев Ю. П.*** (Волгоград); д.т.н., проф. ***Скрыпник О. Н.*** (Беларусь, Минский район, агрогородок Колодищи); д.п.н., проф. ***Собянин Ф. И.*** (Белгород); д.т.н., проф. ***Страбыкин Д. А.*** (Киров); д.т.н., проф. ***Сугак Е. В.*** (Красноярск); д.п.н., проф. ***Ульянова И. В.*** (Москва); к.т.н., доцент ***Хайдаров А. Г.*** (Санкт-Петербург); д.п.н., проф. ***Хода Л. Д.*** (Нерюнгри); д.т.н., проф. ***Часовских В. П.*** (Екатеринбург); д.т.н., проф. ***Ченцов С. В.*** (Красноярск); д.ф.-м.н., проф. ***Ширапов Д. Ш.*** (Улан-Удэ); д.т.н., проф. ***Шишков В. А.*** (Самара)

ISSN 1812–7320
Электронная версия: top-technologies.ru/ru
Правила для авторов: top-technologies.ru/ru/rules/index
Двухлетний импакт-фактор РИНЦ = 1,279
Пятилетний импакт-фактор РИНЦ = 0,523

Периодичность	12 номеров в год		
Учредитель, издатель и редакция	ООО ИД «Академия Естествознания»		
Почтовый адрес	105037, г. Москва, а/я 47		
Адрес редакции и издателя	440026, обл. Пензенская, г. Пенза, ул. Московская, влд. 27		
Типография	ООО «НИЦ Академия Естествознания» 410035, г. Саратов, ул. Мамонтовой, 5		
E-mail	edition@rae.ru	**Телефон**	+7 (499) 705-72-30
Подписано в печать	30.10.2026	**Дата выхода номера**	30.11.2026
Формат	60x90 1/8	**Усл. печ. л.**	45,6
Тираж	1000 экз.	**Заказ**	СНТ 2026/10

Распространяется по свободной цене

© ООО ИД «Академия Естествознания»

Modern high technologies
Scientific journal

The journal has been published since 2003.
The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Communications. **Certificate – PI No. FS 77-63399** dated October 16, 2015.
"Modern high technologies" is a peer-reviewed scientific journal that publishes articles with scientific novelty, representing the results of completed research, problematic or scientific-practical character, scientific reviews.
The Unified State List of Scientific Publications (USPNI) The "White List». Level 2.
The journal is included in the current List of peer-reviewed scientific publications (**HCC RF**). **К1**.
The journal is oriented to scientists, teachers, engineering and technical specialists, employees of information technology and computer science, using an interdisciplinary approach in their research. The authors of the journal pay special attention to the methodology of teaching technical disciplines.
Main scientific directions: 1.2. Computer Science and Informatics, 2.3. Information technologies and telecommunications, 2.5. Engineering, 5.8. Pedagogy.

CHIEF EDITOR
Ledvanov Mikhail Yurievich, Dr. Sci. (Medical), Prof.

EXECUTIVE SECRETARY
Bizenkova Maria Nikolaevna, Cand. Sci. (Medical)

Technical editor
Doronkina E. N.

Corrector
Galenkina E. S.,
Dudkina N. A.

EDITORIAL BOARD

D.Sc., C.Sc., Prof. ***Aloev V. Z.*** (Nalchik); D.Sc., Prof. ***Akhtulov A. L.*** (Omsk); D.Sc., Prof. ***Bajov A. S.*** (St. Petersburg); D.Sc., C.Sc., Prof. ***Bezrukova N. P.*** (Krasnoyarsk); D.Sc., Docent ***Bobykina I. A.*** (Chelyabinsk); D.Sc., C.Sc., Prof. ***Bondarev V. I.*** (Ekaterinburg); D.Sc., Prof. ***Dolgova V. I.*** (Chelyabinsk); D.Sc. ***T. D. Dubovitskaya*** (Sochi); D.Sc., Docent ***Dubrovin A. S.*** (Voronezh); D.Sc., Docent ***Evtushenko I. V.*** (Moscow); D.Sc., C.Sc., Prof. ***Efremova N. F.*** (Rostov-on-Don); D.Sc. ***Ivanova G. S.*** (Moscow); D.Sc., Prof. ***Kalmykov I. A.*** (Stavropol); D.Sc. ***Katayeva L. Yu.*** (Nizhny Novgorod); D.Sc C.Sc., Docent ***Kibalchenko I. A.*** (Taganrog); D.Sc., C.Sc., Prof. ***Kozlov O. A.*** (Moscow); D.Sc., Prof. ***Kozlov A. M.*** (Lipetsk); D.Sc., Prof. ***Kozlovsky V. N.*** (Samara); D.Sc. ***Krasnovsky A. N.*** (Moscow); D.Sc., Docent ***Kuzyakov O. N.*** (Tyumen); D.Sc., Prof. ***Kulikovskaya I. E.*** (Rostov-on-Don); D.Sc., Docent ***Lomazov V. A.*** (Belgorod); D.Sc., Docent ***Lubentsov V. F.*** (Krasnodar); D.Sc. C.Sc., Prof. ***Matis V. I.*** (Barnaul); D.Sc., Prof. ***Mikerova G. J.*** (Krasnodar); D.Sc., C.Sc. ***Mishin V. M.*** (Stavropol); D.Sc., C.Sc., Prof. ***Moiseeva L. V.*** (Ekaterinburg); D.Sc., Prof. ***Murashkina T. I.*** (Penza); D.Sc., Prof. ***Nadezhdin E. N.*** (Moscow); D.Sc., Prof. ***Nikonov E. G.*** (Dubna); D.Sc., Prof. ***Osipov G. S.*** (Yuzhno-Sakhalinsk); D.Sc., Prof. ***Piven V. V.*** (Tyumen); D.Sc. ***Popok V. N.*** (Moscow); D.Sc., Prof. ***Rakhimbaeva I. E.*** (Saratov); D.Sc., Prof. ***Rogachev A. F.*** (Volgograd); D.Sc., Prof. ***Serdobintsev Yu. P.*** (Volgograd); D.Sc., Prof. ***Skrypnik O. N.*** (Belarus, Minsk District, Kolodishchi agricultural town); D.Sc., Prof. ***Sobyanin F. I.*** (Belgorod); D.Sc., Prof. ***Strabykin D. A.*** (Kirov); D.Sc., Prof. ***Sugak E. V.*** (Krasnoyarsk); D.Sc., Prof. ***Ulyanova I. V.*** (Moscow); C.Sc., Docent ***Khaidarov A. G.*** (St.-Petersburg); D.Sc., Prof. ***Khoda L. D.*** (Neryungri); D.Sc., Prof. ***Chasovskikh V. P.*** (Ekaterinburg); D.Sc., Prof. ***Chentsov S. V.*** (Krasnoyarsk); D.Sc., Prof. ***Shirapov D. Sh.*** (Ulan-Ude); D.Sc. ***Shishkov V. A.*** (Samara)

ISSN 1812–7320
Electronic version: top-technologies.ru/ru
Rules for authors: top-technologies.ru/ru/rules/index
Impact-factor RISQ (two-year) = 1,279
Impact-factor RISQ (five-year) = 0,523

Periodicity	12 issues per year		
Founder, publisher and editors	LLC PH Academy of Natural History		
Mailing address	105037, Moscow, p.o. box 47		
Editorial and publisher address	440026, Penza region, Penza, Moskovskaya st., bldg. 27		
Printing	LLC SPC Academy of Natural History 410035, Saratov, st. Mamontova, 5		
E-mail	edition@rae.ru	**Telephone**	+7 (499) 705-72-30
Signed for print	30.10.2026	**Number issue date**	30.11.2026
Format	60x90 1/8	**Conditionally printed sheets**	45,6
Circulation	1000 copies	**Order**	CHT 2026/10

Distribution at a free price
© LLC PH Academy of Natural History

СОДЕРЖАНИЕ

Технические науки (1.2.2, 2.3.3, 2.3.4, 2.3.5, 2.5.3, 2.5.5, 2.5.7, 2.5.8)

СТАТЬИ

КИНЕТИКА ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ МЕДИ С СИНТЕТИЧЕСКИМ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИМ КОРУНДОМ ПРИ СВАРКЕ ДАВЛЕНИЕМ С НАГРЕВОМ В ПЕРИОД НЕУСТАНОВИВШЕЙСЯ ПОЛЗУЧЕСТИ ДЛЯ НОМИНАЛЬНЫХ ДАВЛЕНИЙ ОТ 40 ДО 80 МПА

Абрамов В. В., Жеглова Ю. Г. 12

ИНТЕГРАЦИЯ ОГРАНИЧЕНИЙ НА КРИТЕРИЙ ДАРБИНА – УОТСОНА В ЗАДАЧУ ЧАСТИЧНО БУЛЕВОГО ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДЛЯ ОТБОРА РЕГРЕССОРОВ В ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ

Базилевский М. П. 19

ЭМПИРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕХНИК ОПТИМИЗАЦИИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ FLUTTER: СРАВНЕНИЕ МОБИЛЬНЫХ И ВЕБ-ПЛАТФОРМ

Бисмус А. П., Готская И. Б. 24

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО АНАЛИЗА РИСКОВ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ

Бурькова Е. В., Майраслов К. В. 32

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФРАКЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ ПРИ МОДУЛЯЦИИ СВЕТОВОГО ПОТОКА В ОТКРЫТОМ ИЗМЕРИТЕЛЬНОМ КАНАЛЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО РАСТРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Гашенко Ю. В., Сусарев С. В. 46

КОНТРАСТИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОБУЧЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Гиниятуллин В. М. 56

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ДВИЖУЩЕГОСЯ АППАРАТА ПО АНОМАЛЬНОМУ МАГНИТНОМУ ПОЛЮ ЗЕМЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКИХ МЕТОДОВ

Каткова Е. А. 66

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ МЕЖФАЗНОЙ ГРАНИЦЫ МЕЖДУ ПОТОКАМИ ЖИДКИЙ ЭЛЕКТРОЛИТ – ГАЗ

Кашапов Н. Ф., Пушкарёв Ю. И., Чебакова В. Ю. 74

СОВМЕЩЕННОЕ НЕПРЕРЫВНОЕ ЛИТЬЕ И ЦИКЛИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ СТАЛЬНЫХ ЛИСТОВ: КОНСТРУКЦИЯ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Лернер М. М. 80

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ НА ПРОГРАММИРУЕМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ КОНТРОЛЛЕРАХ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ

Лукин С. А., Кайченов А. В., Ерещенко В. В., Пономаренко Д. А., Николаев Н. С., Делицын А. Н., Яблоков А. Е. 88

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ПОДАВЛЕНИЕ ОБРАТНЫХ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩИХ СИЛ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ КАК УСЛОВИЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

Маренич К. Н., Денисова А. И. *99*

ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УПРАВЛЕНИЯ СЕМИЗВЕННЫМ ЭКЗОСКЕЛЕТОМ НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ДИНАМИКИ В СИСТЕМЕ СИМВОЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ И ПЕРСПЕКТИВЫ НЕЙРОСЕТЕВОЙ РЕАЛИЗАЦИИ

Маслова К. С. *109*

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕЖРЕГИОНАЛЬНОГО ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ С УЧЕТОМ ФРАНЧАЙЗИНГОВЫХ ПРОЕКТОВ

Медведев А. В., Казакова О. А., Казаков Н. Л. *118*

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАДАНИЙ В ГРУППЕ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ ПРИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ЭНЕРГОЗАТРАТ С УЧЕТОМ ПОДЗАРЯДКИ

Мигранов А. Б. *125*

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭВАКУАЦИЕЙ ПЕШЕХОДНЫХ ПОТОКОВ НА ОСНОВЕ ГИБРИДНОЙ МЕЗОСКОПИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ПЛОТНОСТИ ПОТОКА

Наумова Н. А., Чубырь Н. О. *132*

ПОДХОД К КОНФИГУРАЦИИ И ОПТИМИЗАЦИИ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Поспелов К. Н., Лундаева К. А., Бекетов С. М., Дергачев М. В., Гинцяк А. М. *141*

МЕТОД ВЫЯВЛЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ ДНИЩА АВТОМОБИЛЕЙ НА ОСНОВЕ ЭТАЛОННОГО СРАВНЕНИЯ

Слесарев В. Е., Белкин Е. Н. *150*

АВТОМАТИЗАЦИЯ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ТЕРРИТОРИЙ РЕЧНЫХ БАССЕЙНОВ СРЕДСТВАМИ ЯЗЫКА R И СРЕДЫ RSTUDIO

Табунщик В. А. *159*

МЕХАНИЗМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРЕДМЕТНОЙ ПОДГОТОВКОЙ СТУДЕНТОВ МЛАДШИХ КУРСОВ

Тарасова Л. С., Столбова И. Д. *167*

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ЧИСЛОВЫХ ЗНАЧЕНИЙ ОПЕРАТОРА ИНТЕРПОЛИРОВАНИЯ ДЛЯ L-МАРКОВСКОГО ПРОЦЕССА С КВАЗИРАЦИОНАЛЬНОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТЬЮ

Титов А. Н., Фадеева Л. Ю. *179*

АДАПТИВНАЯ СТРАТЕГИЯ ВЫЧИСЛЕНИЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОСАЖДЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ В ЖИДКОСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Ткаченко О. П., Крылов В. И., Вихтенко Э. М. *194*

ЭКСПРЕСС-ДИАГНОСТИКА МАКСИМАЛЬНО НАБЛЮДАЕМОЙ ЧАСТОТЫ СИГНАЛА В СТОХАСТИЧЕСКОМ КАНАЛЕ СВЯЗИ

Чудаев С. О., Артола А. О., Афанасьев Н. Т., Лукьянцев Д. С. *205*

Педагогические науки (5.8.1, 5.8.2, 5.8.3, 5.8.7)

СТАТЬИ

РОДИТЕЛЬСКИЙ КЛУБ КАК ФОРМА ПСИХОЛОГО-ПЕДАГОГИЧЕСКОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ СЕМЕЙ, ИМЕЮЩИХ ДЕТЕЙ С ТЯЖЕЛЫМИ НАРУШЕНИЯМИ РЕЧИ

Алпатова О. Б., Кулешова Э. В. *214*

КОМПЬЮТЕРНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ЯЗЫКОВОЙ КОМПЕТЕНЦИИ СТУДЕНТОВ В ЦИФРОВОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ: МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИ ОПОСРЕДОВАННОЙ ВАЛИДНОСТИ

Андреева Е. А., Корнева И. Г., Усманов Т. Р. *221*

ДИАГНОСТИКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕНЕРАТИВНОГО ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ШКОЛЕ: КРИТЕРИИ, МАТРИЦА СОПРЯЖЕНИЯ С ФЕДЕРАЛЬНЫМ ГОСУДАРСТВЕННЫМ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫМ СТАНДАРТОМ И УРОВНЕВАЯ ШКАЛА

Вишленкова С. Г. *228*

БИНАРНАЯ СИСТЕМА ОЦЕНИВАНИЯ В МАГИСТРАТУРЕ: НАУЧНЫЙ СТЕНДАП КАК ИНСТРУМЕНТ

Войтик Н. В., Полетаева О. Б., Абсалямова Р. А., Муравьева М. В. *242*

РАЗВИТИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ КОМПЕТЕНТНОСТИ У СТУДЕНТОВ ИНЖЕНЕРНОГО ВУЗА В ПРОЦЕССЕ ОБУЧЕНИЯ АНГЛИЙСКОМУ ЯЗЫКУ: ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И ПОТЕНЦИАЛ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Газизулина Л. Р. *250*

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ИГР В КАЧЕСТВЕ МЕТОДИЧЕСКОГО СРЕДСТВА ОБУЧЕНИЯ ПРОГРАММИРОВАНИЮ

Гибадуллин А. А. *256*

ПЕДАГОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ГОТОВНОСТИ БУДУЩИХ ИНЖЕНЕРОВ-ЭНЕРГЕТИКОВ К ПРИНЯТИЮ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Зокирова Э. Р. *262*

ПРОЕКТНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ КАК СРЕДСТВО ФОРМИРОВАНИЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ УМЕНИЙ МЛАДШИХ ШКОЛЬНИКОВ В ЭТНОКУЛЬТУРНОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ

Иванова А. В., Нестерева Н. А. *268*

ФОРМИРОВАНИЕ КОМПЕТЕНЦИИ В ОБЛАСТИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА У БУДУЩИХ УЧИТЕЛЕЙ ИНОСТРАННОГО ЯЗЫКА

Кизрина Н. Г., Бояркина Л. М., Янкина О. Е. *275*

ЦИФРОВЫЕ ПЛАТФОРМЫ И ТЕХНОЛОГИИ В ПОДГОТОВКЕ КОНКУРЕНТОСПОСОБНЫХ ВЫПУСКНИКОВ ВУЗА НА СОВРЕМЕННОМ РЫНКЕ ТРУДА

Коноплянский Д. А. *285*

ТЕХНОЛОГИЯ ПОДГОТОВКИ ИНЖЕНЕРОВ-НЕФТЯНИКОВ ДЛЯ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОГО НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА

Минин М. Г., Савельева Н. Н. *292*

МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ НАДПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ ОБУЧАЮЩИХСЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ В РАМКАХ АУТЕНТИЧНОЙ МУЗЕЙНОЙ СРЕДЫ

Панкратьева Г. И., Богданова Н. В., Каталкина Н. А., Кузнецова У. К. *300*

ПЕРСПЕКТИВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПОДГОТОВКИ УЧИТЕЛЕЙ ЕСТЕСТВЕННО-НАУЧНЫХ УЧЕБНЫХ ПРЕДМЕТОВ

Паршутина Л. А., Заграничная Н. А., Рыжова О. Н. *310*

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ АДАПТИВНОГО КУРСА ДЛЯ ИНЖЕНЕРНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ НА ПРИМЕРЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТА ПО ЭЛЕКТРОНИКЕ

Потапов А. А. *322*

ТЕХНОЛОГИЯ «МЯГКОЙ СИЛЫ» В ПРОЦЕССЕ ПОДГОТОВКИ БУДУЩИХ УЧИТЕЛЕЙ К ПАТРИОТИЧЕСКОМУ ВОСПИТАНИЮ ОБУЧАЮЩИХСЯ

Семенова Е. В. *329*

ПРОФЕССИОНАЛЬНО ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД В ОБУЧЕНИИ СТУДЕНТОВ ПЕДАГОГИЧЕСКОГО ВУЗА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛОГИКЕ И ТЕОРИИ АЛГОРИТМОВ

Тагаева Е. А., Шалина О. Н., Садовников Н. В. *334*

ИССЛЕДОВАНИЕ БАЗОВЫХ ОПЕРАЦИЙ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ПРЕДПОСЫЛКИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРАТЕГИЙ ОБРАБОТКИ ТЕКСТОВОЙ ИНФОРМАЦИИ ОБУЧАЮЩИМИСЯ С ТЯЖЕЛЫМИ НАРУШЕНИЯМИ РЕЧИ НА УРОКАХ МАТЕМАТИКИ

Тишина Л. А. *340*

ФОРМИРОВАНИЕ ГРАЖДАНСКОЙ ИДЕНТИЧНОСТИ И ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ СТУДЕНТОВ ЧЕРЕЗ ОСВОЕНИЕ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ (НА МАТЕРИАЛЕ ХРАМОВОЙ АРХИТЕКТУРЫ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА)

Чернышова Э. П., Гильдина Т. А., Ткаченко Д. А. *347*

РАЗВИТИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ГЕОМЕТРО-ГРАФИЧЕСКИХ СПОСОБНОСТЕЙ БУДУЩИХ ИНЖЕНЕРОВ-КОНСТРУКТОРОВ

Юматова Э. Г., Юматов В. А. *355*

ИГРЫ НАРОДОВ СЕВЕРА В ЗДОРОВЬЕСБЕРЕЖЕНИИ ДОШКОЛЬНИКОВ

Яркова Г. А., Токарева Е. Ю. *360*

CONTENTS

Technical sciences (1.2.2, 2.3.3, 2.3.4, 2.3.5, 2.5.3, 2.5.5, 2.5.7, 2.5.8)

ARTICLES

KINETICS OF PLASTIC STRAIN OF COPPER WITH SYNTHETIC MONOCRYSTALLINE CORUNDUM DURING PRESSURE WELDING WITH HEATING IN THE TRANSIENT CREEP STAGE AT NOMINAL PRESSURES OF 40 TO 80 MPA

Abramov V. V., Zheglova Yu. G. 12

INTEGRATION OF CONSTRAINTS BASED ON THE DURBIN – WATSON TEST INTO MIXED 0–1 INTEGER LINEAR PROGRAMMING PROBLEM FOR SUBSET SELECTION IN LINEAR REGRESSION

Bazilevskiy M. P. 19

EMPIRICAL ANALYSIS OF FLUTTER PERFORMANCE OPTIMIZATION TECHNIQUES: A COMPARISON OF MOBILE AND WEB PLATFORMS

Bismus A. P., Gotskaya I. B. 24

MATHEMATICAL MODEL AND METHODOLOGY OF AUTOMATED ANALYSIS OF INFORMATION SECURITY RISKS FOR EDUCATIONAL INSTITUTIONS

Burkova E. V., Mayraslov K. V. 32

DIFFRACTION EFFECTS MODELING FOR LIGHT MODULATION IN AN OPEN MEASURING CHANNEL OF A FIBER-OPTIC RASTER SENSOR

Gashenko Yu. V., Susarev S. V. 46

CONTRASTING THE PARAMETERS OF A TRAINED NEURAL NETWORK

Giniyatullin V. M. 56

LOCATION OF A MOVING APPARATUS BY THE EARTH'S ANOMALOUS MAGNETIC FIELD USING FUZZY METHODS

Katkova E. A. 66

NUMERICAL STUDY OF THE BEHAVIOR OF THE INTERFACIAL BOUNDARY BETWEEN LIQUID ELECTROLYTE – GAS FLOWS

Kashapov N. F., Pushkarev Yu. I., Chebakova V. Yu. 74

INTEGRATED CONTINUOUS CASTING AND CYCLIC DEFORMATION OF STEEL SHEETS: UNIT DESIGN AND TECHNOLOGICAL PREREQUISITES

Lerner M. M. 80

RESEARCH ON THE APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS RUNNING ON PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLERS FOR PROCESS CONTROL

Lukin S. A., Kaychenov A. V., Ereschenko V. V., Ponomarenko D. A., Nikolaev N. S., Delitsyn A. N., Yablokov A. E. 88

AUTOMATIC SUPPRESSION OF BACK ELECTRIC FORCES
OF ELECTRIC MOTORS AS A CONDITION FOR ENSURING
THE SAFETY OF INDUSTRIAL ELECTRIC INSTALLATIONS

Marenich K. N., Denisova A. I. *99*

SOFTWARE AND ALGORITHMIC SUPPORT FOR THE CONTROL
OF SEVEN-LINK EXOSKELETON BASED ON SOLVING DYNAMICS
PROBLEMS IN A SYSTEM OF SYMBOLIC CALCULATIONS AND
THE PROSPECTS FOR NEURAL NETWORK IMPLEMENTATION

Maslova K. S. *109*

MODELING INTERREGIONAL ECONOMIC DEVELOPMENT
WITH FRANCHISING PROJECTS

Medvedev A. V., Kazakova O. A., Kazakov N. L. *118*

TASK ALLOCATION IN A GROUP OF MOBILE ROBOTS UNDER
ENERGY CONSUMPTION UNCERTAINTY WITH RECHARGING

Migranov A. B. *125*

ADAPTIVE MANAGEMENT OF PEDESTRIAN FLOWS BASED ON A HYBRID
MESOSCOPIC MODEL AND INTELLIGENT ANALYSIS OF FLOW DENSITY

Naumova N. A., Chubyr N. O. *132*

AN APPROACH TO THE CONFIGURATION AND OPTIMIZATION
OF SIMULATION MODELS OF ORGANIZATIONAL SYSTEMS

Pospelov K. N., Lundaeva K. A., Beketov S. M., Dergachev M. V., Gintsyak A. M. *141*

A REFERENCE-BASED METHOD FOR DETECTING CHANGES IN VEHICLE
UNDERBODY IMAGES

Slesarev V. E., Belkin E. N. *150*

AUTOMATION OF GEOECOLOGICAL ASSESSMENT OF RIVER BASIN
TERRITORIES USING THE R LANGUAGE AND RSTUDIO IDE

Tabunshchik V. A. *159*

INTELLIGENT MANAGEMENT MECHANISMS FOR SUBJECT-SPECIFIC
LEARNING AMONG JUNIOR UNIVERSITY STUDENTS

Tarasova L. S., Stolbova I. D. *167*

MATHEMATICAL MODELING AND CALCULATION OF NUMERICAL
VALUES OF THE INTERPOLATION OPERATOR FOR L-MARKOV
PROCESS WITH QUASIRATIONAL SPECTRAL DENSITY

Titov A. N., Fadeeva L. Yu. *179*

AN ADAPTIVE COMPUTATIONAL STRATEGY FOR MODELING
NANOPARTICLE DEPOSITION IN A LIQUID UNDER LASER IRRADIATION

Tkachenko O. P., Krylov V. I., Vikhtenko E. M. *194*

RAPID DIAGNOSTICS OF THE MAXIMUM-OBSERVABLE FREQUENCY
OF THE SIGNAL IN A STOCHASTIC COMMUNICATION CHANNEL

Chudaev S. O., Artola A. O., Afanasev N. T., Lukyantsev D. S. *205*

Pedagogical sciences (5.8.1, 5.8.2, 5.8.3, 5.8.7)

ARTICLES

PARENT CLUB AS A FORM OF PSYCHOLOGICAL AND PEDAGOGICAL SUPPORT FOR FAMILIES RAISING CHILDREN WITH SEVERE SPEECH DISORDERS

Alpatova O. B., Kuleshova E. V. *214*

COMPUTER-BASED ASSESSMENT OF STUDENTS' LANGUAGE PROFICIENCY IN A DIGITAL EDUCATIONAL ENVIRONMENT: A MODEL OF TECHNOLOGY-MEDIATED VALIDITY

Andreeva E. A., Korneeva I. G., Usmanov T. R. *221*

ASSESSMENT OF THE EFFECTIVENESS OF GENERATIVE ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN SCHOOLS: CRITERIA, A CROSSWALK MATRIX WITH THE FEDERAL STATE EDUCATIONAL STANDARD AND A LEVEL SCALE

Vishlenkova S. G. *228*

BINARY ASSESSMENT IN MASTER'S PROGRAMMES: SCIENTIFIC STAND-UP AS A TOOL

Voytik N. V., Poletaeva O. B, Absalyamova R. A., Muraveva M. V. *242*

DEVELOPMENT OF INFORMATION COMPETENCE IN STUDENTS OF ENGINEERING UNIVERSITIES IN THE PROCESS OF TEACHING ENGLISH: PEDAGOGICAL METHODS AND POTENTIAL OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Gazizulina L. R. *250*

DESIGNING AND IMPLEMENTING INTELLECTUAL GAMES AS A METHODOLOGICAL TOOL FOR TEACHING PROGRAMMING

Gibadullin A. A. *256*

PEDAGOGICAL MODEL FOR DEVELOPING FUTURE POWER ENGINEERS' READINESS TO MAKE PROFESSIONAL DECISIONS UNDER UNCERTAINTY

Zokirova E. R. *262*

PROJECT ACTIVITY AS A MEANS OF DEVELOPING RESEARCH SKILLS IN PRIMARY SCHOOL STUDENTS IN AN ETHNOCULTURAL EDUCATIONAL ENVIRONMENT

Ivanova A. V., Nestereva N. A. *268*

FORMATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE COMPETENCE IN PRE-SERVICE FOREIGN LANGUAGE TEACHERS

Kizrina N. G., Boyarkina L. M., Yankina O. E. *275*

DIGITAL PLATFORMS AND TECHNOLOGIES IN THE TRAINING OF COMPETITIVE UNIVERSITY GRADUATES IN THE MODERN LABOR MARKET

Konoplyanskiy D. A. *285*

TECHNOLOGY FOR TRAINING PETROLEUM ENGINEERS
FOR THE HIGH-TECH OIL AND GAS INDUSTRY
Minin M. G., Saveleva N. N. 292

MODEL FOR DEVELOPING SUPRA-PROFESSIONAL COMPETENCIES
IN HIGHER EDUCATION STUDENTS WITHIN AN AUTHENTIC
MUSEUM ENVIRONMENT
Pankrateva G. I., Bogdanova N. V., Katalkina N. A., Kuznetsova U. K. 300

PROSPECTS FOR IMPROVING THE TRAINING OF TEACHERS
OF NATURAL SCIENCE SUBJECTS
Parshutina L. A., Zagranichnaya N. A., Ryzhova O. N. 310

METHODOLOGY FOR DESIGNING AN ADAPTIVE COURSE
FOR AN ENGINEERING DISCIPLINE ON THE EXAMPLE
OF A COURSE PROJECT IN ELECTRONICS
Potapov A. A. 322

SOFT POWER TECHNOLOGY IN THE PROCESS OF TRAINING
FUTURE TEACHERS FOR PATRIOTIC EDUCATION OF STUDENTS
Semenova E. V. 329

THE PROFESSIONALLY-ORIENTED APPROACH TO TEACHING
MATHEMATICAL LOGIC AND ALGORITHM THEORY
TO PEDAGOGICAL UNIVERSITY STUDENTS
Tagaeva E. A., Shalina O. N., Sadovnikov N. V. 334

A STUDY OF BASIC OPERATIONS UNDERLYING THE DEVELOPMENT
OF TEXT INFORMATION PROCESSING STRATEGIES BY STUDENTS
WITH SEVERE SPEECH DISORDERS IN MATHEMATICS LESSONS
Tishina L. A. 340

FORMATION OF CIVIC IDENTITY AND PROFESSIONAL COMPETENCIES
OF STUDENTS THROUGH THE STUDY OF CULTURAL HERITAGE
(BASED ON THE CHURCH ARCHITECTURE OF SAINT PETERSBURG)
Chernyshova E. P., Gildina T. A., Tkachenko D. A. 347

DEVELOPMENT OF FUNDAMENTAL GEOMETRIC AND GRAPHIC
ABILITIES OF FUTURE STRUCTURAL ENGINEERS
Yumatova E. G., Yumatov V. A. 355

THE GAMES OF THE NORTH'S PEOPLES IN PRESERVING THE HEALTH
OF PRESCHOOLERS
Yarkova G. A., Tokareva E. Yu. 360

СТАТЬИ

УДК 621.791.4
DOI

CC BY 4.0

КИНЕТИКА ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ МЕДИ С СИНТЕТИЧЕСКИМ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИМ КОРУНДОМ ПРИ СВАРКЕ ДАВЛЕНИЕМ С НАГРЕВОМ В ПЕРИОД НЕУСТАНОВИВШЕЙСЯ ПОЛЗУЧЕСТИ ДЛЯ НОМИНАЛЬНЫХ ДАВЛЕНИЙ ОТ 40 ДО 80 МПА

Абрамов В. В. ORCID ID 0000-0001-5959-7129,
Жеглова Ю. Г. ORCID ID 0000-0001-8121-8535

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация, e-mail: valabramov@rambler.ru

В работе рассматриваются прямые экспериментальные данные, полученные методом профилографирования и оптической и электронно-микроскопической фактографии фиксированных участков контактной поверхности меди в совмещенном технологическом процессе получения высокочистых металлических поверхностей и прецизионных неразъемных соединений материалов с резко различной сопротивляемостью пластической деформации и физико-химическими свойствами без изменения геометрии изделий. Эксперимент проводился при помощи профилографа-профилометра модели 201 с информационно-вычислительным комплексом, позволяющим автоматически обрабатывать получаемые данные по макро- и микрогеометрии зерна металла (микровыступа) и его формоизменению. В работе были установлены кинетические зависимости пластической деформации меди в контакте с более твердым модельным материалом синтетическим монокристаллическим корундом (сапфиром) при сварке давлением с нагревом методами корреляционно-регрессионного анализа прямых экспериментальных данных. Данные зависимости позволяют оценивать влияние технологических параметров в совмещенном процессе получения высокочистых металлических поверхностей и прецизионных неразъемных соединений для номинальных давлений, превышающих критическое значение предела текучести. Высокочистые металлические поверхности и неразъемные прецизионные соединения необходимы для таких высокотехнологичных отраслей промышленности, как микроэлектроника, приборостроение и машиностроение. В связи с чем полученные кинетические зависимости позволят управлять технологическими параметрами совмещенного процесса выглаживания и получения прецизионных неразъемных соединений.

Ключевые слова: пластическая деформация, микровыступ, сварка давлением с нагревом, медь марки МБ, корунд, корреляционно-регрессионный анализ, период неустановившейся ползучести

KINETICS OF PLASTIC STRAIN OF COPPER WITH SYNTHETIC MONOCRYSTALLINE CORUNDUM DURING PRESSURE WELDING WITH HEATING IN THE TRANSIENT CREEP STAGE AT NOMINAL PRESSURES OF 40 TO 80 MPA

Abramov V. V. ORCID ID 0000-0001-5959-7129,
Zheglova Yu. G. ORCID ID 0000-0001-8121-8535

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation, e-mail: valabramov@rambler.ru

This paper examines direct experimental data obtained via profilography and optical and electron-microscopic fractography of specific areas on a copper contact surface. These data were gathered during a combined process designed to produce high-purity metal surfaces and precision permanent joints between materials with vastly different resistances to plastic strain and distinct physicochemical properties, all without altering the geometry of the components. The experiment utilized a Model 201 profilograph-profilometer equipped with a data processing system capable of automatically analyzing information regarding macro- and micro-geometry (such as metal grains or micro-asperities) and associated shape changes. Using correlation-regression analysis of the direct experimental data, the study established kinetic relationships governing the plastic strain of copper in contact with a harder model material-synthetic monocrystalline corundum (sapphire)-during heated pressure welding. These relationships make it possible to evaluate the influence of process parameters on the combined operation of producing high-purity metal surfaces and precision permanent joints, particularly at nominal pressures exceeding the critical yield strength. High-purity metal surfaces and precision permanent joints are essential for high-tech industries such as microelectronics, instrument manufacturing, and mechanical engineering. Consequently, the established kinetic relationships will enable the control of process parameters for the combined operation of surface burnishing and the formation of precision permanent joints.

Keywords: plastic strain, microprotrusion, pressure welding with heating, MB-grade copper, corundum, correlation-regression analysis, transient creep period

Введение

В продолжение серии работ, посвященных исследованию кинетики образования контакта и пластической деформации меди марки МБ при термодеформационном воздействии в условиях сварки давлением с нагревом, в данной работе установлены аналитические зависимости для определения пластической деформации микровыступов меди (микровыступ – есть одно зерно металла) при разном времени взаимодействия меди марки МБ с конструкционным материалом корундом (сапфиром) в широком диапазоне температур T от комнатной до предплавильной и номинальных давлений от 40 до 80 МПа. Установленные в работе зависимости позволят управлять технологическими параметрами процесса получения прецизионных неразъемных соединений (вторая стадия твердофазной топохимической реакции) меди марки МБ с более твердым кристаллическим материалом без потери их физико-механических свойств и высокочистых металлических поверхностей из меди (первая стадия твердофазной топохимической реакции), необходимых для микроэлектроники, приборостроения [1] и машиностроения [2, с. 314-316; 3].

Аналитические зависимости пластической деформации микровыступов меди марки МБ, полученные на основании прямых экспериментальных данных по образованию контакта, позволяют провести моделирование кинетики пластической деформации микровыступов меди в период неустановившейся ползучести, что и сделано в данной работе.

Цель исследования – установить аналитические зависимости пластической деформации микровыступов меди марки МБ (зерна) в контакте с более твердым кристаллическим материалом, в качестве которого был выбран монокристалл корунда 60° ориентации к оси роста в условиях проведения технологического процесса сварки давлением с нагревом в широком интервале температур, давлений и времени.

Материалы и методы исследования

Экспериментальные исследования проведены по методике профилографирования фиксированного участка поверхности микровыступа металла, описанной в [4]. Высота микронеровностей (шероховатость поверхности) соответствовала R_z=40…80 мкм (3 класс обработки). Фиксированные участки отмечались через 120° на исследуемой поверхности, вертикальное увеличение (ВУ) соответствовало 1000-10000 крат и горизонтальное увеличение (ГУ) находилось в пределах от 200 до 800 крат. Проводилась оптическая и электронная микроскопия фиксированных участков поверхности до и после нагружения, с контактных площадок и по сечению микровыступов (методов косого шлифа) определялись значения микротвердости до и после нагружения. Нагружение образцов выполнялось в установке для диффузионной сварки А306.08, глубина вакуума составляла (1…5) 10^{-5} мм рт. ст. Класс обработки ответной поверхности корунда соответствовал R_z = 0,03…0,05 мкм (13-14 класс обработки).

В результате прямых экспериментов были получены данные о кинетике изменения площади контакта, изменения микротвердости на поверхности контактных площадок микровыступов и в приконтактном объеме, изменения высоты микровыступов во времени до и после нагружения. По полученным значениям были рассчитаны величины относительной пластической деформации микровыступов (зерна), рассчитаны микронапряжения 2-го (нормальные и касательные) на поверхности контактных площадок и объеме зерна микровыступа (зерна). Полученные прямые экспериментальные данные были сведены в реляционную базу данных [5].

Экспериментальные данные по пластической деформации микровыступов представлены в таблице 1.

Результаты исследования и их обсуждение

К прямым экспериментальным данным (табл. 1) по кинетике пластической деформации были применены методы корреляционно-регрессионного анализа, в результате которого были получены аналитические зависимости кинетики пластической деформации микровыступов меди марки МБ ε_m, % в рассматриваемом интервале температур Т (293 до 973 К) и номинальных давлений $\sigma_н$ (40 до 80 МПа):

$$\varepsilon_m = c + d\ln(t'). \quad (1)$$

В формуле (1) присутствует безразмерная величина t':

$$t' = t/10, \quad (2)$$

где 10 с является временем нагружения динамической системы установки.

Таблица 1

Экспериментальные значения пластической деформации ε_m меди марки МБ с синтетическим монокристаллическим корундом (сапфиром) α-Al_2O_3

$\sigma_н$, МПа	t, с	ε_m, %							
		T=293, K	T=373, K	T=473, K	T=573, K	T=673, K	T=773, K	T=873, K	T=973, K
40	15	-	-	-	-	-	21,40	-	33,80
	30	12,00	13,80	16,70	18,50	20,50	26,00	27,00	37,50
	150	14,00	16,30	21,00	22,50	26,00	29,00	30,00	39,80
	330	16,30	17,40	21,60	23,00	28,00	31,00	32,00	-
	450	-	-	-	-		-	-	43,20
	570	16,70	18,00	22,00	23,70	29,30	-	-	-
	630	-	-	-	-		-	-	45,00
	870	-	-	-	-	30,00	36,30	37,70	47,70
	1170	17,40	19,00	22,50	24,00	31,00	-	40,30	-
	1470	-	-	-	-	31,30	41,00	42,80	-
	2070	18,00	19,40	23,00	24,50	32,00	45,30	47,20	-
50	30	12,00	14,00	17,50	19,00	20,70	28,50	30,00	34,00
	90	-	-	-	-	-	-	-	41,00
	150	14,00	16,70	20,00	23,70	26,30	37,00	39,00	43,00
	330	16,00	19,00	22,50	26,30	28,50	39,00	40,00	46,50
	390	-	-	-	-	-	-	-	48,00
	570	17,50	20,00	23,50	28,50	30,00	42,00	43,00	-
	870	-	-	-	-	30,50	44,50	46,00	-
	1170	18,50	21,00	24,00	29,00	31,00	-	-	-
	1470	-	-	-	-	31,50	-	-	-
	2070	19,50	21,50	25,00	29,50	32,00	-	-	-
60	15	-	-	-	-	-	29,00	32,50	34,50
	30	13,00	15,50	18,50	20,00	23,00	-	-	-
	45	-	-	-	-	-	33,40	39,00	44,70
	150	15,50	18,50	21,50	26,30	29,30	39,00	43,00	48,00
	330	17,00	19,00	23,00	28,00	30,00	41,30	45,30	-
	570	17,50	20,00	23,50	28,50	30,50	43,40	47,50	-
	870	-	-	-	-	31,00	46,50	-	-
	1170	18,50	21,00	24,70	29,50	31,20	48,50	-	-
	1470	-	-	-	-	31,50	-	-	-
	2070	20,00	23,00	25,70	30,50	32,50	-	-	-
80	15	-	-	-	-	-	33,40	34,50	36,00
	30	15,30	16,70	17,00	22,00	25,50	35,50	-	45,00
	45	-	-	-	-	-	-	40,00	-
	90	-	-	-	-	-	-	-	49,00
	150	18,00	19,00	20,00	27,50	30,50	41,20	45,50	-
	240	-	-	-	-	-	-	48,00	-
	330	20,00	20,50	22,00	29,00	32,50	43,50	-	-
	570	21,50	23,00	24,50	31,00	34,60	48,00	-	-
	870	-	-	-	-	36,00	-	-	-
	1170	23,00	25,50	27,50	34,60	38,50	-	-	-
	1470	-	-	-	-	39,70	-	-	-
	2070	24,50	28,00	30,50	40,00	43,50	-	-	-

Примечание: составлено авторами на основе прямых экспериментальных данных, полученных в ходе исследования [5].

Таблица 2

Значения коэффициентов *c* и *d* для кинетических зависимостей пластической деформации микровыступов меди $\varepsilon_m(t')$, высота микровыступов R_z=40…80 мкм

$\sigma_н$, МПа	40		50		60		80	
T, К	*c*	*d*	*c*	*d*	*c*	*d*	*c*	*d*
293	10,463	1,4747	9,6426	1,849	11,224	1,5931	12,518	2,201
373	12,526	1,3407	12,048	1,8616	13,658	1,6349	12,569	2,6717
473	16,095	1,4099	15,561	1,8253	16,832	1,6747	12,264	3,1676
573	17,859	1,3547	16,707	2,6006	18,61	2,385	16,655	3,9256
673	18,177	2,676	18,598	2,6449	22,206	1,9858	19,971	3,9173
773	25,699*	0,1015*	23,675	4,593	26,988	4,3108	31,448	3,7749
873	28,322*	0,0965*	25,449	4,4747	31,847	3,9536	32,606	4,8203
973	32,968	2,9585	28,691	5,245	-		-	

Примечание: звездочкой (*) в таблице обозначены значения коэффициентов *c* и *d*, рассчитанных по формулам (4).

В формуле (1) коэффициенты *c* и *d* определяются:

$$c = \overline{\varepsilon_m} - b\overline{X}, \quad d = \frac{\overline{\varepsilon_m X} - \overline{\varepsilon_m}\cdot\overline{X}}{\overline{X^2} - \left(\overline{X}\right)^2}. \quad (3)$$

где *n* – число опытов;

$$X = \ln(t'); \ \overline{X} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} X_i, \ \overline{S} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} S_i,$$

$$\overline{X^2} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} X_i^2, \ \overline{SX} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} S_i X_i.$$

Кинетика пластической деформации микровыступов меди при номинальном давлении $\sigma_н$ = 40 МПа и температурах *T* от 773 и 873 К определяется в соответствии:

$$\varepsilon_m = c + d\cdot t', \quad (4)$$

где *c* и *d*:

$$c = \overline{\varepsilon_m} - b\overline{t'},$$

$$d = \frac{\overline{\varepsilon_m t'} - \overline{\varepsilon_m}\cdot\overline{t'}}{\overline{(t')^2} - \left(\overline{t'}\right)^2}. \quad (5)$$

При $\sigma_н$ = 40 МПа и температурах от 773 до 873 К наблюдается провал пластических свойств меди [6, с. 38-39; 7; 8]. Предел текучести чистой меди находится в диапазоне от 40 до 80 МПа [9].

Значения рассчитанных коэффициентов *c* и *d* для зависимостей (1) и (4) представлены в таблице 2.

Для всех полученных зависимостей пластической деформации микровыступов $\varepsilon_m(t')$ был определен коэффициент корреляции, оценивающий связь между пластической деформацией и временем контакта для (1) и (4), соответственно:

$$r_{нел} = \frac{\overline{\varepsilon_m X} - \overline{\varepsilon_m}\cdot\overline{X}}{\sqrt{\left(\overline{(X)^2} - \left(\overline{X}\right)^2\right)\left(\overline{(\varepsilon_m)^2} - \left(\overline{\varepsilon_m}\right)^2\right)}},$$

$$r_{лин} = \frac{\overline{\varepsilon_m t'} - \overline{\varepsilon_m}\cdot\overline{t'}}{\sqrt{\left(\overline{(t')^2} - \left(\overline{t'}\right)^2\right)\left(\overline{(\varepsilon_m)^2} - \left(\overline{\varepsilon_m}\right)^2\right)}}. \quad (6)$$

Для оценки качества установленных в работе кинетических зависимостей пластической деформации микровыступов меди был рассчитан коэффициент детерминации R^2, определяющийся как квадрат соответствующего коэффициента корреляции и оценивающий качество аппроксимации экспериментальных данных (табл. 1). Для всех установленных в работе зависимости кинетики пластической деформации микровыступов меди была получена средняя ошибка аппроксимации $\overline{A_{\varepsilon_m}}$ в соответствии с формулой:

$$\overline{A_{\varepsilon_m}} = \frac{1}{n}\sum\left|\frac{\varepsilon_m - \widehat{\varepsilon_{m\,t'}}}{\varepsilon_m}\right|\cdot 100\%. \quad (7)$$

Результаты корреляционно-регрессионного анализа приведены в таблице 3.

Таблица 3

Значения коэффициентов корреляции $r_{нел}$ и $r_{лин}$, коэффициентов детерминации R^2 и средние ошибки аппроксимации $\overline{A_{\varepsilon_m}}$ для установленных кинетических зависимостей пластической деформации микровыступов меди $\varepsilon_m(t')$, R_z=40…80 мкм

$\sigma_н$, МПа	40			50			60			80		
T, K	$r_{нел}$ / $r_{лин}$	R^2	$\overline{A_{\varepsilon_m}}$	$r_{нел}$	R^2	$\overline{A_{\varepsilon_m}}$	$r_{нел}$	R^2	$\overline{A_{\varepsilon_m}}$	$r_{нел}$	R^2	$\overline{A_{\varepsilon_m}}$
293	0,983	0,967	2,0	0,991	0,983	1,8	0,996	0,992	1,0	0,996	0,992	1,2
373	0,996	0,991	0,9	0,991	0,981	1,7	0,985	0,970	1,8	0,968	0,936	4,2
473	0,942	0,888	3,1	0,987	0,974	1,7	0,997	0,995	0,7	0,974	0,949	4,2
573	0,948	0,899	2,6	0,979	0,959	2,3	0,963	0,928	3,3	0,969	0,939	3,9
673	0,993	0,987	1,3	0,987	0,975	1,8	0,946	0,895	2,5	0,969	0,940	2,9
773	0,962	0,925	6,0	0,995	0,990	1,3	0,995	0,990	1,3	0,988	0,976	1,6
873	0,991	0,983	2,2	0,986	0,972	2,0	0,990	0,980	1,7	0,999	0,999	0,3
973	0,975	0,950	2,3	0,995	0,991	1,0	-			-		

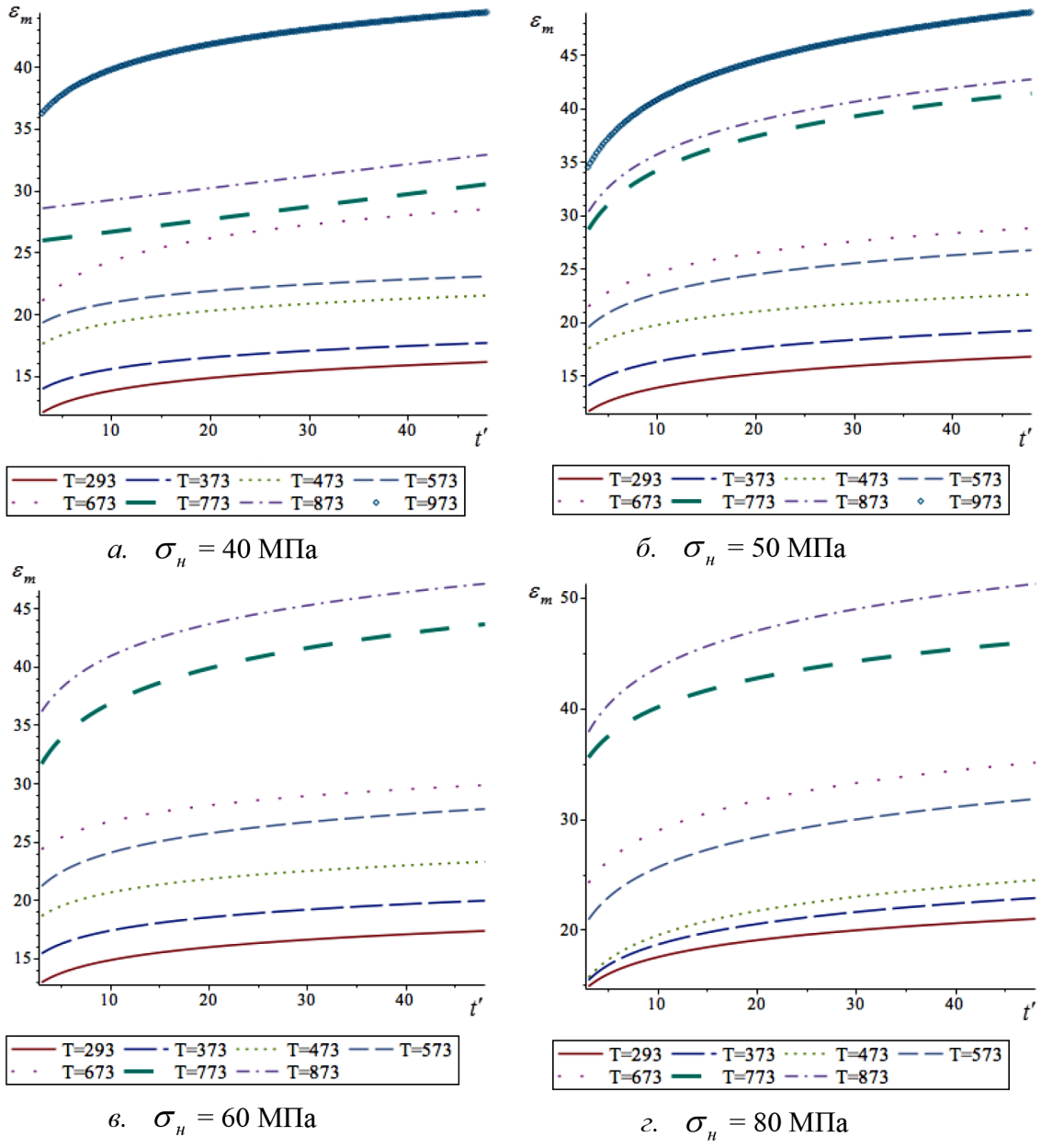
Из таблицы 3 видно, что значения коэффициента корреляции $r_{нел}$ для нелинейных зависимостей (1) превышают 0,94, а для линейных зависимостей (4) значения коэффициентов корреляции $r_{лин}$ превышают 0,96, что подтверждает, что между пластической деформацией и временем в соответствии со шкалой Чеддока существует весьма высокая прямая связь. В результате корреляционно-регрессионного анализа было получено, что значения коэффициента детерминации R^2 для кинетических зависимостей пластической деформации (1) и (4) превышают 0,88, что подтверждает, что полученные кинетические зависимости $\varepsilon_m(t')$ с точностью более 88% аппроксимируют экспериментальные данные. Рассчитанные значения средней ошибки аппроксимации $\overline{A_{\varepsilon_m}}$ для нелинейных зависимостей (1) не превышают 3,1%, а для линейных зависимостей (4) не превышают 6%, что позволяет применять установленные кинетические зависимости пластической деформации микровыступов меди на практике.

Результаты проведенного корреляционно-регрессионного анализа подтверждают, что установленные в работе кинетические зависимости пластической деформации меди (1) и (4) являются статистически значимыми и в дальнейшем будут применяться для расчета пластической деформации в зависимости от времени в широком интервале температур и давлений. Данные зависимости станут основой для разработки программного приложения, позволяющего оценивать технологические параметры совмещенного процесса выглаживания металлических поверхностей и получения прецизионных неразъемных соединений.

Смоделируем кинетику пластической деформации микровыступов меди в период неустановившейся ползучести (время контакта t=30–480 с) для номинальных давлений $\sigma_н$ от 40 до 80 МПа.

На рисунке представлены полученные в работе методами проведенного корреляционно-регрессионного анализа кинетические зависимости пластической деформации микровыступов меди в период неустановившейся ползучести (первая стадия твердофазной топохимической реакции). Из рисунка видно, что температура оказывает несколько большее влияние на кинетику развития контакта, нежели прикладываемое давление [10; 11, с. 170-179; 12].

Исследование кинетики сварки разнородных кристаллических материалов с резко различной сопротивляемостью пластической деформации и природой химической связи показывает, что кинетика роста прочности (схватывания) соединения находится в полном соответствии с кинетикой развития действительного контакта, переходящего в физический при определенном соотношении температуры, давления во времени, характером и особенностями смятия микровыступов обработки свариваемых (контактных) поверхностей, а также возникающими на поверхности контактных площадок и объеме зерна микровыступов микронапряжений 2-го уровня (нормальных и касательных).



Кинетика пластической деформации в период неустановившейся ползучести (время контакта t=30–480 с), R_z=40…80 мкм: а) $\sigma_н$ = 40 МПа, б) $\sigma_н$ = 50 МПа, в) $\sigma_н$ = 60 МПа, г) $\sigma_н$ = 80 Мпа
Составлено авторами по результатам данного исследования

Установлено, что кинетическая кривая образования и развития контакта всегда развивается более интенсивно, чем кинетическая кривая пластической деформации микровыступов обработки, а начало развития схватывания происходит на 2-й стадии смятия микровыступов. Смещение кинетических кривых связано именно с механо-физико-химическими процессами, протекающими на контактных площадках микровыступов, образующих в итоге сплошной физический контакт [13]. Первая стадия смятия микровыступов соответствует периоду активной деформации и этапу неустановившейся ползучести, которые характеризуются наибольшей частотой и плотностью выхода дислокаций в зону контакта, т. е. создается высокая плотность активных центров и образуются мостики схватывания, что должно сопровождаться интенсивным ростом прочности. Отличительной особенностью сварки разнородных материалов является наличие смещения кинетической кривой роста прочности относительно кинетической кривой образования контакта, что обусловлено характером смя-

тия микровыступов и механо-физико-химическими процессами, протекающими на контактных поверхностях свариваемых поверхностей под действием микронапряжений 2-го рода на поверхности и объеме зерна [10; 14; 15].

Установленный характер смятия микровыступов контактных поверхностей свариваемых материалов, их кинетика и механо-физико-химические процессы, протекающие на поверхностях образующихся контактных площадок деформирующихся микровыступов, и микронапряжения 2-го рода, компенсируемые в объеме зерна микровыступа, позволяют разрабатывать управляемые и контролируемые технологические процессы, совмещающие в себе получение высокочистых металлических поверхностей с процессом их сварки давлением с нагревом без изменения их исходных физико-механических и химических свойств и сохранения геометрии свариваемых деталей.

Заключение

В работе установлены аналитические зависимости для расчета пластической деформации микровыступов меди в диапазоне температур от 293 до 973 К и номинальных давлений от 40 до 80 МПа. Данные зависимости позволяют управлять совмещенным технологическим процессом получения высокочистых металлических поверхностей и неразъемных прецизионных соединений, в связи с чем разрабатывается программное приложение, позволяющее производить автоматизированную оценку технологических параметров процесса с целью корректировки уровня термодеформационного воздействия для совмещенных процессов получения высокочистых металлических поверхностей и прецизионных неразъемных соединений разнородных кристаллических материалов с резко различными механо-физико-химическими свойствами без потери их физико-механических и химических свойств и геометрии изделия.

Список литературы

1. Полетаев Ю. В., Щепкин В. В. Преимущества сварки трением фитингов с конической формой контакта малого диаметра // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). 2023. № 23(4). С. 376-386. DOI: 10.23947/2687-1653-2023-23-4-376-386.

2. Лысак В. И., Кузьмин С. В. Сварка взрывом. М.: Машиностроение–1, 2005, 543 с. ISBN: 5-94275-220-6.

3. Чудин В. Н. Сварка давлением патрубков при локальном нагреве // Сварочное производство. 2016. № 9. С. 20-23. ISSN: 0491-6441.

4. Абрамов В. В. Оценка формоизменения микровыступов и развития контакта между разнородными кристаллическими материалами при термодеформационном воздействии // Изв. ТулГУ. 2025. № 2. С. 502-517.

5. База данных № 2026620263 Российская Федерация. Кинетические параметры и физико-механические характеристики микровыступов меди марки МБ в контакте разнородных кристаллических материалов при термодеформационном воздействии: № 2026620263: заявл. 29.12.2025: опубл. 20.01.2026 / Абрамов В. В., Жеглова Ю. Г., Пятков Д. А.

6. Бобылев А. В. Механические и технологические свойства металлов. Справочник. М.: Металлургия, 1980. 295 с.

7. Лежнева С. Н., Волокитина И. Е., Панина Е. А., Волокитина А. В. Эволюция микроструктуры и механических свойств меди при реализации совмещенного процесса «прокатка–рку-прессование» // Физика металлов и металловедение. 2020. Т. 121. № 7. С. 757–762. DOI: 10.31857/S0015323020070050.

8. Агапчева М. В., Солодимова Г. А. Исследование водородной хрупкости бескислородной меди для изделий электронной техники // Материалы XVII Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум». URL: https://scienceforum.ru/2025/article/2018038361.

9. Куликов А. Д., Петров П. А., Деметрашвили И. С., Бурлаков И. А., Хань Тоан Нгуен Эволюция микроструктуры меди М1 при пластической деформации // Технология легких сплавов. 2024. № 4. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/evolyutsiya-mikrostruktury-medi-m1-pri-plasticheskoy-deformatsii (дата обращения: 01.10.2026).

10. Абрамов В. В., Жеглова Ю. Г. Кинетические закономерности формирования контакта при сварке давлением с нагревом разнородных кристаллических материалов для номинальных давление от 5 до 30 МПа // Сварка и Диагностика. 2026. № 4(118). С. 34-40.

11. Гибсон Я., Розен Д., Стакер Б. Технологии аддитивного производства / Пер. с англ. М.: Техносфера, 2022. 646 с. ISBN: 978-5-94836-447-6.

12. Лысак В. И., Кузьмин С. В. Применение энергии взрыва для создания и обработки материалов и конструкций // Наука юга России. 2022. Т. 18. № 4. С. 66–84. DOI: 10.7868/S25000640220408.

13. Шоршоров М. Х., Абрамов В. В., Алехин В. П. О природе задержки роста прочности соединения при сварке давлением с нагревом разнородных материалов с резко различной сопротивляемостью пластической деформации // ФИЗХОМ АН СССР. 1990. № 1. С. 96–114.

14. Кузьмин В. И. Лысак В. И., Кузьмин Е. В., Лата А. Н. Исследование кинетики полета и деформирования пакета при сварке взрывом // Известия Самарского научного центра РАН. 2017. № 1-3. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-kinetiki-poleta-i-deformirovaniya-paketa-pri-svarke-vzryvom (дата обращения: 01.10.2026).

15. Кузьмин Е. В., Лысак В. И., Кузьмин С. В., Пеев А. П. Особенности получения композиционных материалов сваркой взрывом с воздействием ультразвука // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. 2016. № 1. С. 51-55.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 519.862.6
DOI

CC BY 4.0

ИНТЕГРАЦИЯ ОГРАНИЧЕНИЙ НА КРИТЕРИЙ ДАРБИНА – УОТСОНА В ЗАДАЧУ ЧАСТИЧНО БУЛЕВОГО ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДЛЯ ОТБОРА РЕГРЕССОРОВ В ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ

Базилевский М. П. ORCID ID 0000-0002-3253-5697

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения», Иркутск, Российская Федерация, e-mail: mik2178@yandex.ru

Статья посвящена проблеме отбора оптимального состава предикторов из множества потенциальных регрессоров в линейной регрессии. Для оценки неизвестных параметров применяется метод наименьших квадратов. Известно, что задача отбора заданного количества регрессоров, обеспечивающих максимизацию коэффициента детерминации, может быть формализована в виде задачи частично булевого линейного программирования. На сегодняшний день отсутствует математический аппарат, позволяющий интегрировать критерий Дарбина – Уотсона в эту задачу. Этот критерий играет фундаментальную роль в диагностике автокорреляции остатков регрессионной модели. Цель статьи состоит в интеграции критерия Дарбина – Уотсона в структуру задачи частично булевого линейного программирования посредством его представления в форме линейных ограничений. Важным результатом работы является предложенная система линейных уравнений, из решения которой могут быть определены все попарные произведения стандартизованных коэффициентов регрессии. Для нахождения коэффициентов этой системы используется произведение Кронекера и векторизация матриц. Сформулирована задача, обеспечивающая отбор заданного числа регрессоров, максимизирующих коэффициент детерминации при одновременном выполнении ограничения, налагаемого на критерий Дарбина – Уотсона. Предложенный математический инструментарий был успешно апробирован на примере решения реальной задачи анализа данных.

Ключевые слова: регрессионный анализ, линейная регрессия, отбор информативных регрессоров, задача частично булевого линейного программирования, автокорреляция, критерий Дарбина – Уотсона

INTEGRATION OF CONSTRAINTS BASED ON THE DURBIN – WATSON TEST INTO MIXED 0–1 INTEGER LINEAR PROGRAMMING PROBLEM FOR SUBSET SELECTION IN LINEAR REGRESSION

Bazilevskiy M. P. ORCID ID 0000-0002-3253-5697

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Irkutsk State Transport University", Irkutsk, Russian Federation, e-mail: mik2178@yandex.ru

This article addresses the problem of selecting an optimal subset of predictors from a set of potential regressors in linear regression. The unknown parameters are estimated using the ordinary least squares method. It is well known that the problem of selecting a given number of regressors that maximize the coefficient of determination can be formulated as a mixed 0–1 integer linear programming problem. To date, however, no mathematical framework exists that enables the integration of the Durbin – Watson test into this problem, despite its fundamental role in diagnosing autocorrelation of regression residuals. The aim of this study is to incorporate the Durbin – Watson test into the mixed 0–1 integer linear programming framework by expressing it in the form of linear constraints. A key contribution of this work is the proposed system of linear equations, the solution of which yields all pairwise products of the standardized regression coefficients. The coefficients of this system are obtained using the Kronecker product and matrix vectorization. A constrained optimization problem is formulated that selects a specified number of regressors maximizing the coefficient of determination while simultaneously satisfying the constraint imposed by the Durbin – Watson test. The proposed mathematical framework has been successfully validated on a real-world data analysis problem.

Keywords: regression analysis, linear regression, subset selection, mixed 0–1 integer linear programming problem, autocorrelation, Durbin – Watson test

Введение

В регрессионном анализе одной из ключевых проблем является селекция предикторов, обусловленная необходимостью выделения действительно значимых факторов среди множества потенциальных регрессоров. Традиционные пошаговые алгоритмы не всегда гарантируют глобально оптимальный выбор подмножества переменных, особенно в условиях высокой размерности пространства признаков [1, с. 665–668; 2, с. 19–21]. В качестве эффективной альтернативы выступает аппарат математического программирования, в рамках которого

задача отбора регрессоров формулируется как оптимизационная задача с ограничениями. При использовании метода наименьших квадратов (МНК) задача отбора информативных регрессоров в зарубежных литературных источниках (например, [3–5]) сводится в основном к задаче частично булевого квадратичного программирования. Автору удалось формализовать ее в виде задачи частично булевого линейного программирования (ЧБЛП) в работах [6–8]. Причем использование линейных ограничений предоставляет возможность непосредственного контроля над множеством статистических и структурных характеристик модели, включая уровень мультиколлинеарности предикторов [6], значимость отдельных коэффициентов по t-критерию Стьюдента [7], а также общую адекватность спецификации, оцениваемую посредством F-критерия Фишера [8]. Помимо перечисленных характеристик в регрессионных моделях одной из существенных проблем является наличие автокорреляции остатков [9–11], что приводит к снижению эффективности МНК-оценок параметров и несостоятельности статистических выводов по t- и F-тестам. Задача ЧБЛП была дополнена ограничениями для контроля автокорреляции с использованием критерия Фехнера ранее в работе [12]. Недостатком данной схемы является появление большого числа дополнительных булевых переменных, что негативно сказывается на эффективности решения задачи. Известно, что диагностика наличия автокорреляционной зависимости в остаточной последовательности может осуществляться с использованием критерия Дарбина – Уотсона [13–15].

Цель исследования – интеграция критерия Дарбина – Уотсона в структуру задачи ЧБЛП посредством его представления в форме линейных ограничений.

Материал и методы исследования

Модель множественной линейной регрессии с l регрессорами имеет вид

$$y_i = \alpha_0 + \sum_{j=1}^{l} \alpha_j x_{ij} + \varepsilon_i, \quad i = \overline{1,n}, \qquad (1)$$

где α_0, α_1, …, α_l – неизвестные параметры; n – объем выборки; y_i, $i = \overline{1,n}$ – значения зависимой переменной y; x_{ij}, $i = \overline{1,n}$, $j = \overline{1,l}$ – значения независимых переменных; ε_i, $i = \overline{1,n}$ – ошибки регрессии.

Для оценки неизвестных параметров модели (1) применялся МНК. Для этого проводилась стандартизация переменных по формулам

$$y_i^{\bullet} = \frac{y_i - \overline{y}}{\sigma_y}, \; x_{i1}^{\bullet} = \frac{x_{i1} - \overline{x}_1}{\sigma_{x_1}}, \; \ldots, \; x_{il}^{\bullet} = \frac{x_{il} - \overline{x}_l}{\sigma_{x_l}}, \quad i = \overline{1,n},$$

где $\overline{y}$, $\overline{x}_1$, …, $\overline{x}_l$ – средние значения переменных; σ_y, σ_{x_1}, …, σ_{x_l} – среднеквадратические отклонения. Тогда уравнение стандартизованной регрессии имеет вид

$$y_i^{\bullet} = \sum_{j=1}^{l} \beta_j \cdot x_{ij}^{\bullet} + \varepsilon_i^{\bullet}, \; i = \overline{1,n}, \qquad (2)$$

где β_1, …, β_l – стандартизованные коэффициенты регрессии; $\varepsilon_i^{\bullet}$, $i = \overline{1,n}$ – ошибки стандартизованной регрессии.

Оценки параметров регрессии (2) находятся в результате решения системы линейных уравнений

$$R_{xx} \cdot \beta = R_{yx}, \qquad (3)$$

где $R_{xx} = \left\{ r_{x_i x_j} \right\}$, $i, j \in \overline{1,l}$ – матрица коэффициентов корреляции независимых переменных; $R_{yx} = \left\{ r_{yx_j} \right\}$, $j = \overline{1,l}$ – матрица коэффициентов корреляции независимых переменных с зависимой переменной.

Задача отбора из l регрессоров ровно m штук, обеспечивающих максимизацию коэффициента детерминации R^2, формализуется следующим образом:

$$R^2 = r_{yx_1} \cdot \beta_1 + r_{yx_2} \cdot \beta_2 + \ldots + r_{yx_l} \cdot \beta_l \to \max, \qquad (4)$$

$$-\left(1 - \delta_j\right) \cdot M \le \sum_{k=1}^{l} r_{x_j x_k} \cdot \beta_k - r_{yx_j} \le \left(1 - \delta_j\right) \cdot M, \; j = \overline{1,l}, \qquad (5)$$

$$-\delta_j \cdot M \le \beta_j \le \delta_j \cdot M, \; j = \overline{1,l}, \qquad (6)$$

$$\delta_j \in \{0,1\},\ j = \overline{1,l}, \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^{l} \delta_j = m, \quad (8)$$

где M – большое положительное число; δ_j – булева переменная, которая при вхождении j-го регрессора в модель принимает значение 1, а в случае его отсутствия – 0. Если $\delta_j = 0$, то соответствующий коэффициент β_j регрессии, как следует из (6), обращается в нуль. Тем самым регулируется состав регрессоров в целевой функции (4).

Заметим, что смысл ограничений (5), (6) состоит в контроле порядка системы (3) посредством исключения из нее $(l-m)$ уравнений и соответствующих им $(l-m)$ переменных.

Подчеркнем, что задача (4)–(8) ориентирована на отбор фиксированного числа m регрессоров из множества кандидатов. Для выбора этого числа достаточно руководствоваться известной рекомендацией, согласно которой число наблюдений n должно не менее чем в 8–10 раз превосходить m.

Критерий Дарбина – Уотсона для регрессии (2) находится по формуле

$$DW = A / B, \quad (9)$$

где $A = \sum_{i=2}^{n} \left(e_i^{\bullet} - e_{i-1}^{\bullet}\right)^2$, $B = \sum_{i=1}^{n} \left(e_i^{\bullet}\right)^2$.

В этих суммах $e_i^{\bullet} = y_i^{\bullet} - \sum_{j=1}^{l} \beta_j \cdot x_{ij}^{\bullet}$, $i = \overline{1,n}$ – остатки регрессии (2). Критерий DW принимает значения от 0 до 4.

Значение $DW = 2$ говорит об отсутствии автокорреляции остатков.

Результаты исследования и их обсуждение

Известно, что сумма квадратов остатков связана с коэффициентом детерминации R^2 линейной зависимостью. Отсюда следует, что

$$B = \sum_{i=1}^{n} \left(e_i^{\bullet}\right)^2 = n\left(1 - R^2\right). \quad (10)$$

Для нахождения A в (9) поступим следующим образом. Сначала найдем первые разности остатков

$$e_i^{\bullet} - e_{i-1}^{\bullet} = \Delta y_{i-1}^{\bullet} - \sum_{j=1}^{l} \beta_j \cdot \Delta x_{i-1,j}^{\bullet},\ i = \overline{2,n},$$

где $\Delta y_i^{\bullet} = y_i^{\bullet} - y_{i-1}^{\bullet}$, $\Delta x_{i1}^{\bullet} = x_{i1}^{\bullet} - x_{i-1,1}^{\bullet}$, …, $\Delta x_{il}^{\bullet} = x_{il}^{\bullet} - x_{i-1,l}^{\bullet}$, $i = \overline{1,n-1}$ – первые разности стандартизованных переменных.

Затем возведем первые разности остатков в квадрат и просуммируем их:

$$A = \sum_{i=2}^{n} \left(e_i^{\bullet} - e_{i-1}^{\bullet}\right)^2 = \sum_{i=1}^{n-1} \left(\Delta y_i^{\bullet}\right)^2 - 2\sum_{j=1}^{l}\sum_{i=1}^{n-1} \Delta x_{ij}^{\bullet} \Delta y_i^{\bullet} \beta_j + \sum_{j=1}^{l}\sum_{k=1}^{l}\sum_{i=1}^{n-1} \Delta x_{ij}^{\bullet} \Delta x_{ik}^{\bullet} \beta_j \beta_k. \quad (11)$$

Из (11) следует, что величина A не является линейной комбинацией β-коэффициентов. Покажем далее, что выражение (11) можно линеаризовать.

Из системы (3) следует, что $\beta = R_{xx}^{-1} \cdot R_{yx}$.

При транспонировании $\beta^T = R_{yx}^T \cdot R_{xx}^{-1}$.

Тогда найдем произведение $\beta\beta^T$:

$$\beta\beta^T = R_{xx}^{-1} \cdot R_{yx} \cdot R_{yx}^T \cdot R_{xx}^{-1}. \quad (12)$$

Умножим равенство (12) слева и справа на R_{xx}:

$$R_{xx} \cdot \beta\beta^T \cdot R_{xx} = R_{yx} \cdot R_{yx}^T. \quad (13)$$

Выражение (13) – матричное уравнение Сильвестра частного вида. Его можно переписать в виде системы линейных уравнений:

$$\left(R_{xx} \otimes R_{xx}\right) \cdot \mathrm{vec}\left(\beta\beta^T\right) = \mathrm{vec}\left(R_{yx} \cdot R_{yx}^T\right), \quad (14)$$

В формуле (14) $\otimes$ – произведение Кронекера; vec – векторизация матрицы путем наложения столбцов друг на друга.

Для удобства обозначим

$$\mathrm{vec}\left(\beta\beta^T\right) = C,\ R_{xx} \otimes R_{xx} = R_{xx}^{\bullet},$$

$$\mathrm{vec}\left(R_{yx} \cdot R_{yx}^T\right) = R_{yx}^{\bullet}.$$

Причем $C = \{c_j\}$, $j = \overline{1,l^2}$,

$$R_{xx}^{\bullet} = \{r_{ij}\},\ i,j \in \overline{1,l^2},$$

$$R_{yx}^{\bullet} = \{r_j\},\ j = \overline{1,l^2}.$$

Тогда систему линейных уравнений (14) можно переписать в виде

$$\sum_{k=1}^{l^2} r_{jk} \cdot c_k = r_j,\ j = \overline{1,l^2}. \quad (15)$$

Таким образом, из решения системы линейных уравнений (15) могут быть определены все попарные произведения стандартизованных коэффициентов регрессии, что представляет собой важный научный результат. Тогда выражение (11) может быть линеаризовано в виде

$$A = \sum_{i=2}^{n}\left(e_i^{\bullet} - e_{i-1}^{\bullet}\right)^2 = \sum_{i=1}^{n-1}\left(\Delta y_i^{\bullet}\right)^2 - 2\sum_{j=1}^{l}\sum_{i=1}^{n-1}\Delta x_{ij}^{\bullet}\Delta y_i^{\bullet}\beta_j + \sum_{j=1}^{l^2}\sum_{i=1}^{n-1}\Delta x_{iq_{j1}}^{\bullet}\Delta x_{iq_{j2}}^{\bullet}c_j\,, \qquad (16)$$

где q_{j1}, q_{j2}, $j=\overline{1,l^2}$ – элементы матрицы Q, содержащей в строках в лексикографическом порядке размещения с повторениями из l элементов по 2.

Система (15) составлена для линейной регрессии со всеми l предикторами. Исключение регрессоров не влечет за собой изменения числовых значений коэффициентов системы, но приводит к трансформации ее внутренней структуры. Для осуществления такой трансформации введем следующие линейные ограничения:

$$-\left(2-\delta_{q_{j1}}-\delta_{q_{j2}}\right)\cdot M \le \sum_{k=1}^{l^2} r_{jk}\cdot c_k - r_j \le \left(2-\delta_{q_{j1}}-\delta_{q_{j2}}\right)\cdot M\,,\ j=\overline{1,l^2}\,, \qquad (17)$$

$$-\delta_{q_{j1}}\cdot M \le c_j \le \delta_{q_{j1}}\cdot M\,,\ j=\overline{1,l^2}\,, \qquad (18)$$

$$-\delta_{q_{j2}}\cdot M \le c_j \le \delta_{q_{j2}}\cdot M\,,\ j=\overline{1,l^2}\,. \qquad (19)$$

Пусть $l = 3$. Рассмотрим ограничения (17)–(19), например, когда $j = 2$. В этом случае $q_{21} = 1$, $q_{22} = 2$, а параметр $c_2 = \beta_1\beta_2$. В зависимости от значений булевых переменных δ_1 и δ_2 возможны 4 исхода:

1) если $\delta_1 = 0$, $\delta_2 = 0$, то уравнение $\sum_{k=1}^{l^2} r_{2k}\cdot c_k = r_2$ исключается из системы, а $c_2 = 0$;

2) если $\delta_1 = 0$, $\delta_2 = 1$, то уравнение $\sum_{k=1}^{l^2} r_{2k}\cdot c_k = r_2$ исключается из системы, а $c_2 = 0$;

3) если $\delta_1 = 1$, $\delta_2 = 0$, то уравнение $\sum_{k=1}^{l^2} r_{2k}\cdot c_k = r_2$ исключается из системы, а $c_2 = 0$;

4) если $\delta_1 = 1$, $\delta_2 = 1$,

то уравнение $\sum_{k=1}^{l^2} r_{2k}\cdot c_k = r_2$ не исключается из системы, а $-M \le c_2 M$.

Таким образом, j-е уравнение системы (15) сохраняется лишь в том случае, когда в модель одновременно включены оба регрессора, соответствующие индексам j-й строки матрицы Q. При этом ограничение, накладывающее на параметр c_j нулевое значение, снимается.

Введем следующее ограничение на значение критерия Дарбина – Уотсона:

$$2-d \le \frac{A}{B} \le 2+d\,. \qquad (20)$$

где d – назначенная исследователем величина из диапазона [0, 2]. Если $d = 2$, то проблема автокорреляции остатков несущественна для исследователя. Напротив, при $d = 0$ ситуация интерпретируется как предельно желательная – исследователь требует модель с полным отсутствием автокорреляционной зависимости, что редко достижимо. Поскольку тест Дарбина – Уотсона носит статистический характер, то для назначения величины d можно воспользоваться критическим значением d_U (верхняя граница), зависящим от числа наблюдений, числа регрессоров и уровня значимости. В таком случае $d = 2 - d_U$.

Ограничение (20) является нелинейным. Для его линеаризация необходимо умножить все части двойного неравенства на B:

$$\left(2-d\right)B \le A \le \left(2+d\right)B\,. \qquad (21)$$

Тогда решение задачи ЧБЛП (4)–(8), (10), (16)–(19), (21) обеспечивает отбор m регрессоров, максимизирующих коэффициент детерминации R^2 при одновременном выполнении ограничения, налагаемого на критерий Дарбина – Уотсона. Отметим, что при определенных значениях величины d система ограничений может оказаться несовместной, что приводит к отсутствию допустимого решения задачи ЧБЛП. Данный факт не является недостатком метода, а скорее указывает на границы его применимости. В таком случае необходимо смягчить критериальный порог, увеличив число d.

Для апробации предложенного математического инструментария проводилось моделирование с использованием данных *data9-3*, встроенных в эконометрический пакет Gretl. Эти данные имеют структуру временных рядов, объем выборки $n = 87$. Зависимая переменная y – объемы продаж электроэнергии бытовым потребителям в Сан-Диего. Независимые переменные: x_1 – среднее количество бытовых потребителей; x_2 – тариф электроэнергии; x_3 – индекс потребительских цен; x_4 – доходы населения; x_5 – градусо-сутки охлаждения; x_6 – градусо-сутки отопления; x_7 – численность населения.

Сначала проводился стандартный отбор регрессоров без учета автокорреляционной структуры остатков. Для этого в пакете LPSolve решалась задача ЧБЛП (4)–(8) при $m = 3$ и $M = 50$. В результате была построена следующая линейная регрессия:

$$\tilde{y} = -124,535 + 1,306x_1 + 0,279x_5 + 0,375x_6 . (22)$$

Для модели (22) $R^2 = 0,9567$, $DW = 1,3828$.

Для уровня значимости 5%, объема выборки $n = 87$ и трех регрессоров нижняя и верхняя критические границы $d_L = 1,5808$ и $d_U = 1,7232$.

Поскольку $DW < d_L$ (1,3828 < 1,5808), то гипотеза об отсутствии автокорреляции отвергается и подтверждается положительная автокорреляция.

Затем проводился отбор регрессоров с контролем автокорреляции. Для этого решалась сформулированная задача (4)–(8), (10), (16)–(19), (21) при $m = 3$, $M = 50$. Для обеспечения отсутствия автокорреляции величина d рассчитана по формуле

$$2 - d_U = 2 - 1,7232 = 0,2768 \cdot$$

В результате была построена следующая линейная регрессия:

$$\tilde{y} = -261,475 - 6,288x_2 + 0,187x_6 + 0,633x_7 . (23)$$

Для модели (23) $R^2 = 0,9285$, $DW = 2,2716$. Поскольку $DW < 4 - d_U$ (2,2716 < 2,2768), то гипотеза об отсутствии автокорреляции принимается. При этом качество аппроксимации регрессии (23) ожидаемо оказалось несколько ниже по сравнению с моделью (22).

Заключение

В результате проведенных исследований сформулирована задача ЧБЛП, которая обеспечивает отбор заданного количества регрессоров, максимизирующих коэффициент детерминации при одновременном выполнении ограничения, налагаемого на критерий Дарбина – Уотсона. На примере моделирования объемов продаж электроэнергии доказана корректность разработанного математического аппарата. Для построенной модели принята гипотеза об отсутствии автокорреляции в остатках. Поскольку предложенная методика отбора состава регрессоров требует значительного объема подготовительной аналитической работы, в дальнейшем предполагается автоматизировать ряд процессов путем разработки специализированного программного продукта. Также планируется использовать полученные в данной статье результаты для развития теории построения вполне интерпретируемых регрессионных моделей.

Список литературы

1. Айвазян С. А., Мхитарян В. С. Прикладная статистика и основы эконометрики. М.: Издательское объединение ЮНИТИ, 1998. 1003 с.

2. Стрижов В. В., Крымова Е. А. Методы выбора регрессионных моделей. М.: Вычислительный центр РАН, 2010. 60 с.

3. Konno H., Yamamoto R. Choosing the best set of variables in regression analysis using integer programming // Journal of global optimization. 2009. Vol. 44. P. 273–282. DOI: 10.1007/s10898-008-9323-9.

4. Park Y. W., Klabjan D. Subset selection for multiple linear regression via optimization // Journal of Global Optimization. 2020. Vol. 77. P. 543–574. DOI: 10.1007/s10898-020-00876-1.

5. Chung S., Park Y. W., Cheong T. A mathematical programming approach for integrated multiple linear regression subset selection and validation // Pattern Recognition. 2020. Vol. 108. P. 107565. DOI: 10.1016/j.patcog.2020.107565.

6. Базилевский М. П. О разрешимости оптимизационной задачи построения вполне интерпретируемых линейных регрессий // Ученые записки Казанского университета. Серия: Физико-математические науки. 2025. Т. 167. № 4. С. 627–640. DOI: 10.26907/2541-7746.2025.4.627-640.

7. Базилевский М. П. Метод построения вполне интерпретируемых линейных регрессий со статистически значимыми по критерию Стьюдента оценками и незначимыми коэффициентами интеркорреляции // Вычислительные методы и программирование. 2025. Т. 26. № 4. С. 534–547. DOI: 10.26089/NumMet.v26r435.

8. Базилевский М. П. Оптимизационные задачи отбора информативных регрессоров в линейной регрессии с контролем ее значимости по критерию Фишера // Известия Самарского научного центра РАН. 2024. Т. 26. № 6 (122). С. 200–207. DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-6-200-207.

9. Kumar N. K. Autocorrelation and heteroscedasticity in regression analysis // Journal of Business and Social Sciences. 2023. Vol. 5. Is. 1. P. 9–20. DOI: 10.3126/jbss.v5i1.72442.

10. Андронов Р. В., Леверенц Е. Э., Чепур П. В. Отсутствие автокорреляции временного ряда транспортного потока как критерий изолированности регулируемого пересечения // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Т. 19. № 3. С. 54–60. DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-3-54-60.

11. Satyanarayana, Beary I., Rao K. A. Empirical likelihood ratio test for autocorrelation in least squares regression // Communications in Statistics-Simulation and Computation. 2026. Vol. 55. Is. 2. P. 405–421. DOI: 10.1080/03610918.2024.2407890.

12. Базилевский М. П. Контроль автокорреляции остатков с помощью коэффициента Фехнера в задаче математического программирования для отбора информативных регрессоров в линейной регрессии // System Analysis and Mathematical Modeling. 2024. Т. 6. № 2. С. 146–158. EDN: ZELKZO.

13. Зверев А. П., Баринов А. В. Проверка метода возгорания торфяников на основе критерия Дарбина – Уотсона // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 2. С. 209–212. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-2-209-210.

14. Mahmoud R. A. Digital protection scheme based on Durbin Watson and Pearson similarity indices for current signals practically applied to power transformers // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. Is. 1. P. 12214. DOI: 10.1038/s41598-025-91491-1.

15. Zhao X., Hu J., Wu K., Xia H., Yu D. Weak signal detection technique based on Durbin–Watson test and one-bit sampling // Review of Scientific Instruments. 2024. Vol. 95. Is. 5. DOI: 10.1063/5.0198084.

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest.

Финансирование: Автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 004.415.2
DOI

CC BY 4.0

ЭМПИРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕХНИК ОПТИМИЗАЦИИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ FLUTTER: СРАВНЕНИЕ МОБИЛЬНЫХ И ВЕБ-ПЛАТФОРМ

[1]Бисмус А. П. ORCID ID 0009-0009-5165-418X,
[1, 2]Готская И. Б. ORCID ID 0000-0003-3074-8936

[1]Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: alexeybismus@gmail.com;
[2]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный педагогический университет имени А. И. Герцена», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Производительность кроссплатформенных приложений на Flutter определяется совокупностью архитектурных и технических решений, однако их измеримое влияние на метрики рендеринга в реальных условиях исполнения остается слабо верифицированным. Цель работы – установить, оказывают ли пять выбранных техник оптимизации Flutter-приложений измеримое влияние на метрики рендеринга, насколько выявленные эффекты переносимы с мобильной платформы на веб и какие из них могут служить обоснованными ориентирами для выбора оптимизаций при кроссплатформенной разработке на Flutter. Применен двухконтурный дизайн: мобильный контур образуют два Android-устройства среднего сегмента в режиме profile, браузерный – Chrome Canary. Исследование охватывает сценарии: вынесение CPU-интенсивных вычислений в Dart-изолят, адаптивное декодирование изображений, ленивую загрузку списков, сокращение избыточных перестроений дерева виджетов и минимизацию шиммер-анимации. Для каждого сценария фиксировались медиана и 95-й процентиль времени кадра, а также доля кадров с нарушением целевого временного бюджета, обозначаемая как jank. Наиболее выраженный эффект получен при вынесении вычислительно тяжелых задач в изолят: на мобильных устройствах jank устранен полностью, в браузерном контуре его доля снизилась при неизменной медиане. Оптимизация дерева виджетов улучшает фазу сборки при умеренном влиянии на суммарное время кадра. Статичный заполнитель шиммер-анимации обеспечивает предсказуемое поведение на обоих устройствах; частичное упрощение анимации ухудшило хвостовые метрики на более слабом устройстве. Адаптивное декодирование изображений снизило объем кэша изображений на устройстве, где эта метрика доступна; ленивая загрузка сократила число изначально загружаемых элементов. Кадровые метрики в обоих сценариях остались в пределах погрешности. Эффекты оптимизаций согласуются по направлению, однако различаются по масштабу в зависимости от платформы и устройства. Полученные данные дают разработчикам Flutter-приложений обоснованные ориентиры для выбора оптимизаций на мобильных и веб-платформах.

Ключевые слова: производительность рендеринга, кроссплатформенная разработка, время кадра, плавность интерфейса, оптимизация мобильных приложений, эмпирический эксперимент, Flutter

EMPIRICAL ANALYSIS OF FLUTTER PERFORMANCE OPTIMIZATION TECHNIQUES: A COMPARISON OF MOBILE AND WEB PLATFORMS

[1]Bismus A. P. ORCID ID 0009-0009-5165-418X,
[1, 2]Gotskaya I. B. ORCID ID 0000-0003-3074-8936

[1]Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "National Research University ITMO", Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: alexeybismus@gmail.com;
[2]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Russian State Pedagogical University named after A. I. Herzen", Saint Petersburg, Russian Federation

The performance of cross-platform Flutter applications is determined by a combination of architectural and technical decisions; however, their measurable impact on rendering metrics under real execution conditions remains poorly verified. The aim of this study is to determine whether five selected Flutter optimization techniques produce a measurable effect on rendering metrics, to what extent these effects transfer from mobile to web, and which of them provide evidence-based guidance for selecting optimizations in cross-platform Flutter development. A two-arm design is applied: the mobile arm comprises two mid-range Android devices in profile mode, and the browser arm comprises Chrome Canary. The study covers the following scenarios: offloading CPU-intensive computations to a Dart isolate, adaptive image decoding, lazy list loading, reducing redundant widget-tree rebuilds, and minimizing shimmer animation. For each scenario, the median and 95th-percentile frame time were recorded, as well as the proportion of frames exceeding the target frame-time budget, referred to as jank. The most pronounced effect was observed when offloading computationally heavy tasks to an isolate: on mobile devices, jank was eliminated entirely; in the browser arm, the jank rate decreased while the median remained unchanged. Widget-tree optimization improved the build phase with a moderate effect on total frame time. A static shimmer placeholder achieved predictable behavior on both devices; partial animation simplification degraded tail metrics on the weaker device. Adaptive image decoding reduced the image-cache size on the device where this metric was available; lazy loading reduced the number of initially loaded items, with frame-time metrics unchanged within measurement error. Optimization effects are consistent in direction but differ in magnitude depending on the platform and device. The results provide Flutter developers with preliminary, evidence-based reference points for selecting optimizations on mobile and web platforms.

Keywords: rendering performance, cross-platform development, frame time, UI smoothness, mobile application optimization, empirical experiment, Flutter

Введение

По данным StatCounter, в 2025–2026 гг. через мобильные устройства генерировалось 50–55 % глобального веб-трафика. Кроссплатформенные фреймворки, прежде всего Flutter, получили широкое распространение: по данным Statista, с 2021 г. Flutter занимает лидирующие позиции среди решений данного класса. С усложнением приложений плавность интерфейса и стабильность времени кадра превращаются из технических характеристик в прямой фактор пользовательского восприятия: jank-эффект (срыв плавности, пропуск кадра) снижает удержание и воспринимаемое качество продукта.

Эмпирические исследования производительности мобильных приложений уже сформировали обширный корпус работ. M. Hort с соавт. систематизировали методы оптимизации по четырем измерениям (отзывчивость, запуск, память, энергопотребление), обобщив 156 публикаций [1]. R. Rua и J. Saraiva провели масштабный эмпирический анализ Android-приложений [2], а N. Kumari с коллегами классифицировали типовые причины деградации производительности по данным открытых репозиториев [3]. A. Biørn-Hansen с соавт., оценивая накладные расходы Flutter, React Native и других фреймворков, показали зависимость эффектов от сценария нагрузки [4]; W. Oliveira с коллегами описали неравномерное распределение издержек между CPU, памятью и сетью [5].

Среди Flutter-специфичных работ M. Zulistiyan с соавт. сравнивают библиотеки управления состоянием по нагрузке на CPU [6]; в работе [7] показано снижение нагрузки средствами Skia Shader Language; B. Dornauer и M. Felderer оценивают стратегии энергосбережения в мобильных и веб-приложениях [8]; М. Ф. Алиева с соавт. предлагают систему ключевых метрик производительности [9].

Перечисленные работы охватывают либо общий класс мобильных приложений, либо отдельные техники Flutter в изолированных условиях. Контролируемое же сравнение нескольких техник сразу на мобильной и веб-платформах до сих пор остается за рамками внимания как российских, так и зарубежных исследователей.

Цель исследования – оценить влияние пяти техник оптимизации Flutter-приложений на метрики рендеринга, определить, насколько выявленные эффекты переносятся между мобильной и веб-платформами, и на этой основе сформировать обоснованные ориентиры для выбора оптимизаций при кроссплатформенной разработке. Все измерения проведены в рамках единого контролируемого эксперимента с фиксированным окружением и унифицированными сценариями нагрузки.

Материалы и методы исследования

Основным методом служил контролируемый эксперимент в трактовке эмпирической программной инженерии: в каждом сценарии изменяли единственный фактор при фиксированных прочих условиях [10–12]. Для повторяемости измерений фиксировали программное окружение, использовали унифицированные сценарии нагрузки и автоматический сбор данных [13]. Код стенда, сырые данные и протокол измерений доступны в открытом репозитории: https://github.com/bismus-le-sha/flutter-performance-optimization-experiment.

Экспериментальная среда

Мобильный контур представлен смартфоном Samsung Galaxy A12 (SM-A125F). Основная серия измерений выполнена на нем 11–18 октября 2026 г. Второе устройство, Huawei P Smart (FIG-LX1), было доступно только в предварительной серии (март 2026 г., одна сессия на условие, бета-версия SDK). Его данные приводятся как вспомогательные и в статистический анализ не входят. Приложение собиралось в режиме profile, отдельно для каждого условия; запуск и сбор данных обеспечивали пакеты integration_test и flutter drive.

Веб-контур – браузер Chrome for Testing 155.0.8059.39 (зафиксированная сборка, не обновлявшаяся в ходе серии) на ноутбуке под Windows 11 со встроенным графическим адаптером Intel UHD (ANGLE, Direct3D 11) и дисплеем 144 Гц. Приложение компилировалось dart2js в режиме profile; журнал каждой сессии подтверждает загрузку рендерера CanvasKit. HTML-рендерер в используемой версии Flutter отсутствует, поэтому сравнение рендереров не проводилось. Каждая сессия запускалась в новом профиле браузера без расширений, в видимом окне 1600×1024 пикселей.

Все измерения основной серии выполнены на Flutter 3.41.9 (канал stable) и Dart 3.11.5; версия SDK и режим сборки записывались в каждую строку данных. Конфигурация среды приведена в табл. 1.

Сценарии оптимизации

Стенд включал пять изолированных сценариев, охватывающих основные классы нагрузки Flutter-приложений (табл. 2).

В каждом сценарии включали единственный метод оптимизации, оставляя прочие компоненты стенда неизменными; изоляцию вмешательств обеспечивали конфигурационные флаги и dependency injection [14]. Показатели сравнивали до и после оптимизации, а SCN-SHIMMER дополнительно тестировали в трех состояниях: baseline, optimized и static.

Таблица 1

Среда эксперимента

Параметр	Мобильный контур	Веб-контур
Устройство	Samsung Galaxy A12 (SM-A125F), Android 12, 3 ГБ ОЗУ; вспомогательно – Huawei P Smart (FIG-LX1), Android 9	Ноутбук, Windows 11, 16 ГБ ОЗУ, Intel UHD (ANGLE / Direct3D 11)
Дисплей	1600×720, 60 Гц	1920×1080, 144 Гц
Среда исполнения	Flutter engine (Android)	Chrome for Testing 155.0.8059.39, CanvasKit
Сборка и запуск	profile; integration_test, flutter drive	dart2js, profile; flutter drive
SDK	Flutter 3.41.9 (stable), Dart 3.11.5	То же
Повторы	10 запусков на условие	10 сессий на условие
Период	11–18.10.2026	11–18.10.2026

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования. FIG-LX1 – предварительная серия, март 2026 г., одна сессия на условие.

Таблица 2

Сценарии оптимизации

Сценарий	Нагрузка	Метод оптимизации
SCN-FIB	Вычислительный	Вынесение CPU-задач в Dart-изолят
SCN-IMG	Ресурсоемкий	Декодирование с учетом размера отображения
SCN-LAZY	Ленивые операции	Ленивая загрузка элементов списка
SCN-REBUILD	UI-перестроения	Условные обновления через setState
SCN-SHIMMER	Анимационный	Минимизация шиммер-эффекта; static placeholder

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

В веб-сборке функция compute() не создает отдельного изолята: вычисление выполняется в основном потоке после передачи управления циклу событий (исходный код Flutter SDK, foundation/_isolates_web.dart). Поэтому в веб-контуре SCN-FIB сравнивает синхронный и асинхронный вызов одной функции, а не вынесение вычислений в отдельный поток.

В мобильных сценариях SCN-IMG и SCN-LAZY изображения загружались с локального зеркала (по USB) вместо внешнего сервера: при загрузке из интернета часть запусков завершалась сетевыми ошибками. Зеркало отдает побайтные копии исходных файлов, поэтому вычислительная нагрузка не меняется, а сетевая вариативность исключается. При подготовке серии обнаружена ошибка служебного кода сбора метрик: он повторно загружал и декодировал в полном разрешении каждое отображаемое изображение. Ошибка исправлена до измерения SCN-IMG и SCN-LAZY; в SCN-REBUILD оба состояния отображают одни и те же изображения, и дополнительная нагрузка в них одинакова.

Конвейер измерений и метрики

На мобильной платформе для каждого кадра через интерфейс FrameTiming фиксировали время сборки (build), время растеризации (raster), полное время кадра t_frame и момент начала кадра (vsync). В веб-контуре для каждого кадра фиксировали метку requestAnimationFrame и вычисляли межкадровый интервал t_int.

Частоту выдачи кадров вычисляли как $F = N / T$, где N – число кадров, T – длительность окна наблюдения. В отличие от величины, обратной медиане времени кадра, F не превышает частоту обновления экрана и учитывает периоды, когда кадры не формировались. На мобильной платформе частоту перерисовки задает цикл тестового стенда (шаг 16 мс), поэтому F не превышает примерно 30 кадров/с и сравнивается только между состояниями одного сценария. Для SCN-FIB дополнительно приводится максимальный интервал между соседними кадрами – длительность заморозки интерфейса.

Пропуском кадра (англ. jank) считали кадр, не уложившийся в бюджет 16,67 мс (60 Гц): на мобильной платформе – t_frame > 16,67 мс, в веб-контуре – t_int > 16,67 мс. Для веб-контура дополнительно рассчитывали долю интервалов длиннее 1,5 периода кадра при 144 Гц (t_int > 10,42 мс). Под хвостовыми показателями понимаются верхние процентили распределения (p95).

Статистический анализ

Единицей анализа служил запуск – отдельный процесс приложения или отдельная сессия браузера, а не кадр: кадры одного запуска зависимы друг от друга. Каждое условие измерялось в 10 запусках; запуск включал 2 прогревочные и 10 измерительных итераций, прогревочные в анализ не входили. Порядок условий перемешивался в 10 рандомизированных блоках (каждое условие один раз в блоке). Перед каждым мобильным запуском процесс приложения принудительно завершался; запуск начинался, только если температура аккумулятора не превышала 31,0 °C.

Для каждого запуска вычисляли медиану и p95 времени кадра (межкадрового интервала), долю пропусков кадров и F. Медиану предпочли среднему, поскольку распределения временны́х метрик не подчиняются нормальному закону [2, 15]. Эффект оптимизации оценивали как разность медиан показателя между состояниями (по 10 запусков в каждом) с 95 % доверительным интервалом: перцентильный бутстрэп, 10 000 повторений, ресэмплинг запусков. Непараметрическим размером эффекта служила дельта Клиффа (δ); значимость проверяли U-критерием Манна – Уитни с поправкой Холма на множественные сравнения. Коэффициент Коэна d не применялся: он опирается на среднее и стандартное отклонение и плохо описывает асимметричные распределения времени кадра.

Выбросы не удалялись: медленные кадры и составляют предмет измерения. Для проверки чувствительности к данным применен фильтр по межквартильному размаху (1,5 IQR), использованный в предварительной серии. Он удаляет 4–15 % кадров и в большинстве условий снижает долю пропусков кадров почти до нуля, то есть скрывает исследуемый эффект; сравнение до и после фильтрации приведено в табл. 6. Распределения дополнительно проверяли визуально – по графикам ECDF и диаграммам размаха [16, 17].

Результаты исследования и их обсуждение

Основная серия включает 220 запусков, по 10 на каждое условие. В таблицах приведены медианы по запускам и разности между состояниями с 95 % доверительными интервалами.

Мобильные результаты

SCN-FIB. Синхронное вычисление замораживает интерфейс примерно на 12 с за итерацию; вынесение в изолят устраняет заморозку и снижает долю пропусков кадров с 20 до 1 % (табл. 3, 4; рисунок, а, б). Время отдельного кадра здесь плохо описывает деградацию: основная потеря плавности – заморозка между кадрами.

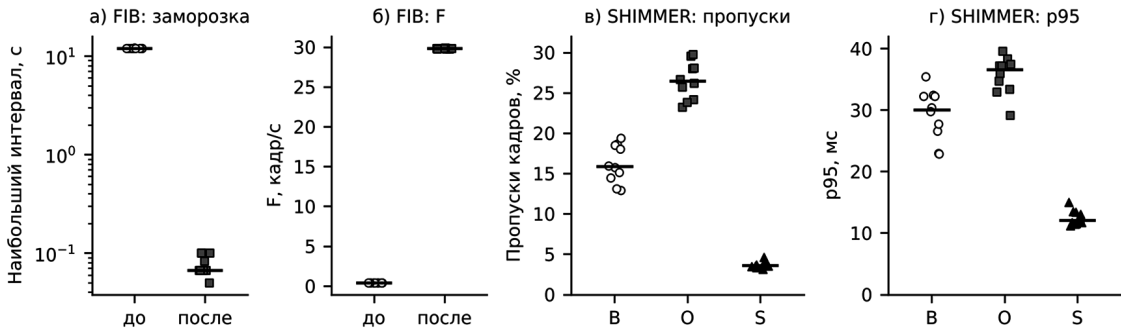
SCN-REBUILD. Оптимизация вдвое сократила фазу сборки, не затронув растеризацию (табл. 4); изменение полного времени кадра незначимо, доля пропусков кадров снизилась на 2,2 п. п.

SCN-SHIMMER. Состояние optimized снизило медиану времени кадра, но увеличило p95 и долю пропусков кадров; статичный заполнитель улучшил все показатели (табл. 3; рисунок, в, г).

SCN-LAZY и *SCN-IMG.* Обе техники снизили память процесса на 110–130 МБ (табл. 4). Кадровые метрики SCN-LAZY не изменились; SCN-IMG снизил p95 и долю пропусков кадров при росте медианы на 0,25 мс.

Веб-результаты

Медиана межкадрового интервала во всех условиях составила 6,9–7,0 мс (144 Гц). Значимые различия получены в двух сценариях: в SCN-FIB вызов через compute() ухудшил отрисовку, в SCN-LAZY частота кадров выросла на треть, а наибольшая пауза отрисовки сократилась с 590 до 48 мс (табл. 5).



SCN-FIB (а – наибольший интервал между кадрами, логарифмическая шкала; б – частота выдачи кадров F) и SCN-SHIMMER (в – доля пропусков кадров; г – p95 времени кадра; B/O/S – baseline/optimized/static) на SM-A125F. Точки – запуски (n = 10), линия – медиана
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Таблица 3

Кадровые метрики мобильного контура (SM-A125F)

Сценарий	Состояние	N	t̃, мс	p95, мс	Пропуски, %	Δ p95, мс [95 % ДИ]	Δ пропусков, п. п. [95 % ДИ]
SCN-FIB	before	500	13,6	20,9	20,0		
	after	37 359	7,5	9,7	1,0	−11,2 [−11,5; −11,0]	−19,0 [−19,9; −16,9]
SCN-REBUILD	before	8413	10,9	18,7	8,7		
	after	8411	10,7	17,5	6,6	−1,2 [−2,0; −0,6]*	−2,2 [−3,6; −1,8]
SCN-SHIMMER	baseline	5947	14,0	30,1	15,9		
	optimized	5936	11,6	36,6	26,4	+6,5 [2,4; 10,6]	+10,6 [7,2; 13,3]
	static	5688	9,5	12,1	3,6	−18,0 [−20,6; −13,3]	−12,3 [−14,9; −10,6]
SCN-LAZY	before	5723	8,8	12,4	4,3		
	after	5866	8,7	11,5	4,0	−1,0 [−2,6; 0,2]*	−0,3 [−0,7; 0,2]*
SCN-IMG	before	17 016	10,9	22,2	11,7		
	after	17 035	11,2	20,3	9,8	−1,9 [−2,4; −1,3]	−1,8 [−2,1; −1,1]

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования. Медианы по 10 запускам; N – число кадров; Δ – относительно первого состояния (для SCN-SHIMMER – baseline); ДИ – бутстрэп по запускам; * – незначимо после поправки Холма.

Таблица 4

Фазы кадра, заморозка и память (SM-A125F)

Сценарий	Показатель	До	После	Разность [95 % ДИ]
SCN-FIB	Наибольший интервал между кадрами, мс	12 000	67	-11 934 [-11 958; -11 901]
SCN-FIB	F, кадр/с	0,41	29,8	+29,4 [29,4; 29,4]
SCN-REBUILD	Медиана сборки / растеризации, мс	1,99/7,42	1,05/7,62	-0,94 [-1,02; -0,70] / +0,20 [-0,11; 0,36]
SCN-LAZY	Память процесса (PSS), МБ	289	175	-114 [-117; -103]
SCN-IMG	Кэш изображений / PSS, МБ	85,9/316	10,5/190	-75,3 / -126 [-157; -114]

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования. Медианы по 10 запускам; PSS – dumpsys meminfo в конце запуска; кэш изображений одинаков во всех запусках состояния.

Таблица 5

Результаты веб-контура (Chrome for Testing 155, 144 Гц)

Сценарий	Состояние	N	F, кадр/с	p95 t_int, мс	t_int > 16,67 мс, %	t_int > 10,42 мс, %	Наибольший интервал, мс
SCN-FIB	before	3204	7,2	34,8	6,4	9,3	4225
	after	2354	5,4	48,5	8,9	9,4	4197
SCN-REBUILD	before	36 927	143,2	7,2	0,07	0,49	35
	after	37 039	143,2	7,2	0,05	0,40	42
SCN-SHIMMER	baseline	28 534	142,0	7,2	0,42	0,91	35
	optimized	28 443	141,5	7,2	0,49	0,92	42
	static	28 509	141,8	7,2	0,49	0,91	42
SCN-LAZY	before	21 283	97,2	12,4	2,5	10,5	590
	after	22 457	129,5	9,9	1,4	5,8	48
SCN-IMG	before	65 702	143,0	7,2	0,07	0,46	77
	after	65 616	143,0	7,2	0,08	0,46	73

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования. Медианы по 10 сессиям; t_int – межкадровый интервал; 10,42 мс – 1,5 периода кадра при 144 Гц. Значимо после поправки Холма: SCN-FIB – F -1,8 [-2,0; -1,7] кадр/с, доля > 16,67 мс +2,4 [2,3; 2,5] п. п.; SCN-LAZY – F +32 [14; 48] кадр/с, доля > 16,67 мс -1,2 [-1,5; -0,7] п. п.

Таблица 6

SM-A125F: без фильтрации и после фильтрации 1,5 IQR

Сценарий	Состояние	Удалено кадров, %	p95, мс: без / с фильтром	Пропуски, %: без / с фильтром
SCN-FIB	before	6,2	21,0/20,1	19,6/14,3
	after	4,6	9,7/8,7	1,1/0,0
SCN-REBUILD	before	6,4	18,7/15,7	8,8/2,5
	after	6,5	17,6/14,8	6,4/0,0
SCN-SHIMMER	baseline	15,0	29,8/16,2	16,2/3,7
	optimized	10,3	35,4/22,3	26,5/18,1
	static	4,1	12,2/11,0	3,7/0,0
SCN-LAZY	before	4,8	12,6/10,3	4,3/0,0
	after	4,5	11,4/10,2	4,1/0,0
SCN-IMG	before	11,2	22,1/14,6	11,5/0,3
	after	9,9	20,4/15,0	9,8/0,0

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования. По объединенным кадрам 10 запусков условия.

Фильтр 1,5 IQR, применявшийся в предварительной серии, удаляет 4–15 % кадров и в 7 из 11 условий снижает долю пропусков кадров почти до нуля (табл. 6), поэтому выводы построены на нефильтрованных данных. Предварительная серия на FIG-LX1 (одна сессия; табл. S1 в репозитории) согласуется с основной по направлению эффекта SCN-FIB; в SCN-SHIMMER состояние optimized на этом устройстве, напротив, снизило долю пропусков кадров. Это расхождение требует проверки на повторных запусках.

Вычисления. Синхронное вычисление в основном изоляте останавливает кадровый конвейер, поэтому на мобильной платформе тяжелые вычисления следует выносить в изолят. В веб-сборке compute() не создает отдельного потока, и эффект отсутствует; для браузера требуются Web Workers или разбиение работы на части, которые в работе не исследовались.

Перестроения. Сборка занимает около 2 мс из 11 мс кадра, а растеризация, не затрагиваемая оптимизацией, – около 7,5 мс. Поэтому сокращение перестроений заметно влияет на кадр лишь там, где сборка составляет его значимую долю. Перенос нагрузки на растеризацию, отмеченный в предварительной серии, не подтвердился.

Анимации. Частичное упрощение анимации удешевило типичный кадр, но сделало редкие кадры дороже. Причина не устанавливалась; гипотеза – перераспределение работы между фазами кадра при объединении слоев ShaderMask. Отсюда практический вывод: оптимизацию следует оценивать по p95 и доле пропусков кадров, а не только по медиане; статичный заполнитель оказался наиболее предсказуемым вариантом.

Ресурсные оптимизации. Ленивая загрузка и декодирование с учетом размера отображения уменьшают объем одновременно декодированных изображений, поэтому их выбор оправдан прежде всего экономией памяти. Рост медианы в SCN-IMG предположительно связан с масштабированием при декодировании; это не проверялось.

Переносимость. Переносимость эффектов между платформами ограничена: в браузере проявился только эффект ленивой загрузки. Отсутствие различий в SCN-SHIMMER и SCN-IMG может объясняться тем, что при 144 Гц и аппаратном ускорении все состояния укладываются в бюджет кадра; это гипотеза. Выводы относятся только к исследованным устройствам и условиям.

Ограничения исследования. Область применения выводов ограничена несколькими факторами. Мобильный контур – это два устройства с 3 ГБ ОЗУ и частотой обновления 60 Гц; устройства нижнего (менее 3 ГБ) и верхнего (90+ Гц) сегментов он не охватывает, а эффекты на них могут заметно отличаться [3]. Измерения шли только в режиме profile: он близок к release-сборке по отсутствию отладочной инфраструктуры, но не тождествен ей. Каждый сценарий – это одна сессия с прогревом; разброс между независимыми запусками не оценивался [15]. Наконец, в SCN-IMG метрика кэша недоступна на FIG-LX1, что ограничивает сравнение устройств в этом сценарии.

Использованные в веб-контуре конфигурации html и canvaskit на данной версии Flutter SDK не гарантированно используют разные рендер-движки: флаг --web-renderer в этой версии не поддерживается, и сборочный скрипт не передает его. Поэтому обе конфигурации рассматриваются как повторные измерения одного условия, а не как независимое сравнение рендереров.

Точная версия Flutter SDK инструментально не зафиксирована: в коде харнесса присутствует строка версии, не привязанная к фактическому значению SDK на момент выполнения. Достоверно известны только нижняя граница из pubspec.lock и канал сборки.

Сбор данных занял несколько месяцев; данные по двум мобильным устройствам получены в разное время, что могло внести дополнительную вариативность, не связанную с самими техниками оптимизации.

Из веб-контура исключен дополнительный сценарий разбора JSON-данных SCN-JSON, не входящий в основной набор из пяти сценариев (не удалось корректно воспроизвести условия), а также SCN-IMG и SCN-REBUILD (специфичная для них метрика не сохранилась в конвейере агрегации данных).

Формулировка «вынесение в изолят» для веб-контура отражает используемый программный интерфейс (compute()), но не гарантирует независимое параллельное исполнение: поведение зависит от целевой компиляции и версии Flutter и отдельно не проверялось.

Внешнюю валидность ограничивает однородность стенда: изолированные сценарии хорошо контролируют переменные, но не воспроизводят реальное приложение, где несколько техник работают одновременно и влияют друг на друга. Поэтому приоритетные направления дальнейшей работы – расширить парк устройств, оценить доверительные интервалы для изменения медианы, p95 и доли jank-кадров по нескольким независимым запускам, применить непараметрические критерии (например, U-критерий Манна – Уитни) и изучить взаимодействие техник между собой [11, 15, 3].

Заключение

Проведена эмпирическая оценка пяти техник оптимизации Flutter-приложений в контролируемых условиях, в двухконтурном дизайне: мобильном (Samsung Galaxy A12, Huawei P Smart, режим profile) и браузерном (Chrome Canary). Основой анализа стали медиана, 95-й процентиль и доля кадров с нарушением временно́го бюджета.

Работа дает систематическую оценку пяти техник в единой среде измерений, охватывающей мобильную и браузерную платформы. Показано, что межплатформенный перенос правомерен на уровне направления эффекта, но не его величины: браузерное окружение существенно меняет масштаб изменений. Совокупный анализ центральных и хвостовых статистик позволил увидеть случаи, когда улучшение медианы сопровождается деградацией хвостовых характеристик. По устойчивости и переносимости эффектов выделены техники, показавшие наиболее согласованный результат между платформами в проведенных испытаниях; это может служить предварительным ориентиром при выборе оптимизаций при кроссплатформенной разработке на Flutter.

Полученные результаты носят предварительный характер и относятся только к исследованным устройствам, версии SDK и условиям измерений. Выводы ограничены двумя устройствами среднего сегмента, одной сессией на сценарий и профильным режимом сборки. Перенос результатов на другие аппаратные конфигурации, термические условия и реальные многокомпонентные приложения требуют повторной проверки.

Список литературы

1. Hort M., Kechagia M., Sarro F., Harman M. A survey of performance optimization for mobile applications // IEEE Transactions on Software Engineering. 2022. Vol. 48. Is. 8. P. 2879–2904. DOI: 10.1109/TSE.2021.3071193.

2. Rua R., Saraiva J. A large-scale empirical study on mobile performance: energy, run-time and memory // Empirical Software Engineering. 2024. Vol. 29. Art. 31. DOI: 10.1007/s10664-023-10391-y.

3. Kumari N., Das T., Mikkonen T. An Empirical Study on Understanding Performance Issues and Causes in Android Apps // 2024 IEEE International Conference on Source Code Analysis and Manipulation (SCAM). Flagstaff, AZ, USA, 2024. P. 242–247. DOI: 10.1109/SCAM63643.2024.00032.

4. Biørn-Hansen A., Rieger C., Grønli T.-M., Majchrzak T. A., Ghinea G. An empirical investigation of performance overhead in cross-platform mobile development frameworks // Empirical Software Engineering. 2020. Vol. 25. Is. 4. P. 2997–3040. DOI: 10.1007/s10664-020-09827-6.

5. Oliveira W., Moraes B., Castor F., Fernandes J. P. Analyzing the Resource Usage Overhead of Mobile App Development Frameworks // Proceedings of the 27th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering (EASE 2023). ACM, 2023. DOI: 10.1145/3593434.3593487.

6. Zulistiyan M., Adrian M., Wibowo Y. F. A. Performance Analysis of BLoC and GetX State Management Library on Flutter // Journal of Information System Research (JOSH). 2024. Vol. 5. Is. 2. P. 583–591. DOI: 10.47065/josh.v5i2.4698.

7. Нуждин Д. Г. Оптимизация производительности мобильных приложений: стратегии и лучшие практики // Вестник науки. 2023. Т. 3. № 11 (68). С. 850–862. URL: https://www.вестник-науки.рф/article/10987 (дата обращения: 20.05.2026). ISSN 2712-8849.

8. Dornauer B., Felderer M. Energy-saving strategies for mobile web apps and their measurement: Results from

a decade of research // 2023 IEEE/ACM 10th International Conference on Mobile Software Engineering and Systems (MOBILESoft). IEEE, 2023. P. 75–86. DOI: 10.1109/MOBILSoft59058.2023.00017.

9. Алиева М. Ф., Давтян В. К., Коцур С. Н. Оценка производительности мобильных приложений // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. 2023. № 2 (321). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-proizvoditelnosti-mobilnyh-prilozheniy (дата обращения: 21.05.2026).

10. Easterbrook S., Singer J., Storey M.-A., Damian D. Selecting Empirical Methods for Software Engineering Research // Guide to Advanced Empirical Software Engineering. 2008. P. 285–311. DOI: 10.1007/978-1-84800-044-5_11.

11. Wohlin C., Runeson P., Höst M., Ohlsson M. C., Regnell B., Wesslén A. Experimentation in Software Engineering. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012. DOI: 10.1007/978-3-642-29044-2. ISBN 978-3-642-29043-5.

12. Montgomery D. C. Design and Analysis of Experiments. 9th ed. Hoboken: Wiley, 2017. 630 p. ISBN 978-1-119-29936-3.

13. Fehr J., Heiland J., Himpe C., Saak J. Best practices for replicability, reproducibility and reusability of computer-based experiments exemplified by model reduction software // AIMS Mathematics. 2016. Vol. 1. Is. 3. P. 261–281. DOI: 10.3934/Math.2016.3.261.

14. Martin R. C. Clean Architecture: A Craftsman's Guide to Software Structure and Design. Boston: Prentice Hall, 2017. ISBN 978-0-13-449416-6.

15. Georges A., Buytaert D., Eeckhout L. Statistically rigorous Java performance evaluation // ACM SIGPLAN Notices. 2007. Vol. 42. Is. 10. P. 57–76. DOI: 10.1145/1297105.1297033.

16. Shatz I. Assumption-checking rather than (just) testing: The importance of visualization and effect size in statistical diagnostics // Behavior Research Methods. 2024. Vol. 56. P. 826–845. DOI: 10.3758/s13428-023-02072-x.

17. Kitchenham B. A., Pfleeger S. L., Pickard L. M., Jones P. W., Hoaglin D. C., El Emam K., Rosenberg J. Preliminary guidelines for empirical research in software engineering // IEEE Transactions on Software Engineering. 2002. Vol. 28. Is. 8. P. 721–734. DOI: 10.1109/TSE.2002.1027796.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 004.056
DOI

CC BY 4.0

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО АНАЛИЗА РИСКОВ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ

Бурькова Е. В. ORCID ID 0009-0008-0739-0757,
Майраслов К. В. ORCID ID 0009-0009-6059-9434

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Оренбургский государственный университет имени В. А. Бондаренко», Оренбург, Российская Федерация, e-mail: tulpan63@bk.ru

В условиях роста компьютерных угроз и усложнения информационных систем традиционные методы оценки рисков информационной безопасности характеризуются высокой трудоемкостью, субъективностью и трудностями в соблюдении нормативных требований. Целью исследования является разработка математической модели процесса оценки рисков, вычислительного метода ее реализации и методики автоматизированного анализа рисков, обеспечивающих детерминированный расчет интегрального уровня риска и формирование рекомендаций по его снижению в соответствии с российскими стандартами, а также их экспериментальная проверка. В работе использованы нормативные документы регуляторов и официальная база угроз, на основе которых построена формализованная математическая модель процесса оценки рисков с применением экспертных оценок и корректирующих коэффициентов. Вычислительный метод включает модифицированную Min-Max нормализацию, метод взвешенных сумм, калибровку коэффициентов координатным поиском и анализ чувствительности методом «одного изменения»; методика представлена как последовательность этапов со ссылками на выражения модели. Процесс реализован в виде программного комплекса с реляционной базой данных и модулей автоматической генерации отчетов. Экспериментальная апробация методики проведена на информационной системе образовательной организации – Оренбургского государственного университета имени В. А. Бондаренко. В ходе исследования определено, что интеграция количественных расчетов с нормативными проверками обеспечивает воспроизводимость результатов и позволяет снизить субъективность качественных оценок, минимизировать влияние человеческого фактора. Сравнение ручных и программных процедур показало, что автоматизация существенно ускоряет подготовку документации и повышает точность выбора мер защиты за счет динамического учета реальных характеристик защищаемой системы. Полученные результаты подтверждают работоспособность разработанного инструментария на конкретном объекте информатизации и демонстрируют потенциал его адаптируемости для организаций других отраслей при условии актуализации отраслевых коэффициентов в базе данных.

Ключевые слова: математическая модель, методика, вычислительный метод, экспертный подход, анализ чувствительности, угрозы, риски, меры защиты

MATHEMATICAL MODEL AND METHODOLOGY OF AUTOMATED ANALYSIS OF INFORMATION SECURITY RISKS FOR EDUCATIONAL INSTITUTIONS

Burkova E. V. ORCID ID 0009-0008-0739-0757,
Mayraslov K. V. ORCID ID 0009-0009-6059-9434

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Orenburg State University named after V. A. Bondarenko", Orenburg, Russian Federation, e-mail: tulpan63@bk.ru

Amidst rising cyber threats and the increasing complexity of information systems, traditional information security risk assessment methods are characterized by high labor intensity, subjectivity, and challenges in meeting regulatory requirements. The study aims to develop a mathematical model for the risk assessment process, a computational method for its implementation, and an automated risk analysis methodology. These components facilitate the deterministic calculation of the aggregate risk level and the generation of risk-mitigation recommendations in compliance with Russian standards, alongside their experimental validation. The work utilizes regulatory documents and official threat databases to construct a formalized mathematical model of the risk assessment process, incorporating expert judgments and adjustment coefficients. The computational method employs modified Min-Max normalization, the weighted sum method, coefficient calibration via coordinate search, and sensitivity analysis using the "one-factor-at-a-time" approach; the methodology is presented as a sequence of stages linked to the model's mathematical expressions. The process has been implemented as a software suite featuring a relational database and modules for automated report generation. Experimental validation was conducted using the information system of an educational institution–the V.A. Bondarenko Orenburg State University. The study determined that integrating quantitative calculations with regulatory compliance checks ensures result reproducibility, reduces the subjectivity of qualitative assessments, and minimizes the impact of the human factor. A comparison between manual and software-based procedures demonstrated that automation significantly accelerates documentation preparation and improves the accuracy of security measure selection by dynamically accounting for the actual characteristics of the system being protected. The results confirm the viability of the developed tools for a specific information system and demonstrate their potential for adaptation to organizations in other sectors, provided that industry-specific coefficients in the database are kept up to date.

Keywords: mathematical model, methodology, computational method, expert approach, sensitivity analysis, threats, risks, protective measures

Введение

В условиях стремительной цифровизации социально-экономических процессов и усложнения архитектуры информационных систем (ИС) проблема обеспечения информационной безопасности (ИБ) приобретает стратегическое значение. Рост числа целевых кибератак, повышение профессионализма нарушителей, а также внедрение облачных технологий, распределенных вычислений и больших данных формируют новую матрицу угроз, требующую оперативного и объективного управления рисками. Актуальным направлением исследований является разработка формализованных и автоматизированных подходов к оценке актуальности угроз и оценке рисков ИБ, исключающих субъективность экспертных оценок и минимизирующих временные затраты на проведение анализа [1].

Нормативно-правовая база Российской Федерации в области ИБ [2–4] предъявляет жесткие требования к процессам категорирования, оценки угроз и выбора контрмер. Однако на практике большинство организаций продолжают использовать ручные или полуавтоматизированные методы анализа, основанные на опросниках и статических таблицах. Такие подходы характеризуются высокой трудоемкостью, низкой воспроизводимостью результатов, трудностями в динамическом обновлении базы угроз и сложностью согласования требований регуляторов с фактическим состоянием защиты [5].

В связи с этим возникает научная и практическая потребность в создании математической модели процесса оценки рисков, вычислительного метода и основанной на них методики, интегрирующей количественные и качественные методы оценки рисков, формализующей процессы выбора мер защиты в соответствии с актуальными нормативными требованиями и реализующей вычислительные процедуры в виде программного средства с интуитивно понятным интерфейсом. Среди зарубежных подходов к анализу рисков ИБ получили распространение: методология факторного анализа информационных рисков FAIR™ (Factor Analysis of Information Risk), обеспечивающая количественную оценку рисков в денежном эквиваленте [6]; база знаний MITRE ATT&CK, систематизирующая тактики и техники реальных кибератак для построения сценариев угроз [7]; а также аналитические отчеты и руководства Агентства Европейского союза по кибербезопасности (ENISA)[1], формирующие методологическую основу для оценки рисков. В российских условиях наибольшее распространение получили методики, основанные на требованиях ФСТЭК России и стандартах ГОСТ Р ИСО/МЭК 27005 [3].

В настоящей работе представлены математическая модель процесса оценки рисков, вычислительный метод и методика автоматизированного анализа рисков, апробированные на информационной системе образовательной организации – Оренбургского государственного университета имени В. А. Бондаренко. Выбор объекта апробации обусловлен наличием разветвленной IT-инфраструктуры, обрабатывающей конфиденциальную информацию различного рода, в том числе персональные данные значительного контингента обучающихся и сотрудников, а также необходимостью соблюдения требований регуляторов в сфере образования. Архитектура разработанного программного комплекса предусматривает возможность его дальнейшей адаптации для организаций других отраслей за счет применения отраслевых коэффициентов в реляционной базе данных угроз.

Цель исследования – разработка математической модели процесса оценки рисков информационной безопасности, вычислительного метода ее реализации и методики автоматизированного анализа рисков, обеспечивающих детерминированный расчет интегрального уровня риска и формирование рекомендаций по его снижению в соответствии с российскими стандартами, и их экспериментальная проверка.

Для достижения цели решались следующие задачи: формализация процесса оценки рисков в виде математической модели; разработка вычислительного метода (расчет, нормализация и ранжирование рисков, калибровка экспертных коэффициентов, анализ чувствительности модели); формулировка методики в виде последовательности этапов с указанием используемых выражений модели; программная реализация и апробация на информационной системе образовательной организации.

Материалы и методы исследования

Задача анализа и оценки вероятности реализации угроз и рисков ИБ исследо-

[1] ENISA Threat Landscape 2025: Annual report on the state of cybersecurity threats / European Union Agency for Cybersecurity (ENISA). Athens, Greece, October 2025. 142 p. [Электронный ресурс]. URL: https://www.enisa.europa.eu/publications/enisa-threat-landscape-2025 (дата обращения: 15.07.2026).

вана многими учеными. В основном используются качественные, количественные и гибридные методы [8, 9]. В статье [10] обоснована необходимость применения гибридного подхода к оценке рисков для АСУ ТП как объектов критической информационной инфраструктуры (КИИ). Авторы отмечают, что качественные методы, основанные на экспертных оценках, обеспечивают полноту анализа, гибридный подход позволяет перевести лингвистические переменные в числовые шкалы, сохранив преимущества обоих методов [11, 12]. Авторы работы [13] в исследовании рисков коммерческого банка также применяют экспертные методы, дополняя их теорией марковских процессов и математической статистикой. Особое внимание уделено оценке работ по восстановлению системы после инцидента, что критично для финансовых организаций с высокими требованиями к доступности [14]. В работе [15] оценка риска производится на основе технологий машинного обучения. Авторы рассматривают методики оценки рисков с учетом коэффициентов, отражающих отраслевую специфику, например медицинские ИС, в которых приоритетом является защита персональных данных, и масштаб системы, предлагая формальную модель оценки рисков с использованием теоретико-множественного аппарата, что позволяет учитывать взаимосвязи между уязвимостями компонентов системы [16, 17]. Все рассмотренные работы подчеркивают важность адаптации методик к особенностям защищаемого объекта: для банков ключевыми факторами являются финансовые потери, репутационные риски и требования регуляторов, для объектов критической информационной инфраструктуры приоритет отдается безопасности технологических процессов, где ущерб может включать экологические катастрофы и человеческие жертвы [18].

На основе анализа научных публикаций по теме оценки рисков ИБ выявлены следующие тенденции:

− переход к риск-ориентированному подходу – оценка рисков становится основой для адаптации базовых наборов мер защиты, а не формальным требованием;

− автоматизация оценки с применением координатно-графового метода [19];

− учет производственного контекста с проведением оценки эффективности систем защиты [20];

− использование нечеткой логики и экспертных систем позволяет работать с неполными данными и сохранять интерпретируемость результатов.

Исследование построено в соответствии с тремя составляющими прикладного математического моделирования: математической моделью, вычислительным методом и комплексом программ. Математическая модель описывает процесс оценки рисков информационной безопасности (ИБ) с помощью множеств, отображений и расчетных соотношений (выражения (1)–(12), табл. 1). Вычислительный метод включает алгоритм расчета и ранжирования рисков, модифицированную Min-Max нормализацию, метод взвешенных сумм, оценку вычислительной погрешности, калибровку экспертных коэффициентов и анализ чувствительности модели (выражения (13)–(20), табл. 2–5). Программный комплекс реализует модель и метод в автоматизированном режиме. Методика автоматизированного анализа рисков ИБ представлена как последовательность этапов, для каждого из которых указаны используемые выражения модели и процедуры вычислительного метода (табл. 6). Таким образом, математическая модель является составной частью методики, но не отождествляется с ней.

Математическая модель процесса оценки рисков информационной безопасности

Теоретическую основу математической модели составили принципы риск-менеджмента ИБ, изложенные в [2, 21, 22], регламентирующие порядок выявления угроз, категорирования объектов и применения базового набора мер защиты. Также были рассмотрены международные стандарты информационной безопасности [23–25] и методология моделирования угроз безопасности [26]. Для задания параметров модели используется метод экспертных оценок.

Моделируемым процессом является формирование интегрального уровня риска информационной системы (ИС) организации: по входным данным пользователя (тип организации, состав активов, масштаб ИС и организации, оценки возможного ущерба, статусы реализации мер защиты) для каждой выявленной угрозы u_i рассчитывается R_i – интегральный уровень риска i-й угрозы, а затем общий риск ИС R_{totgl}. В качестве рассматриваемых организаций взяты восемь сфер деятельности, тестирование проводилось на примере образовательного учреждения – университета. Для организаций из различных сфер деятельности характерно, что различные угрозы имеют различную частоту, для учета данного фактора используется γ – отраслевой коэффициент частоты реализации угрозы u_i в конкретном типе организации. Возможный ущерб (нарушение

конфиденциальности, целостности, доступности) оценивается пользователем по шкале L/M/H и используется для определения класса защищенности ИС; ожидаемый ущерб S_i от реализации угрозы рассчитывается по выражению (8). Коэффициент α – масштаб ИС (федеральный/региональный/объектовый), необходим для определения класса защищенности ИС; β – коэффициент масштаба организации, влияющий на масштаб ущерба; $\psi_{im}(x_m)$ – корректирующий коэффициент, учитывающий степень реализации мер защиты и класс сертификации используемых средств защиты информации (СЗИ) в соответствии с требованиями нормативных документов. Итоговая вероятность реализации угрозы P_i определяется как произведение базовой вероятности реализации угрозы, отраслевого коэффициента и эффективных весов реализованных мер защиты. Диапазоны изменения коэффициентов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Математическая модель процесса оценки рисков информационной безопасности

Этап	Формула (номер)	Характеристика данных
Этап 1. Идентификация активов и их ценности	$A = \{a_1, a_2, \ldots, a_m\}$ (1) $C: A \to \{1,2,3,4,5\}$, (2) оценивается в баллах	A – множество активов ИС организации (информационных, программных, аппаратных), которое определяется ответами пользователя; m – количество активов, находящихся в ИС; $C(a)$ – ценность актива, a – целое число
Этап 2. Идентификация угроз и их связь с активами и отраслевыми коэффициентами	$U = \{u_1, u_2, \ldots, u_N\}$ (3) $N = 155$ $\forall u_i : A_i \subseteq A$ (4) $P_{0i} \in [0 \ldots 1]$ (5) $\gamma_{0отр} \in [0.5,2]$ (6) $K_{отрia} \in [0.5,2]$, $\forall a \in A_i$ (7)	U – множество угроз; N – количество угроз, оставшихся после фильтрации из исходного набора БДУ ФСТЭК (227 угроз) по критерию отсутствия в ИС суперкомпьютерных, облачных и ИИ-компонентов; A_i – подмножество активов, которые может затронуть угроза u_i; P_{0i} – базовая вероятность реализации угрозы (экспертная константа исходя из статистики); $\gamma_{0отр}$ – отраслевой коэффициент частоты встречаемости угрозы u_i в конкретном типе организации (экспертная константа) $K_{отрia}$ – отраслевой коэффициент ущерба, отвечающий, насколько критично нарушение актива a, атакованного угрозой u_i
Этап 3. Оценка ущерба	$S_i = \beta \times \alpha \times \sum_{a \in A_i} C(a) \times K_{отрia}$ (8)	S_i – ожидаемый ущерб от реализации угрозы u_i (в баллах); α – коэффициент масштаба ИС; β – коэффициент масштаба организации, вычисляемый по входным данным пользователя (1.0/1.5/2.0).
Этап 4. Оценка вероятности реализации угрозы	$P_i = P_{0i} \times \gamma_{0отр} \times$ $\times (\prod_{k=1}^{K_i} \varphi_{i,k}(x_k) \times \prod_{m=1}^{M_i} \psi_{im}(x_m))$, (9)	P_i – итоговая вероятность реализации угрозы (0…1); K_i – количество факторов уязвимости для угрозы i; M_i – количество реализованных мер защиты для угрозы i; $\varphi_{i,k}(x_k)$ – коэффициент увеличения вероятности, активируемый ответом пользователя x_k, указывающий на наличие уязвимости (экспертная оценка ≥ 1); $\psi_{im}(x_m)$ – коэффициент уменьшения вероятности, активируемый ответом пользователя x_m (m=1,…, M_i), указывающий на наличие защитной меры (экспертная оценка ≤ 1); произведения по k и m охватывают все ответы, влияющие на i угрозу
Этап 5. Расчет риска	$R_i = P_i \times S_i$ (10) $R_i^{\%} = \frac{\min(R_i, R_{max})}{R_{max}} \times 100\%$ (11)	R_i – абсолютный риск угрозы u_i (в баллах), R_{max} – верхняя граница нормализации (экспертная оценка), которая ограничивает R_i сверху для перевода в проценты; $R_i^{\%}$ – риск от угрозы u_i в %
	$R_{total} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} R_i^{\%}$ (12)	R_{total} – общий риск информационной системы [0, 100]%

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Для формализации процесса оценки рисков в модели выделено пять расчетных этапов (табл. 1): идентификация активов и их ценности; идентификация угроз и их связь с активами и отраслевыми коэффициентами; оценка ущерба; оценка вероятности реализации угрозы; расчет риска. Ранжирование угроз и формирование рекомендаций выполняются вычислительным методом и методикой (табл. 6). База угроз сформирована на основе Банка данных угроз ФСТЭК России, дата выгрузки 10.02.2026, последнее обновление для данной даты 08.02.2026 г. Банк данных угроз регулярно обновляется, поэтому была взята версия актуальная на дату обращения, включающая в себя 227 угроз [27]. Выбор пакета анализируемых угроз основан на типе анализируемых информационных систем, в качестве которых рассматривались ГИС, иные ИС, ИСПДн. Фильтром отбора угроз являлись виды объектов воздействия угроз, отсутствие в этих ИС суперкомпьютеров, облачных сервисов и ИИ-компонентов. Пример исключенной угрозы: УБИ.029 Угроза использования вычислительных ресурсов суперкомпьютера «паразитными» процессами, УБИ.020 Угроза злоупотребления возможностями, предоставленными потребителям облачных услуг. База данных угроз может быть расширена при дальнейшем совершенствовании программы.

Оценка соответствия уровня защиты нормативным требованиям выполняется в автоматическом режиме согласно [2] с определением класса защищенности ИС (К1, К2, К3) и минимально требуемого класса и уровня доверия сертифицированных средств защиты информации (СЗИ). В табл. 1 представлена математическая модель процесса оценки рисков ИБ (выражения (1)–(12)).

Модель (1)–(12) является детерминированной и мультипликативной. Ожидаемый ущерб (8) определяется взвешенной суммой ценностей затронутых активов $C(a)$ с отраслевыми весами $K_{\text{отр}ia}$, умноженной на коэффициенты масштаба α и β. Итоговая вероятность реализации угрозы (9) формируется как произведение базовой вероятности P_{0i}, отраслевого коэффициента $\gamma_{0\text{отр}}$ и корректирующих коэффициентов $\varphi_{i,k}(x_k)$ (увеличивают вероятность при наличии уязвимости, $\varphi \geq 1$) и $\psi_{im}(x_m)$ (уменьшают вероятность при наличии меры защиты, $\psi \leq 1$). Риск угрозы (10) равен произведению вероятности и ущерба, нормализованное значение риска (11) приводится к шкале от 0 до 100 %, общий риск ИС (12) вычисляется как среднее нормализованных рисков по всем N угрозам. Входными данными модели являются множество активов A с оценками $C(a)$, коэффициенты масштаба α, β и ответы пользователя x_k, x_m; выходными – значения $R_i^{\%}$, R_{total} и ранжированный перечень угроз (13).

Вычислительный метод

Для реализации математической модели (1)–(12) разработан вычислительный метод, включающий пять процедур: расчет и ранжирование рисков по модели; нормализацию рисков; оценку вычислительной погрешности; калибровку экспертных коэффициентов; анализ чувствительности модели к изменению входных параметров.

Используются численные методы расчета: модифицированный метод Min-Max нормализации в фиксированном диапазоне с экспертным ограничением максимального значения и метод взвешенных сумм (Weighted Sum Model, WSM), который относится к группе методов многокритериального принятия решений. Для расчета частных показателей, таких как ущерб от угрозы (8), используется метод взвешенных сумм с применением экспертных и отраслевых коэффициентов.

Алгоритм расчета и ранжирования

Для заданных входных данных расчет выполняется за один проход без итераций.

1. По типу организации из реляционной базы данных загружаются отраслевые коэффициенты $\gamma_{0\text{отр}}$ и $K_{\text{отр}ia}$, по анкете определяются множество активов A, ценности $C(a)$, коэффициенты α, β и ответы пользователя.

2. Для каждой угрозы u_i, $i = 1,\ldots,N$ последовательно вычисляются S_i по (8), P_i по (9), R_i по (10) и $R_i^{\%}$ по (11).

3. По выражению (12) вычисляется общий риск R_{total}.

4. Угрозы упорядочиваются по убыванию нормализованного риска, то есть находится перестановка π, для которой

$$R^{\%}_{\pi(1)} \geq R^{\%}_{\pi(2)} \geq \ldots \geq R^{\%}_{\pi(N)}, \qquad (13)$$

и формируется перечень $T_{10}=\{u_{\pi(1)},\ldots,u_{\pi(10)}\}$ из десяти наиболее критичных угроз. Вычислительная сложность расчета рисков линейна по числу угроз N, ранжирования – $O(N \log N)$.

Нормализация рисков

Для приведения итогового риска к шкале от 0 до 100 % применялся метод Min-Max нормализации с экспертным ограничением. Вычислительный метод является детерминированным: вместо случайного моделирования используется аппарат взвешенных сумм и мультипликативных моделей с жестко заданными отраслевыми и масштабирующими коэффициентами.

Таблица 2

Сравнение классического и модифицированного методов нормализации

Показатель	Классический Min-Max	Модифицированный Min-Max
Максимальное значение R_i в выборке, балл	387,4	387,4
Динамический R_{max}^{sample} >	387,4	–
Фиксированный R_{max}^{fixed}	–	400
Среднее нормализованное значение, %	42,3	40,8
Медиана нормализованного значения, %	31,7	30,5
Стандартное отклонение нормализованных значений, %	28,1	27,0
Количество угроз с нормализованным значением > 90 %	3	2
Разброс нормализованных значений (max – min), п. п.	100,0	96,9
Изменение ранжирования топ-10 угроз при добавлении экстремального значения (R = 620)	4 перестановки	0 перестановок
Время вычисления 155 нормализаций, мс	0,012	0,011

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 3

Результаты численного эксперимента по оценке воспроизводимости

Показатель	Значение
Максимальное отклонение R_i между прогонами, балл	0,0
Максимальное отклонение нормализованного значения R_i, %	0,0
Максимальное отклонение общего риска R_{total}, %	0,0
Количество прогонов с различным ранжированием топ-10	0 из 1000
Теоретическая верхняя граница погрешности	$\varepsilon \approx 2{,}22 \cdot 10^{-16}$
Наблюдаемая погрешность	0,0 (ниже порога отображения)

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Для подтверждения работоспособности модифицированного метода нормализации проведен численный эксперимент на основе данных 155 угроз, полученных в ходе апробации на информационной системе ОГУ им. В. А. Бондаренко. Классический метод нормализации определяется формулой

$$r_i^{classic} = \frac{R_i - R_{min}}{R_{max}^{sample} - R_{min}} \cdot 100\%, \qquad (14)$$

где $R_{max}^{sample} - R_{min}$ определяется динамически по выборке. Модифицированный метод определяется формулой

$$r_i^{mod} = \min\left(\frac{R_i}{R_{max}^{fixed}} \cdot 100\%, 100\% \right), \qquad (15)$$

$$R_{max}^{fixed} = 400.$$

Результаты сравнения на одних и тех же входных данных представлены в табл. 2.

Ключевой результат: при добавлении в выборку единственной экстремальной угрозы (R_i = 620 баллов, что превышает R_{max}^{fixed}) классический метод приводит к «сжатию» шкалы: все остальные значения уменьшаются пропорционально новому максимуму, и четыре угрозы из топ-10 меняют свое ранжирование. Модифицированный метод обрезает экстремальное значение до 100 %, не влияя на распределение остальных рисков (0 перестановок в топ-10).

Оценка вычислительной погрешности

Для проверки утверждения об ограничении погрешности машинным эпсилоном проведен численный эксперимент: расчет рисков для идентичных входных данных выполнен 1000 раз последовательно. Результаты представлены в табл. 3.

Нулевое отклонение объясняется детерминированностью алгоритма: отсутствуют итерационные процедуры, генераторы

случайных чисел и условные ветвления, зависящие от состояния. Утверждение о машинном эпсилоне подтверждено численно, а не только теоретически.

Анализ чувствительности модели

Анализ выполнен методом «одного изменения» (one-at-a-time): каждый входной параметр θ_j (из числа P_{0i}, $\gamma_{0отр}$, β, α, $C(a)$, $\varphi_{i,k}$, ψ_{im}, $R_{\max}$) последовательно варьировался в заданном диапазоне при фиксированных базовых значениях остальных параметров. Пусть θ^0 – вектор базовых значений параметров, $\theta^{(j)}$ – вектор, в котором изменен только j-й параметр. Изменения риска i-й угрозы и общего риска ИС определяются выражениями

$$\Delta R_i^{(j)} = R_i^{\%}\left(\theta^{(j)}\right) - R_i^{\%}\left(\theta^0\right), \qquad (16)$$

$$\Delta R_{total}^{(j)} = R_{total}\left(\theta^{(j)}\right) - R_{total}\left(\theta^0\right). \qquad (17)$$

Показатели чувствительности, приведенные в табл. 4 (среднее и максимальное изменение риска угрозы), вычисляются по выражению

$$\bar{\Delta}_j = \frac{1}{\left|U_j\right|}\sum_{u_i \in U_j} \Delta R_i^{(j)},$$

$$\Delta_j^{\max} = \Delta R_{i^*}^{(j)},$$

$$i^* = \operatorname{argmax}_i \left|\Delta R_i^{(j)}\right|, \qquad (18)$$

где U_j – множество угроз, на оценку которых влияет параметр θ_j. Изменения выражены в процентных пунктах. Результаты представлены в табл. 4.

Наибольшую чувствительность модель демонстрирует к коэффициенту масштаба организации β (переход от объектового к федеральному масштабу увеличивает средний риск на 12,5 п. п.). Наименее чувствительна модель к весам мер защиты $\psi_{im}(x_m)$, что подтверждает корректность экспертной калибровки: защитные меры снижают риск, но не являются доминирующим фактором по сравнению с масштабом системы.

Таблица 4

Анализ чувствительности модели к изменению входных параметров

Варьируемый параметр	Диапазон изменения	Среднее изменение R_i, п. п.	Максимальное изменение R_i, п. п.	Среднее изменение R_{total}, п. п.
Базовая вероятность P_{0i}	±20 %	±3,2	±7,8	±1,4
Отраслевой коэффициент $\gamma_{0отр}$	±30 %	±4,1	±9,6	±1,9
Коэффициент масштаба β	1,0 → 2,0	+12,5	+28,3	+12,5
Коэффициент масштаба ИС α	1,0 → 1,4	+9,8	+21,4	+9,8
Ценность актива $C(a)$	±1 балл	±5,4	±11,2	±2,3
Вес уязвимости φ	±25 %	±2,8	±6,1	±1,2
Вес мер защиты $\psi_{im}(x_m)$	±25 %	−2,1	−5,3	−0,9
R_{max}^{fixed}	350 → 400	±3,7	±8,4	±1,6

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования$
п. п. – процентный пункт (абсолютное изменение показателя, выраженного в процентах).

Таблица 5

Устойчивость модифицированного метода к экстремальным значениям

Добавленная экстремальная угроза, R_i, балл	Нормализованное значение экстремальной угрозы, %	Изменение среднего по остальным 155 угрозам, п. п.	Изменение ранжирования топ-10
400 (= R_{max}^{fixed})	100,0	0,0	Нет
500	100,0 (обрезание)	0,0	Нет
620	100,0 (обрезание)	0,0	Нет
1000	100,0 (обрезание)	0,0	Нет

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Устойчивость к экстремальным значениям

Для оценки устойчивости в выборку последовательно добавлялись угрозы с искусственно завышенными значениями R_i. Результаты представлены в табл. 5.

Функция обрезания ($\cdot min100\%$) гарантирует, что ни одна экстремальная угроза не влияет на нормализованные значения остальных. Это подтверждает липшицевость функции нормализации с константой $L = 100/400 = 0{,}25$: для любых R_a, $R_b \in [0;+\infty]$ выполняется

$$\left|f\left(R_a\right)-f\left(R_b\right)\right| \le 0{,}25 \cdot \left|R_a - R_b\right|,$$

что исключает лавинообразный рост ошибок.

Модифицированный метод Min-Max нормализации с фиксированной верхней границей отличается от классического метода, где максимум определяется динамически по выборке, в разработанной методике задана экспертная константа $R_{max} = 400$ баллов. Формула нормализации совпадает с выражением (11) модели при фиксированном значении максимума и эквивалентна выражению (15).

Применение модифицированного метода обусловлено спецификой задачи оценки рисков информационной безопасности. Во-первых, фиксированная верхняя граница $R_{max} = 400$ баллов установлена экспертным путем на основе анализа максимально возможного ущерба для типовых информационных систем и обеспечивает стабильность шкалы при повторных аудитах: результаты оценки рисков, проведенной в разные периоды времени, остаются сопоставимыми, что критично для мониторинга динамики защищенности ИС. Во-вторых, функция обрезания $min(R_i,R_{max})$ исключает влияние экстремальных значений на итоговую нормализацию. В классическом методе появление единственной угрозы с аномально высоким риском привело бы к «сжатию» шкалы для всех остальных угроз, что исказило бы их взаимное ранжирование. В разработанной методике такие значения просто достигают потолка в 100 %, не влияя на распределение остальных рисков. В-третьих, модифицированный метод обладает вычислительной устойчивостью: поскольку алгоритм детерминирован и не содержит итерационных процедур, погрешность вычислений ограничена машинным эпсилоном $\varepsilon \approx 2{,}22 \cdot 10^{-16}$ для 64-битных чисел с плавающей запятой и не накапливается при обработке 155 угроз, нулевое отклонение за 1000 прогонов показывает детерминированность (табл. 3). Функция нормализации является липшицевой с константой $L = 100/400 = 0{,}25$, что подтверждено экспериментом с экстремальными значениями (табл. 5) и гарантирует отсутствие лавинообразного роста ошибок. Таким образом, модификация метода Min-Max позволяет сохранить простоту и интерпретируемость классического подхода, одновременно обеспечивая требования нормативного риск-менеджмента: воспроизводимость, сопоставимость результатов во времени и устойчивость к экстремальным значениям.

Калибровка экспертных коэффициентов и проверка модели

Все коэффициенты модели являются экспертно-расчетными, поскольку Банк данных угроз ФСТЭК России содержит идентификаторы угроз, объекты воздействия и их описания, но не содержит количественных значений вероятностей реализации угроз. В связи с этим значения коэффициентов получены методом экспертных оценок.

В состав экспертной группы вошли три специалиста подразделения информационной безопасности Оренбургского государственного университета имени В. А. Бондаренко. Исходную выборку составили: Банк данных угроз безопасности информации ФСТЭК России по состоянию на 10.02.2026, содержащий 227 угроз; перечень из 155 угроз, отобранных после фильтрации по критерию отсутствия в ИС суперкомпьютерных, облачных и ИИ-компонентов; перечень из 12 типов активов информационной системы образовательной организации; перечень из 18 мер защиты, используемых в анкете программного средства; характеристики информационной системы образовательной организации, полученные в ходе апробации методики.

Для калибровки коэффициентов сформирована выборка из 48 синтетических модельных профилей информационных систем образовательных организаций, различающихся составом активов, масштабом организации, масштабом информационной системы, оценками возможного ущерба и статусами реализации мер защиты. Из 48 профилей 36 использованы для калибровки коэффициентов, 12 – для отложенной проверки модели. Экспертное оценивание проводилось в два тура по методу Дельфи: на первом туре эксперты независимо задавали значения коэффициентов и ранжировали угрозы по уровню риска для каждого профиля; на втором туре проводилось согласование оценок, расхождение по которым превышало установленный порог. Согласованность экспертных оценок оценивалась коэффициентом кон-

кордации Кендалла, значения которого составили не менее 0,74 для групп коэффициентов, что свидетельствует о достаточной согласованности.

В качестве критерия оптимизации использовалось минимальное среднее абсолютное отклонение модельных нормализованных рисков от экспертных оценок риска при дополнительном ограничении на согласованность ранжирования топ-10 угроз. Подбор значений выполнялся методом координатного поиска в заранее заданных допустимых диапазонах коэффициентов.

Формально задача калибровки записывается как задача параметрической оптимизации. Пусть $\theta = (\theta_1,\ldots,\theta_q)$ – вектор калибруемых коэффициентов (P_{0i}, $\gamma_{0\text{отр}}$, $K_{\text{отр}ia}$, $\varphi_{i,k}$, ψ_{im}, $R_{\max}$); P_{cal} – множество калибровочных профилей ($|P_{cal}| = 36$); $E_{p,i}$ – экспертная оценка нормализованного риска i-й угрозы для профиля p; $R_{p,i}^{\%}(\theta)$ – соответствующее значение, вычисленное по модели (11). Критерий оптимизации имеет вид

$$J(\theta) = \frac{1}{|P_{cal}|\,N} \sum_{p\in P_{cal}} \sum_{i=1}^{N} \left| R_{p,i}^{\%}(\theta) - E_{p,i} \right| \to \min_{\theta}, \quad (19)$$

при ограничениях

$$Q_p(\theta) \geq Q_{\min}, \ \theta_j^{\min} \leq \theta_j \leq \theta_j^{\max}, \quad (20)$$

где $Q_p(\theta)$ – показатель согласованности ранжирования топ-10 угроз по модели и по экспертной оценке для профиля p, $Q_{\min}$ – допустимый порог, $[\theta_j^{\min}, \theta_j^{\max}]$ – заранее заданный допустимый диапазон j-го коэффициента.

Таблица 6

Этапы методики и используемые выражения модели и метода

Этап	Содержание действий	Выражения модели и процедуры метода	Результат
Подготовка (однократно)	Формирование базы угроз (фильтрация Банка данных угроз ФСТЭК: 227 → 155 угроз); экспертное задание и калибровка коэффициентов (метод Дельфи, два тура); проверка модели на отложенных профилях; анализ чувствительности	Диапазоны коэффициентов – (5)–(7); калибровка – (19), (20); анализ чувствительности – (16)–(18)	Реляционная база данных угроз, коэффициентов и рекомендаций
1. Выбор типа организации	Пользователь выбирает одну из восьми сфер деятельности; из базы данных загружаются отраслевые коэффициенты частоты и ущерба	Коэффициенты $\gamma_{0\text{отр}}$, $K_{\text{отр}ia}$ – (6), (7)	Отраслевые коэффициенты выбранного типа организации
2. Сбор характеристик ИС	Заполнение анкеты: состав активов и их ценность; масштаб организации (численность персонала, филиальная сеть); оценка ущерба по свойствам ИБ и масштаб ИС с автоматическим определением класса защищенности К1–К3 [2]; статусы реализации 18 мер защиты и классы СЗИ	Множество активов и ценности – (1), (2); коэффициенты α, β; ответы x_k, x_m – в (8), (9)	Характеристика ИС; класс защищенности; требуемые классы СЗИ
3. Идентификация актуальных угроз	Формирование множества угроз из базы данных ФСТЭК ($N = 155$), определение для каждой угрозы затрагиваемых активов и базовой вероятности	Множество угроз и подмножества активов – (3), (4); базовая вероятность – (5)	Перечень актуальных угроз с привязкой к активам
4. Количественная оценка рисков	Для каждой угрозы последовательно рассчитываются ущерб, вероятность, риск и нормализованный риск; вычисляется общий риск ИС	Ущерб (метод взвешенных сумм) – (8); вероятность – (9); риск – (10); нормализация при $R_{\max} = 400$ – (11), (15); общий риск – (12)	R_i, $R_i^{\%}$, R_{total}
5. Ранжирование угроз	Упорядочение угроз по убыванию нормализованного риска, выделение 10 наиболее критичных угроз	Ранжирование – (13)	Ранжированный перечень угроз, T_{10}
6. Формирование рекомендаций	Сопоставление требуемых и реализованных мер защиты и классов СЗИ; формирование рекомендаций трех уровней приоритета (критические, важные, информационные) и общих рекомендаций по инфраструктуре; экспорт отчета в форматах Word и Excel	Правила проверки класса защищенности и сертификации СЗИ [2]; результаты этапов 4 и 5	Отчет с рекомендациями по снижению рисков

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Координатный поиск реализуется следующим образом: на каждой итерации выбирается один коэффициент θ_j, его значение перебирается в допустимом диапазоне при фиксированных остальных коэффициентах, принимается значение, дающее наименьшее $J(\theta)$ при выполнении ограничения (20), после чего выполняется переход к следующему коэффициенту. Процедура повторяется по всем коэффициентам до прекращения улучшения целевой функции. Отложенные 12 профилей в подборе коэффициентов не использовались и применялись только для проверки модели.

Методика автоматизированного анализа рисков информационной безопасности

На основе математической модели (1)–(12) и вычислительного метода (13)–(20) сформулирована методика автоматизированного анализа рисков ИБ – система правил, определяющая порядок действий пользователя и программного комплекса. Методика включает подготовительный этап, выполняемый однократно при создании и актуализации базы данных, и шесть этапов применения, выполняемых при каждой оценке рисков. Для каждого этапа в табл. 6 указаны используемые выражения модели и процедуры вычислительного метода.

Таким образом, методика определяет порядок применения модели и вычислительного метода, а программный комплекс, описанный в разделе «Результаты исследования и их обсуждение», автоматизирует выполнение этапов 1–6.

Результаты исследования и их обсуждение

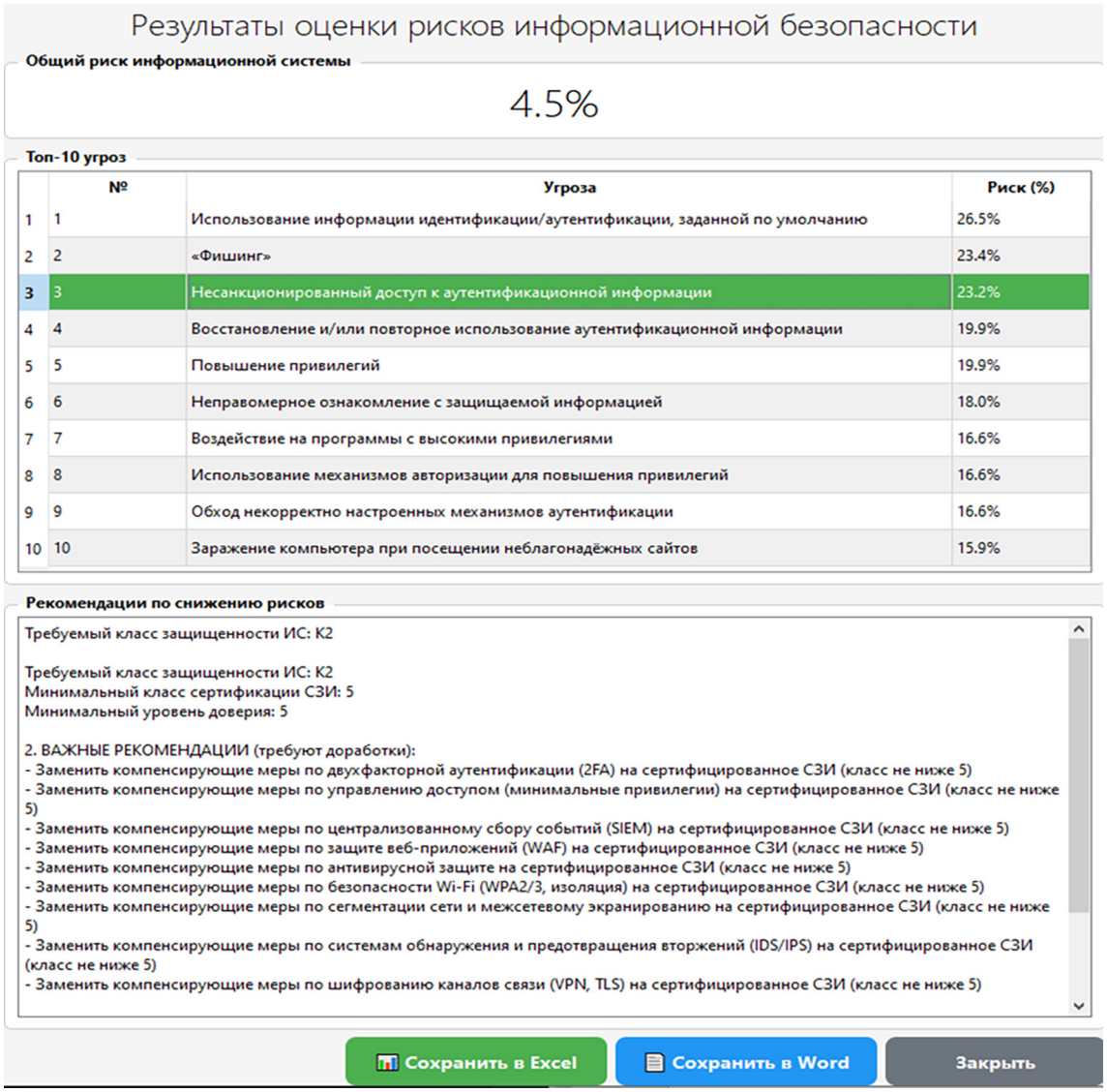
Алгоритм работы программного средства реализует циклический процесс сбора характеристик ИС, валидации введенных данных, вычисления рисков и визуализации результатов. Пользователь последовательно заполняет три логических блока анкеты: «Общие вопросы» (численность персонала, филиальная сеть, типы защищаемых активов), «Класс защищенности» (оценка ущерба по трем свойствам ИБ, масштаб ИС, автоматическое определение класса К1–К3) и «Вопросы по ИС организации» (статус реализации 18 мер защиты, классы СЗИ), расчет и ранжирование рисков по каждой угрозе, формирование рекомендаций по снижению их уровня. Калибровка параметров модели проводилась итерационным методом. Использовались различные входные данные и проводилось сравнение, выявление расхождений, корректировка модели, чтобы ее выходы максимально точно совпадали с реальными, наблюдаемыми данными. Для оценки чувствительности модели использовался метод «одного изменения», изменяли один параметр и проверяли, как меняется результат, что позволило оценить влияние каждого параметра, определена средняя чувствительность. Окно программы «Результаты оценки рисков информационной безопасности» показано на рисунке.

Программная реализация модели, вычислительного метода и методики выполнена на языке Python 3.8. Архитектура приложения включает модуль графического интерфейса (PyQt6), реляционную базу данных угроз и отраслевых коэффициентов (sqlite3), подсистему динамической визуализации соответствия (BeautifulSoup4), а также модули экспорта отчетности (openpyxl, python-docx). Для обеспечения воспроизводимости исследований реализованы механизмы сохранения и загрузки характеристик организаций в формате JSON.

Для оценки экономической эффективности внедрения методики проведен сравнительный анализ трудоемкости ручного и автоматизированного процессов оценки рисков. Данные получены на основе экспертного опроса специалистов по ИБ и хронометража типовых операций для одной информационной системы на базе Оренбургского государственного университета имени В. А. Бондаренко (табл. 7).

Пояснения к терминам табл. 7. Хронометраж проведен на основе пяти независимых замеров для каждой операции с участием трех специалистов отдела ИБ. Под «разбросом» понимается максимальное процентное отклонение от среднего значения (диапазон вариации), обусловленное субъективностью экспертных оценок при ручном расчете. «Среднее число итераций согласования» отражает необходимость двух-трех повторных вычислений при ручном методе для исправления арифметических и логических ошибок, тогда как автоматизированный алгоритм выполняет расчет детерминированно за один проход. Часовая тарифная ставка (ЧТС) специалиста принята на уровне 600 руб./час на основе анализа средних рыночных показателей для аналитиков ИБ в регионе (данные агрегаторов вакансий за 2025–2026 гг.). Суммарные трудозатраты снижаются с 46 до 1,3 человеко-часов.

Наибольший разброс при ручном методе (до ±60 % на этапе расчета ущерба) обусловлен субъективностью экспертных оценок и сложностью работы по оценке ценности информационных активов. Разброс при автоматизации стремится к нулю (±0 % на математических этапах), так как программа использует жестко заданные коэффициенты.



Окно программы «Результаты оценки рисков информационной безопасности»
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Таблица 7

Сравнительная характеристика трудозатрат

Вид работы	Исполнители	Среднее число итераций согласования	Ручной расчет: ср. время (ч) / разброс	Автоматизация: ср. время (ч) / разброс
Сбор и ввод исходных данных для ИС	Аналитик ИБ, владелец ИС	2	8,0 / ±40 %	0,5 / ±10 %
Идентификация и актуализация угроз	Аналитик ИБ	2	4,0 / ±30 %	0,2 / ±5 %
Оценка существующих мер защиты	Аналитик ИБ	2	10,0 / ±50 %	0,2 / ±10 %
Расчет ущерба для каждой угрозы	Аналитик ИБ	3	8,0 / ±60 %	0,1 / ±0 %
Расчет вероятности реализации каждой угрозы	Аналитик ИБ	3	4,0 / ±50 %	0,1 / ±0 %
Расчет риска	Аналитик ИБ	2	2,0 / ±40 %	0,1 / ±0 %
Формирование отчета и рекомендаций	Аналитик ИБ	2	10,0 / ±30 %	0,1 / ±5 %
Итого			46,0	1,3

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Способ расчета экономии: расчет экономии проводится через сокращение трудозатрат. Базовая экономия за одну оценку рисков для одной ИС оценивается снижением трудоемкости выполнения операций, как разница трудозатрат до внедрения автоматизации процессов и после внедрения (Т1-Т2), умноженная на часовую тарифную ставку специалиста (ЧТС):

$$Э = (Т1 – Т2) \times ЧТС =$$
$$= (46 – 1.3) \times 600 = 26820 \text{ р.}$$

Необходимо учитывать, что работа по оценке рисков информационной безопасности в рамках своей организации проводится не реже одного раза в год, это зависит от многих факторов: отрасли и характера данных, сложности инфраструктуры, предыдущих инцидентов, требований регуляторов, бюджета.

Экспериментальная апробация методики в рамках данной работы проведена на базе информационной системы образовательной организации (Оренбургский государственный университет имени В. А. Бондаренко). Разработанная методика обладает потенциалом адаптируемости для предприятий различных отраслей: для этого достаточно актуализировать отраслевые коэффициенты (γ,α) в реляционной базе данных в соответствии со спецификой нового объекта защиты. Однако выводы о точности и производительности в настоящей статье базируются на результатах, полученных в ходе апробации в образовательном секторе. Апробация была ограничена одной образовательной организацией. Апробация методики проводилась на базе Оренбургского государственного университета, данные получены на основе экспертного опроса специалистов отдела информационной безопасности университета. Разработанная методика снижает ключевые недостатки традиционных подходов: субъективность качественных шкал компенсируется введением отраслевых и масштабирующих коэффициентов, а формализация нечетких правил обеспечивает детерминированность вывода при сохранении гибкости. Интеграция с актуальной базой угроз ФСТЭК и автоматическая проверка соответствия СЗИ нормативным классам повышают готовность организаций к аттестационным проверкам и аудитам соответствия.

Обоснование утверждений об объективности, точности и снижении влияния человеческого фактора базируется на следующих положениях, подтвержденных результатами экспериментов:

1. Детерминированность математической модели. В отличие от качественных методов, опирающихся на субъективные экспертные шкалы («высокий/средний/низкий»), разработанная методика использует формализованные числовые коэффициенты (γ, α, β, φ), значения которых зафиксированы в реляционной базе данных risks.db и не зависят от субъективных качеств аналитика. При одинаковых входных данных программа гарантированно выдает идентичный результат, что подтверждено численным экспериментом из 1000 последовательных прогонов для ИС ОГУ: максимальное отклонение по всем 155 угрозам составило 0,0 балла, ранжирование топ-10 не изменялось (табл. 3).

2. Воспроизводимость результатов. Сравнение ручного и автоматизированного расчетов (табл. 7) показало, что разброс значений при ручном методе достигает ±60 % на этапе оценки ущерба из-за субъективности экспертных оценок, тогда как при автоматизации разброс стремится к ±0 % на вычислительных этапах. Это обеспечивается применением модифицированного метода Min-Max нормализации в фиксированном диапазоне и метода взвешенных сумм (WSM) с жестко заданными весами.

3. Верификация соответствия нормативным требованиям. Алгоритм автоматической проверки класса защищенности ИС (К1, К2, К3) и класса сертификации СЗИ реализует требования Приказа ФСТЭК России № 117 от 11 апреля 2025 г. [2] в виде формальных логических правил, что снижает возможность ошибочной интерпретации нормативных документов аналитиком.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанная методика и программное средство могут рассматриваться как вспомогательный инструмент предварительной оценки рисков, апробированный на информационной системе образовательной организации и требующий дальнейшей экспертной проверки и актуализации нормативной базы. Архитектура программного комплекса предусматривает возможность его адаптации для организаций других отраслей за счет модульной структуры реляционной базы данных, в которой все используемые коэффициенты хранятся в виде настраиваемых параметров и могут быть актуализированы без модификации вычислительного ядра программы. В рамках апробации на базе Оренбургского государственного университета имени В. А. Бондаренко методика продемонстрировала свою работоспособность для задач оперативного риск-менеджмента, обоснования бюджетов на информационную безопасность и формирования технических заданий на проектирование систем защиты.

Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением эмпирической базы за счет проведения независимых кейсов в организациях иных отраслей, расширением базы угроз за счет интеграции с национальными центрами мониторинга кибербезопасности, внедрением предиктивных моделей оценки рисков на основе анализа сетевого трафика и адаптацией методики для оценки безопасности объектов критической информационной инфраструктуры.

Заключение

В рамках исследования разработаны и экспериментально проверены математическая модель процесса оценки рисков информационной безопасности, вычислительный метод ее реализации (нормализация и ранжирование рисков, калибровка коэффициентов, анализ чувствительности) и методика автоматизированного анализа рисков и выбора мер их снижения. Экспериментальная апробация программного комплекса была проведена на базе информационной системы образовательной организации, что подтвердило работоспособность предложенных алгоритмов и корректность математической модели.

Несмотря на то, что текущие выводы ограничены результатами апробации в образовательном секторе, модульная архитектура разработанного решения и использование настраиваемых отраслевых коэффициентов создают потенциал для его адаптации и применения в организациях других отраслей при соответствующей актуализации нормативной базы. Предложенный подход, сочетающий детерминированные вычисления с автоматизированными нормативными проверками, позволяет снизить субъективность качественных оценок, минимизировать влияние человеческого фактора и обеспечить высокую воспроизводимость результатов в строгом соответствии с требованиями регуляторов Российской Федерации.

Список литературы

1. Верещагин И. Ю. Современные угрозы и риски информационной безопасности корпоративных систем в условиях импортозамещения // Вестник евразийской науки. 2024. Т. 16. № S4. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=68553282 (дата обращения: 05.06.2026).

2. Приказ ФСТЭК России от 11 апреля 2025 г. № 117 «Об утверждении Требований о защите информации, содержащейся в государственных информационных системах, иных информационных системах государственных органов, государственных унитарных предприятий, государственных учреждений» [Электронный ресурс]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_507869/ (дата обращения: 26.06.2026).

3. ГОСТ Р ИСО/МЭК 27005-2010. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Менеджмент риска информационной безопасности. [Электронный ресурс]. URL: https://base.garant.ru/70350582 (дата обращения: 26.06.2026).

4. Приказ ФСТЭК России от 18 февраля 2013 г. № 21 «Об утверждении состава и содержания организационных и технических мер по обеспечению безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных» [Электронный ресурс]. URL: https://base.garant.ru/70380924/ (дата обращения: 26.06.2026).

5. Васильев Н. С. Управление информационной безопасностью организации на основе использования современных моделей менеджмента // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Экономика и управление. 2025. № 3 (71). С. 166–174. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=83133044 (дата обращения: 04.06.2026). DOI: 10.26456/2219-1453/2025.3.166–174.

6. Learn FAIR™. [Электронный ресурс]. URL: https://www.fairinstitute.org/learn-fair (дата обращения: 15.07.2026).

7. MITRE ATT&CK. [Электронный ресурс]. URL: https://attack.mitre.org/ (дата обращения: 01.07.2026).

8. Мищенко Е. Ю., Повышев А. А. Оценка вероятности реализации угроз информационной безопасности // Вопросы кибербезопасности. 2026. № 1 (71). С. 13–19. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=89067870 (дата обращения: 04.06.2026). DOI: 10.21681/2311-3456-2026-1-13-19.

9. Мордовец В. А., Графов А. А., Варламов Г. В. Управление рисками информационной безопасности // Экономика и управление. 2025. Т. 31. № 1. С. 72–82. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=80390821 (дата обращения: 04.06.2026). DOI: 10.35854/1998-1627-2025-1-72-82.

10. Иваненко В. Г., Иванова Н. Д. Оценка рисков информационной безопасности автоматизированных систем управления технологическим процессом // Вопросы кибербезопасности. 2024. № 1 (59). С. 116–123. URL: https://cyberrus.info/wp-content/uploads/2024/02/vokib-2024-1-st13-s116-123.pdf (дата обращения: 30.05.2026). DOI: 10.21681/2311-3456-2024-1-116-123.

11. Плохута К. Д. Качественная оценка рисков с использованием экспертных оценок и интуитивного анализа как ключевых инструментов управления угрозами в информационной безопасности // Современные наукоемкие технологии. 2024. № 12. С. 245–251. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=79710705 (дата обращения: 04.06.2026). DOI: 10.17513/snt.40271.

12. Ожгибесова А. С., Шабуров А. С., Южаков А. А. О совершенствовании подхода к оценке рисков безопасности информации в контексте обеспечения живучести информационных систем // Системная инженерия и информационные технологии. 2025. Т. 7. № 5 (24). С. 157–169. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=88878397 (дата обращения: 05.06.2026). DOI: 10.54708/2658-5014-SIIT-2025-no5-p157.

13. Колычев В. Д., Буданов Н. А. Комплексная методика оценки рисков информационной безопасности в коммерческом банке // Безопасность информационных технологий. 2021. Т. 28. № 2. С. 83–97. URL: https://bit.spels.ru/index.php/bit/article/view/1346 (дата обращения: 24.05.2026). DOI: 10.26583/bit.2021.2.08.

14. Краковский Ю. М., Киргизбаев В. П. Оценка эффективности работ по устранению инцидентов информационной безопасности на основе двухфакторных рисков // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2025. № 4. С. 90–100. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=88750276 (дата обращения: 04.06.2026). DOI: https://doi.org/10.17308/sait/1995-5499/2025/4/90-100.

15. Андрусенко Ю. А., Лапин В. Г., Дудова М. С., Бородулин И. В., Русских Е. А. Исследование методов оценки рисков информационной безопасности в технологиях машинного обучения // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2025. № 2 (70). С. 23–31. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82997466 (дата обращения: 05.06.2026).

16. Бурькова Е. В., Рычкова А. А., Коннов А. Л., Кильдюшова А. А. Метод анализа рисков информационной безопасности объекта информатизации медицинской организации // Научно-технический вестник Поволжья. 2025. № 6. С. 237–241. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82624759 (дата обращения: 25.05.2026).

17. Лившиц И. И. Оценка рисков утечки персональных данных от атак по каналам поставщиков // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025. Т. 52. № 1. С. 97–104. URL: https://vestnik.dgtu.ru/jour/article/view/1703 (дата обращения: 26.06.2026). DOI: 10.21822/2073-6185-2025-52-1-97-104.

18. Приказ ФСТЭК России от 25 декабря 2017 г. № 239 «Об утверждении Требований по обеспечению безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры РФ» [Электронный ресурс]. URL: https://base.garant.ru/71901880/ (дата обращения: 01.07.2026).

19. Корженевский Д. А., Зырянова Т. Ю. Методика оценки рисков информационной безопасности координатно-графовым методом // Вестник УрФО. Безопасность в информационной сфере. 2025. № 4 (58). С. 53–63. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=88778471 (дата обращения: 05.06.2026). DOI: 10.14529/secur250406.

20. Шукенбаев А. Б., Ламзин А. С., Шукенбаева Н. Ш., Лебедев В. В. Анализ рисков информационной безопасности и оценка эффективности систем защиты на предприятии // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2026. № 3. С. 58–70. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=89134223 (дата обращения: 05.06.2026). DOI: 10.25791/pribor.3.2026.1661.

21. Приказ ФСТЭК России от 14 марта 2014 г. № 31 «Об утверждении Требований к обеспечению защиты информации в автоматизированных системах управления производственными и технологическими процессами на критически важных объектах, потенциально опасных объектах, а также объектах, представляющих повышенную опасность для жизни и здоровья людей и для окружающей природной среды» [Электронный ресурс]. URL: https://base.garant.ru/70690918/ (дата обращения: 01.07.2026).

22. Методика оценки угроз безопасности информации: Методический документ от 5 февраля 2021 г. [Электронный ресурс]. URL: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/400325044/ (дата обращения: 15.05.2026).

23. ISO/IEC 27005:2022. Information security, cybersecurity and privacy protection – Guidance on managing information security risks. International Organization for Standardization, Geneva, 2022. [Электронный ресурс]. URL: https://www.iso.org/standard/80585.html (дата обращения: 26.06.2026).

24. ISO/IEC 27001:2022. Information security, cybersecurity and privacy protection – Information security management systems – Requirements. International Organization for Standardization, Geneva, 2022. [Электронный ресурс]. URL: https://www.iso.org/standard/27001 (дата обращения: 01.07.2026).

25. Joint Task Force Transformation Initiative. Guide for Conducting Risk Assessments / NIST Special Publication 800–30 Revision 1. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology, September 2012. 95 p. [Электронный ресурс]. URL: https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/legacy/sp/nistspecialpublication800-30r1.pdf (дата обращения: 26.06.2026).

26. Alberts C. J., Behrens S., Pethia R. D., Wilson W. R. Operationally Critical Threat, Asset, and Vulnerability Evaluation (OCTAVE) Framework, Version 1.0. Pittsburgh, PA: Software Engineering Institute, Carnegie Mellon University, 1999. CMU/SEI-99-TR-008. DOI: 10.1184/R1/6575906.v1. [Электронный ресурс]. URL: https://www.sei.cmu.edu/library/operationally-critical-threat-asset-and-vulnerability-evaluation-octave-framework-version-10/ (дата обращения: 15.05.2026).

27. Банк данных угроз безопасности информации ФСТЭК России. [Электронный ресурс]. URL: https://bdu.fstec.ru/threat (дата обращения: 10.02.2026).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 001.891.573:681.586.5:535.42
DOI

CC BY 4.0

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФРАКЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ ПРИ МОДУЛЯЦИИ СВЕТОВОГО ПОТОКА В ОТКРЫТОМ ИЗМЕРИТЕЛЬНОМ КАНАЛЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО РАСТРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Гашенко Ю. В., Сусарев С. В.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», Самара, Российская Федерация, e-mail: juliasarbitova@gmail.com

При микронных размерах элементов открытого измерительного канала волоконно-оптического растрового преобразователя дифракционные эффекты оказывают определяющее влияние на распределение интенсивности, что требует строгого математического моделирования для исключения ошибок позиционирования. Целью работы является построение математической модели дифракции света на круглом отверстии диафрагмы на основе интеграла Рэлея – Зоммерфельда и создание программного комплекса для проведения многовариантных вычислительных экспериментов. Математическая модель описывает распространение монохроматической волны в ближней зоне с граничным условием равномерного освещения отверстия. Численная реализация выполнена методом прямого суммирования с шагом дискретизации, обеспечивающим контролируемую погрешность воспроизведения фазовых соотношений; для повышения производительности применена векторизация вычислений с использованием библиотеки NumPy языка Python. Корректность разработанной схемы подтверждена сравнением с точными аналитическими решениями на оптической оси и в дальней зоне, а также кросс-верификацией. С помощью программного комплекса исследована дифракционная картина в широком диапазоне расстояний от диафрагмы, определены угол расходимости светового пучка, характер распределения интенсивности и размеры дифракционного пятна. Проанализировано влияние числа зон Френеля: показано, что при числе зон менее единицы периодическая интерференционная структура не формируется, однако дифракция существенно изменяет диаметр пятна и уровень сигнала. На основе полученных распределений установлены рациональные положения растровой решетки и отводящего оптического волокна, обеспечивающие максимальную интенсивность полезного сигнала при сохранении диаметра пятна в пределах ширины полосы решетки. Разработанные математическая модель и программный комплекс обладают контролируемой погрешностью и позволяют проводить параметрическую оптимизацию волоконно-оптических преобразователей, что делает их пригодными для включения в состав систем автоматизированного проектирования измерительных устройств.

Ключевые слова: волоконно-оптический растровый преобразователь, дифракция света, модуляция светового потока, интеграл Рэлея – Зоммерфельда, дифракционное пятно, открытый оптический канал, растр

DIFFRACTION EFFECTS MODELING FOR LIGHT MODULATION IN AN OPEN MEASURING CHANNEL OF A FIBER-OPTIC RASTER SENSOR

Gashenko Yu. V., Susarev S. V.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Samara State Technical University", Samara, Russian Federation, e-mail: juliasarbitova@gmail.com

With micron-sized elements in the open measuring channel of a fiber-optic raster transducer, diffraction effects have a decisive influence on the intensity distribution, which requires rigorous mathematical modeling to avoid positioning errors. The aim of the work is to construct a mathematical model of light diffraction at a circular aperture of the diaphragm based on the Rayleigh–Sommerfeld integral and to develop a software package for conducting multivariate computational experiments. The mathematical model describes the propagation of a monochromatic wave in the near field with a boundary condition of uniform illumination of the aperture. The numerical implementation is performed by a direct summation method with a discretization step that provides a controlled error in reproducing phase relations; to improve performance, vectorization of computations using the NumPy library of the Python language is employed. The correctness of the developed scheme is confirmed by comparison with exact analytical solutions on the optical axis and in the far field, as well as by cross-verification. Using the software package, the diffraction pattern is studied over a wide range of distances from the diaphragm; the divergence angle of the light beam, the intensity distribution character, and the diffraction spot size are determined. The influence of the number of Fresnel zones is analyzed: it is shown that when the number of zones is less than one, a periodic interference structure does not form, but diffraction significantly changes the spot diameter and signal level. Based on the obtained distributions, rational positions of the raster grating and the receiving optical fiber are established, providing maximum useful signal intensity while keeping the spot diameter within the width of the grating strip. The developed mathematical model and software package have a controlled error and allow parametric optimization of fiber-optic transducers, making them suitable for inclusion in computer-aided design systems for measuring devices.

Keywords: fiber-optic raster sensor, light diffraction, light modulation, Rayleigh – Sommerfeld integral, diffraction spot, open optical channel, raster

Введение

Волоконно-оптические преобразователи широко применяются в высокоточных измерительных системах благодаря универсальности и устойчивости к внешним воздействиям [1]. Управление оптическим потоком осуществляется модулирующими устройствами предельного и поглощающего типов. Среди них выделяются растровые решетки – периодические структуры с переменным пропусканием, служащие для преобразования линейных и угловых перемещений в цифровой код. Такие решетки обеспечивают линейность характеристик, высокую стабильность и адаптируемость к требуемому диапазону измерений, а также устойчивы к вибрации и температурным колебаниям. Применение растровых преобразователей устраняет влияние нестабильности питающего напряжения и температуры на выходной сигнал, а амплитудно-логический метод обработки гарантирует высокую точность в широком температурном диапазоне. При микронных размерах элементов открытого измерительного канала доминирующую роль начинают играть дифракционные эффекты на круглом отверстии диафрагмы. Некорректный учет этих эффектов ведет к ошибкам позиционирования решетки и снижению точности, что обусловливает актуальность разработки строгой математической модели дифракции в ближней зоне и создание на ее основе вычислительного инструментария для инженерного проектирования.

Цель исследования – построение математической модели распространения света в открытом канале волоконно-оптического растрового преобразователя на основе интеграла Рэлея – Зоммерфельда, численное моделирование и создание программного комплекса, позволяющего проводить многовариантные вычислительные эксперименты для определения рациональных геометрических параметров преобразователя.

Материалы и методы исследования

Постановка задачи математического моделирования

На рис. 1 представлен волоконно-оптический растровый преобразователь. Показан случай пропускания светового потока через пропускающий участок решетки. В случае с поглощающей частью решетки световой поток поглощается полностью, соответственно сигнал с отводящего оптического волокна не поступает.

Согласно исследованиям [2] выявлено, что для данного преобразователя целесообразно расположить растровую решетку и отводящее оптическое волокно в зоне наибольшей интенсивности излучения и резкого перепада сигнала, то есть на расстоянии до $x_{кр}$, так как для дальнейшего преобразования необходимо только наличие либо отсутствие светового потока на отводящем торце. Для оптического волокна с диаметром сердцевины d_c = 200 мкм и апертурным углом θ_{NA} = 12° расстояние $x_{кр}$ составит примерно 470 мкм. Соответственно, возникает одна из сложнейших задач расположения всех элементов преобразователя в пределах данного расстояния с учетом затухания светового потока и влияния дифракции [3].

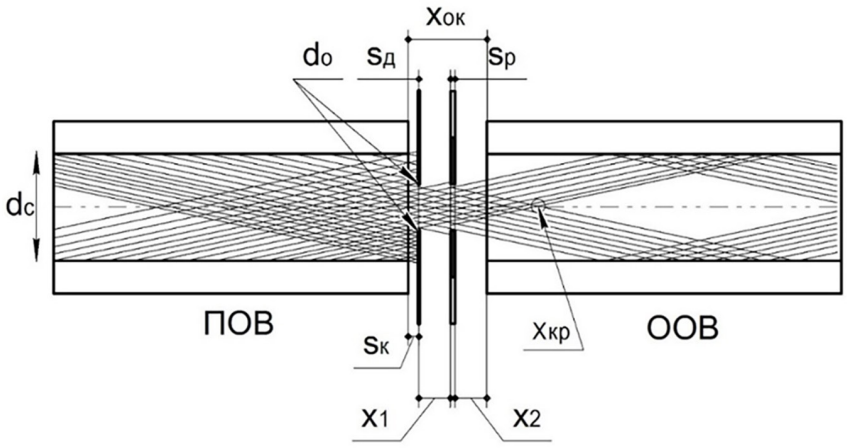


Рис. 1. Распределение светового потока в открытом канале волоконно-оптического преобразователя: ПОВ – подводящее оптическое волокно, ООВ – отводящее оптическое волокно, d_c – диаметр сердцевины оптоволокна, d_o – диаметр отверстия диафрагмы, $x_{кр}$ – дистанция формирования светового пучка, $s_к$ – толщина клеевого слоя, $s_д$ – толщина диафрагмы, $s_р$ – толщина растровой решетки, $x_{ок}$ – длина открытого оптического канала, x_1 – расстояние между диафрагмой и растровой решеткой, x_2 – расстояние между растровой решеткой и ООВ
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

В данном случае используется диафрагма из фольги с круглым отверстием диаметром d_o = 8 мкм, ограничивающая расходимость пучка. Прошедшее через нее излучение попадает на растровую решетку с шириной полосы пропускания 8 мкм, где в зависимости от локального коэффициента пропускания поглощается либо поступает в отводящее оптическое волокно [4].

Математическая модель дифракции

Большое значение в оптических системах имеет явление дифракции. Понятие дифракции в оптике связано с нарушением прямолинейности распространения света в среде с неоднородностями, такими как отверстия, края экранов и т. д. Согласно скалярной теории дифракции основными методами, применяемыми при численных расчетах, являются приближения Френеля и Фраунгофера, а также метод углового спектра [5]. В ближнем поле более строгим считается интеграл Рэлея – Зоммерфельда первого типа, который представляет собой решение скалярного волнового уравнения в полупространстве с граничным условием Дирихле и тесно связан с методом углового спектра. Данный интеграл используется при малых расстояниях распространения волнового фронта порядка десятков длин волн [6].

Распределение электрического поля дифрагирующего света в точке (x, y, z) задается дифракционным уравнением Рэлея – Зоммерфельда первого типа [7, 8]:

$$E(x,y,z) = -\frac{i}{\lambda}\iint_S E(0,y_0,z_0)\frac{e^{ikr}}{r}\cos\theta dy_0 dz_0, \quad (1)$$

где $E(0, y_0, z_0)$ – начальное поле в плоскости диафрагмы ($x = 0$),

$r = \sqrt{x^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}$ – расстояние от точки в плоскости отверстия диафрагмы $(0, y_0, z_0)$ до наблюдаемой точки (x, y, z),

i – мнимая единица,

λ – длина волны,

x – ось распространения световой волны,

$k = 2\pi/\lambda$ – волновое число,

$\cos\theta = x/r$– направляющий косинус угла между x и r.

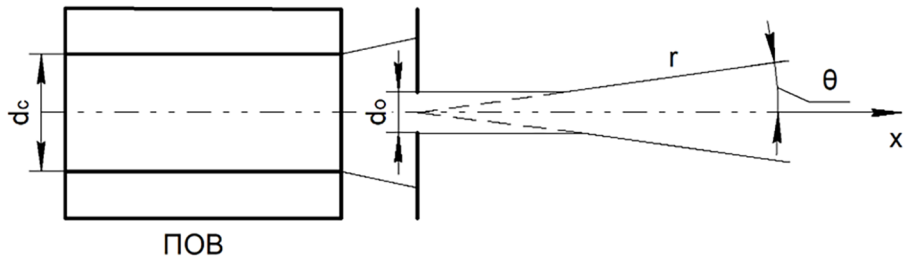


Рис. 2. Распределение светового потока при прохождении диафрагмы с круглым отверстием
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Интегрирование ведется только по площади круглого отверстия S, так как поле вне отверстия равно нулю. Все геометрические размеры выражаются в микрометрах. Формула (1) соответствует интегралу Рэлея – Зоммерфельда первого рода в приближении $kr \gg 1$; по сравнению с точным осевым решением [9], вносимая этим погрешность осевой интенсивности не превышает 0,02 % при $x \geq 18$ мкм и составляет около 0,5 % при $x = 5$ мкм.

На рис. 2 представлен случай распределения светового потока от излучающего торца ПОВ при прохождении через диафрагму с круглым отверстием, где θ – угол дифракционной расходимости, r – расстояние от точки в плоскости отверстия диафрагмы до наблюдаемой точки, d_c – диаметр сердцевины ПОВ, d_o – диаметр отверстия в диафрагме, x – ось распространения световой волны.

В модели принимается, что отверстие освещается пространственно когерентной плоской волной, падающей по нормали. Поскольку диаметр сердцевины ПОВ значительно превышает диаметр отверстия, поле в плоскости $x = 0$ при этом можно считать равномерным в пределах отверстия и рав-

ным нулю вне его (границы применимости допущения обсуждаются ниже):

$$E(0,y_0,z_0)=\begin{cases}E_0, \sqrt{y_0^2+z_0^2}\le\dfrac{d_0}{2}\\ 0, \sqrt{y_0^2+z_0^2}>\dfrac{d_0}{2}\end{cases}. \quad (2)$$

Амплитуда E_0 в модели полагается равной единице, так как в дальнейшем анализируется относительное распределение интенсивности $I = |E|^2$.

Вне оптической оси интеграл Рэлея – Зоммерфельда в ближней зоне не выражается в замкнутом виде, поэтому необходимо построить численную схему [10], обеспечивающую компромисс между точностью и вычислительной эффективностью.

Реализация численной схемы

Область отверстия покрывается равномерной прямоугольной сеткой с шагом $\Delta y_0 = \Delta z_0$. Для адекватного воспроизведения фазовых соотношений шаг выбран из условия $\Delta y_0 \le \lambda/10$; вопросы выбора шага дискретизации при численном интегрировании формулы Рэлея – Зоммерфельда рассмотрены в [6]. Шаг λ/2 соответствует пределу Найквиста для распространяющихся волн, пространственные частоты которых не превышают 1/λ. Однако при расстояниях порядка десятков длин волн фаза ядра e^{ikr} между соседними узлами меняется на величину до $k\Delta y_0 \sin\theta$, и для точного воспроизведения интерференционных членов в ядре интеграла требуется запас: при $\Delta y_0 = \lambda/10$ этот набег не превышает $2\pi/10$ рад. Достаточность выбранного шага подтверждена исследованием сходимости (табл. 2).

Интеграл аппроксимируется двойной суммой по узлам сетки, попадающим в круглое отверстие:

$$E(x,y_m,z_n)=\frac{\Delta y_0 \Delta z_0}{i\ddot{e}}\sum_{p,q}E_0\frac{xe^{ikr^{mnpq}}}{r_{mnpq}^2}, \quad (3)$$

где $r_{mnpq}=\sqrt{x^2+(y_m-y_{0p})^2+(z_n-z_{0q})^2}$,

а индексы p, q нумеруют активные узлы.

Погрешность такой аппроксимации обусловлена заменой гладкой подынтегральной функции ее значениями в узлах сетки. Для функций с осциллирующим множителем e^{ikr} эта составляющая убывает с уменьшением шага по степенному закону; к ней добавляется погрешность ступенчатой аппроксимации границы круглого отверстия прямоугольной сеткой, которая и определяет фактический порядок сходимости; для уменьшения этой составляющей при криволинейной границе области применяют, например, треугольные сетки [11]. Погрешность оценивается методом повторного счета на последовательно сгущаемых сетках с экстраполяцией по правилу Рунге:

$$\varepsilon(h)\approx\frac{|I(h)-I(h/2)|}{(2p-1)}.$$

По данным табл. 2 разности решений на последовательных сетках уменьшаются примерно вдвое при уменьшении шага вдвое, то есть наблюдаемый порядок сходимости $p \approx 1$, а не $p = 2$, характерный для квадратурной формулы при гладкой границе области), и именно это значение использовано в оценке. Для шага λ/10 погрешность дискретизации составляет около 0,4% по максимальной интенсивности и около 0,15% по диаметру пятна. Эта оценка справедлива в предположении асимптотического режима сходимости и сама по себе не является погрешностью относительно точного решения; близость к точному решению подтверждается сравнением с точным аналитическим решением на оси: при $x = 30$ мкм решение с шагом λ/10 отличается от него на 0,36 %, что согласуется с приведенной оценкой, а интегрирование в полярных координатах, не использующее ступенчатую аппроксимацию границы, воспроизводит его с расхождением менее 0,01 %.

Интенсивность вычисляется как

$$I(x,y_m,z_n)=\left|E(x,y_m,z_n)\right|^2. \quad (4)$$

Параметры численного эксперимента, использованные при моделировании, сведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры численного эксперимента

Параметр	Значение
Длина волны λ, мкм	0,85
Диаметр отверстия d_0, мкм	8,0
Размер расчетного окна в плоскости наблюдения, мкм × мкм	40 × 40
Шаг сетки в плоскости отверстия $\Delta y_0 = \Delta z_0$, мкм	0,085 (λ/10)
Число узлов по диаметру отверстия	95 (94 интервала)
Шаг по продольной координате x, мкм	0,5
Критерий остановки по x	$x \le 200$ мкм
Нормировка интенсивности	I_{max} в сечении $x = 30$ мкм принята за 1,0

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Оценка погрешности квадратурной формулы (3) дополнительно проведена сравнением с аналитическими решениями на оси и в дальней зоне и кросс-верификацией с независимым кодом; полученные расхождения не превышают 0,9 %.

Прямое вычисление двойной суммы для каждой точки наблюдения стандартными циклическими конструкциями приводит к неприемлемым временным затратам. Поэтому в основу программной реализации положена техника векторизации с использованием библиотеки NumPy языка Python [12].

Программный комплекс построен по модульному принципу и включает четыре функциональных блока: модуль исходных данных, задающий геометрические и волновые параметры; расчетное ядро, реализующее вычисление поля и интенсивности посредством векторизованных операций библиотеки NumPy, что заменяет циклы по узлам отверстия и по точкам строки наблюдения операциями над двумерными массивами и на порядки ускоряет расчет; модуль анализа, автоматически определяющий координаты максимума интенсивности, ширину пятна по уровню половинной интенсивности, угол дифракционной расходимости и число зон Френеля; модуль визуализации, формирующий двумерные карты интенсивности, радиальные сечения и картины распространения пучка вдоль оптической оси. Функциональная схема взаимодействия модулей комплекса представлена на рис. 3, фрагмент кода вычислительного ядра – на рис. 4.

Для подтверждения корректности разработанной численной схемы и ее программной реализации выполнена серия тестов, результаты которых сведены в табл. 3.

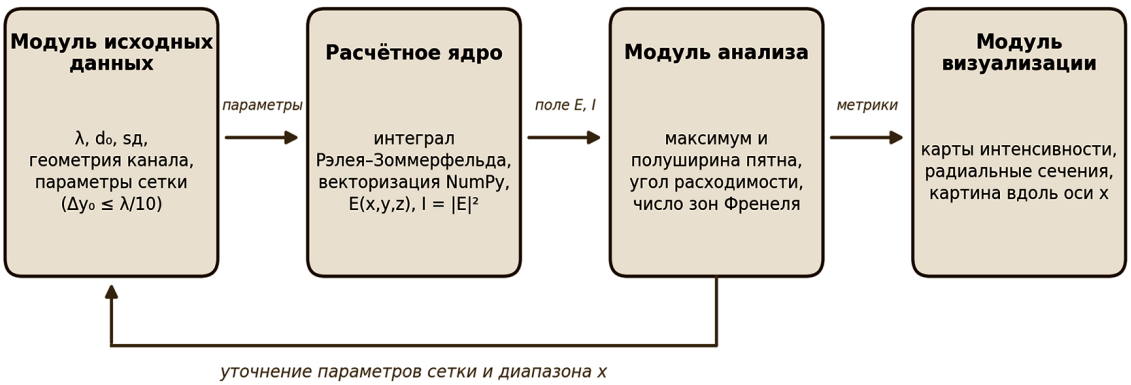


Рис. 3. Функциональная схема взаимодействия модулей программного комплекса
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

```
import numpy as np

def rayleigh_sommerfeld(x, lam, d0, n_src, y_obs, z_obs):
    # Поле по интегралу Рэлея-Зоммерфельда I рода (формула (3))
    k = 2.0 * np.pi / lam                    # волновое число
    y0 = np.linspace(-d0/2, d0/2, n_src)     # сетка в плоскости отверстия
    dy0 = y0[1] - y0[0]                      # шаг: d0/(n_src - 1)
    Y0, Z0 = np.meshgrid(y0, y0, indexing="ij")
    m = Y0**2 + Z0**2 <= (d0/2)**2           # узлы внутри отверстия
    ys, zs = Y0[m], Z0[m]
    E = np.empty((y_obs.size, z_obs.size), dtype=complex)
    for i, y in enumerate(y_obs):            # цикл только по строкам наблюдения
        # массив (точки строки) x (узлы отверстия)
        r = np.sqrt(x**2 + (y - ys)**2 + (z_obs[:, None] - zs)**2)
        E[i] = dy0**2 / (1j*lam) * np.sum(np.exp(1j*k*r) * x / r**2, axis=1)
    return E
```

Рис. 4. Фрагмент кода расчетного ядра
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Таблица 2

Исследование сходимости по шагу сетки (x = 30 мкм)

Шаг сетки	Диаметр пятна по уровню 0,5, мкм	Максимальная интенсивность, отн. ед.	Относительное изменение интенсивности
λ/2 (0,425 мкм)	3,387	0,969	–
λ/5 (0,17 мкм)	3,365	0,989	2,1 %
λ/10 (0,085 мкм)	3,352	1,000	1,1 %
λ/20 (0,0425 мкм)	3,350	1,002	0,21 %
λ/40 (0,02125 мкм)	3,348	1,003	0,11 %

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 3

Результаты верификации численной схемы

Тест	Сравниваемый параметр	Значение модели	Эталонное значение	Относительная погрешность
Аналитическое решение (зона Фраунгофера), x = 200 мкм	Диаметр центрального максимума картины Эйри	52,3 мкм	51,85 мкм (теория: 2,44λx/d₀)	0,9 %
Точное решение на оси, x = 30 мкм	Осевая интенсивность (абс., E₀ = 1)	2,7296	2,7394	0,36 %
Точное решение на оси, x = 100 мкм	Осевая интенсивность (абс., E₀ = 1)	0,3373	0,3391	0,53 %
Кросс-верификация с Matlab, x = 30 мкм	Осевая интенсивность (абс., E₀ = 1)	2,7296	2,7296	< 0,01 %
Кросс-верификация с Matlab, x = 60 мкм	Осевая интенсивность/ полуширина	0,3250 / 6,587 мкм	0,3250 / 6,587 мкм	< 0,01 %
Кросс-верификация с Matlab, x = 100 мкм	Осевая интенсивность/ полуширина	0,1236 / 10,940 мкм	0,1236 / 10,940 мкм	< 0,01 %
Интегрирование в полярных координатах, x = 30 мкм	Полуширина пятна	3,352 мкм	3,348 мкм	0,12 %
Интегрирование в полярных координатах, x = 60 мкм	Осевая интенсивность/ полуширина	0,3250 / 6,587 мкм	0,3254 / 6,578 мкм	0,12 % / 0,14 %
Интегрирование в полярных координатах, x = 100 мкм	Осевая интенсивность/ полуширина	0,1236 / 10,940 мкм	0,1238 / 10,926 мкм	0,16 % / 0,13 %
Измельчение сетки (189 узлов)	Диаметр пятна (уровень 0,5)	3,352 мкм (95 узлов)	3,350 мкм (189 узлов)	0,07 %

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

1. Сравнение с аналитическим решением: на больших расстояниях $x \gg d_0^2 / \lambda$ распределение интенсивности должно соответствовать картине Эйри

$$I(\rho) = I_0 \left[\frac{2J_1(u)}{u} \right]^2, \quad u = \frac{\pi d_0 \rho}{(\lambda x)}, \qquad (5)$$

где ρ – радиальная координата в плоскости наблюдения, J_1 – функция Бесселя первого рода первого порядка. Поскольку диаметр центрального максимума при x = 200 мкм (около 52 мкм) не помещается в основное расчетное окно 40×40 мкм, для данного теста использовано отдельное окно 120×120 мкм с шагом 0,5 мкм в плоскости наблюдения; положение первого минимума уточнялось параболической интерполяцией по трем соседним узлам. Расхождение с теоретическим значением $2{,}44\lambda x/d_0$ = 51,85 мкм не превысило 0,9% (табл. 3). Небольшое систематическое превышение объясняется тем, что при x = 200 мкм условие $x \gg d_0^2 / \lambda \approx 75$ мкм выполняется лишь приближенно.

2. Кросс-верификация: осевая интенсивность и полуширина пятна в контрольных сечениях x = 30, 60 и 100 мкм, рассчитанные независимой реализацией схемы (3) в среде Matlab, совпали с результатами комплекса до четвертого значащего знака. Точность самой дискретизации дополнительно

проверена интегрированием в полярных координатах (квадратура Гаусса – Лежандра, 300×720 узлов), не использующим ступенчатую аппроксимацию границы отверстия; расхождения не превышают 0,2 % (табл. 3).

3. Исследование сходимости: измельчение сетки от λ/2 до λ/40 (табл. 2) показало монотонную сходимость решения с достаточной точностью уже при шаге λ/10.

4. Сравнение с точным решением на оси: для ядра Рэлея – Зоммерфельда первого рода в точной форме осевое поле равномерно освещенного круглого отверстия выражается в замкнутом виде [9]:

$$E(x)=E_0\left[e^{ikx}-\frac{x}{R}e^{ikR}\right],R=\left(x^2+\frac{d_0^2}{4}\right)^{1/2}.$$

Расхождение решения по схеме (3) с шагом λ/10 не превышает 0,53% (табл. 3), а положение осевого максимума (x = 18,8 мкм, n = 1) совпадает с результатом моделирования.

Видно, что при уменьшении шага с λ/10 до λ/20 максимальная интенсивность изменяется на 0,21 %, а диаметр пятна – на 0,07 %; при дальнейшем измельчении до λ/40 изменения уменьшаются примерно вдвое (0,11 и 0,04 %), что подтверждает сходимость схемы и достаточность шага λ/10 для практических расчетов. Интенсивность в таблице нормирована на значение, полученное с шагом λ/10. Сравнение результатов всех проведенных тестов приведено в табл. 3.

Для оценки устойчивости полученных результатов к неизбежным технологическим допускам проведен упрощенный анализ чувствительности. Варьировались основные параметры: диаметр отверстия d_0 ±0,5 мкм, длина волны λ ±10 нм, боковое (поперечное) смещение растровой решетки и отводящего волокна ±2 мкм, а также толщина диафрагмы $s_д$. Результаты представлены в табл. 4 (для x = 30 мкм; для ООВ – для x = 70 мкм, середины рекомендуемого диапазона его размещения).

Для бокового смещения растровой решетки в таблице приведена доля мощности пучка, проходящая через полосу пропускания шириной 8 мкм (при центрированной решетке – 0,85). Для бокового смещения ООВ приведена интенсивность в точке, соответствующей смещенному центру торца, относительно осевой в сечении x = 70 мкм; если диаметр сердцевины ООВ значительно превышает размер пятна, собираемый волокном поток при таком смещении практически не изменяется. В силу симметрии задачи результаты для смещений +2 и −2 мкм совпадают. Гауссов профиль освещения задан как

$$E(0,\rho)=E_0e^{\frac{-\rho^2}{w^2}}$$

при той же амплитуде E_0 в центре отверстия, поэтому снижение интенсивности отражает уменьшение потока, проходящего через отверстие.

Толщина диафрагмы ($s_д \approx 5$ мкм) учтена в предположении квазинормального падения излучения на отверстие введением дополнительного набега фазы в канале отверстия конечной длины:

$$\Delta\varphi(\rho) = ks_д\left(\frac{1}{cos\theta_i(\rho)}-1\right),$$

где $\theta_i(\rho)\approx\rho/x_{кр}$ – оценочный угол падения луча на точку отверстия на расстоянии ρ от оси. При этом допущении неоднородность набега фазы по апертуре при $s_д$ = 5 мкм не превышает $1{,}3\cdot10^{-3}$ рад, а варьирование толщины в диапазоне $s_д$ = 4–6 мкм изменяет диаметр пятна и максимальную интенсивность менее чем на 0,1 % (табл. 4). Этот результат, как и остальные количественные результаты работы, относится к принятой модели пространственно когерентного освещения, близкого к нормальному. Излучение многомодового ПОВ содержит наклонные компоненты с углами до θ_{NA} и является частично когерентным: при заполненной апертуре волокна радиус когерентности в плоскости торца составляет порядка

$$\frac{\lambda}{2\sin\theta_{NA}} \approx 2 \text{ мкм},$$

то есть меньше диаметра отверстия. В этом случае дифракционная картина формируется некогерентным наложением наклонных пучков и расширяется по сравнению с рассчитанной, а набег фазы в канале отверстия и частичное виньетирование стенками канала становятся заметными. Учет углового спектра и частичной когерентности излучения ПОВ вынесен в предмет дальнейших исследований.

С использованием созданного программного комплекса проведена серия вычислительных экспериментов для параметров λ = 850 нм, d_0 = 8 мкм, варьируемое расстояние x = 5–200 мкм. На рис. 5 показан результат моделирования (фрагмент x = 5–120 мкм) распределения интенсивности излучения при прохождении диафрагмы с круглым отверстием.

Таблица 4

Влияние вариаций параметров на диаметр дифракционного пятна и интенсивность

Вариация	Диаметр пятна, мкм	Максимальная интенсивность, отн. ед.	Изменение диаметра, %
Номинальные значения (d_0 = 8 мкм, λ = 0,85 мкм)	3,35	1,000	–
d_0 = 7,5 мкм	3,56	0,84	+6,1
d_0 = 8,5 мкм	3,17	1,16	−5,4
λ = 0,84 мкм	3,31	1,02	−1,2
λ = 0,86 мкм	3,39	0,98	+1,2
Боковое смещение растровой решетки ±2 мкм	3,35	0,79 (доля мощности в полосе 8 мкм; номинал 0,85)	0
Боковое смещение ООВ ±2 мкм (x = 70 мкм)	7,67	0,83 (относительно осевой при x = 70 мкм)	–
Неравномерность освещения (Гауссов профиль, w = 4 мкм)	3,78	0,41	+12,7
Толщина диафрагмы $s_д$ = 4 мкм	3,35	1,000	< 0,1
Толщина диафрагмы $s_д$ = 6 мкм	3,35	1,000	< 0,1

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования

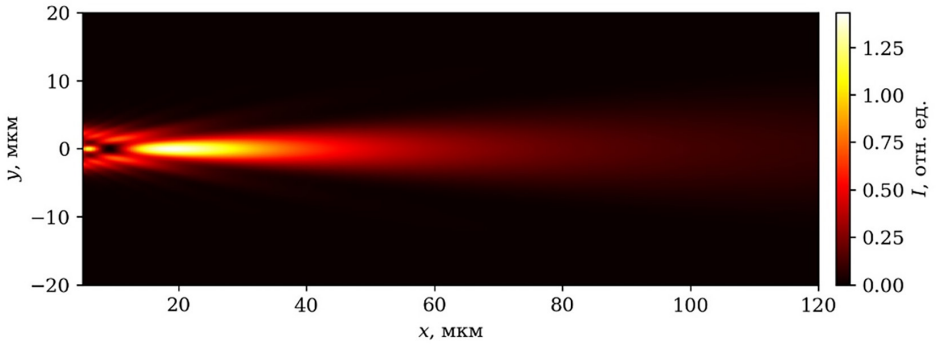


Рис. 5. Распределение интенсивности излучения при прохождении диафрагмы с круглым отверстием
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

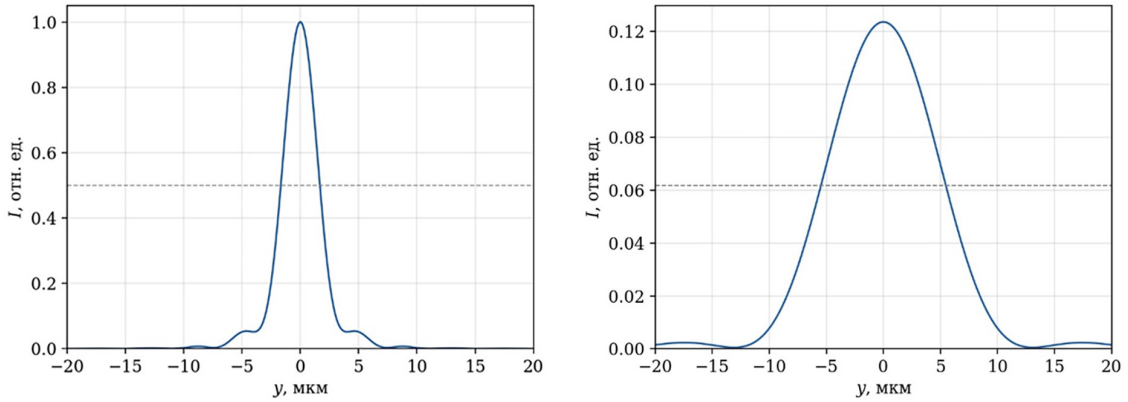
Световой поток после прохождения отверстия диафрагмы достаточно сколлимирован: полный угол дифракционной расходимости по уровню половинной интенсивности составил θ = 6,2° (угол полурасходимости $\theta_п$ = 3,1°), что согласуется с угловым размером центрального максимума картины Эйри по уровню 0,5: $1{,}03\lambda/d_0 \approx 6{,}3°$. При x < 19 мкм (число зон Френеля n > 1) наблюдается чередование темных и светлых колец, включая темный центр при $x \approx 9$ мкм ($n \approx 2$) – эта зона непригодна для размещения решетки. Максимум осевой интенсивности достигается при $x \approx 18{,}8$ мкм (n = 1). Далее формируется единое центральное пятно, интенсивность которого монотонно убывает с расстоянием. Растровую решетку целесообразно располагать в диапазоне $x \approx 20$–30 мкм – сразу за областью n > 1, где интенсивность остается высокой, а кольцевая структура отсутствует. В качестве расчетного сечения далее принято x = 30 мкм.

Число зон Френеля рассчитывается как

$$n = \frac{d_0^2}{4\lambda x}, \qquad (6)$$

где d_o – диаметр отверстия в диафрагме, λ – длина волны, x – расстояние от диафрагмы до растровой решетки.

При x = 30 мкм расчет показал, что количество зон Френеля составляет n = 0,627 (значению n = 1 соответствует $x \approx 18{,}8$ мкм). При n < 1 отверстие не охватывает первую зону полностью, интерференция на его краях не дает существенного гашения или усиления, и наблюдается одно яркое пятно без кольцевой структуры [13].



а *б*

Рис. 6. Распределение интенсивности в дифракционном пятне после прохождения световым потоком диафрагмы с круглым отверстием: а – сечение на расстоянии x_1 = 30 мкм, б – сечение на расстоянии x_2 = 100 мкм
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Для оценки размера дифракционного пятна и интенсивности излучения, попадающего на растровую решетку, были получены сечения на расстоянии x_1 = 30 мкм и x_2 = 100 мкм от диафрагмы, представленные на рис. 6.

В сечении *а* (x_1 = 30 мкм) интенсивность на оси принята за единицу (табл. 1). Распределение неравномерно: диаметр центрального максимума по первым минимумам составляет около 8 мкм, при этом полуширина центральной области высокой интенсивности (уровень 0,5) составляет 3,35 мкм, за пределами которой интенсивность резко падает.

В сечении *б* (x_2 = 100 мкм) распределение интенсивности более однородно, резкие перепады отсутствуют, однако интенсивность примерно в 8 раз ниже, чем в сечении *а*, что затрудняет дальнейшее преобразование светового потока. Диаметр пятна по уровню половинной интенсивности составляет около 11 мкм (по первым минимумам – около 26 мкм).

Произведенный расчет, а также результаты моделирования показали, что диаметр дифракционного пятна по уровню 0,5 не превышает ширину зоны пропускания растровой решетки (8 мкм) вплоть до расстояния около 73 мкм; при этом с учетом падения интенсивности рационально располагать растровую решетку на расстоянии не более 60 мкм, так как при большем расстоянии снижается интенсивность излучения и увеличивается диаметр дифракционного пятна, что может привести к ложному срабатыванию счетчиков и внести неточность при дальнейшем расчете перемещения растровой решетки. Этот вывод подтверждается и энергетической оценкой: доля мощности пучка, попадающая в полосу шириной 8 мкм, уменьшается с 0,85 при x = 30 мкм до 0,77 при x = 60 мкм и 0,70 при x = 73 мкм, то есть при большем удалении решетки заметная часть потока попадает на соседние полосы. Для решеток с меньшей шириной полосы допустимое расстояние сокращается: например, при ширине полосы 4 мкм полуширина пятна достигает ее уже при x ≈ 36 мкм, а доля мощности в такой полосе при x = 30 мкм составляет 0,66. Учитывая, что интенсивность излучения в сечении, соответствующем расстоянию x_2 = 100 мкм от диафрагмы, очень мала, а низкая интенсивность излучения наблюдается начиная с расстояния от диафрагмы x = 85 мкм, для выбранных параметров модели рациональным является диапазон размещения торца ООВ x = 60–80 мкм от диафрагмы [14]. При выборе положения торца ООВ следует также учитывать общие условия эффективного ввода излучения в волокно – согласование размера пятна и углового спектра излучения с сердцевиной и числовой апертурой волокна [15].

Заключение

Разработана и верифицирована математическая модель дифракции света на круглом отверстии в открытом канале волоконно-оптического растрового преобразователя, основанная на интеграле Рэлея – Зоммерфельда, и реализующий ее модульный программный комплекс на Python (численная схема прямого суммирования с векторизацией вычислений). Комплекс с кон-

тролируемой погрешностью рассчитывает распределения интенсивности в ближней зоне, углы расходимости пучка и рациональные зоны размещения элементов преобразователя. Показано, что при числе зон Френеля менее единицы (для принятых параметров – на расстояниях свыше 19 мкм) интерференционные кольца отсутствуют, однако дифракция по-прежнему определяет размер пятна и уровень сигнала. Учет дифракционных эффектов критически важен при проектировании высокоточных растровых преобразователей: он позволяет снизить вклад дифракционных искажений и обосновать выбор геометрии, что создает предпосылки для улучшения их метрологических характеристик. Разработанный инструментарий применим в системах автоматизированного проектирования волоконно-оптических измерительных устройств. Представленные результаты являются предварительными вычислительными рекомендациями; их экспериментальная проверка и учет дополнительных факторов (угловой спектр и частичная когерентность излучения многомодового оптического волокна, качество поверхностей, связь мод в волокне) составят предмет дальнейших исследований.

Список литературы

1. Фадеев К. М., Ларионов Д. Д., Жикина Л. А., Минкин А. М., Шевцов Д. И. Волоконно-оптический датчик одновременного измерения температуры и давления с использованием интерферометра Фабри – Перо и волоконной брэгговской решетки // Приборы и техника эксперимента. 2020. № 4. С. 115–119. URL: https://elibrary.ru/item.asp?doi=10.31857/S003281622005002X (дата обращения: 03.06.2026). DOI: 10.31857/S003281622005002X.

2. Мурашкина Т. И., Бадеева Е. А. Волоконно-оптические приборы и системы: науч. разработки НТЦ «Нанотехнологии волоконно-оптических систем». СПб.: Политехника, 2018. 187 с. [Электронный ресурс]. URL: http://elib.pnzgu.ru/library/12334000 (дата обращения: 03.06.2026). ISBN 978-5-7325-1132-1.

3. Табекина Н. А., Четвериков Б. С., Чепчуров М. С. Влияние явления дифракции света на точность автоматизированного процесса определения геометрических параметров профиля объектов // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2016. № 1. С. 90–93. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-yavleniya-difraktsii-sveta-na-tochnost-avtomatizirovannogo-protsessa-opredeleniya-geometricheskih-parametrov-profilya (дата обращения: 07.09.2026).

4. Мурашкина Т. И., Бадеев В. А., Хасаншина Н. А., Бадеев А. В., Дудоров Е. А. Моделирование параметров волоконно-оптического рефрактометрического преобразователя // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 1 (47). С. 22–31. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-parametrov-volokonno-opticheskogo-refraktometricheskogo-preobrazovatelya (дата обращения: 07.09.2026). DOI: 10.21685/2307-5538-2024-1-3.

5. Арзамасцева Г. В., Евтихов М. Г., Лисовский Ф. В., Мансветова Е. Г. Дифракция света на фракталах: сопоставление данных экспериментов с получаемыми численными методами Фурье – образами изображений объектов // РЭНСИТ. 2017. Т. 9. № 2. С. 221–229. URL: http://cplire.ru:8080/5218/ (дата обращения: 03.06.2026). DOI: 10.17725/rensit.2017.09.221.

6. Shen F., Wang A. Fast-Fourier-transform based numerical integration method for the Rayleigh – Sommerfeld diffraction formula // Applied Optics. 2006. Vol. 45. Is. 6. P. 1102–1110. DOI: 10.1364/AO.45.001102.

7. Налимов А. Г., Котляр В. В., Ханенко Ю. В. Расчет тремя методами интенсивности цилиндрического векторного пучка в остром фокусе // Компьютерная оптика. 2023. Т. 47. № 5. С. 734–741. URL: https://computeroptics.ru/KO/Annot/KO47-5/470507.html (дата обращения: 09.09.2026). DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1346.

8. Goodman J. W. Introduction to Fourier Optics. 4th ed. New York: W. H. Freeman, 2017. 564 p. ISBN 978-1319153045.

9. Heurtley J. C. Scalar Rayleigh – Sommerfeld and Kirchhoff diffraction integrals: a comparison of exact evaluations for axial points // Journal of the Optical Society of America. 1973. Vol. 63. Is. 8. P. 1003–1008. DOI: 10.1364/JOSA.63.001003.

10. Головашкин Д. Л. и др. Дифракционная компьютерная оптика / под ред. В. А. Сойфера. М.: Физматлит, 2007. 736 с. ISBN 978-5-9221-0845-4.

11. Макаров О. И., Шанин А. В., Корольков А. И. Интеграл Зоммерфельда в задачах моделирования дифракции акустических волн с помощью треугольной сетки // Акустический журнал. 2023. Т. 69. № 2. С. 129–145. URL: https://sciencejournals.ru/view-article/?j=akust&y=2023&v=69&n=2&a=Akust2360010Makarov (дата обращения: 03.06.2026). DOI: 10.31857/S0320791923600105.

12. Harris C. R., Millman K. J., van der Walt S. J., et al. Array programming with NumPy // Nature. 2020. Vol. 585. P. 357–362. DOI: 10.1038/s41586-020-2649-2.

13. Ильинский Р. Е. Моделирование дифракции света на полуплоскости методами геометрической оптики // Компьютерная оптика. 2025. Т. 49. № 1. С. 60–66. URL: https://computeroptics.ru/KO/Annot/KO49-1/490108.html (дата обращения: 03.06.2026). DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1394.

14. Гашенко Ю. В. Волоконно-оптическая информационно-измерительная система для определения плотности пожароопасных жидкостей: автореф. дис. … канд. техн. наук: 2.2.11. Пенза, 2025. 22 с. [Электронный ресурс]. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_013790460 (дата обращения: 03.06.2026).

15. Wagner R. E., Tomlinson W. J. Coupling efficiency of optics in single-mode fiber components // Applied Optics. 1982. Vol. 21. Is. 15. P. 2671–2688. DOI: 10.1364/AO.21.002671.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 004.8
DOI

CC BY 4.0

КОНТРАСТИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОБУЧЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Гиниятуллин В. М. ORCID ID 0000-0002-4686-2752

Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение высшего образования «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации», Москва, Российская Федерация, e-mail: fentazer@mail.ru

Анализ литературных источников показал, что методы постобработки (квантование, прунинг, кластеризация по весу и т. п.) обученных нейронных сетей весьма популярны, однако считается, что за упрощением структуры нейронной сети следует ухудшение качества работы. В представляемой статье показана принципиальная возможность преобразования рабочего хода обученной нейронной сети к целочисленному виду без потери точности. Сравнивались результаты готовых решений и собственных реализаций нейронных сетей в большинстве случаев с более простыми структурами (один скрытый слой). Исследовалось влияние округления параметров нейронной сети на качество работы и структуру сети. В ряде случаев наблюдалось улучшение качества. Округление до целых чисел всех параметров нейрона позволяет утверждать, что он формализует сложную многозначную логическую функцию. Например, при квантовании функции активации тангенс гиперболический, в минимальном варианте, нейрон может реализовать функцию смешанной логики (троичной на входе [-1, 0, +1] и бинарной на выходе). В общем случае логика будет большей значности, симметричной относительно нуля ([-n…0…+n]). Округление производится послойно, начиная со входа, поразрядно округляются аргументы скалярного произведения: вектор входов и матрица весов, затем округляются параметры выходного нейрона: вход и вектор весов. Входные аргументы можно округлить до 1-2 десятичных знаков после запятой, что вполне приводимо к целым числам. В ряде случаев удалось добиться обнуления столбцов и/или строк матриц весов, что эквивалентно удалению нейронов из матрицы весов и/или удалению аргументов из вектора входов, следовательно, сокращается размерность входа нейронной сети.

Ключевые слова: квантование, контрастирование, нейронная сеть, рабочий ход, точность, функции активации, многозначная логика

CONTRASTING THE PARAMETERS OF A TRAINED NEURAL NETWORK

Giniyatullin V. M. ORCID ID 0000-0002-4686-2752

Federal State Educational Budgetary Institution of Higher Education "Financial University under the Government of the Russian Federation", Moscow, Russian Federation, e-mail: fentazer@mail.ru

An analysis of literature sources has shown that post-processing methods (quantization, pruning, weight-based clustering, etc.) for trained neural networks are quite popular; however, it is believed that simplifying the structure of a neural network leads to a deterioration in performance. The present article demonstrates the fundamental possibility of converting the operational mode of a trained neural network to an integer form without losing accuracy. The results of off-the-shelf solutions and custom implementations of neural networks were compared; in most cases, the custom implementations had simpler structures (one hidden layer). The effect of rounding the parameters of a neural network on the quality of its performance and the network's structure was investigated. In some cases, an improvement in quality was observed. Rounding all the neuron's parameters to whole numbers allows us to assert that it formalizes a complex multivalued logical function. For example, when the activation function is quantized to the hyperbolic tangent, in the minimal version the neuron can implement a mixed-logic function (ternary at the input [-1, 0, +1] and binary at the output). In general, the logic will have greater significance, symmetric with respect to zero ([-n…0…+n]). Rounding is performed layer by layer, starting from the input; the arguments of the dot product are rounded bit by bit: the input vector and the weight matrix, then the parameters of the output neuron are rounded: the input and the weight vector. Input arguments can be rounded to 1–2 decimal places after the decimal point, which is quite convertible to integers. In some cases, it was possible to zero out the columns and/or rows of the weight matrices, which is equivalent to removing neurons from the weight matrix and/or removing arguments from the input vector; consequently, the input dimensionality of the neural network is reduced.

Keywords: quantization, contrast, neural network, operation, accuracy, activation functions, multivalued logic

Введение

Большие языковые модели (Large Language Models LLM), в настоящее время повсеместно внедряются в производственные процессы. В работе [1] предложена система анализа неструктурированных документов Docu Mind AI с использованием LLM. Интеграция методов оптического распознавания символов и синтаксического анализа обеспечивает поддержку графических и векторных форматов для запросов в режиме реального времени. В обзоре [2] рассматриваются задачи преобразования текста в SQL и SQL в текст для доступа к структурированным данным и анализируются возможности применения этих ме-

тодов в сфере кибербезопасности, малоресурсных систем управления базами данных и корпоративной аналитики. В работе [3] были сгенерированы комментарии к программному коду с помощью модели GPT-3.5, затем выявлялись ошибки с использованием набора данных Defects 4J. Предложенный подход позволяет обнаружить на 19–94% больше реальных ошибок, в зависимости от используемых метрик.

В [4] сравнивались модели CNN обнаружения, классификации и сегментации изображений с COVID-19, разработанная нейронная сеть достигает точности в 93%, что доказывает эффективность CNN в задачах диагностики и прогноза COVID-19. Целью исследования [5] была разработка и оценка LLM на основе Llama 3-8B для создания текстовых заключений по результатам магнитно-резонансной томографии и компьютерной томографии. Несмотря на то, что модель продемонстрировала высокую эффективность, такие её недостатки, как предвзятость в наборе данных, ограниченное разнообразие выборки, отсутствие клинического мышления и потребность в больших вычислительных ресурсах, требуют дальнейшей доработки и проверки в реальных условиях.

Целью исследования [6] было создание упрощенного и интерпретируемого показателя для отличия текстов, созданных LLM, от текстов, написанных человеком. Оценка показала, что разработанный критерий на основе триграмм-косинус-дельта неизменно демонстрировал наивысшую производительность в различных экспериментальных условиях, достигнув значения Adjusted Rand Index примерно 0,70, что выше базового показателя RuModernBERT (ARI ≈ 0,28).

В работе [7] использовались методы глубокого обучения для обнаружения вредоносного трафика, зашифрованного с помощью криптографии, без его расшифровки, что обеспечивает высокую точность обнаружения. Предлагается метод, сочетающий обработку естественного языка и машинное обучение, метод обнаружения на основе TF-IDF для построения модели обнаружения.

Для анализа сетевого трафика в [8] предложена архитектура Edge-Mamba, объединяющая линейную State Space-архитектуру (модель состояний) и дообучение (fine-tuning) на сетевых данных. Дана оценка переносимости между гетерогенными наборами данных. Показано, что без дообучения переносимость ограниченна (точность 65%), но при дообучении на 10% целевого набора данных точность восстанавливается до 99%. Это позволяет отнести дообучение к методам постобработки ИНС.

Некоторые методы квантования/округления предполагают преобразование дробных типов данных (таких, как float16, float32, float64) в целочисленные типы. Размерность полученных целочисленных коэффициентов всегда кратна байту, а вот их значения могут быть ограничены мощностью вплоть до единичных бит [9].

Результаты обзора [10] методов квантования, прунинга и дистилляции знаний показали, что постобучающее квантование может сократить размер модели в 3 раза и потерять не более 1.5% точности. Полученные результаты планируется использовать для дальнейшей оптимизации нейронных сетей, комбинирования методов квантования с другими методами и создания новых гибридных методов. Квантование эффективно для мобильных и IoT-устройств, где критичны требования к энергопотреблению и памяти.

В [11] рассматривается структурный прунинг без дообучения. Сеть ResNet-32 для задачи классификации CIFAR-10 удалось сократить в 4.5 раза при падении точности примерно на 10%. В работе [12] бесструктурным прунингом формировали разреженную рекуррентную нейронную сеть, которая используется в качестве модели цифрового корректора в задаче линеаризации СВЧ усилителя мощности. Разреженная модель имеет компактный вид и снижает вычислительную нагрузку на вычислителе.

Микроконтроллеры и устройства IoT [13] энергоэффективны и доступны по цене, но зачастую имеют ограниченный функционал, малый объем памяти и вычислительную мощность, а современные LLM модели могут иметь многие миллионы параметров. Это затрудняет развертывание LLM моделей на мобильных устройствах, повышает риск задержек и/или неэффективной обработки данных, что неприемлемо в приложениях автономного вождения или медицинской диагностике.

Метод сжатия [14] на основе факторизации низкого ранга с разложением по сингулярным числам разной степени сжатия снижает вычислительную нагрузку на большие языковые модели, но часто приводит к значительному снижению точности, даже при небольшой степени сжатия. Проверочные задачи показали, что при равномерном сжатии модели теряли важную синтаксическую и семантическую информацию. Для решения этой проблемы использовались алгоритмы взвешивания и фрагментарное сжатие избыточных частей модели.

В работе [15] на примере нейронной сети с функцией активации ReLu в одном

скрытом слое показано, что некоторые нейроны на выходе всегда выдают нулевое значение, они никогда не генерируют никакой информации, в рассмотренных датасетах такие нейроны обнаружены, и их доля доходила до 60%. Из этого следует вывод о необходимости поиска и удаления бесполезных нейронов после процедуры обучения нейронной сети.

Процедура квантования в настоящее время применяется для всех параметров нейронной сети, в частности под квантованием функций активации понимается ограничение разрядности результата непрерывных функции вплоть до целых чисел.

Цель исследования – демонстрация возможности квантования/контрастирования всех параметров нейронной сети, в том числе и входного вектора, и упрощения структуры ИНС в результате детального анализа результатов контрастирования без потери точности. Научная новизна исследования состоит в том, что при замене непрерывных функций активации на многозначные логические значность входа и выхода может различаться.

Материалы и методы исследования

В таблице 1 приведены характеристики рассматриваемых датасетов. Датасет DDoS Traffic расположен по адресу [16]. Строка «Dest IP» содержит адреса в форматах IPv4 и IPv6, а строка «Highest Layer» десять названий сетевых протоколов.

Столбцы датасета Water Quality and Potability [17] содержат дробные числа с точностью до 18 десятичных чисел, что явно избыточно. На сайте размещения (общедоступный ресурс kaggle) в обсуждениях этого датасета высказывается мнение, что он полностью синтетический.

Строковые и константные столбы датасета DDoS_Dataset [18] игнорируются, дробные типы данных отсутствуют, целевой параметр троичный.

Датасет UNSW_NB15 [19], в отличие от предыдущих, не сбалансирован по целевому параметру, который содержит перечислимый тип данных из десяти категорий.

В таблице 2 сравниваются структуры ИНС, их сложность убывает от первого столбца к последнему, в скрытых слоях используется функция активации ReLu.

Таблица 1

Характеристики датасетов

Название	Количество строк	Количество столбцов	Тип данных				Значность целевого столбца
			бинарный	целочисленный	дробный	перечислимый	
ddos-traffic	852585	9	3	3	1	2	2
Water	3276	10	1		9		2
DDoS_Dataset	151202	23	2	10		11	3
UNSW_NB15	130460	29	9	12	7	1	10

Примечание: составлено авторами на основе источников [16-19].

Таблица 2

Сравнение структур ИНС

Слой	UNSW_NB15	ddos-traffic	Water	DDoS_Dataset
Dense	256			
Dropout	0,3			
Dense	256	80		
Dropout	0,3	-		
Dense	128	40		
Dropout	0,3	-		
Dense	64	20	16	
Dropout	0,3	-	-	
Dense	12	10	8	5
Dense	10, softmax	1, sigmoid	1, sigmoid	1, sigmoid

Примечание: составлено авторами на основе источников [16-19].

ИНС UNSW_NB15 [20] содержит пять скрытых нейронных слоев и четыре слоя Dropout. Выходной слой содержит десять нейронов (по значности целевого параметра), функция активации softmax. После обучения значение Accuracy составляет 70,1%.

ИНС ddos-traffic [21] содержит четыре скрытых слоя, выходной нейрон бинарный, функция активации sigmoid. После обучения значение Accuracy составляет 94,42%.

В ИНС Water [22] два скрытых слоя нейронов, выход бинарный, функция активации sigmoid, упрощение структуры ИНС приводит к снижению Accuracy до 62,2%.

Самая простая ИНС – это DDoS_Dataset [23], всего один скрытый слой из пяти нейронов. Целевой столбец этого датасета троичный, но ИНС по выходу бинарная, прогнозируется наличие/отсутствие атаки. После обучения значение Accuracy составляет 100%.

Результаты исследования и их обсуждение

Исследование свойств процедуры квантования

В задачах бинарной классификации результат работы ИНС имеет битовый вид ИСТИНА/ЛОЖЬ, но до такого состояния огрубляется результат непрерывной функции активации выходного нейрона, аргументом которой является скалярное произведение векторов. Тогда представляется выгодным заменить непрерывную функцию активации на пороговую, а аргументы скалярного произведения огрубить соответствующим образом.

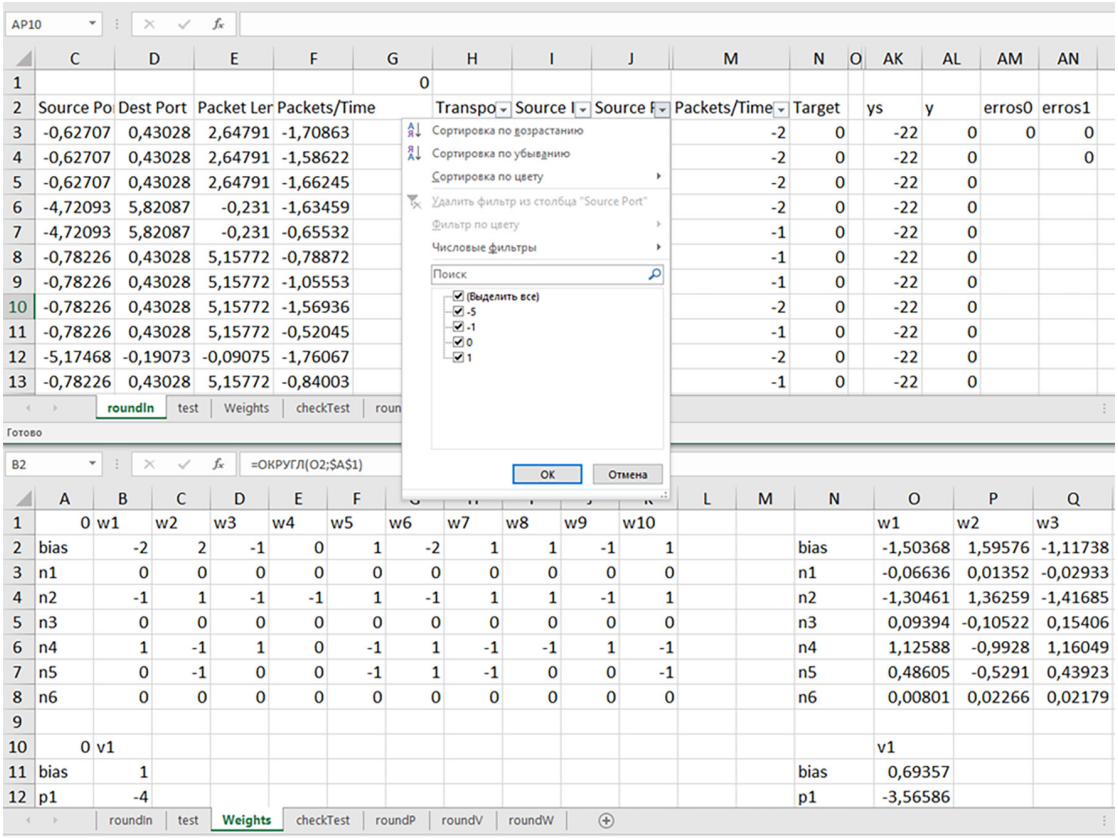
Для экспериментов с датасетом ddos-traffic была выбрана следующая структура ИНС: один скрытый слой в десять нейронов с функциями активации тангенс гиперболический, один нейрон в выходном слое с сигмоидальной функцией активации. Обучение нейронных сетей производилось с помощью библиотеки PyTorch, и было достигнуто значение Accuracy: 100.0%. Перед обучением датасет стандартными функциями библиотеки scikit-learn (scikit-learn.org/stable) разбивается на обучающую и тестовую выборки и масштабируется в дробных числах. Далее в электронных таблицах воспроизводился рабочий ход ИНС на тестовой выборке. На рис. 1 снимок экрана со страницей проверки вычислений.

AF3 =ЕСЛИ((1/(1+EXP(-AE3)))<0,5;0;1)

	B	G	H	I	J	S	T	U	AD	AE	AF	AG	AH
1	Transport	Packets/Ti	Target		ps1	ps10	bias	p1	p10	ys	y	erros0	erros1
2	0,32339	-1,70863	0		4,74722	-5,47473	1	0,99985	-0,99996	-21,8303	0	0	0
3	0,32339	-1,58622	0		4,7482	-5,48107	1	0,99985	-0,99997	-21,8302	0		0
4	0,32339	-1,66245	0		4,74759	-5,47712	1	0,99985	-0,99997	-21,8303	0		
42850	0,32339	-1,44109	1		-2,18032	1,84249	1	-0,97478	0,95103	21,6745	1		
42851	0,32339	0,83265	1		-2,16209	1,7248	1	-0,97386	0,93844	21,893	1		
42852	0,32339	-0,86202	1		-2,19673	1,85551	1	-0,97559	0,95226	21,8371	1		
42853	0,32339	0,3093	1		-2,23324	1,88863	1	-0,97729	0,95525	22,0442	1		
42854	0,32339	0,47569	1		-2,186	1,78627	1	-0,97506	0,94537	21,9481	1		
42855	0,32339	0,88909	1		-2,16158	1,72177	1	-0,97383	0,93808	21,8903	1		
42856	0,32339	1,0093	1		-2,16061	1,71554	1	-0,97378	0,93732	21,8834	1		
42857	0,32339	-0,23825	1		-2,23761	1,91692	1	-0,97748	0,95766	22,0186	1		
42858	0,32339	0,04029	1		-2,23538	1,90252	1	-0,97738	0,95645	22,0362	1		
42859	0,32339	-0,72202	1		-2,17448	1,80512	1	-0,97449	0,94733	21,8036	1		
42860	0,32339	0,98292	1		-2,16088	1,71701	1	-0,97379	0,9375	21,8852	1		
42861	0,32339	1,24239	1		-2,15875	1,70349	1	-0,97368	0,93584	21,8641	1		
42862	0,32339	-1,9703	1		-2,25154	2,00666	1	-0,97809	0,96449	21,7306	1		
42863	0,32339	1,11559	1		-2,1809	1,7532	1	-0,97481	0,94174	21,9219	1		
42864	0,32339	0,70438	1		-2,16307	1,73133	1	-0,97391	0,93921	21,8971	1		
42865	0,32339	-1,80611	1		-2,18321	1,86131	1	-0,97493	0,9528	21,5943	1		
42866	-3,09228	-2,11544	1		-2,07301	1,73975	1	-0,96884	0,9402	20,6501	1		
42867	0,32339	0,84291	1		-2,22898	1,86105	1	-0,97709	0,95278	22,0327	1		
42868	0,32339	0,82679	1		-2,1621	1,72503	1	-0,97386	0,93847	21,8932	1		
42869	0,32339	1,02396	1		-2,16051	1,71481	1	-0,97378	0,93724	21,8824	1		
42870	0,32339	-0,52118	1		-2,19397	1,83782	1	-0,97545	0,95059	21,8846	1		
42871	0,32339	-0,16495	1		-2,17006	1,77638	1	-0,97427	0,9443	21,8691	1		
42872	0,32339	-1,56643	1		-2,20239	1,892	1	-0,97586	0,95555	21,7048	1		
42873	0,32339	-1,45868	1		-2,24738	1,98006	1	-0,97791	0,96259	21,8425	1		
42874	0,32339	-0,84443	1		-2,17549	1,81152	1	-0,97454	0,94799	21,7849	1		
42875													

test | Weights | checkTest | roundP | roundV | roundW | roundIn

Рис. 1. Рабочий ход ИНС, функция tanh, датасет ddos-traffic
Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования



	C	D	E	F	G	H	I	J	M	N	O	AK	AL	AM	AN
1					0										
2	Source Po	Dest Port	Packet Ler	Packets/Time		Transpo	Source I	Source F	Packets/Time	Target		ys	y	erros0	erros1
3	-0,62707	0,43028	2,64791	-1,70863					-2	0		-22	0	0	0
4	-0,62707	0,43028	2,64791	-1,58622					-2	0		-22	0		0
5	-0,62707	0,43028	2,64791	-1,66245					-2	0		-22	0		
6	-4,72093	5,82087	-0,231	-1,63459					-2	0		-22	0		
7	-4,72093	5,82087	-0,231	-0,65532					-1	0		-22	0		
8	-0,78226	0,43028	5,15772	-0,78872					-1	0		-22	0		
9	-0,78226	0,43028	5,15772	-1,05553					-1	0		-22	0		
10	-0,78226	0,43028	5,15772	-1,56936					-2	0		-22	0		
11	-0,78226	0,43028	5,15772	-0,52045					-1	0		-22	0		
12	-5,17468	-0,19073	-0,09075	-1,76067					-2	0		-22	0		
13	-0,78226	0,43028	5,15772	-0,84003					-1	0		-22	0		

	A	B	C	D	E	F	L	M	N	O	P	Q
1	0	w1	w2	w3	w4	w5				w1	w2	w3
2	bias	-2	2	-1	0	1			bias	-1,50368	1,59576	-1,11738
3	n1	0	0	0	0	0			n1	-0,06636	0,01352	-0,02933
4	n2	-1	1	-1	-1	1			n2	-1,30461	1,36259	-1,41685
5	n3	0	0	0	0	0			n3	0,09394	-0,10522	0,15406
6	n4	1	-1	1	0	-1			n4	1,12588	-0,9928	1,16049
7	n5	0	-1	0	0	-1			n5	0,48605	-0,5291	0,43923
8	n6	0	0	0	0	0			n6	0,00801	0,02266	0,02179
9												
10	0	v1								v1		
11	bias	1							bias	0,69357		
12	p1	-4							p1	-3,56586		

Рис. 2. Округление входа, функция tanh, датасет ddos-traffic
Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования

В столбце A находятся смещения входного слоя, в столбцах B – G экземпляры тестовой выборки: Transport Layer, Source IP, Source Port, Dest Port, Packet Length, Packets/Time (часть столбцов скрыта). В тестовой выборке 42 874 строки, масштабирование входных значений с помощью функции StandardScaler из библиотеки scikit-learn приводит к тому, что бинарные столбцы кодируются в формате дробных чисел и не симметрично, например столбец B (Transport Layer) содержит значения 0,323385775 и -3,092281818. Столбец H содержит ожидаемое значение, столбцы J – S содержат результаты скалярного произведения входов на матрицу весов скрытого слоя, обозначены как ps1…ps10.

В столбце T находятся смещения (единицы) выходного нейрона, в столбцах U – AD результаты функции активации, тангенс гиперболический, обозначены как p1… p10 (часть столбцов скрыта). Столбец AE обозначен как ys, содержит результат скалярного произведения столбцов p1…p10 на вектор весов выходного нейрона. В столбце AF результат работы ИНС – это округление до целых чисел сигмоидальной функции (строка формул) выходного нейрона, ячейки AG2 и AH2 содержат сумму ошибок для классов 0 и 1 соответственно, в ячейке AH3 находится общая ошибка сети по всем классам. Обученная ИНС ни в обучающей, ни в тестовой выборке ни разу не ошибается.

Таблица весов скрытого слоя, страница Weights (нижняя часть рис. 2), округляется до пятизначности (ячейки B2 – K8), диапазон изменения [-2, -1, 0 1, 2]. В округленной таблице весов имеются нулевые строки: n1 (ячейки B3 – K3), n3 (ячейки B5 – K5) и n6 (ячейки B8 –K8).

Это означает, что соответствующие им аргументы Transport Layer, Source Port и Packets/Time необязательны. Более того в столбце w4 имеется всего одно не нулевое значение (ячейка E4), которое можно занулить без потери качества работы ИНС.

Контрастирование прямым ходом

Для экспериментов с датасетом Water Quality and Potability структура ИНС была упрощена, до десяти нейронов в единственном скрытом слое, функциями активации тангенс гиперболический и один нейрон в выходном слое с сигмоидальной функцией активации. Датасет делится на обучающую, тестовую и валидационную выборки в пропорции одна треть.

AN3 =СУММ(AM2:AN2)

	B	J	K	L	M	V	W	X	Y	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN
1	ph	Turbidity	Potability		ps1	ps10			p1	p10		ys	y		erros0	erros1
2	1,24601	1,93133	0		-0,14923	0,69475		1	-0,14813	0,60103		-0,11788	0		5	136
3	0,41938	1,35813	0		-0,12272	0,33628		1	-0,1221	0,32415		-0,53339	0			141
4	1,45082	0,0806	0		-0,89533	0,66232		1	-0,71402	0,5799		-0,44687	0			
378	-0,46524	0,06065	1		-0,32863	-0,02716		1	-0,31729	-0,02715		-0,26153	0			
379	-0,40599	1,23976	1		0,97388	0,32206		1	0,7504	0,31136		-0,56018	0			
380	0,08087	-0,27276	1		0,4208	0,23042		1	0,39761	0,22643		-0,01546	0			
381	-0,01121	-0,0184	1		1,0402	0,81298		1	0,77797	0,67123		-0,72908	0			
382	1,22648	0,01672	1		0,20134	0,1794		1	0,19867	0,1775		0,15464	1			
383	0,18429	0,47689	1		0,60289	-0,29739		1	0,5391	-0,28892		0,19104	1			
384	0,21501	1,88821	1		0,55372	-0,5931		1	0,5033	-0,53212		-0,49308	0			
385	0,74682	-0,731	1		0,32353	-0,36019		1	0,31269	-0,34538		-0,74985	0			
386	-0,33214	0,93097	1		0,65242	0,42959		1	0,5733	0,40498		0,06393	1			
387	-0,02811	0,7606	1		0,17669	-0,06818		1	0,17488	-0,06807		-0,27156	0			
388	-0,89026	-0,44127	1		1,31043	0,06707		1	0,86438	0,06697		-0,76538	0			
389	-1,08348	-2,80994	1		0,73953	-0,24029		1	0,62886	-0,23577		-0,47901	0			
390	-1,25274	0,86428	1		0,69039	0,81273		1	0,59823	0,67109		-0,40875	0			
391	2,01057	0,43231	1		-0,1006	0,77474		1	-0,10026	0,64968		-0,48532	0			
392	-0,26205	-2,26978	1		0,38053	0,74279		1	0,36316	0,63083		-0,43515	0			
393	-0,87919	0,12198	1		0,05411	0,53945		1	0,05405	0,49257		-0,2108	0			
394	2,15074	-1,41205	1		-0,49137	0,40738		1	-0,4553	0,38624		-0,02455	0			
395	1,40353	0,66698	1		-0,01111	0,07517		1	-0,01111	0,07503		0,22802	1			
396	0,69961	-0,34201	1		-0,46572	0,50715		1	-0,43473	0,46772		-0,4156	0			
397	0,15334	0,01246	1		0,41594	0,18945		1	0,3935	0,18721		-0,60557	0			
398	0,21656	-0,33788	1		1,31965	-0,06288		1	0,8667	-0,0628		-0,60403	0			
399	-0,76732	1,99704	1		-0,28417	0,05632		1	-0,27676	0,05626		-0,29275	0			
400	0,08957	-1,05584	1		0,05397	0,7028		1	0,05392	0,60614		-0,51582	0			
401	1,04938	0,19069	1		0,07952	0,40954		1	0,07935	0,38808		0,1639	1			
402	0,87582	0,52456	1		-0,611	-0,14194		1	-0,54483	-0,14099		-0,6724	0			
403	-0,19516	1,60159	1		0,32767	0,41573		1	0,31643	0,39332		-0,29919	0			
404	-0,85115	1,46771	1		0,43548	-0,02297		1	0,40989	-0,02297		-0,15753	0			

Рис. 3. Рабочий ход ИНС, функция tanh, датасет Water Quality and Potability
Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования

AS1672 {=МУМНОЖ(AG2:AQ2012;Weights!B14:B24)}

	A	I	J	K	S	T	U	V	AE	AI	AG	AH	AQ	AI	AS	AT	AI	AV	AW
1			2	ph	Turbidity	Potability		ps1	ps10		2	p1	p10		ys	y		erros0	erros1
2	1,24601	1,93133	1	1,25	1,93	0		-0,1518	0,6887		1	-0,15	0,6		-0,1133	0		36	676
3	0,41938	1,35813	1	0,42	1,36	0		-0,1229	0,3366		1	-0,12	0,32		-0,5319	0			712
4	1,45082	0,0806	1	1,45	0,08	0		-0,9164	0,6857		1	-0,72	0,6		-0,4281	0			
1665	1,52244	-1,01915	1	1,52	-1,02	1		0,041	-0,1609		1	0,04	-0,16		-0,4214	0			
1666	-0,29191	-0,11791	1	-0,29	-0,12	1		0,0152	-0,1563		1	0,02	-0,16		-0,4636	0			
1667	0,11108	-0,00549	1	0,11	-0,01	1		0,7247	-0,3371		1	0,62	-0,32		-0,4349	0			
1668	1,08588	0,07689	1	1,09	0,08	1		1,2751	0,7767		1	0,86	0,65		-0,2426	0			
1669	0,69013	0,95883	1	0,69	0,96	1		0,9614	0,3225		1	0,74	0,31		-0,3506	0			
1670	0,84706	-0,01794	1	0,85	-0,02	1		0,5792	-0,2362		1	0,52	-0,23		-0,4	0			
1671	0,22882	-2,31738	1	0,23	-2,32	1		-0,0411	-0,3575		1	-0,04	-0,34		-0,3735	0			
1672	-0,92709	-0,97277	1	-0,93	-0,97	1		0,4824	0,2008		1	0,45	0,2		0,0006	1			
1673	-0,27664	0,95736	1	-0,28	0,96	1		1,7199	-0,7016		1	0,94	-0,61		-0,8782	0			
1674	-0,41703	-1,69312	1	-0,42	-1,69	1		1,3119	0,3671		1	0,86	0,35		-0,816	0			
1675	0,06625	-0,0889	1	0,07	-0,09	1		0,4594	-0,6468		1	0,43	-0,57		-0,4244	0			

InputTrain | InputTest | Weights | checkTest | checkTestTrain | roundHidden | roundOutput

Готово

B14 =ОКРУГЛ(N14;A13)

	A	B	C	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X
13	2	v				v										
14	bias	-0,09			bias	-0,09464										
15	p1	0,27			p1	0,27285										
16	p2	0,3			p2	0,29754										
17	p3	0,19			p3	0,19436										
18	p4	0,33			p4	0,32924										
19	p5	0,67			p5	0,66584										
20	p6	0,2			p6	0,20426										
21	p7	0,4			p7	0,39835										
22	p8	0,39			p8	0,39001										
23	p9	0,36			p9	0,36										
24	p10	0,34			p10	0,33797										

InputTrain | InputTest | Weights | checkTest | checkTestTrain | roundHidden | roundOutput

Рис. 4. Округление выхода ИНС, функция tanh, датасет Water Quality
Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования

На тестовой выборке было достигнуто значение Accuracy: 65,0%. На рис. 3 представлен снимок экрана со страницей воспроизведения рабочего хода ИНС на тестовой выборке. В ячейке AM2 находится сумма ошибок по классу ноль, в ячейке AN2 – по классу один, общая сумма ошибок – в ячейке AN3. Количество и месторасположение ошибочных экземпляров совпадает с расчетным, следовательно, воспроизведение рабочего хода в электронных таблицах реализовано корректно.

Дальнейшие расчеты производятся на полной выборке из 2011 строк, суммарное количество ошибок 713, точность в процентах – 64,55%. Здесь и далее округления параметров ИНС производятся, начиная с входных аргументов.

Верхняя часть рис. 4 демонстрирует округление столбцов p1…p10 и весов выходного нейрона (нижняя часть рис. 4) до двух знаков после запятой, коэффициенты округления в ячейках AG1 и A13 соответственно. Качество работы ИНС улучшается на один экземпляр класса 1 (выделен в строке 1672, верхняя часть рис. 4). Единственность улучшения объясняется тем, что этот экземпляр находится ближе других к разделяющей плоскости, отрицательное его значение -0,00415, а положительное 0,0006.

Сокращение матриц весов

Для экспериментов с датасетом DDoS_Dataset структура ИНС была изменена, шесть нейронов в единственном скрытом слое, его функция активации тангенс гиперболический, один нейрон в выходном слое, функция активации тангенс гиперболический. На тестовой выборке было достигнуто значение Accuracy: 100,0%. В данном случае отсутствие атаки кодируется -1, тип атаки DDoS-ACK кодируется 0, тип атаки DDoS-PSH-ACK кодируется +1. Целевые категории можно кодировать четырьмя способами: отсутствие атаки ±1, а типы атак нулем и оставшейся единицей.

На рис. 5 демонстрируется округление входных аргументов до целых чисел и весов скрытого слоя до одного знака после запятой, коэффициенты округления в ячейках L1 и A1 соответственно, кроме того, принудительно обнулены коэффициенты третьего нейрона (вместе с bias) и первых двух аргументов.

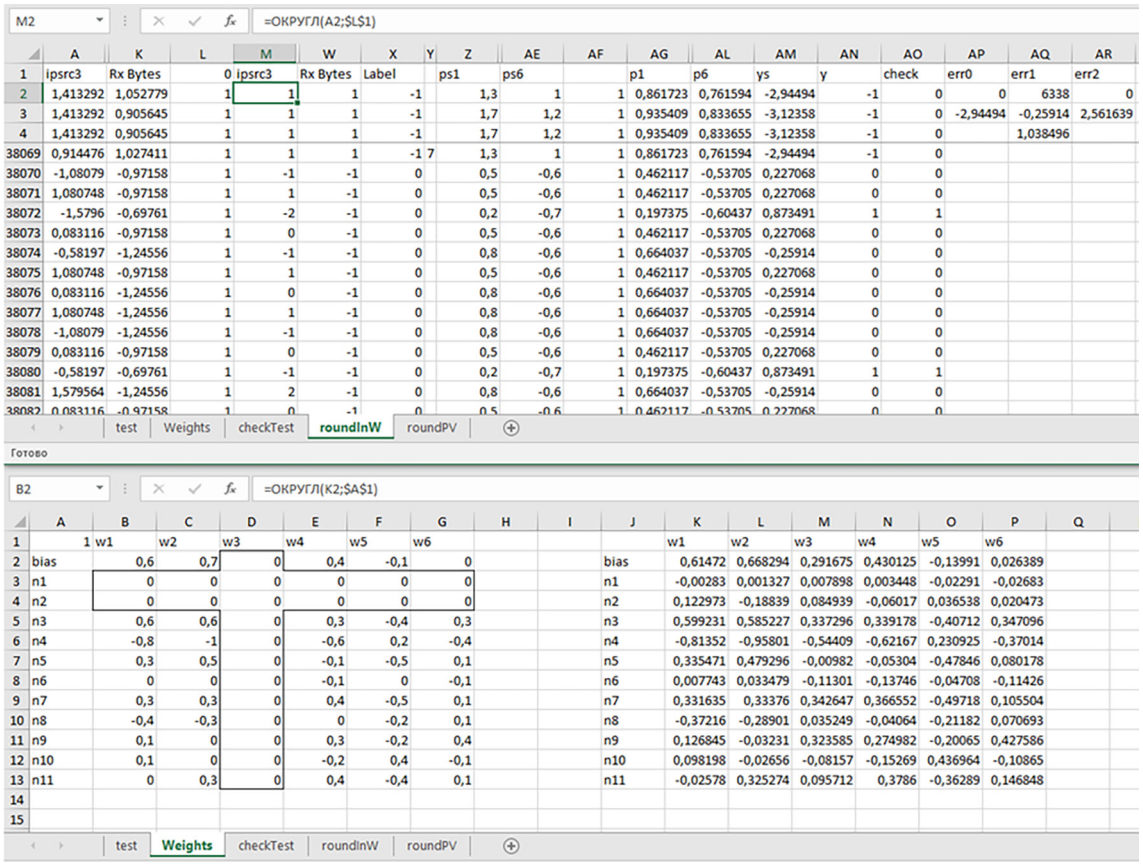


Рис. 5. Округление входов, выходная функция tanh, датасет DDoS_Dataset
Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования

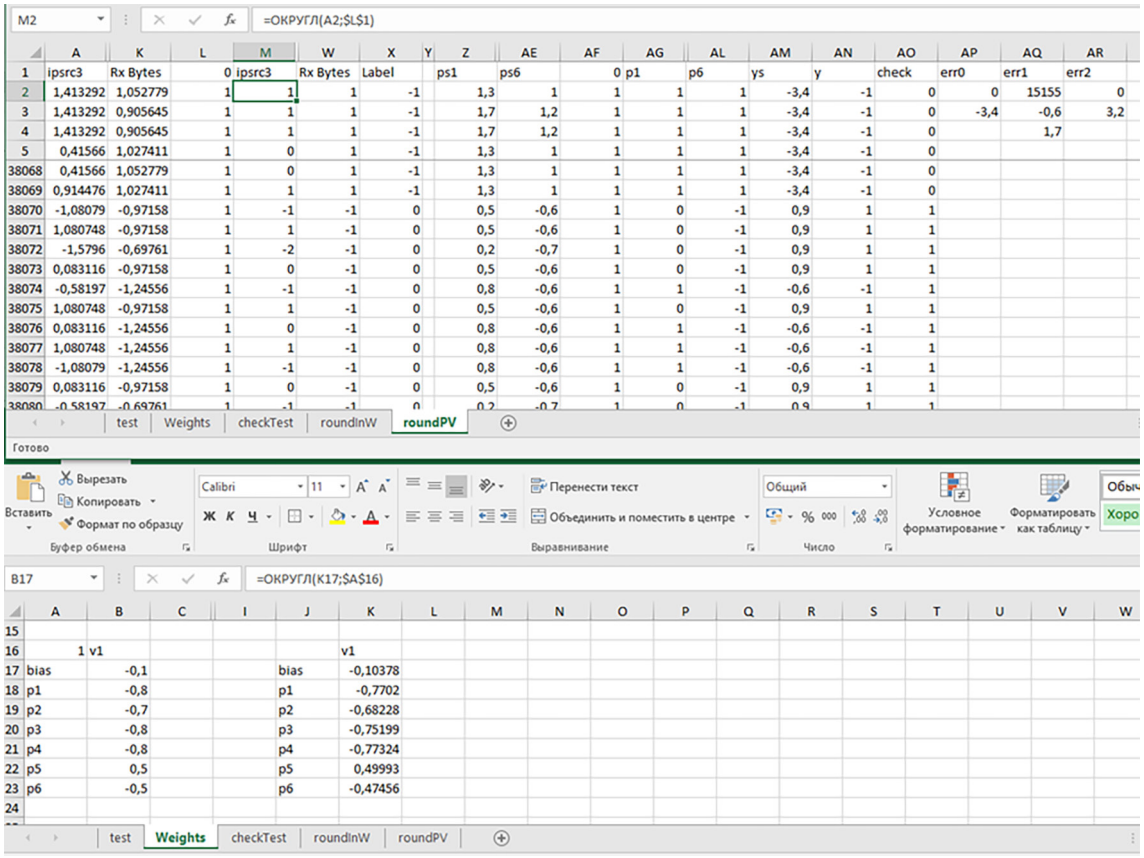


Рис. 6. Округление выхода, выходная функция tanh, датасет DDoS_Dataset
Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования

При этом тангенциальная функция активации на выходе фиксирует 6338 ошибок (ячейка AQ2). В ячейке AP3 находится максимальное значение скалярного произведения (столбец ys) для категории «нет атаки», в столбце AQ3 минимальное, а в ячейке AQ4 максимальное значение скалярного произведение для категории «атака DDoS-ACK», в ячейке AR3 минимальное значение скалярного произведения для категории «атака DDoS-PSH-ACK». Поскольку указанные диапазоны не пересекаются, то замена тангенса на пороговую, с более широкими границами, функцию активации вернет ИНС к безошибочному варианту.

Выскажем предположение, что обнулять коэффициенты матрицы скрытого слоя выгоднее по горизонтали (сокращая количество входных аргументов), например в строке n6 осталось всего два ненулевых веса.

На рис. 6 демонстрируется округление столбцов p1…p6 до целых чисел и весов выходного нейрона до одного знака после запятой, коэффициенты округления в ячейках AF1 и A16 соответственно. При этом пороговая функция активации на выходе фиксирует 15 155 ошибок (ячейка AQ2). В ячейке AP3 находится максимальное значение скалярного произведения (столбец ys) для категории «нет атаки», в столбце AQ3 минимальное, а в ячейке AQ4 максимальное значение скалярного произведения для категории «атака DDoS-ACK», в ячейке AR3 минимальное значение скалярного произведения для категории «атака DDoS-PSH-ACK». Поскольку указанные диапазоны не пересекаются, то замена тангенса на пороговую, с более широкими границами, функцию активации вернет ИНС к безошибочному варианту.

Контрастирование ИНС на примере многоклассового датасета

Для экспериментов с датасетом UNSW_NB15 структура ИНС была упрощена: десять нейронов в единственном скрытом слое с функциями активации тангенс гиперболический, один нейрон в выходном слое с функцией активации ReLu.

Было достигнуто значение Accuracy в 62.0%, не распознаются атаки DoS, Shellcode, Worms и Reconnaissance, полученный результат несколько хуже, чем у исходной ИНС, в которой имеется 5 скрытых слоев и 726 нейрона (суммарно).

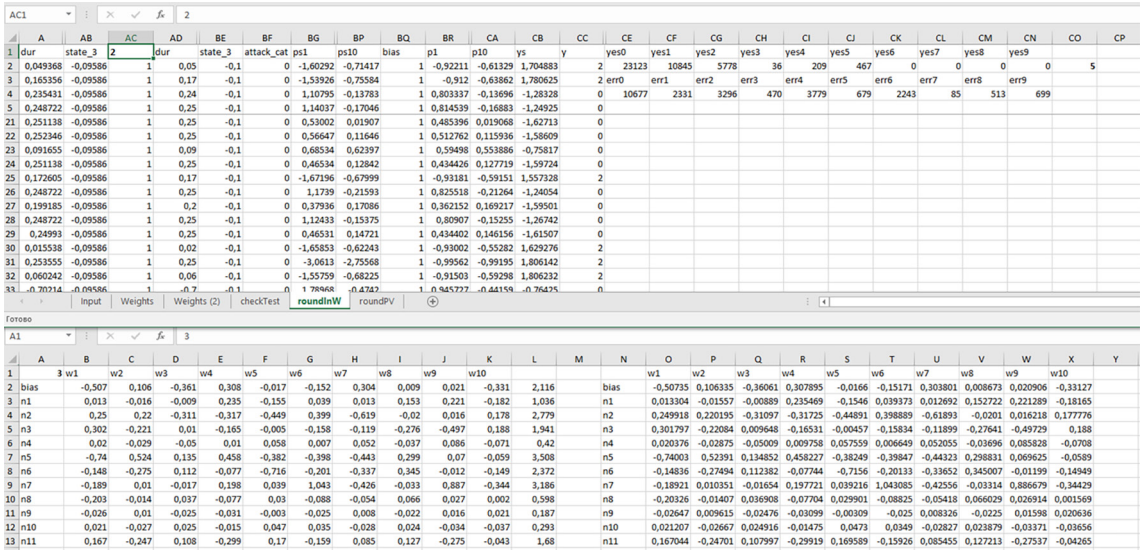


Рис. 7. Округление входа, функция tanh, датасет UNSW_NB15
Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования

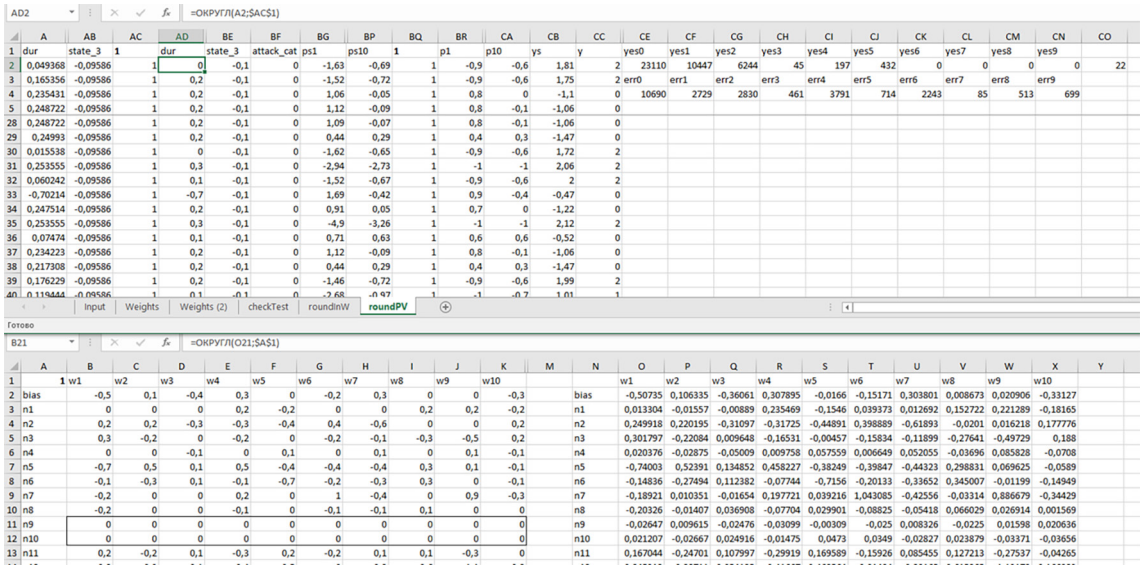


Рис. 8. Удаление входных аргументов, функция tanh, датасет UNSW_NB15
Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования

На рис. 7 снимок экрана с округлением входных аргументов до двух знаков после запятой и весов скрытого слоя до трех знаков после запятой, коэффициенты округления в ячейках AC1 и A1 соответственно. При этом количество правильно опознанных экземпляров увеличивается на пять штук (ячейка CO2).

При повторном округлении (рис. 8) параметров нейронной сети до одного знака (веса выходного слоя не приведены для экономии места) суммарный выигрыш в 17 экземпляров по классам распределяется неравномерно, для класса 1 количество ошибок увеличивается на 398 экземпляров. Такое округление результата тангенса (столбцы p1…p10) можно заменить ступенчатой функцией активации в 21 категорию, от -1 до +1 с шагом 0,1 по вертикали. По горизонтали шаг переменный, это можно объяснить нелинейностью функции активации. На рис. 8 выделены строки, с коэффициентами матрицы первого скрытого слоя, которые обнулились в результате округления. Кроме того, имеются строки с небольшим количеством значащих коэффициентов, их обнуление также возможно. Это означает, что можно сократить мерность входного пространства алгоритмически.

Заключение

Контрастирование/округление может применяться ко всем параметрам ИНС, в том числе и ко входу. На практике контрастирование входа производится последовательным уменьшением количества значащих цифр после запятой и в матрице весов скрытого слоя, и в векторах входов.

Замена непрерывных функций активаций на ступенчатые приводит к использованию многозначных логических функций, значность которых может различаться по входу и выходу.

Методика преобразования рабочего хода ИНС в целочисленный вид предполагает сохранение/повышение достигнутой при обучении точности.

Список литературы

1. Asad A. Sh., Khan F. M. Docu Mind Ai – Intelligent Document Analysis System // Indian Journal of Computer Science and Technology. 2025. Vol. 4. Is. 3. P. 06-11. URL: https://www.indjcst.com/archives/docu-mind-ai-intelligent-document-analysis-system (дата обращения: 10.07.2026). DOI: 10.59256/indjcst.20250403002.

2. Sangamnerkar B., Namdev S. Lightweight and Data-Efficient Fine-Tuning of Language Models for Bidirectional Text-To-Sql and Sql-To-Text Tasks: A Systematic Review // Advanced International Journal for Research. 2025. Vol. 6. Is. 6. P. 1-6. DOI: 10.63363/aijfr.2025.v06i06.2745.

3. Hossain S.B., Taylor R., Dwyer M. Doc2oracll: Investigating the impact of Documentation on Llm-Based Test Oracle Generation // Proceedings of the Acm on Software Engineering. 2025. Vol. 2. Is. FSE. Article № FSE084. P. 1870-1891. URL: https://dl.acm.org/doi/10.1145/3729354 (дата обращения: 10.07.2026). DOI:10.1145/3729354.

4. Tharsanee R. M., Soundariya Rs, Saran Kumar A., Karthiga Ms. Deep Convolutional Neural Networke-Based Image Classification for Covid-19 Diagnosis // Data Science for Covid-19. 2021. Vol. 5. P. 117–145. URL: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8137809 (дата обращения: 10.09.2026). DOI: 10.1016/B978-0-12-824536-1.00012-5.

5. Voinea Ș. V., Mămuleanu M., Teică R. V., Florescu L. M., Selișteanu D., Gheonea I. A. Gpt-Driven Radiology Report Generation With Fine-Tuned Llama 3 // Bioengineering. 2024. Vol. 11. № 10. Article 1043. DOI: 10.3390/bioengineering11101043.

6. Salnikov E., Bonch-Osmolovskaya A. Detecting Llm-Generated Text With Trigram-Cosine Stylometric Delta: An Unsupervised and Interpretable Approach // Journal of Language and Education. 2025. Vol. 11. № 3. P. 138-151. URL: https://jle.hse.ru/article/view/22211 (дата обращения: 10.07.2026). DOI:10.17323/jle.2025.22211.

7. Yang H., He Q., Liu Zh., Zhang Q. Malicious Encryption Traffic Detection Based On Nlp // Security and Communication Networks. 2021. Vol. 2021. Article ID 9960822. 10 pages. URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1155/2021/9960822 (дата обращения: 10.07.2026). DOI:10.1155/2021/9960822.

8. Здорников Е. О., Попов И. Ю. Ресурсно-Эффективное Обнаружение Сетевых Атак С Использованием Селективной State Space Models // Научно-Технический Вестник Информационных Технологий, Механики и Оптики. 2026. Т. 26. № 1. С. 94-103. URL: https://ntv.elpub.ru/jour/article/view/568 (дата обращения: 10.07.2026). DOI: 10.17586/2226-1494-2026-26-1-94-103.

9. Benoit Jacob, Skirmantas Kligys, Bo Chen, Menglong Zhu, Matthew Tang, Andrew Howard, Hartwig Adam, Dmitry Kalenichenko, Quantization and Training of Neural Networks for Efficient Integer-Arithmetic-Only Inference, in Proceedings of The Ieee Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2018. P. 2704–2713. DOI: 10.1109/CVPR.2018.00286.

10. Татарникова Т. М., Раскопина А. С. Анализ эффективности постобучающего квантования для оптимизации нейронных сетей // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2025. Т. 17. № 2. С. 4-10. URL: http://www.h-es.ru/images/archive/Nom-2-2025.pdf (дата обращения: 10.07.2026). DOI: 10.36724/2409-5419-2025-17-2-4-10.

11. Пушкарева М. М., Карандашев Я. М. Сокращение нейронной сети Resnet-32 с применением структурного прунинга и направленного дропаута // Труды НИИСИ РАН. 2021. Т. 11. № 2. С. 20-25. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47272380 (дата обращения: 10.07.2026). DOI: 10.25682/niisi.2021.2.0003.

12. Аверина Л. И., Гутерман Н. Е., Хайдаров А. А. Методы разреживания двунаправленной LSTM модели цифрового корректора // Журнал Радиоэлектроники. 2025. № 12. DOI: 10.30898/1684-1719.2025.12.6.

13. Khan S. A., Shulepina S., Shulepin D., Lukmanov R. A. Review of Algorithmic Solutions for Deployment of Neural Networks on Lite Devices // Computer Research and Modeling. 2024. Vol. 16. № 7. P. 1601-1619. URL: https://crm.ics.org.ru/journal/article/3557 (дата обращения: 10.07.2026). DOI: 10.20537/2076-7633-2024-16-7-1601-1619.

14. Pletenev S. Probing the Pitfalls: Understanding Svd's Shortcomings in Language Model Compression // Journal of Language and Education. 2024. Vol. 10. № 4. P. 85-97. URL: https://jle.hse.ru/article/view/22368 (дата обращения: 10.07.2026). DOI: 10.17323/jle.2024.22368.

15. Яковлев А.С., Шаякберов Э.В., Гиниятуллин В.М. Вариативность алгоритма обучения нейронных сетей Wide Learning // Программная инженерия. 2025. Т. 16. № 3. С. 134-143. DOI: 10.17587/prin.16.134-143.

16. Ördekçi O. DDoS-трафик // Kaggle. [Электронный ресурс]. URL: https://www.kaggle.com/datasets/oktayrdeki/ddos-traffic-dataset (дата обращения: 10.07.2026).

17. Tharmalingam L. Water Quality and Potability // Kaggle. [Электронный ресурс]. URL: https://www.kaggle.com/datasets/uom190346a/water-quality-and-potability/data (дата обращения: 10.07.2026).

18. Trap Bushali. DDoS_Dataset // Kaggle. [Электронный ресурс]. URL: https://www.kaggle.com/datasets/trapbushali/ddos-dataset (дата обращения: 10.07.2026).

19. Skvortsov M. Unsw_Nb15_Prepared // Kaggle. [Электронный ресурс]. URL: https://www.kaggle.com/datasets/mikhailskvortsov/unsw-nb15-prepared (дата обращения: 10.07.2026).

20. Unsw_Nb15_Dl_Models. [Электронный ресурс]. URL: https://kaggle.com/code/mikhailskvortsov/unsw-nb15-dl-models (дата обращения: 10.07.2026).

21. DDOS Attack Classification. [Электронный ресурс]. URL: https://kaggle.com/code/govindbhatter/ddos-attack-classification (дата обращения: 10.07.2026).

22. Water Potability – NN. [Электронный ресурс]. URL: https://kaggle.com/code/ashishk1331/water-potability-nn (дата обращения: 10.07.2026).

23. DEV II. [Электронный ресурс]. URL: https://kaggle.com/code/trapbushali/dev-ii (дата обращения: 10.07.2026).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Статья подготовлена по результатам исследований, выполненных за счет бюджетных средств по государственному заданию Финуниверситета.

Financing: The article was prepared based on the results of research carried out at the expense of budgetary funds on the state assignment of the Financial University.

УДК 519.688
DOI

CC BY 4.0

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ДВИЖУЩЕГОСЯ АППАРАТА ПО АНОМАЛЬНОМУ МАГНИТНОМУ ПОЛЮ ЗЕМЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКИХ МЕТОДОВ

Каткова Е. А. ORCID ID 0009-0000-5392-5312

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: st133284@student.spbu.ru

Рассмотрена задача определения координат движущегося аппарата по цифровой карте аномального магнитного поля Земли, без использования внешнего источника навигационной информации. Целью работы является тестирование нечеткого алгоритма решения этой задачи и соответствующего программного кода на заданной области коррекции. Идея нечеткого алгоритма состоит в построении эталонных траекторий аппарата по точкам карты области коррекции, в которых значения модуля аномальной магнитной индукции (или других навигационных параметров) наиболее соответствуют значениям, измеренным в процессе его движения. Сопоставление значений поля, измеренного и эталонного, осуществляется после их фазификации посредством вычисления нечетких мер сходства. Взвешенный центр масс конечных точек эталонных траекторий с наибольшей суммарной мерой сходства дает искомые координаты. Предложенный метод определения местоположения аппарата отличается вычислительной простотой. В отличие от классических алгоритмов он не требует предварительной статистической обработки данных карты, линеаризации модели измерений, не ограничен информативностью навигационного поля. Полученные расчетные результаты показали устойчивость нечеткого алгоритма по отношению к изменению интервалов неопределенности для измеряемых и эталонных значений модуля аномальной магнитной индукции.

Ключевые слова: аномальное поле, нечеткое число, нечеткие сравнения

LOCATION OF A MOVING APPARATUS BY THE EARTH'S ANOMALOUS MAGNETIC FIELD USING FUZZY METHODS

Katkova E. A. ORCID 0009-0000-5392-5312

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Saint Petersburg State University", Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: st133284@student.spbu.ru

The problem of determining the coordinates of a moving apparatus using a digital map of the Earth's anomalous magnetic field, without using an external source of navigation information, has been considered. The aim of the work is to test a fuzzy algorithm for solving this problem and the corresponding software code on a given correction area. The idea behind the fuzzy algorithm is to construct reference trajectories of the apparatus based on points in the map of the correction area, where the values of the anomalous magnetic induction module (or other navigation parameters) most closely correspond to the values measured during its movement. The comparison of the measured and reference field values is carried out after their fuzzification by calculating fuzzy similarity measures. The weighted center of mass of the end points of the reference trajectories with the highest total similarity measure yields the required coordinates. The proposed method for determining the apparatus location is computationally simple. Unlike classical algorithms, it does not require preliminary statistical processing of map data, linearization of the measurement model, and is not limited by the informativeness of the navigation field. The obtained calculation results demonstrated the stability of the fuzzy algorithm with respect to changes in the uncertainty intervals for the measured and reference values of anomalous magnetic induction module.

Keywords: anomalous field, fuzzy number, fuzzy comparisons

Введение

Накопленный опыт применения глобальных навигационных спутниковых систем выявил не только их очевидные преимущества, но и недостатки: зависимость от электромагнитной обстановки, возможность постановки радиопомех и создания ложных сигналов, позволяющих захватывать управление различными движущимися аппаратами. По этой причине вновь стали актуальны разработки автономных навигационных систем.

Классическое решение для автономной навигации – применение инерциальных навигационных систем (ИНС), дающих «грубые» координаты движущегося аппарата, и использование для корректировки этих координат данных о параметрах различных геофизических полей [1; 2, с. 8–35; 3].

Подходящим, в смысле автономной навигации, является аномальное (связанное с поверхностным слоем Земли) магнитное поле. Очевидно, что оно доступно в любой точке, его практически невозможно намеренно заблокировать или исказить, особенно на расстоянии, оно не зависит от времени суток, сезона и т. д. Проблемой, однако, являются различные естественные возмущения магнитного поля, к которым можно

отнести временные изменения, суточные колебания, магнитные бури. Так, если естественные вариации магнитного поля в спокойные периоды не превосходят 5–20 нТл, то во время магнитных бурь они достигают 100–500 нТл [4]. Существуют также проблемы неточности и неполноты измерений его параметров. Для решения проблемы нестабильности значений навигационного поля могут быть использованы два подхода.

Первый – фильтровать навигационные данные. Так поступила, например, компания SandboxAQ (USA) с навигационной системой AQNav (Quantum – AI Navigation System, 2024 год) [5].

Второй – рассматривать навигационные данные как нечеткие величины с учетом ошибок измерения, картографирования и возможных флуктуаций. Такой подход был предложен автором этой статьи в работах [6; 7].

Цель исследования – тестирование нечеткого алгоритма и программного кода для определения местоположения движущегося аппарата по аномальному магнитному полю Земли в заданной области коррекции.

Материалы и методы исследования

Идея нечеткого алгоритма автономной навигации состоит в построении эталонной траектории по точкам карты области коррекции, в которых значения модуля аномальной магнитной индукции (или других параметров навигационного поля) наиболее соответствуют значениям, измеряемым вдоль траектории движения аппарата. Сопоставление значений поля, измеренного и эталонного, осуществляется после их фазификации посредством вычисления нечетких мер сходства [8, с. 158].

Пусть имеем некоторую траекторию в заданной области коррекции, вдоль которой проводятся измерения геофизического поля f_k^* в моменты времени t_k, и пусть имеется цифровая карта поля $f_n(\varphi_n,\lambda_n)$, соответствующая высоте/глубине траектории движения аппарата. Здесь φ_n – географическая широта, λ_n – долгота n-й точки.

Пусть $S_k^* = (\varphi_k^*,\lambda_k^*)$ – выдаваемые ИНС координаты местоположения в моменты проведения измерений, а r_k – максимальная погрешность ИНС в данной точке маршрута. Для каждой точки S_k^*, начиная с первой, рассмотрим поисковую окрестность O_k с центром в точке S_k^* и радиусом r_k. Пусть S_k – множество точек карты, попадающих в поисковую окрестность O_k, а f_k – множество значений поля в этих точках (далее – эталонные данные). Преобразуем четкие значения поля из множества f_k и измеренное значение f_k^* в нечеткие и выполним их попарные нечеткие сравнения, результатами которых являются меры сходства сравниваемых значений.

Для фазификации (введения нечеткости) четких значений поля здесь использовались треугольные функции принадлежности. Однако интервалы неопределенности, определяющие ширину носителей функций принадлежности нечетких значений карты $\Delta_э$ и измеренных значений $\Delta_и$ рассматривались отдельно, а не объединялись в один, как в [6; 7]. Считалось, что величина $\Delta_э$ определяется ошибкой картографирования, а $\Delta_и$ задается ошибкой измерения и оценкой возможных флуктуаций магнитных аномалий во время измерений. Такой подход к фазификации представляется более простым и не менее эффективным, чем рассмотренный ранее в [7] способ через введение лингвистической переменной [9].

Обозначим $\delta_{изм}$ – оценку абсолютной погрешности измерения значений поля с учетом девиации; $\delta_ф$ – оценку амплитуды флуктуаций поля, некомпенсируемых при автономном движении. Тогда оценка максимальной ожидаемой неопределенности измеряемого значения поля может быть получена по формуле

$$\Delta_и = 2\cdot(\delta_{изм} + \delta_ф). \quad (1)$$

Следует отметить, что абсолютная погрешность измерений современных магнитометров не превосходит нескольких нТл. При корректной установке датчика и стабильной калибровке влияние магнитных свойств конструкции аппарата также обычно мало [4]. Основной вклад в неопределенность измеряемого значения поля вносит величина $\delta_ф$, обусловленная, например, магнитной бурей. Сложность оценки $\delta_ф$ состоит в том, что магнитные бури имеют различные интенсивности (в том числе в зависимости от географической широты), различные частоты и фазы, то есть для различных областей оценки $\Delta_и$ будут различны. В рассмотренной задаче величина $\Delta_и$ менялась в диапазоне 100–400 нТл. Предполагалось, что интервал неопределенности $\Delta_и$ = 100 нТл с учетом ошибки измерения соответствует слабым флуктуациям, например, суточным колебаниям, а интервал неопределенности $\Delta_и$ = 400 нТл –возможным флуктуациям во время магнитных бурь в средних широтах.

Погрешность картографирования, определяющая неопределенность эталонных данных, тоже может изменяться в широком диапазоне значений. Пусть $\Delta_э$ также принадлежит интервалу 100–400 нТл.

Треугольные функции принадлежности нечетких эталонных $B_э$ и измеренных $B_и$ значений поля даются формулой

$$\mu_b(x) = max\left(0{,}1 - \frac{|x-b|}{\omega}\right), \quad (2)$$

где $b = B_э$, $\omega = \Delta_э / 2$ или $b = B_u$, $\omega = \Delta_u / 2$.

Индекс Жаккара для этих функций принадлежности определяется по формуле

$$J = \frac{\int_R \min\left(\mu_{B_u}(u), \mu_{B_э}(u)\right) du}{\int_R \max\left(\mu_{B_u}(u), \mu_{B_э}(u)\right) du}. \quad (3)$$

Следует отметить, что индекс Жаккара симметричен и интерпретируется как отношение пересечения и объединения площадей, ограниченных функциями принадлежности рассматриваемых нечетких чисел.

Тогда меру сходства нечетких измеренного и эталонного значений поля предлагается вычислять по формуле

$$\nu\left(B_u, B_э\right) = k \cdot J, \quad (4)$$

где k – нормировочный коэффициент, т. ч. $\nu\left(B_u, B_э\right) \in [0,1]$.

Для описанных выше треугольных функций принадлежности с различными носителями Δ_u и $\Delta_э$:

$$k = 1 / J_{max}, \quad (5)$$

где J_{max} – отношение ширины меньшего интервала неопределенности к ширине большего.

В случае произвольных функций принадлежности для вычисления мер сходства нечетких значений поля может быть рассмотрен двухэтапный подход. На первом этапе через индекс Жаккара вычисляется мера сходства только для их носителей, и если она превосходит некоторое пороговое значение, то на втором этапе уже сравниваются соответствующие функции принадлежности. При этом для сравнения функций принадлежности на втором этапе рекомендуется использовать другую нечеткую меру, например метрическую.

Далее переходим к построению эталонных траекторий. Обозначим через A_k подмножества множеств S_k у которых вычисленная мера сходства выше некоторого заданного уровня. Рассмотрим все возможные отрезки, соединяющие точки соседних множеств A_k и A_{k+1}. Если отрезок удовлетворяет характеристикам реальной траектории по скорости аппарата (длине отрезка) и углу от направления на север с учетом соответствующих погрешностей, то он рассматривается как участок эталонной траектории.

Искомые координаты аппарата на выходе из области коррекции дает конечная точка эталонной траектории с наибольшей суммарной мерой сходства по всем измерениям. Если таких траекторий в заданной области коррекции несколько, координаты искомой точки определяются как взвешенный по мерам сходства центр масс их конечных точек.

В качестве эталонных данных могут быть рассмотрены цифровые карты для определенных регионов [10]. Общедоступными являются данные всемирной карты магнитных аномалий WDMAM [11; 12], которые загружаются в текстовом формате для выбранной пользователем территории. WDMAM имеет разрешение 3 угловые минуты для высоты 5 км над эллипсоидом WGS84. Для перерасчета карты на заданную высоту/глубину могут быть использованы специальные программы, например Geomag-IMP [13].

Результаты исследования и их обсуждение

Пусть аппарат движется прямолинейно в области коррекции между 55°35’ и 55°56’ с. ш., 37° и 37°20’ в. д. Считаются заданными скорость аппарата, азимут и погрешности их определения. Заданы координаты ИНС точек вдоль траектории аппарата, в которых считается измеренным модуль аномальной магнитной индукции. Значения параметров модели приведены в табл. 1, их следует рассматривать как условные, поскольку не ставилась задача привязки к аппарату конкретного вида. При моделировании использовалась готовая цифровая карта аномалий магнитного поля для указанной области коррекции, при уменьшении шага сетки проводилась интерполяция кубическими сплайн-функциями.

Координаты аппарата на выходе из области коррекции, полученные по результатам расчетов, приведены в табл. 2. Координаты аппарата, моделируемые по заданным измерениям поля: (55°54’, 37°10’).

По результатам табл. 1 были вычислены средняя абсолютная ошибка (6), среднеквадратичная ошибка (7), выборочная дисперсия оценок (8). Результаты расчетов показаны в табл. 3.

$$MAE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|\hat{x}_i - x_{ист}\right|, \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\hat{x}_i - x_{ист}\right)^2}, \quad (7)$$

$$s^2 = \frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}\left(\hat{x}_i - \bar{x}\right)^2, \bar{x} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\hat{x}_i, \quad (8)$$

где $\hat{x}_i$ – оценки истинного значения $x_{ист}$

Таблица 1

Исходные данные

Параметр	Значение
Шаг сетки карты, географическая минута	1; 0,5; 0,25
Скорость аппарата, км/ч	200 ± 10
Азимут траектории, градус	18,5 ± 0,5
Координаты ИНС, (широта, долгота)	(55°38’, 37°05’) (55°43’, 37°08’) (55°48’, 37°11’) (55°53’, 37°14’)
Измерения модуля аномальной магнитной индукции, нТл	300,5 0,3 202 299
Радиус поисковой окрестности, географическая минута	5
Ширина интервалов неопределенности $\Delta_и$, $\Delta_э$ нТл	100, 200, 300, 400

Примечание: составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 2

Результаты расчетов координат аппарата

Шаг сетки, минуты	$\Delta_э$, нТл	$\Delta_и$, нТл	Координаты, град, мин		Значения ошибок			
			φ	λ	$\Delta\varphi$, град	$\Delta\lambda$, град	$\Delta\varphi$, м	$\Delta\lambda$, м
0,25	100	100	55°54,250’	37°10,250’	0,00417	0,00416	463,4	259,6
	100	200	55°54,188’	37°10,125’	0,00314	0,00208	349,0	129,8
	100	300	55°54,277’	37°10,220’	0,00461	0,00367	512,3	229,0
	100	400	55°54,352’	37°10,422’	0,00587	0,00703	652,3	438,7
	200	200	55°54,250’	37°10,250’	0,00417	0,00416	463,4	259,6
	200	300	55°54,250’	37°10,207’	0,00416	0,00345	462,3	215,3
	200	400	55°54,332’	37°10,249’	0,00553	0,00415	614,6	259,0
	300	300	55°54,250’	37°10,250’	0,00417	0,00416	463,4	259,6
	300	400	55°54,215’	37°10,109’	0,00359	0,00182	399,0	113,6
	400	400	55°54,250’	37°10,250’	0,00417	0,00416	463,4	259,6
0,5	100	100	55°54,500’	37°10,500’	0,00834	0,00833	926,8	519,8
	100	200	55°54,500’	37°11,164’	0,00834	0,01939	926,8	1209,9
	100	300	55°54,499’	37°11,095’	0,00831	0,01824	923,5	1138,2
	100	400	55°54,622’	37°11,490’	0,01036	0,02483	1151,3	1549,4
	200	200	55°54,500’	37°11,159’	0,00834	0,01932	926,8	1205,6
	200	300	55°54,379’	37°10,760’	0,00631	0,01266	701,2	790,0
	200	400	55°54,499’	37°11,081’	0,00832	0,01801	924,6	1123,8
	300	300	55°54,378’	37°10,756’	0,0063	0,01259	700,1	785,6
	300	400	55°54,378’	37°10,757’	0,0063	0,01262	700,1	787,5
	400	400	55°54,499’	37°11,097’	0,00832	0,01828	924,6	1140,7
1	100	100	55°54,500’	37°11,500’	0,00834	0,025	926,8	1560,0
	100	200	55°54,500’	37°11,500’	0,00834	0,025	926,8	1560,0
	100	300	55°54,500’	37°11,500’	0,00833	0,025	925,7	1560,0
	100	400	55°54,662’	37°11,662’	0,01104	0,0277	1226,9	1728,5
	200	200	55°54,500’	37°11,500’	0,00834	0,025	926,8	1560,0
	200	300	55°54,500’	37°11,500’	0,00834	0,025	926,8	1560,0
	200	400	55°54,500’	37°11,500’	0,00834	0,025	926,8	1560,0
	300	300	55°54,500’	37°11,500’	0,00834	0,025	926,8	1560,0
	300	400	55°54,500’	37°11,500’	0,00834	0,025	926,8	1560,0
	400	400	55°54,500’	37°11,500’	0,00833	0,025	925,7	1560,0

Примечание: составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 3

Оценки ошибок

Шаг сетки, минуты	*MAE*		*RMSE*		*s*	
	$\Delta\varphi$, м	$\Delta\lambda$, м	$\Delta\varphi$, м	$\Delta\lambda$, м	$\Delta\varphi$, м	$\Delta\lambda$, м
0,25	484,3	242	491,9	256,4	91	174
0,5	880,6	1025	890,9	1063,4	136	567
1	956,6	1576,8	960,9	1577,7	91	100

Примечание: составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 4

Сравнение разброса оценок координат с размером ячейки

Шаг сетки, минуты	Размер ячейки		s	*s* / ячейка
	$\Delta\varphi$ / $\Delta\lambda$, м	*eucl*, м	*eucl*, м	
0,25	463/259	531	196	0,37
0,5	926/519	1062	583	0,55
1	1852/1037	2123	135	0,06

Примечание: составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования

Сравнение полученной выборочной дисперсии с размером ячейки в терминах евклидовой метрики ($\sqrt{\Delta\varphi^2 + \Delta\lambda^2}$) дано в табл. 4.

По результатам расчетов, показанных в табл. 2–4, можно сделать следующие выводы.

1. Как и следовало ожидать, наиболее точные оценки местоположения аппарата после прохождения заданной области коррекции могут быть получены на сетке с шагом 0,25*'*. Это связано не с уточнением данных карты, а с более точным учетом геометрических погрешностей участков эталонных траекторий, что также подтверждается характером изменения оценок координат: при шаге 1 минута они «связаны» с одним узлом сетки, при уменьшении шага сетки оценки координат начинают изменяться между соседними узлами.

2. Среднеквадратичная ошибка оценок координат для сетки с шагом 0,25*'* в евклидовой метрике составляет ~555 м.

3. При наибольшей разнице ширин интервалов неопределенности для измеренного и эталонного значений карты наблюдается наибольшая ошибка определения положения аппарата при любом шаге сетки карты.

4. Сравнение разброса оценок координат (по статистике s^2) с размером ячейки карты свидетельствует об устойчивости нечеткого метода к изменениям ширин интервалов неопределенности.

5. В рассмотренном вычислительном эксперименте полученные оценки координат характеризуются положительным смещением (в большей мере по долготе) относительно моделируемого положения аппарата. При использовании нечеткого метода на практике следует либо проводить предварительный расчет для заданных области коррекции и характеристик движения аппарата с целью вычисления систематического смещения, учет которого значительно повысит точность определения координат, либо комбинировать нечеткий алгоритм с другим методом. Например, сначала применить нечеткий метод, а после уменьшения ошибки ИНС до ошибки нечеткого метода, использовать расширенный фильтр Калмана [14; 15].

Для наглядности некоторые полученные расчетные результаты показаны на рис. 1–3. На всех рисунках нижняя прямая изображает траекторию аппарата по данным ИНС, лежащие выше отрезки – участки возможных эталонных траекторий. Точками внутри поисковых окрестностей отмечены те узлы сетки, в которых мера сходства соответствующих нечеткого измеренного и эталонного значений модуля аномальной магнитной индукции выше порогового значения, равного 0,4.

Для оценки вычислительной сложности рассмотренного нечеткого алгоритма введем обозначения: N – полное число точек на карте области коррекции, M – число точек внутри одной поисковой окрестности (зависит от шага сетки карты и радиуса), C – число поисковых окрестностей.

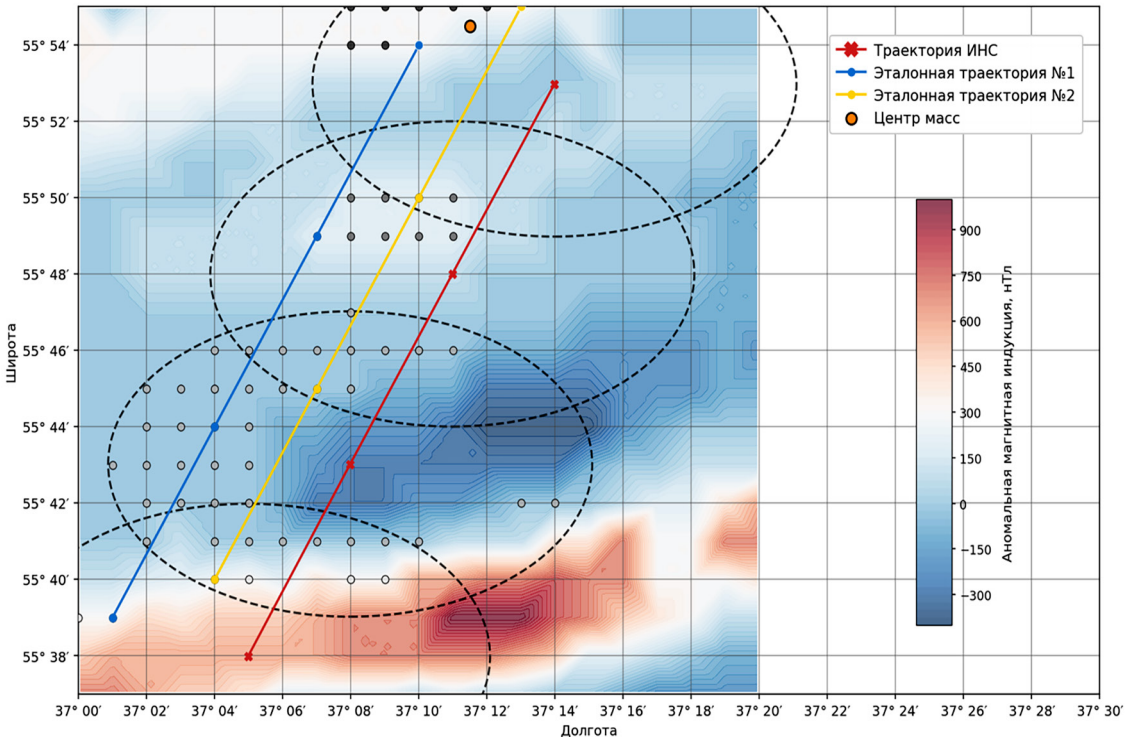


Рис. 1. Построение эталонных траекторий на карте магнитных аномалий области коррекции с шагом сетки 1' ($\Delta_э$ = 200 нТл, $\Delta_и$ = 300 нТл)
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

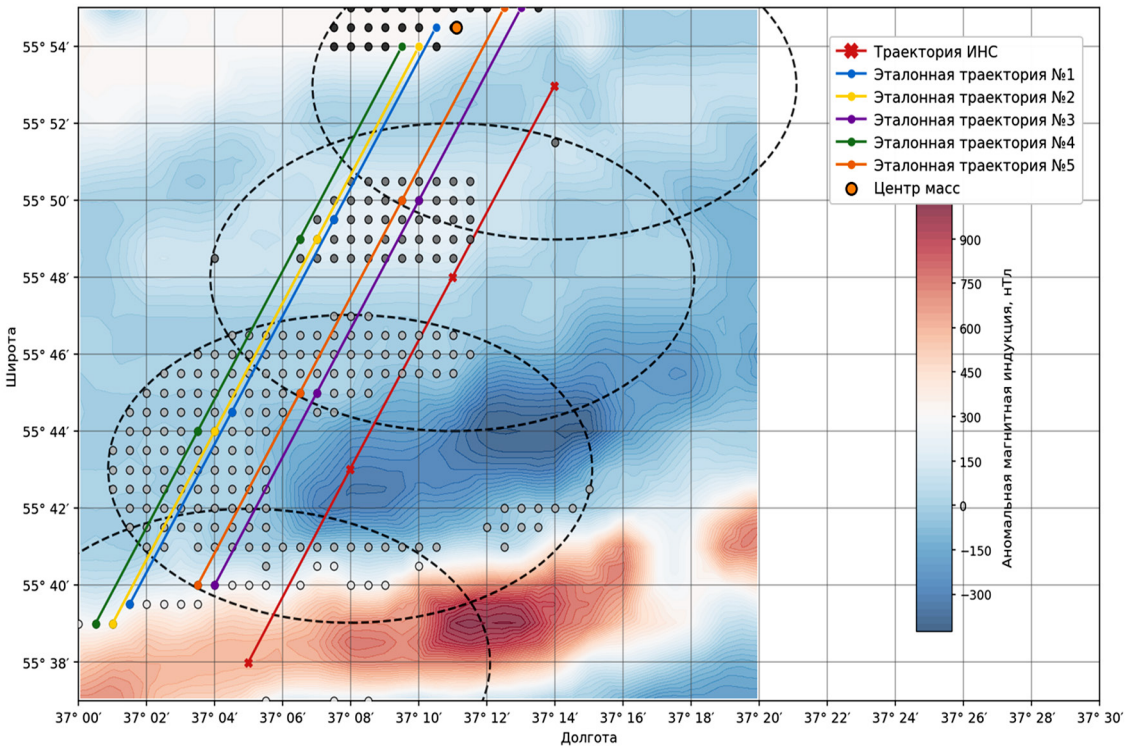


Рис. 2. Построение эталонных траекторий на карте магнитных аномалий области коррекции с шагом сетки 0,5' ($\Delta_э$ = 400 нТл, $\Delta_и$ = 400 нТл)
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

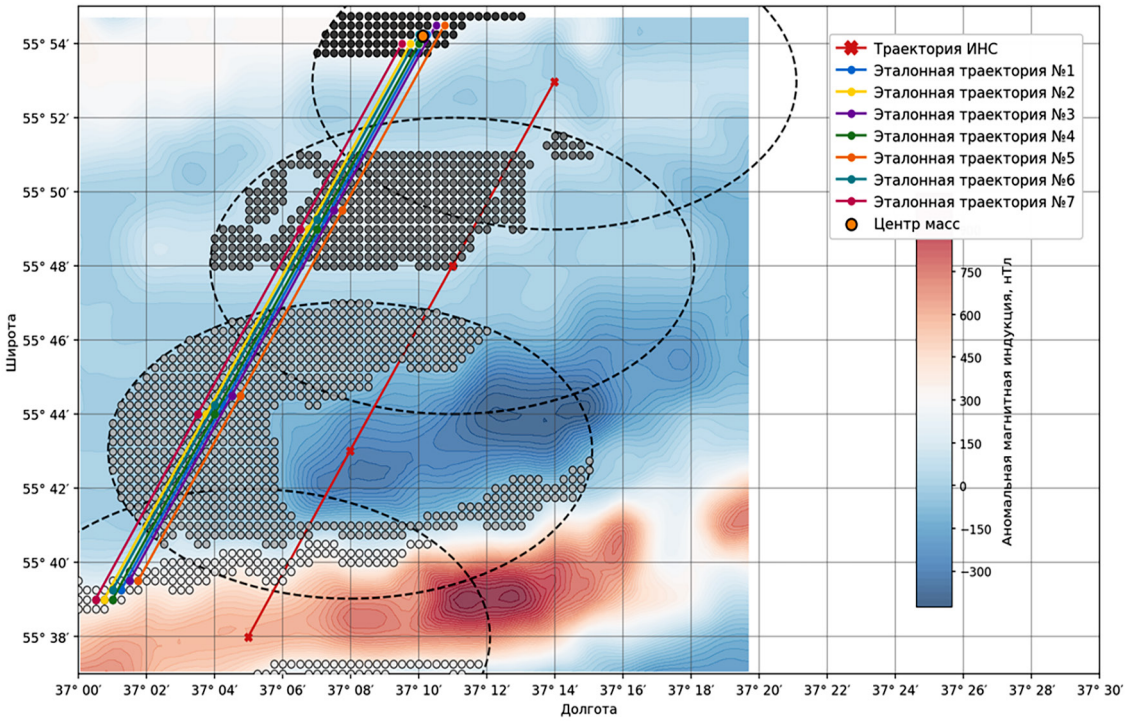


Рис. 3. Построение эталонных траекторий на карте магнитных аномалий области коррекции с шагом сетки 0,25' ($\Delta_э$ = 300 нТл, $\Delta_и$ = 400 нТл)
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

Учитывая, что сложность одной операции нечеткого сравнения, вычисления углового отклонения и длины участка эталонной траектории оценивается как $O(1)$, можно дать следующие оценки сложности основных функций алгоритма:

− загрузка данных – $O(N)$;

− отбор точек карты, попадающих в поисковые окрестности, – $O(CN)$;

− отбор «лучших» (по результатам нечетких сравнений) точек внутри всех поисковых окрестностей – $O(CM)$;

− построение участков эталонных траекторий по отобранным точкам соседних окрестностей – $O(CM^2)$;

− ранжирование эталонных траекторий – $O(1)$

Тогда итоговая оценка по доминирующим членам – $O(C(N+M^2))$.

Заключение

Рассмотрены результаты работы нечеткого алгоритма и программного кода для определения местоположения движущегося аппарата по аномальному магнитному полю Земли в заданной области коррекции. Результаты расчетов подтверждают работоспособность нечеткого метода и его устойчивость к изменению интервалов неопределенности для измеряемых и эталонных значений модуля аномальной магнитной индукции.

Предложенный нечеткий алгоритм определения местоположения аппарата отличается вычислительной простотой, при этом он не ограничен информативностью навигационного поля, не требует предварительной статистической обработки данных карты или линеаризации модели измерений поля, как классические алгоритмы корреляционно-экстремальных навигационных систем.

Список литературы

1. Джанджгава Г. И., Герасимов Г. И., Августов Л. И. Навигация и наведение по пространственным геофизическим полям // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 3 (140). С. 74–84. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/navigatsiya-i-navedenie-po-prostranstvennym-geofizicheskim-polyam (дата обращения: 15.09.2026).

2. Белоглазов И. Н., Джанджгава Г. И., Чигин Г. П. Основы навигации по геофизическим полям. М.: Наука, 1985. 328 с. [Электронный ресурс]. URL: https://djvu.online/file/pN72BP2UqRlrP (дата обращения: 13.09.2026).

3. Каршаков Е. В., Павлов Б. В., Тхоренко М. Ю., Папуша И. А. Перспективные системы навигации летательных аппаратов с использованием измерений потенциальных физических полей // Гироскопия и навигация. 2021. Т. 29. № 1 (112). С. 32–51. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivnye-sistemy-navigatsii-letatelnyh-apparatov-s-ispolzovaniem-izmereniy-potentsialnyh-fizicheskih-poley?ysclid=mtfr9h3ld0788202060 (дата обращения: 17.09.2026). DOI: 10.17285/0869-7035.0055.

4. Орлова И. П. Методы и технологии магнитной навигации: современное состояние и направления развития // Наука и технологические разработки. 2025. Т. 104. № 2. С. 27–52. DOI: 10.21455/std2025.2-2.

5. Sandbox AQ. [Электронный ресурс]. URL: https://www.sandboxaq.com/solutions/aqnav (дата обращения: 23.09.2026).

6. Каткова Е. А. О методах решения задачи автономной навигации по аномальному магнитному полю Земли // Инженерный вестник Дона. 2026. № 4. URL: https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2026/10973 (дата обращения: 05.06.2026).

7. Гришкин В. М., Каткова Е. А. Методы нечеткой логики в задаче автономной навигации по параметрам пространственных геофизических полей // Современные наукоемкие технологии. 2026. № 2. С. 17–22. DOI: 10.17513/snt.40665.

8. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. М.: Лаборатория знаний, 2024. 801 с. [Электронный ресурс]. URL: https://www.litres.ru/book/andzhey-pegat/nechetkoe-modelirovanie-i-upravlenie-6651373/?ysclid=mtn47yk6i501056884 (дата обращения: 15.09.2026). ISBN 978-5-93208-782-4.

9. Орлов А. В. Нечетко-ассоциативный метод обработки сенсорных данных мобильного робота // Вестник Московского государственного технического университета им. Баумана. Серия «Приборостроение». 2007. № 1. С. 74–85. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/nechetko-assotsiativnyy-metod-obrabotki-sensornyh-dannyh-mobilnogo-robota (дата обращения: 24.07.2026).

10. Интермагнет. Международная сеть магнитных обсерваторий. [Электронный ресурс]. URL: https://intermagnet.org/ (дата обращения: 12.09.2026).

11. Jean-Francois Oehler, Didier Rouxel and Marie-Francoise Lequentrec-Lalancette. Comparison of global geomagnetic field models and evaluation using marine datasets in the north-eastern Atlantic Ocean and western Mediterranean Sea. Earth, Planets and Space. 2018. Vol. 70. Art. 99. DOI: 10.1186/s40623-018-0872-y.

12. Dyment J., Lesur V., Hamoudi M., Choi Y., Thebault E., Catalan M., The WDMAM Task Force, the WDMAM Evaluators and the WDMAM Data Providers. World Digital Magnetic Anomaly Map version 2.0. [Электронный ресурс]. URL: https://wdmam.org (дата обращения: 20.08.2026).

13. Программа геомагнетизма Геологической службы США Интерполированные магнитные возмущения (Geomag-IMP). [Электронный ресурс]. URL: https://code.usgs.gov/ghsc/geomag/geomag-imp (дата обращения: 20.09.2026).

14. Степанов О. А., Торопов А. Б. Методы нелинейной фильтрации в задаче навигации по геофизическим полям. Ч. 1. Обзор алгоритмов // Гироскопия и навигация. 2015. Т. 23. № 3 (90). С. 102–125. URL: https://elektropribor.spb.ru/wp-content/uploads/2025/10/102_Степанов_Торопов.pdf (дата обращения: 20.09.2026). DOI: 10.17285/0869-7035.2015.23.3.102-125.

15. Степанов О. А., Торопов А. Б. Методы нелинейной фильтрации в задаче навигации по геофизическим полям. Ч. 2. Современные тенденции развития // Гироскопия и навигация. 2015. Т. 23. № 4 (91). С. 147–159. URL: https://elektropribor.spb.ru/4_2015/ (дата обращения: 20.09.2026). DOI: 10.17285/0869-7035.2015.23.4.147-159.

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest.

Финансирование: Автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 519.6:532.529.5
DOI

CC BY 4.0

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ МЕЖФАЗНОЙ ГРАНИЦЫ МЕЖДУ ПОТОКАМИ ЖИДКИЙ ЭЛЕКТРОЛИТ – ГАЗ

[1]Кашапов Н. Ф. ORCID ID 0000-0002-1185-4605, [1, 2]Пушкарёв Ю. И., [1, 2]Чебакова В. Ю. ORCID ID 0000-0002-0785-3861

[1]Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», Институт механики и машиностроения, Казань, Российская Федерация;
[2]Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет», Казань, Российская Федерация, e-mail: vchebakova@mail.ru

С появлением альтернативных источников энергии, таких как ветровые и солнечные электростанции, возникает вопрос хранения электроэнергии для обеспечения стабильного и бесперебойного электроснабжения. Наиболее активно разрабатываются мембранные и гибридные редокс-батареи, но интерес представляют и безмембранные технологические решения. Этот тип батарей основан на несмешиваемости ламинарных потоков перекачиваемых реагентов. Граница раздела между двумя потоками работает как проводник протонов/ионов. Цель работы – рассмотреть возможность конфигурирования безмембранной прокачки реагентов типа «газ – жидкость», на поведение которых влияет скорость их подачи. В этом случае поверхность раздела фаз обеспечивает ионный перенос между металлическим и воздушным электродами, в результате чего на воздушном катоде происходит трехфазная граничная реакция (твердое тело – жидкость – газ). В данной работе исследовалось, насколько стабильна площадь зоны раздела сред при прокачке реагентов в разных фазах – жидкого электролита и газового потока – как одного из немаловажных факторов взаимодействия трехфазной граничной реакции. Моделирование проводилось в пакете COMSOL Multiphysics в гидродинамическом приближении. Показано, что объем камеры прокачки, уровень жидкости, вязкость, плотность и поверхностное натяжение электролита определяют стабильность границы раздела фаз. Пересечение диапазонов значений этих параметров, при которых возможна стабильная работа проточных редокс-батарей, ограничено, что затрудняет их масштабирование. Сделан вывод о необходимости введения пористого электрода для прокачки одного из взаимодействующих электролитов.

Ключевые слова: безмембранные проточные редокс-батареи, взаимодействие потоков, граница раздела фаз

NUMERICAL STUDY OF THE BEHAVIOR OF THE INTERFACIAL BOUNDARY BETWEEN LIQUID ELECTROLYTE – GAS FLOWS

[1]Kashapov N. F. ORCID ID 0000-0002-1185-4605, [1, 2]Pushkarev Yu. I., [1, 2]Chebakova V. Yu. ORCID ID 0000-0002-0785-3861

[1]Federal State Budgetary Institution of Science "Federal Research Center 'Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences" Institute of Mechanics and Mechanical Engineering, Kazan, Russian Federation;
[2]Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Kazan (Volga Region) Federal University", Kazan, Russian Federation, e-mail: vchebakova@mail.ru

With the emergence of alternative energy sources such as wind and solar power plants, the issue of electricity storage has arisen to ensure a stable and uninterrupted power supply. While membrane and hybrid redox flow batteries are the most actively developed technologies, membraneless solutions are also of interest. This type of battery relies on the immiscibility of laminar flows of pumped reactants; the interface between the two streams acts as a proton or ion conductor. The aim of this study is to examine the feasibility of configuring a membraneless system with gas-liquid reactant flows, where behavior is influenced by flow velocity. In this setup, the phase interface facilitates ion transport between the metal and air electrodes, triggering a three-phase boundary reaction (solid-liquid-gas) at the air cathode. The study investigated the stability of the interface area–a critical factor in the three-phase reaction–during the simultaneous flow of liquid electrolyte and gas. Modeling was performed using the COMSOL Multiphysics software package within a hydrodynamic framework. The results demonstrate that the flow chamber volume, liquid level, and the electrolyte's viscosity, density, and surface tension determine the stability of the phase interface. The range of parameter values allowing for stable flow battery operation is limited, which complicates system scaling. The study concludes that incorporating a porous electrode for the flow of one of the interacting electrolytes is necessary.

Keywords: membraneless redox flow batteries, flow interactions, phase separation zone

Введение

Проточные редокс-батареи (ПРБ) основаны на окислительно-восстановительном взаимодействии прокачиваемых электролитов, содержащих электроактивные элементы (редокс-пары). В большинстве разрабатываемых конфигураций электролиты разделены полупроводящей мембраной. Мембраны, разграничивающие потоки реагирующих между собой электролитов в проточных редокс-батареях, часто являются наиболее дорогостоящими и наименее надежными компонентами батарей, поскольку они могут подвергаться коррозии при многократном воздействии определенных реагентов. Поэтому предлагается использовать прокачку реагентов без мембраны, основываясь на несмешиваемости ламинарных потоков. Такие ПРБ называются безмембранными. Электролиты в них протекают параллельно, практически не смешиваясь. Поток естественным образом разделяет жидкости, устраняя необходимость в мембране, это возможно при прокачке электролитов с разной вязкостью [1, 2], а также при использовании в качестве одного из реагентов газовой фазы [3]. При этом в ранних работах преобладало предположение прокачки двух несмешиваемых потоков электролитов при отсутствии мембраны между ними, в дальнейшем интерес вызвали безмембранные батареи, в которых редокс-анолит и католит ограничены несмешивающимися водными и неводными фазами [4].

Так, например, электрохимический элемент, основанный на реакции ванадия и кислорода, был получен путем замены положительной полуячейки на воздушный электрод [5]. Известны цинковые металл-воздушные батареи, где электролитом металл-воздушной батареи является жидкий раствор (обычно на водной основе), который обеспечивает ионный транспорт между металлическим и воздушным электродом, и на воздушном катоде происходит трехфазная граничная реакция (твердое тело – жидкость – газ) [6]. Реакционная зона состоит из двух взаимопроникающих подсистем: гидрофобной подсистемы, в которой диффундирует кислород, и гидрофильных микроканалов, в которых транспортируются ионы металла и образуются реакционные участки, обеспечивающие реакцию восстановления кислорода (РВК). Кислород или воздух является наиболее рассматриваемым реагентом в силу доступности, а парой к нему стали металлы, например водные цинк-воздушные батареи [7].

Также аспект взаимодействия струи электролита с электроактивной плазмой разряда и металлическим электродом представляет интерес для струйных разрядов с жидкими электродами [8–10]. Влияние электролита и его паров исследовалось в работе [11].

Цель исследования – рассмотреть возможность конфигурации безмембранной прокачки реагентов типа газ – жидкость, на поведение которых влияет скорость их подачи.

Материалы и методы исследования

Численное моделирование проточных редокс-батарей имеет несколько подходов. Первый подход основан на теории электрохимии, где процессы моделируют с помощью основных электрохимических законов для расчета перенапряжения и значения плотности тока на электродах, связывая два электрода дополнительными параметрами, например коэффициентом переноса заряженных частиц. Такой подход позволяет наиболее полно учесть процессы на электродах, однако слабо отражает процессы на межфазной границе между несмешиваемыми электролитами [12–14]. Авторами описывается влияние процессов выделения цинка (как граничных условий) на распределение компонент электролита в межэлектродном пространстве [15]. Второй подход составляет гидродинамическое приближение, где упор делается на моделирование движения электролита, при этом теряя большую часть электрохимических реакций взаимодействия редокс-пар и реакции их появления в электролите [1]. Большой интерес представляет совмещение этих двух подходов [16, 17].

В данной работе исследовалось, насколько стабильна площадь взаимодействия жидкого и «нежидкого» электролита, как одного из немаловажных факторов взаимодействия трехфазной граничной реакции (твердое тело – жидкость – газ), поэтому остановились на гидродинамическом подходе. Моделирование проводилось в пакете COMSOL Multiphysics. Геометрия моделируемой ячейки представляет собой прямоугольную трубу с двумя отдельными входами для прокачки потоков газ – жидкость. Геометрия двумерной модели учитывала высоту трубы (учитывалось соотношение высоты жидкости и газа в ней) и ее протяженность. Стоит отметить, что 2D-модель хорошо описывает только начальные стадии, но не способна корректно воспроизвести трехмерные эффекты, которые возникают позже, например появление поперечных структур. Также в 3D нелинейный рост неустойчивости происходит быстрее, чем в 2D. Это означает, что волны в реальности нарастают и переходят в следующий режим при меньших скоростях газа, чем предсказывает 2D-модель, но такой пере-

ход требует кратно больших вычислительных ресурсов. В качестве прокачиваемых реагентов для модельной задачи брались вода и воздух. Кислород и воздух являются наиболее используемыми реагентами в металл-воздушных проточных редокс-батареях [18–20], тогда как в гибридных редокс-батареях в качестве электролитов используют щелочные и кислые водные растворы [21, 22]. Устойчивость границы раздела фаз определяется балансом динамического давления газа и стабилизирующих сил. Обобщенное условие возникновения волн на границе раздела фаз в ограниченном канале можно представить в виде упрощенного соотношения [23]:

$$\rho_g U_g^{\,2} \cdot cth(kh_g) \approx (\rho_l - \rho_g)g + \sigma k^2 + V, \quad (1)$$

где $\rho_g U_g^{\,2}$ – это динамическое давление газовой фазы, выступающее основной возмущающей силой, стремящейся деформировать поверхность жидкости, $cth(kh_g)$ – геометрический фактор (h_g – это в контексте задачи высота газового слоя, а k – волновое число $2\pi/\lambda$), $(\rho_l - \rho_g)g$ – гравитационный член, обеспечивающий стабилизацию за счет разности плотностей, σk^2 – вклад капиллярных сил (σ – поверхностное натяжение, препятствующее дестабилизации интерфейса на малых масштабах), V – член, описывающий вязкое демпфирование, зависящее от вязкости жидкости.

Результаты исследования и их обсуждение

Расчеты проводились при небольших линейных размерах, свойственных ПРБ. На рис. 1 расчеты проведены с разной вязкостью жидкого электролита. Длина камеры прокачки составляла 25 см, высота была 30 см (15 см жидкость и 15 см воздух), скорость воздуха 1,5 м/с, жидкости 0,1 м/с. Газовый поток располагается над потоком электролита. Расчеты показали наличие длинных волн с высотой гребня порядка 0,5–1 см (рис. 1).

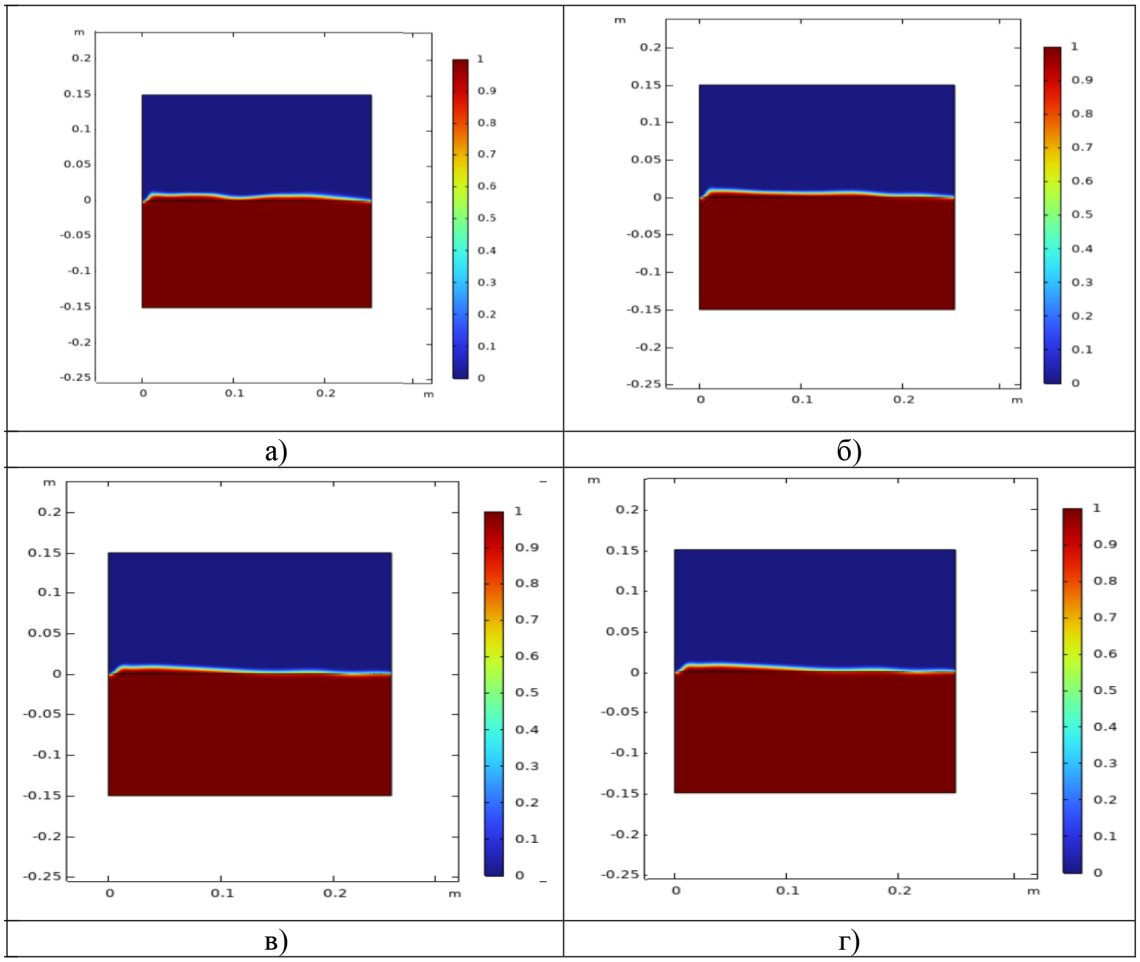


*Рис. 1. Продольное сечение при различных значениях вязкости электролита: а) 0,005 Па*с, б) 0,01 Па*с, в) 0,02 Па*с, г) 0,04 Па*с.*
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

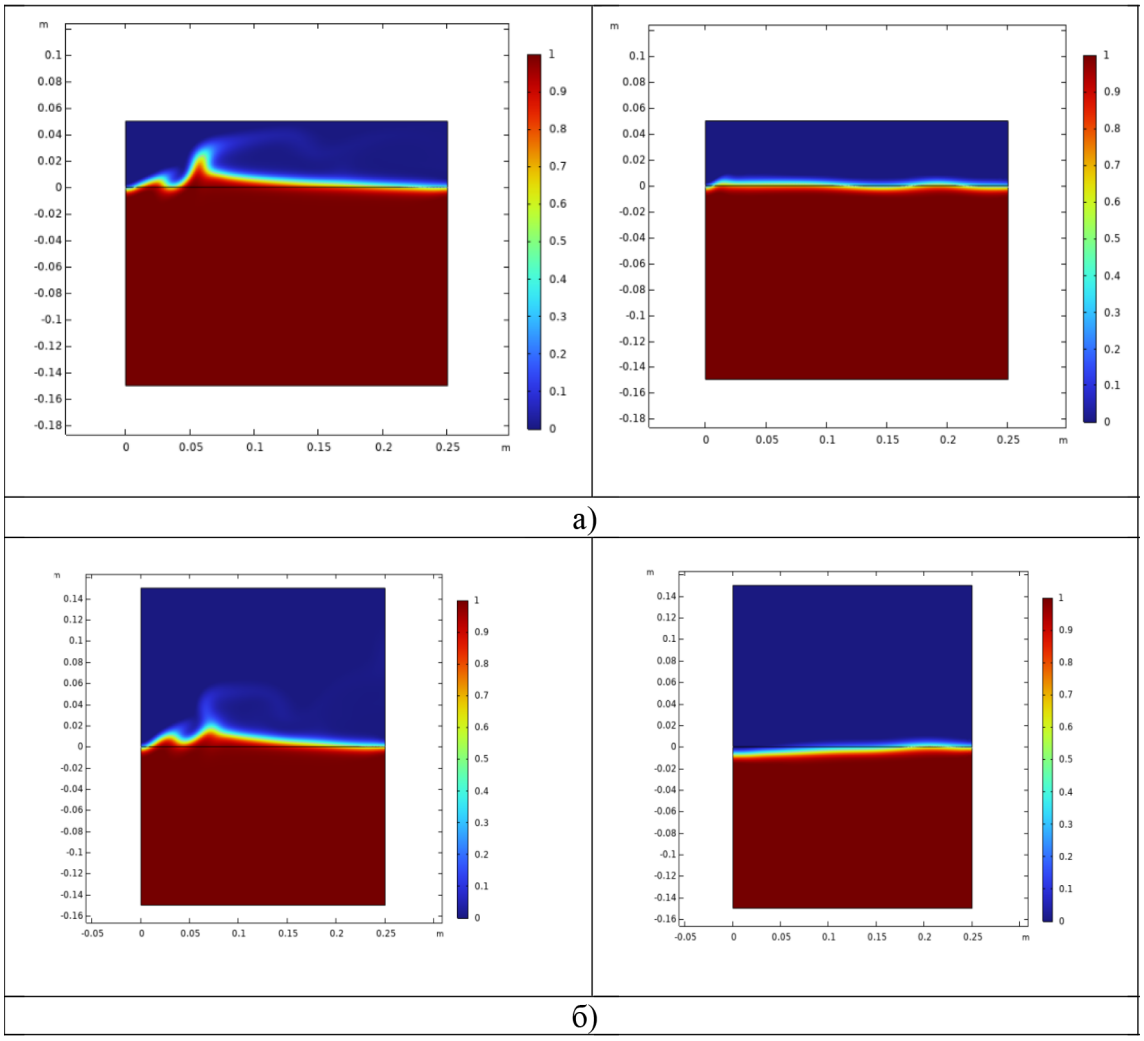


Рис. 2. Продольное сечение при различных соотношениях глубины электролита и высоты воздушного канала
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Наличие длинных волн при небольших линейных размерах отмечается и при разной высоте потока газа (рис. 2), при этом в начале временного интервала образуются более высокие и короткие волны. На рис. 2 высота слоя воды при этом была постоянной – 15 см (скорость воздуха 1,5 м/с, жидкости 0,1 м/с).

При увеличении длины ячейки расчеты показали влияние скорости течения и высоты воздушной фазы на образование волн на поверхности (рис. 3). В частности, численные эксперименты показали, что при уменьшении высоты слоя воздуха увеличивается значение скорости прокачки воздуха, при котором не происходит образования волн на поверхности воды и течение остается близким к ламинарному состоянию.

Полученные результаты согласуются с линейной теорией устойчивости стратифицированных течений [24]. При малых h_g значение $cth(kh_g)$ резко возрастает, что может вызвать сильное подавление возмущений из-за близости верхней стенки трубы [23, 25]. Помимо относительной скорости фаз и геометрических характеристик канала, на стабильность границы раздела фаз влияют и параметры жидкости, такие как вязкость, плотность, поверхностное натяжение (правая часть соотношения (1)).

Так, безмембранная конфигурация подачи парных реагентов в разных фазах представляется возможным, но достаточно сложным в подборе параметров технологическим решением. Ограничение на соотношение параметров, таких как объем газовой и жидкостной фазы, размер камеры прокачки, лишает проточные редокс-батареи возможности масштабирования.

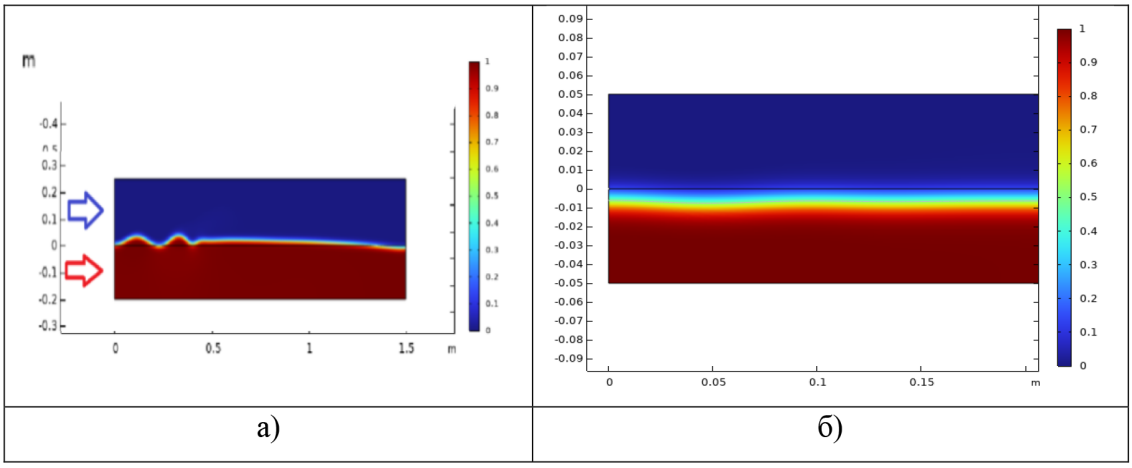


Рис. 3. а) скорость воды 0,1 м/с, скорость воздуха 1,5 м/с, момент времени 6 с, высота трубы 45 см (20 см – вода, 25 см – воздух), длина 1,5 м; б) скорость воды 0,1 м/с, скорость воздуха 1,5 м/с, момент времени 6 с, высота трубы 10 см (5 см – вода, 5 см – воздух)
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Авторы полагают, что представляется лучшим технологическим решением в случае жидкостных металл-воздушных батарей использовать следующие конфигурации:

а) подача потоков в одном направлении, но одна из фаз идет через пористый электрод;

б) либо через разделительный пористый элемент между воздушной и жидкой фазой, где поток газа направлен перпендикулярно направлению потока жидкого электролита.

Заключение

Мембраны, разграничивающие потоки реагирующих между собой электролитов, часто являются наиболее дорогостоящими и наименее надежными компонентами редокс-батарей, поскольку они могут подвергаться коррозии при многократном воздействии определенных реагентов. Поэтому исследуется возможность технических решений, при которых используют прокачку реагентов без мембраны, основываясь на несмешиваемости ламинарных потоков. В работе исследовалось влияние скорости течения на поведение реагентов типа «газ – жидкость» на границе раздела в безмембранных проточных редокс-батареях. Показано возникновение поверхностных волн, делающих систему нестабильной. Это связано с тем, что на протекание трехфазной граничной реакции (твердое тело – жидкость – газ) непосредственно влияет поведение поверхности раздела. Возникновение волн зависит от соотношения параметров: объема газовой и жидкостной фазы, скорости прокачки потоков, вязкости электролита.

Авторы полагают, что лучшим технологическим решением для жидкостных металл-воздушных батарей представляется использование пористого электрода или пористого разделительного элемента.

Список литературы

1. Ruiz-Martín D., Moreno-Boza D., Marcilla R., Vera M., Sánchez-Sanz M. Mathematical modelling of a membraneless redox flow battery based on immiscible electrolytes // Applied Mathematic Modelling. 2022. Vol. 101. P. 96–110. DOI: 10.1016/j.apm.2021.08.020.

2. Lua X., Leung D. Y. C., Wanga Y., Wangb H., Xuan J. An Up-scaling Strategy for Counter-flow Based Microfluidic Network: A Numerical Study // Energy Procedia. 2017. Vol. 142. P. 661–666. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.12.109.

3. Sharmoukh W. Redox flow batteries as energy storage systems: materials, viability, and industrial applications // RSC Adv. 2025. Vol. 15. Art. 10106. DOI: 10.1039/d5ra00296f.

4. Ejigu A., Elgendy A., Al Nasser H. A., Jupp K., Dryfe R. A. W. Membraneless biphasic redox flow batteries: Interfacial effects and generalisation of the chemistry // Electrochimica Acta. 2025. Vol. 512. Art. 145426. DOI: 10.1016/j.electacta.2024.145426.

5. Sanchez-Díez E., Ventosa E., Guarnieri M., Trovo A., Flox C., Marcilla R., Soavi F., Mazur P., Aranzabe E., Ferret R. Redox flow batteries: Status and perspective towards sustainable stationary energy storage // Journal of Power Sources. 2021. Vol. 481. Art. 228804. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2020.228804.

6. Mainar A. R., Iruin E., Colmenares L. C., Kvasha A., de Meatza I., Bengoechea M., Leonet O., Boyano I., Zhang Z., Blazquez J. A. An overview of progress in electrolytes for secondary zinc-air batteries and other storage systems based on zinc // Journal of Energy Storage. 2018. Vol. 15. P. 304–328. DOI: 10.1016/j.est.2017.12.004.

7. Li Y., Lu J. Metal-air batteries: Will they be the future electrochemical energy storage device of choice? // ACS Energy Lett. 2017. Vol. 2. P. 1370–1377. DOI: 10.1021/acsenergylett.7b00119.

8. Kashapov N., Kashapov R., Kashapov L. Influence of the electrolytic cathode temperature on the self-sustaining mechanism of plasma-electrolyte discharge // Journal of Physics D: Applied Physics. 2018. T. 51. Vol. 49. Art. 494003. DOI: 10.1088/1361-6463/aae334.

9. Кашапов Р. Н., Кашапов Н. Ф., Кашапов Л. Н., Клюев С. В., Чебакова В. Ю. Исследование плазменно-электролитного процесса получения наночастиц оксида титана // Строительные материалы и изделия. 2022. Т. 5. № 5. С. 70–79. DOI: 10.58224/2618-7183-2022-5-5-70-79.

10. Chebakova V. Yu., Dmitriev M. S., Kashapov L. N., Kashapov N. F. Study of Alkaline Electrolysis Processes in a Sodium Hydroxide-Based Electrolyte at Various Concentrations // Lobachevskii jornual of mathematics. 2026. Vol. 47. Is. 5. P 2056–2065. DOI: 10.1134/S1995080226617881.

11. Кашапов Н. Ф., Кашапов Л. Н., Чебакова В. Ю., Кашапов Р. Н. Исследование теплового баланса в системе «металлический электрод – плазменная парогазовая оболочка – электролит» // Современные наукоемкие технологии. 2025. № 12. С. 84–88. DOI: 10.17513/snt.40608.

12. Permatasari A., So M., Nguyen V. L., Yano T. Gen Inoue Numerical analysis of vanadium redox flow battery design: Investigating the impact of compression and fiber structure on carbon paper electrodes // Electrochimica Acta. 2025. Vol. 535. Art. 146616. DOI: 10.1016/j.electacta.2025.146616.

13. Wojeicchowski J. P., Neves C. M., Navalpotro P., Rubio-Presa R., Ventosa E., Marcilla R., Coutinho J. A. P Computer-aided design of membrane-free batteries using conductor-like screening model for real solvents // Journal of Energy Storage. 2023. Vol. 72. Art. 108584. DOI: 10.1016/j.est.2023.108584.

14. Kashapov R. N., Kashapov L. N., Kashapov N. F., Chebakova V. Yu. Kinetics of two-phase gas-liquid mediums in electrolysis processes // High Temperature. 2022. Vol. 60. Is. S3. P. S356–S362. DOI: 10.1134/s0018151x21060080.

15. Kashapov L. N., Kashapov N. F., Chebakova V. Yu., Chebakova E. V. Mathematical modeling of cathodic zinc electroextraction processes // Journal of Siberian Federal Universit. Mathematics and Physics. 2023. Т. 16. Is. 5. С. 572–582. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54633263 (дата обращения: 15.08.2026).

16. Zorrilla F., Montiel M., Mustata R., Losantos R., Valiño L. Impact of electrolyte composition on the mitigation of electrolyte imbalance in a vanadium redox flow battery: A 3D multiphysics model // Journal of Energy Storage. 2025. Vol. 107. Art. 114899. DOI: 10.1016/j.est.2024.114899.

17. Chebakova V., Kashapov L., Kashapov N., Dmitriev M. The sweep method as one of the methods for solving the charge transport problem in an alkaline electrolyte // Match: Communications in Mathematical and Computer Chemistry. 2026. Vol. 95. Is. 2. С. 441–456. DOI: 10.46793/match.95-2.11925.

18. Li T., Huang M., Bai X., Wang Y.-X. Metal-air batteries: A review on current status and future applications // Progress in Natural Science: Materials International. 2023. Vol. 33. P. 151–171. DOI: 10.1016/j.pnsc.2023.05.007.

19. Asmare M., Zegeye M., Ketema A. Advancement of electrically rechargeable metal-air batteries for future mobility // Energy Reports. 2024. Vol. 11 P. 1199–1211. DOI: 10.1016/j.egyr.2023.12.067.

20. Song J., Yu D., Wu X., Xie D., Sun Y., Vishniakov P., Hu F., Li L., Li Ch., Maximov M. Yu., El-Khatib K. M., Peng Sh. Interfacial coupling porous cobalt nitride nanosheets array with N-doped carbon as robust trifunctional electrocatalysts for water splitting and Zn-air battery // Chemical Engineering Journal. 2022. Vol. 437. Art. 135281. DOI: 10.1016/j.cej.2022.135281.

21. Wang N., Wan H., Duan J., Wang X., Tao L., Zhang J., Wang H. A review of zinc-based battery from alkaline to acid // Materials Today Advances. 2021. Vol. 11. Art. 100149. DOI: 10.1016/j.mtadv.2021.100149.

22. Xiaohui Zeng, Junnan Hao, Zhijie Wang, Jianfeng Mao, Zaiping Guo. Recent progress and perspectives on aqueous Zn-based rechargeable batteries with mild aqueous electrolytes // Energy Storage Materials. 2019. Vol. 20. P. 410–437. DOI: 10.1016/j.ensm.2019.04.022.

23. Ooms G., Poesio P. Stationary waves on a horizontal gas-liquid interface in a pipe // International Journal of Multiphase Flow. 2003. Vol. 29. Is. 12. P. 1771–1792. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2003.09.004.

24. Taitel Y., Dukler A. E. A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow // AIChE Journal. 1976. Vol. 22. Is. 1. P. 47–55. DOI: 10.1002/AIC.690220105.

25. Andritsos N., Hanratty T. J. Influence of liquid viscosity in stratified horizontal gas-liquid flows // AIChE Journal. 1987. Vol. 33. Is. 3. P. 444–454. DOI: 10.1002/aic.690330310.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Работа выполнена за счет предоставленного в 2026 г. Фондом науки и технологий Республики Татарстан гранта на осуществление фундаментальных и поисковых исследований в научных и образовательных организациях, предприятиях и организациях реального сектора экономики Республики Татарстан (соглашение № 25 от 05.08.2026).

Financing: The work was carried out using a grant provided in 2026 by the Science and Technology Fund of the Republic of Tatarstan for the implementation of fundamental and exploratory research in scientific and educational organizations, enterprises and organizations of the real sector of the economy of the Republic of Tatarstan (agreement No. 25 dated 05.08.2026).

УДК 621.74.047:621.7.06
DOI

CC BY 4.0

СОВМЕЩЕННОЕ НЕПРЕРЫВНОЕ ЛИТЬЕ И ЦИКЛИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ СТАЛЬНЫХ ЛИСТОВ: КОНСТРУКЦИЯ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Лернер М. М. ORCID ID 0000-0003-3935-1011

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», Екатеринбург, Российская Федерация, e-mail: lerner888@mail.ru

В статье рассмотрена установка, в которой непрерывное литье стальной заготовки объединено с ее циклической деформацией. Цель работы – систематизировать конструктивные и технологические особенности C-CAD (Continuous Casting and Deformation), сопоставить их с конкретными вариантами тонкослябовых литейно-прокатных маршрутов и выделить группы параметров, которые следует учитывать при оценке надежности и масштабировании установки. Обзор основан на публикациях 2017–2025 гг.; библиографические записи и содержание работ проверялись по DOI, сайтам журналов и издателей, а отбор был завершен 28.09.2026. При сравнении учитывались тип рабочего инструмента, режим нагружения, состояние металла в зоне деформации, связь с кристаллизатором, использование остаточного тепла и требования к управлению приводами. Показано, что C-CAD нельзя отличать от современных литейно-прокатных линий только по признаку более раннего обжатия. Существенные особенности схемы связаны с применением противоположных бойков, циклическим характером нагрузки и разделением процесса на формирование полосы из оболочки с жидкой фазой и последующую циклическую деформацию затвердевшего металла. Систематизированы ограничения опубликованных исследований и параметры, которые требуют совместного контроля: температура, скорость вытягивания, закон движения бойков, усилие деформации, жесткость силовой системы и охлаждение. Сделан вывод, что промышленное масштабирование требует связанного теплового, прочностного и кинематического анализа и проверки расчетных моделей по данным опытной установки.

Ключевые слова: непрерывное литье, циклическая деформация, тонкий сляб, кристаллизатор, совмещенные процессы, деформационный блок, литейно-деформационная установка

Благодарности: *Автор выражает огромную благодарность научному консультанту, доктору технических наук, профессору Лехову Олегу Степановичу.*

INTEGRATED CONTINUOUS CASTING AND CYCLIC DEFORMATION OF STEEL SHEETS: UNIT DESIGN AND TECHNOLOGICAL PREREQUISITES

Lerner M. M. ORCID ID 0000-0003-3935-1011

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin", Yekaterinburg, Russian Federation, e-mail: lerner888@mail.ru

The paper considers a unit in which continuous casting of a steel strand is combined with cyclic deformation. The aim is to systematize the design and process features of C-CAD (Continuous Casting and Deformation), compare them with specifically defined thin-slab casting-and-rolling routes, and identify groups of parameters that should be considered when assessing reliability and scale-up. The review is based on publications from 2017-2025; bibliographic records and article contents were checked using DOI records and publisher and journal websites, and the selection was completed on September 28, 2026. The comparison considers the type of working tool, loading mode, metal state in the deformation zone, connection with the mould, use of residual heat, and drive-control requirements. It is shown that C-CAD should not be distinguished from modern casting-and-rolling lines solely by an assumption of earlier reduction. Its essential features are the use of opposed dies, cyclic loading, and a two-stage process consisting of strip formation from a shell containing a liquid phase followed by cyclic deformation of solidified metal. The limitations of the available studies are summarized, together with the parameters that require coordinated control: temperature, withdrawal speed, die-motion law, deformation force, structural stiffness, and cooling. Industrial scale-up therefore requires coupled thermal, strength, and kinematic analysis and validation of computational models against pilot-unit measurements.

Keywords: continuous casting, cyclic deformation, thin slab, mould, deformation unit, integrated processes, casting-and-deformation unit

Acknowledgements: *The author expresses deep gratitude to his scientific advisor, Doctor of Technical Sciences, Professor Oleg Stepanovich Lekhov.*

Введение

В производстве листового проката давно идет движение к более коротким технологическим маршрутам. Чем меньше времени проходит между разливкой и деформацией, тем меньше тепла теряет заготовка и тем меньше энергии требуется на повторный нагрев. Поэтому современные процессы стремятся получать более тонкий литой полуфабрикат и как можно быстрее передавать его на последующую обработку. История развития непрерывной разливки показывает, что сближение стадий затвердевания и деформации стало одним из основных направлений развития плоского проката [1].

Тонкослябовое литье и прямая прокатка постепенно перешли от работы с отдельными слябами к полунепрерывным и бесконечным схемам. Такие линии ценят за компактность, меньшие потери тепла и возможность выпускать заданный сортамент с меньшим числом промежуточных операций [2]. Одновременно металлургические предприятия продолжают снижать энергозатраты на разливке и горячей деформации, поэтому интерес к совмещенным процессам сохраняется [3].

У более короткой технологической цепочки есть и обратная сторона: меньше возможностей исправить структуру металла на последующих стадиях. Для тонкослябового литья с прямой прокаткой особенно важно управлять ростом аустенитного зерна еще до основной прокатки [4]. Для ультратонкой горячекатаной полосы, полученной в бесконечном режиме, показано существенное влияние содержания углерода на микроструктуру, свойства и текстуру [5]. Эти результаты подтверждают, что совмещенную технологию нельзя оценивать только по длине линии или степени обжатия: нужно одновременно учитывать конструкцию машины, состояние металла и управляемость процесса.

Один из таких вариантов – установка C-CAD (Continuous Casting and Deformation, непрерывное литье и деформация). В ней непрерывнолитая заготовка после кристаллизатора сразу попадает в зону глубокого циклического обжатия. Основную деформацию создают не валковые клети, а две противоположные стенки-бойки. Они работают рядом с зоной, где формируется твердая оболочка заготовки. Из-за этого особенно важны точная кинематика бойков, жесткость силовой системы, охлаждение инструмента и согласование движения бойков со скоростью вытягивания металла.

Цель исследования – систематизировать конструктивные и технологические особенности C-CAD, сопоставить их с конкретно определенными вариантами тонкослябовых литейно-прокатных маршрутов и выделить группы параметров, которые необходимо учитывать при оценке надежности и масштабировании установки.

Материалы и методы исследования

Работа выполнена как научный обзор с инженерным сопоставлением технологических схем. Поиск и проверка источников завершены 28.09.2026. Для поиска и верификации использовались DOI/Crossref, открытые страницы журналов и официальные сайты издателей. Основные поисковые запросы на русском и английском языках: «тонкослябовое литье и прямая прокатка», «бесконечная прокатка полосы», «непрерывное литье и деформация», C-CAD continuous casting deformation, cyclic deformation continuous-cast slabs, thin slab casting direct rolling и endless strip production. Основной временной диапазон выборки составил 2017–2025 гг.

В итоговый анализ включено 15 источников: 14 рецензируемых научных публикаций и официальный технический материал разработчика оборудования. Рецензируемые статьи включались в выборку, если можно было идентифицировать первоисточник и получить сведения хотя бы по одному из следующих признаков: состав оборудования, состояние металла в зоне деформации, положение деформационного узла относительно машины непрерывного литья, режим нагружения, тепловые условия либо результаты расчета и эксперимента. Материалы без проверяемого первоисточника и публикации, не позволяющие отделить описание конструкции от подтвержденного результата, не использовались как доказательная база. Официальный технический материал разработчика оборудования привлекался только для описания компоновки и эксплуатационной логики промышленной линии ESP; его данные не рассматривались как независимое рецензируемое подтверждение преимуществ технологии.

Для сопоставления использованы данные по оптимизации режимов Endless Strip Production, где одновременно учитываются энергозатраты, качество полосы и загрузка клетей [6]. Процессы внутри кристаллизатора оценивались по численному исследованию влияния электромагнитного торможения и перемешивания на течение и затвердевание тонкого сляба [7]. Причины поверхностных дефектов рассматривались по обзору высокоскоростного тонкослябового литья, в котором показана связь качества оболочки с течением расплава, температурным полем и тепловым потоком [8]. Схемы сопоставлялись по положению де-

формационного узла, типу рабочего инструмента, непрерывности процесса, использованию остаточного тепла, согласованию скоростей и ограничениям надежности.

Для каждой публикации фиксировались объект и масштаб исследования, примененный метод, подтвержденный результат и основное ограничение. Отдельно выделялись экспериментальные данные, расчетные результаты и конструктивные решения; это разделение далее показано в табл. 2. Численные параметры установок различного масштаба не считались напрямую сопоставимыми без дополнительных условий подобия. Рисунки в статье выполнены автором для пояснения компоновки: они не заменяют рабочие конструкторские чертежи и не используются для получения численных параметров.

Научная новизна обзора состоит в сопоставлении публикаций по единой инженерной схеме: уровню интеграции с разливкой, состоянию металла в зоне деформации, типу рабочего инструмента, характеру нагружения и степени подтверждения результатов. Такой подход позволяет раздельно рассматривать предварительное циклическое обжатие крупных затвердевших слябов, формирование полосы из оболочки с жидкой фазой и последующую деформацию затвердевшего металла, а также сопоставлять C-CAD с конкретными вариантами TSCR без смешения общей технологической концепции и ее промышленных реализаций [2, 9, 10].

Результаты исследования и их обсуждение

Работу [9] корректнее рассматривать как предшествующее направление циклической деформации, а не как описание той же конструкции C-CAD. В ней исследуется система предварительного глубокого обжатия крупных непрерывнолитых слябов, то есть уже сформированной массивной заготовки. В C-CAD, описанной для получения листов из стали [10] и развиваемой в последующих конструктивных вариантах [11], деформационный узел функционально связан с кристаллизатором и работает с заготовкой другого состояния и масштаба.

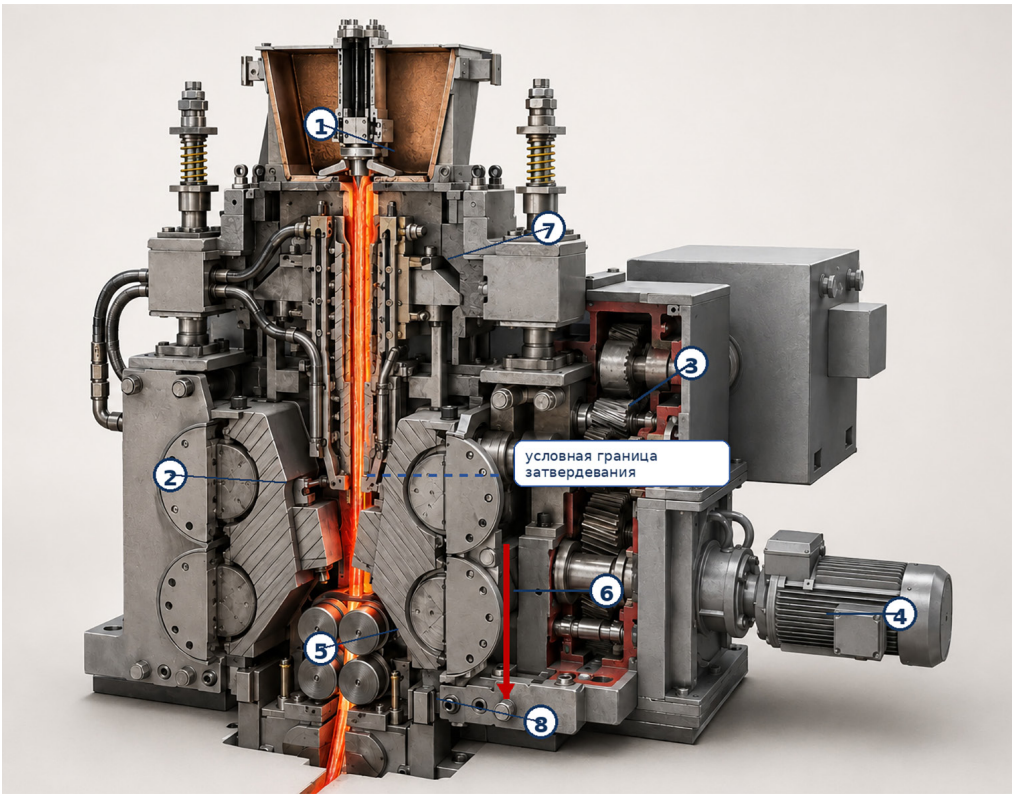


Рис. 1. Рабочий модуль установки непрерывного литья и деформации в разрезе:
1 – кристаллизатор; 2 – стенка-боек деформационного блока; 3 – редуктор-синхронизатор;
4 – электропривод; 5 – тянущий и калибрующий роликовый узел; 6 – направление движения горячей заготовки; 7 – участок заготовки с жидкой фазой (условно); 8 – затвердевшая полоса.
Пунктиром показана условная граница завершения затвердевания
Примечание: составлен автором по конструктивной логике [10, 11];
границы фаз показаны схематично и не в масштабе

Для понимания физики процесса важно разделять две стадии. На первой стадии формируется полоса из оболочки, внутри которой сохраняется жидкая фаза; на второй выполняется циклическая деформация уже затвердевшего металла [10]. Поэтому выражения «оболочка с жидкой фазой» и «затвердевший тонкий сляб (полоса)» далее используются раздельно и не как взаимозаменяемые состояния.

На рис. 1 показана трехмерная схема рабочего модуля. Выносными линиями обозначены кристаллизатор, стенка-боек деформационного блока, редуктор-синхронизатор, электропривод и тянущий узел; отдельно показаны направление движения горячей заготовки и условная граница завершения затвердевания. Такая разметка отделяет кристаллизационную часть процесса от зоны циклической деформации затвердевшего металла.

Установку удобно рассматривать как несколько узлов, которые работают только вместе. Кристаллизатор формирует твердую оболочку и задает исходное сечение заготовки. Бойки обжимают металл и одновременно воспринимают большие механические и тепловые нагрузки. Привод задает ход бойков и должен сохранять правильную фазу их движения. Тянущее устройство перемещает заготовку и связывает скорость разливки с частотой обжатий. Поэтому изменение одного режима сразу влияет на другие: например, скорость вытягивания меняет время пребывания металла в кристаллизаторе, толщину оболочки, температуру перед деформацией и допустимую частоту работы бойков.

В обычной литейно-прокатной линии деформация распределена между несколькими клетями. В C-CAD значительная часть этой работы приходится на один деформационный модуль. Рабочая поверхность бойка должна захватывать металл, направлять его течение, формировать конечный размер и выдерживать повторяющиеся циклы нагрева и нагрузки. Машина получается компактнее, но требования к прочности деталей, жесткости опор и точности синхронизации становятся выше.

Совмещенную схему рассматривают не только для сплошных листовых заготовок. В работах по получению полых стальных заготовок анализируется контакт металла с внутренней оправкой, который заметно меняет напряженное состояние и требования к форме бойков [12].

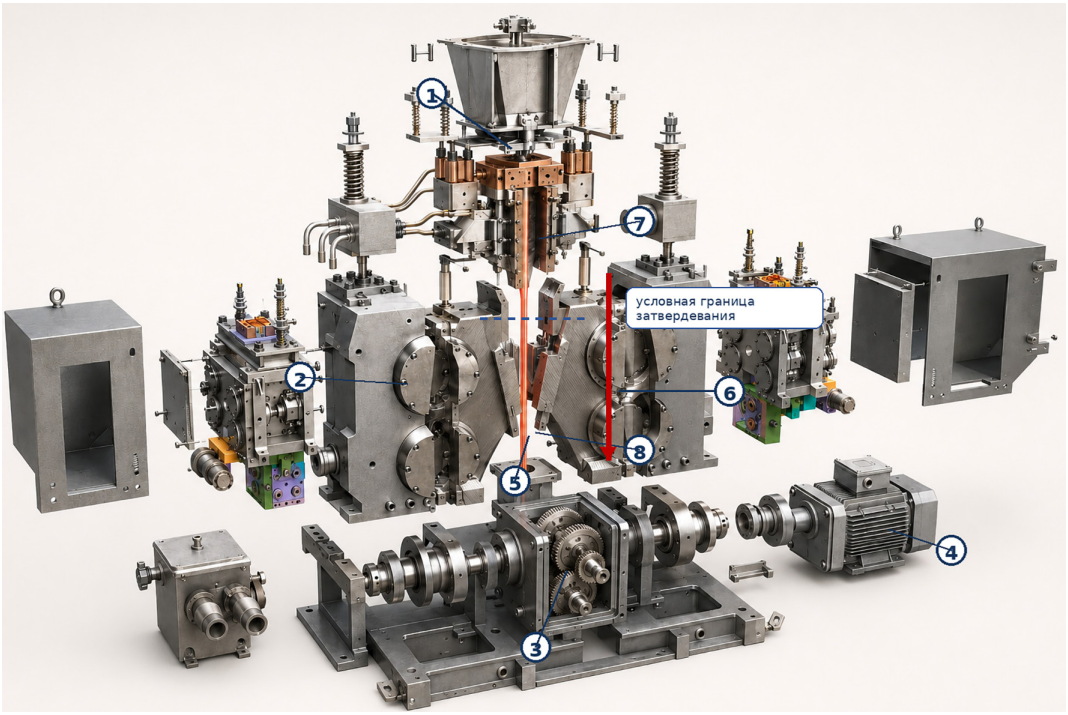


Рис. 2. Разнесенная компоновка основных модулей установки непрерывного литья и деформации: 1 – кристаллизатор; 2 – деформационный блок; 3 – редуктор-синхронизатор; 4 – электропривод; 5 – тянущее и направляющее устройство; 6 – направление движения горячей заготовки; 7 – участок заготовки с жидкой фазой (условно); 8 – затвердевшая заготовка. Пунктиром показана условная граница завершения затвердевания
Примечание: составлен автором по материалам [10, 11]; границы фаз и расстояния между модулями показаны схематично

Дальнейшие расчеты показали, что для таких задач полезна рабочая поверхность переменного радиуса и совместный учет усилия обжатия и вытягивания [13]. Это расширяет возможности базовой схемы, но одновременно делает трехмерное контактное моделирование практически обязательным.

На рис. 2 основные части установки показаны разнесенно и снабжены теми же функциональными обозначениями. Такой вид позволяет увидеть связи между кристаллизатором, деформационным блоком, приводом и тянущим узлом, не смешивая зону с жидкой фазой и участок, где деформируется затвердевший металл.

Для сравнения выбраны не три равноправные «технологии», а два конкретных варианта маршрута тонкослябового литья и прямой прокатки и отдельная схема C-CAD. В обзоре [2] TSCR рассматривается как общее направление, которое развивалось от периодической прокатки через полунепрерывные схемы к бесконечному процессу. Поэтому в табл. 1 сопоставлены: периодический/полунепрерывный TSCR на примере CSP, бесконечный TSCR на примере ESP и C-CAD как отдельная литейно-деформационная компоновка.

Из табл. 1 следует, что различие C-CAD и современных TSCR-маршрутов нельзя сводить к формуле «деформация начинается раньше». В ESP первая интенсивная деформация также включена непосредственно в непрерывно связанную линию после разливки [2]. Корректнее связывать специфику C-CAD с другим рабочим инструментом – противоположными бойками, циклическим характером контакта и разделением процесса на формирование полосы из оболочки с жидкой фазой и последующую деформацию затвердевшего металла [10, 11]. Для утверждения о преимуществе по расстоянию или времени до первой деформации нужны сопоставимые геометрические и временные данные, которых в выбранных источниках нет.

Таблица 1

Сопоставление конкретных вариантов литейно-прокатных маршрутов и C-CAD

Параметр	Периодический/ полунепрерывный TSCR (пример: CSP)	Бесконечный TSCR (пример: ESP)	C-CAD	Практический смысл
Место в технологической классификации	Вариант TSCR с разливкой тонкого сляба и последующей прокаткой отдельными или удлиненными партиями	Бесконечное развитие TSCR с непрерывной связью разливки и прокатки	Отдельная схема совмещенного литья и циклической деформации	CSP и ESP рассматриваются как варианты развития TSCR, а не как категории одного уровня с TSCR
Состояние металла перед основной деформацией	Затвердевший тонкий сляб	Затвердевшая заготовка в непрерывно связанной линии	Стадия 1 – формирование полосы из оболочки с жидкой фазой; стадия 2 – циклическая деформация затвердевшего металла	Для C-CAD необходимо различать две физически разные стадии процесса
Рабочий инструмент и режим нагружения	Валки; металл непрерывно проходит через очаг деформации при установившейся прокатке	Валки; непрерывное прохождение металла через последовательно работающие клети	Две противоположные стенки-бойки; контакт и нагрузка изменяются циклически	Ключевое отличие C-CAD связано с инструментом и цикличностью нагрузки
Расположение интенсивной деформации	После выхода тонкого сляба из разливочной части и его передачи в прокатный тракт	Непосредственно в связанной линии после разливки; процесс непрерывен	Деформационный блок конструктивно связан с кристаллизатором	Без сопоставимых расстояний и времени некорректно утверждать, что одна схема начинает обжатие «раньше» другой
Ключевое ограничение интеграции	Температурная и структурная однородность сляба, согласование разливки и прокатки	Синхронизация разливки, нагрева и прокатки по всей непрерывной линии	Согласование вытягивания, закона движения бойков, силового режима и охлаждения	Масштабирование определяется не одним параметром, а связанной тепловой, силовой и кинематической задачей

Примечание: классификация и характеристики TSCR систематизированы по [2, 5, 6]; сведения о C-CAD – по [10, 11]. Описание промышленной ESP дополнительно сверено с техническим материалом разработчика [14].

Интенсивное обжатие в составе линии, связанной с кристаллизатором, допустимо только тогда, когда оболочка заготовки формируется устойчиво. Исследования тонкослябовой разливки показывают, что изменение движения жидкого металла меняет фронт затвердевания и распределение температуры [7]. Поверхностные дефекты также связаны с нестабильным течением, тепловым потоком и локальным перегревом или переохлаждением оболочки [8]. Поэтому интенсивная деформация после кристаллизатора не исправит проблему, если сама оболочка сформировалась с дефектами. Режимы разливки и обжатия нужно настраивать совместно.

Глубокое обжатие горячей заготовки может интенсивно прорабатывать литую структуру, но его нельзя напрямую приравнивать к обычной прокатке. При установившейся прокатке металл непрерывно проходит через очаг деформации между валками. В C-CAD контакт бойков с металлом и силовая нагрузка изменяются циклически: рабочий ход чередуется с паузой. Поэтому для расчета машины важны не только максимальное усилие, но и амплитуда повторяющейся нагрузки, частота циклов, нагрев поверхности бойков и условия охлаждения между обжатиями.

Именно бойки становятся одним из самых нагруженных узлов установки. С одной стороны, их нужно хорошо охлаждать. С другой, каналы, переходы сечений и локальные перепады температуры могут сами стать причиной концентрации напряжений. Нагрев также меняет размеры инструмента и рабочий зазор. Поэтому промышленная установка должна измерять температуру, положение и усилие во время работы. Без такой обратной связи точной настройки процесса добиться трудно.

Опыт бесконечных прокатных линий показывает, что непрерывность дает результат только при согласованном управлении всеми участками. В Endless Strip Production режим прокатки уже рассматривают как многокритериальную задачу, где одновременно учитываются расход энергии, качество полосы и нагрузка на оборудование [6]. Для C-CAD к этому набору нужно добавить скорость вытягивания, частоту и фазу движения бойков, величину обжатия, температуру металла и допустимую нагрузку на привод. Эти параметры лучше настраивать вместе, а не по одному.

Промышленный пример бесконечной литейно-прокатной линии дает Arvedi ESP. Технический материал разработчика оборудования [14] описывает прямую связь разливки и прокатки, компактную компоновку и использование тепла литой заготовки. Этот источник в настоящем обзоре применяется только для характеристики конструкции и эксплуатационной логики ESP: его статус независимой внешней рецензируемой публикации не подтвержден. Поэтому приведенные в нем заявления об экономических или энергетических преимуществах не используются как самостоятельное доказательство превосходства технологии.

Похожая логика используется и для других металлов. Например, при вертикально-изгибной разливке тонких слябов из алюминиевого сплава AA6063 структуру литой заготовки и свойства прокатанного листа анализируют как части одного маршрута [15]. Эти данные нельзя напрямую переносить на сталь, потому что теплофизические свойства и сопротивление деформации у материалов различаются. Однако сам подход полезен: кристаллизацию и последующую обработку давлением нужно рассматривать вместе.

Для проверки того, как в обзоре разделены экспериментальные, расчетные и конструктивные данные, основные работы сведены в табл. 2. Таблица показывает не только подтвержденный результат, но и границы, в которых этот результат допустимо использовать при сравнении технологий.

Для промышленной C-CAD разумно выделить несколько уровней управления. Первый отвечает за разливку: расход металла, уровень расплава и теплоотвод в кристаллизаторе. Второй управляет бойками и поддерживает нужный закон их движения. Третий согласует вытягивание заготовки с циклом деформации, чтобы между узлами не накапливались лишние продольные усилия. Четвертый следит за состоянием машины: температурой бойков, вибрацией, токами приводов и изменением зазоров. При такой схеме C-CAD становится не просто механической машиной, а управляемой системой с постоянной обратной связью.

Расчетные модели нужно обязательно сверять с измерениями на опытной установке. Модель может показать поля температуры, напряжений и перемещений, но для настройки реальной машины этого недостаточно. Нужны измерения температуры заготовки и бойков, усилия или момента на приводе, скорости вытягивания, фактического хода рабочих органов и размеров готовой полосы. Эти данные помогут точнее задать теплообмен и трение в расчетах и в дальнейшем оценивать ресурс нагруженных деталей.

Таблица 2

Характеристика основных источников,
использованных при инженерном сопоставлении

Источник	Объект и масштаб	Метод	Подтвержденный результат	Ограничение для настоящего обзора
[2]	TSCR; обзор промышленных маршрутов	Обзор развития технологии	TSCR разделен на периодический, полунепрерывный и бесконечный этапы развития	Не содержит прямого сравнения с C-CAD
[6]	ESP; режимы промышленной непрерывной прокатки	Многокритериальная оптимизация режима	Показана необходимость совместного учета нагрузки клетей, качества и энергозатрат	Результаты относятся к валковой непрерывной линии
[9]	Циклическое предварительное обжатие крупных непрерывнолитых слябов	Конструктивное и экспериментальное исследование	Подтверждена возможность глубокого циклического обжатия крупных слябов	Это конструктивно и физически иная задача, чем формирование полосы из оболочки с жидкой фазой
[10]	Установка для получения стального листа; расчетная схема совмещенного процесса	Численное моделирование и инженерный анализ	Разделены формирование полосы из оболочки с жидкой фазой и циклическая деформация затвердевшего металла	Результаты относятся к конкретной геометрии и режиму установки
[11]	Варианты конструкций C-CAD	Конструктивный анализ	Систематизированы варианты построения кристаллизатора и деформационного узла	Основной результат – описание конструктивных решений; объем независимой экспериментальной проверки ограничен
[14]	Arvedi ESP; промышленная линия	Техническое описание разработчика оборудования	Показана компоновка непрерывно связанной разливки и прокатки	Материал не используется как независимое рецензируемое доказательство заявленных преимуществ

Примечание: составлена автором по указанным источникам; формулировки «подтвержденный результат» относятся только к данным, прямо представленным в соответствующей публикации.

У опубликованных работ по C-CAD есть заметное ограничение: многие из них посвящены отдельной геометрии или отдельной расчетной задаче. Для полноценного сравнения с промышленными литейно-прокатными линиями пока не хватает длительных серий данных по производительности, стабильности размеров, качеству поверхности, структуре металла, стойкости бойков и удельным энергозатратам. Поэтому сегодня обоснованно говорить о перспективности и необычной компоновке процесса, но не о его доказанном преимуществе для любого сортамента.

По имеющимся публикациям C-CAD может представлять интерес в задачах, где требуется большая локальная деформация, компактный деформационный модуль или специальная геометрия заготовки. Для массовых широких сортаментов валковые бесконечные линии имеют значительно более широкую промышленную апробацию, однако выбранные источники не дают сопоставимой базы для прямого ранжирования C-CAD и ESP по производительности, энергозатратам или стойкости оборудования. Поэтому область рационального применения C-CAD следует определять по результатам конкретных расчетов и испытаний, а не задавать заранее.

Работу установки в итоге определяют три группы параметров. Первая – технологические: температура металла, степень и скорость деформации, скорость вытягивания и длительность цикла. Вторая – конструктивные: геометрия кристаллизатора и бойков, жесткость станины, привод и охлаждение. Третья – измерительные: точность контроля температуры, усилия, положения и скорости. Если рассматривать эти параметры отдельно, устойчивый режим подобрать трудно. Для промышленной машины они должны настраиваться как единая система.

Вывод

1. В C-CAD разливка, формирование оболочки, вытягивание заготовки и циклическая деформация связаны между собой. При анализе процесса необходимо отдель-

но рассматривать стадию формирования полосы из оболочки с жидкой фазой и стадию деформации затвердевшего металла.

2. Отличие C-CAD от конкретных вариантов TSCR связано прежде всего с применением противоположных бойков, циклическим режимом нагружения и конструктивной связью деформационного блока с кристаллизатором. По выбранным источникам нельзя обоснованно утверждать, что деформация в C-CAD всегда начинается раньше, чем в ESP.

3. Короткая технологическая цепочка создает предпосылки для уменьшения тепловых потерь, но одновременно повышает требования к согласованию температуры, жесткости машины, движения приводов и скорости вытягивания. Количественное сравнение энергозатрат C-CAD и промышленных ESP/CSP в рассмотренных публикациях отсутствует.

4. Для дальнейшего развития нужны связанные тепловые и прочностные расчеты, трехмерное моделирование контакта, гибкая синхронизация приводов и постоянный контроль температуры и усилий на работающей установке.

5. Потенциальную область применения C-CAD следует определять для конкретного сортамента по совокупности расчетных и экспериментальных данных. Для специальных листовых и полых заготовок циклический деформационный модуль дает дополнительные возможности формирования сечения, однако преимущество по производительности, энергозатратам или ресурсу оборудования требует отдельного сопоставимого подтверждения.

Список литературы

1. Guthrie R. I. L., Isac M. M. Continuous Casting Practices for Steel: Past, Present and Future // Metals. 2022. Vol. 12. Is. 5. Art. 862. URL: https://www.mdpi.com/2075-4701/12/5/862 (дата обращения: 28.09.2026). DOI: 10.3390/met12050862.

2. Wang S., Gao J., Wu G., Mao X. Thin slab casting and direct rolling technology: Current status and prospects // Chinese Journal of Engineering. 2022. Vol. 44. Is. 4. P. 534–545. URL: https://cje.ustb.edu.cn/en/article/doi/10.13374/j.issn2095-9389.2021.10.21.001 (дата обращения: 28.09.2026). DOI: 10.13374/j.issn2095-9389.2021.10.21.001.

3. Cui J., Meng G., Zhang K., Zuo Z., Song X., Zhao Y., Luo S. Research Progress on Energy-Saving Technologies and Methods for Steel Metallurgy Process Systems – A Review // Energies. 2025. Vol. 18. Is. 10. Art. 2473. URL: https://www.mdpi.com/1996-1073/18/10/2473 (дата обращения: 28.09.2026). DOI: 10.3390/en18102473.

4. Zhou T., O'Malley R. J., Zurob H. S., Subramanian M., Cho S.-H., Zhang P. Control of Upstream Austenite Grain Coarsening during the Thin-Slab Cast Direct-Rolling (TSCDR) Process // Metals. 2019. Vol. 9. Is. 2. Art. 158. URL: https://www.mdpi.com/2075-4701/9/2/158 (дата обращения: 28.09.2026). DOI: 10.3390/met9020158.

5. Tian P., Zhu G., Kang Y. Effect of Carbon Content on Microstructure, Properties and Texture of Ultra-Thin Hot Rolled Strip Produced by Endless Roll Technology // Materials. 2021. Vol. 14. Is. 20. Art. 6174. URL: https://www.mdpi.com/1996-1944/14/20/6174 (дата обращения: 28.09.2026). DOI: 10.3390/ma14206174.

6. Peng W., Wei C., Yang J., Chen X., Qi B., Li X., Sun J., Zhang D. Rolling schedule design for the ESP rolling process based on NSGA-II-DE // ISA Transactions. 2025. Vol. 158. P. 427–441. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019057824006268 (дата обращения: 28.09.2026). DOI: 10.1016/j.isatra.2024.12.047.

7. Wang C., Liu Z., Li B. Combined Effects of EMBr and SEMS on Melt Flow and Solidification in a Thin Slab Continuous Caster // Metals. 2021. Vol. 11. Is. 6. Art. 948. URL: https://www.mdpi.com/2075-4701/11/6/948 (дата обращения: 28.09.2026). DOI: 10.3390/met11060948.

8. Zhang L., Zhai B., Wang W. A review of thin slab casting and formation of slab surface defects // Continuous Casting. 2020. Vol. 39. Is. 4. P. 22–28. URL: https://www.chinamet.cn/gyby/lz/CN/10.13228/j.boyuan.issn1005-4006.20200033 (дата обращения: 28.09.2026). DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1005-4006.20200033.

9. Lekhov O. S., Mikhalev A. V., Bilalov D. Kh., Shevelev M. M. Cyclic-Deformation System for the Reduction of Continuous-Cast Slabs // Steel in Translation. 2017. Vol. 47. Is. 4. P. 225–228. URL: https://link.springer.com/article/10.3103/S0967091217040064 (дата обращения: 28.09.2026). DOI: 10.3103/S0967091217040064.

10. Лехов О. С., Михалев А. В., Шевелев М. М., Билалов Д. Х. Литье и обжатие тонких слябов при получении листов из стали для сварных труб на установке непрерывного литья и деформации // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2017. Т. 15. № 3. С. 31–36. URL: https://vestnik.magtu.ru/arkhiv-nomerov/63-arkhiv-nomerov/3-2017/819-31.html (дата обращения: 28.09.2026). DOI: 10.18503/1995-2732-2017-15-3-31-36.

11. Mikhalev A. V. Development of technology and designs of continuous casting and deformation of blanks // Modern High Technologies. 2024. Vol. 5. Part 1. P. 71–75. URL: https://www.top-technologies.ru/en/article/view?id=40007 (дата обращения: 28.09.2026). DOI: 10.17513/snt.40007.

12. Lekhov O. S., Mikhalev A. V., Nepryakhin S. O. Stress state of billet-mandrel system during production of hollow steel billet in a unit of continuous casting and deformation. Part 1 // Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 2023. Vol. 66. Is. 4. P. 485–491. DOI: 10.17073/0368-0797-2023-4-485-491.

13. Lekhov O. S., Mikhalev A. V., Nepryakhin S. O. Stress state of billet-mandrel system during production of hollow steel billet in a unit of continuous casting and deformation. Part 2 // Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 2024. Vol. 67. Is. 4. P. 457–462. DOI: 10.17073/0368-0797-2024-4-457-462.

14. Scholler J., Piemonte C. Endless Hot Rolled Coil (eHRC) from Arvedi ESP – A New Standard in Rolled Materials // Mitsubishi Heavy Industries Technical Review. 2024. Vol. 61. Is. 2. P. 1–8. URL: https://www.mhi.com/technology/review/abstract-61-2-70 (дата обращения: 28.09.2026).

15. Wu Z. H., Mao Q. J., Hua F. A., Jia G. L., Li J. P., Li C. G., Yuan G., Wang G. D. Researches on the Macro- and Micro-Structures and Properties of the Vertical Bending Continuous Casted AA6063 Thin Slabs and Their As-Rolled Sheets // Metals. 2022. Vol. 12. Is. 11. Art. 1937. URL: https://www.mdpi.com/2075-4701/12/11/1937 (дата обращения: 28.09.2026). DOI: 10.3390/met12111937.

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest.

Финансирование: Автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 681.518
DOI

CC BY 4.0

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ НА ПРОГРАММИРУЕМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ КОНТРОЛЛЕРАХ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ

[1]Лукин С. А. ORCID ID 0009-0003-7121-6087,
[1]Кайченов А. В. ORCID ID 0000-0002-0358-8888,
[1]Ерещенко В. В.,[1]Пономаренко Д. А.,[2]Николаев Н. С.,
[2]Делицын А. Н. ORCID ID 0000-0003-3281-0369,
[2]Яблоков А. Е. ORCID ID 0000-0003-1489-8256

[1]Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Мурманский арктический университет», Мурманск, Российская Федерация, e-mail: ivanivannikov264@gmail.com;
[2]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)», Москва, Российская Федерация

В статье исследуется возможность внедрения искусственных нейронных сетей (ИНС) в управляющие программы программируемых логических контроллеров (ПЛК) для тех задач, в которых применение классических методов управления затруднительно из-за высокой сложности объектов. Исследование направлено на проверку возможности применения современных ПЛК управления сложным технологическим процессом с помощью нейронных сетей без использования внешних вычислительных устройств. Для проведения экспериментов в среде CODESYS V3.5 разработан специализированный программный модуль, реализующий архитектуру полносвязного многослойного перцептрона с возможностью обучения методом стохастического градиентного спуска. В качестве аппаратной платформы использованы сенсорные панельные контроллеры российской фирмы «ОВЕН» СПК107 и СПК210-07. Экспериментальная часть исследования включает тестирование разработанного модуля ИНС в задачах классификации на стандартных наборах данных («ирисы Фишера», MNIST, Fashion-MNIST, Kuzushiji-MNIST), аппроксимации различных функций, а также эксперименты по внедрению нейронного регулятора в контур регулирования температуры сушильной установки УПОР-М2 Мурманского арктического университета. Результаты экспериментов показали практическую возможность выполнения как задач классификации с высокой точностью (более 80 %), так и аппроксимации нелинейных зависимостей современными программируемыми логическими контроллерами. В рамках работы исследована возможность «обучения с учителем» ИНС на ПЛК как на готовых данных, так и непосредственно при управлении технологическим процессом на примере классического ПИ-регулятора. Также в рамках эксперимента продемонстрирована возможность переноса структуры нейронной сети с одного программируемого логического контроллера на другой. Сделан вывод о перспективности подобного подхода для создания адаптивных систем управления, но при этом отмечается необходимость дальнейшей оптимизации процесса обучения.

Ключевые слова: искусственная нейронная сеть, программируемый логический контроллер, управление, сушка гидробионтов, регулятор

RESEARCH ON THE APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS RUNNING ON PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLERS FOR PROCESS CONTROL

[1]Lukin S. A. ORCID ID 0009-0003-7121-6087,
[1]Kaychenov A. V. ORCID ID 0000-0002-0358-8888,
[1]Ereschenko V. V., [1]Ponomarenko D. A., [2]Nikolaev N. S.,
[2]Delitsyn A. N. ORCID ID 0000-0003-3281-0369,
[2]Yablokov A. E. ORCID ID 0000-0003-1489-8256

[1]Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Murmansk Arctic University", Murmansk, Russian Federation, e-mail: ivanivannikov264@gmail.com;
[2]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH)", Moscow, Russian Federation

This article examines the possibility of integrating artificial neural networks (ANNs) into control programs for programmable logic controllers (PLCs) for tasks where the use of classical control methods is difficult due to the high complexity of the objects. The study is aimed at verifying the feasibility of using modern PLCs to control complex technological processes with the help of neural networks without the use of external computing devices. To conduct experiments in the CODESYS V3.5 environment, a specialized software module has been developed that implements the architecture of a fully connected multilayer perceptron with the ability to be trained using the stochastic gradient descent method. The hardware platform consists of sensor panel controllers from the Russian company "OWEN" – SPK107 and SPK210-07. The experimental part of the study includes testing the developed ANN module in classification tasks using standard datasets (Fisher iris, MNIST, Fashion-MNIST, Kuzushiji-MNIST), approximating various functions, as well as experiments on implementing a neural controller in the temperature control loop of the UPOR-M2 drying plant at Murmansk Arctic University. The experimental results demonstrated the practical feasibility of both performing classification tasks with high accuracy (over 80%) and approximating nonlinear dependencies using modern programmable logic controllers. Within the study, the possibility of "supervised learning" of an ANN on a PLC was investigated, both using ready-made data and directly during process control, using the example of a classic PI-controller. The experiment also demonstrated the possibility of transferring the structure of a neural network from one programmable logic controller to another. A conclusion is drawn about the potential of this approach for creating adaptive control systems, but at the same time, the need for further optimization of the learning process is noted.

Keywords: artificial neural network, programmable logic controller, control, aquatic bioresources drying, controller

Введение

В настоящее время встречается большое количество технологических процессов, описание и управление которыми традиционными средствами затруднено. В решении данной проблемы может помочь применение искусственных нейронных сетей (далее ИНС, нейросети, нейронные сети), обученных на основе экспертных данных, что позволит как повысить качество управления, так и снизить число экспериментов, проведенных с целью настройки регуляторов и системы управления технологическим процессом в целом. Современные программируемые логические контроллеры (ПЛК) обладают достаточной вычислительной мощностью для работы с нейронными сетями, однако вопрос интеграции нейросетевого модуля в существующую систему управления технологическим процессом без использования дополнительных вычислительных устройств слабо раскрыт в научной литературе.

В статье [1] представлен результат использования нейронной сети на ПЛК в задаче классификации двухмерных серых объектов по четырем классам. Обучение проводилось на персональном компьютере, после чего коэффициенты передавались в контроллер по сети PROFIBUS. По результатам экспериментов авторам удалось добиться почти абсолютной точности определения на проверочной выборке из 80 объектов.

Идея интеграции ПЛК и ИНС рассмотрена в статье [2]. Авторы рассматривают в качестве трендов для применения нейросетей предиктивное техническое обслуживание, самооптимизацию, повышение качества человеко-машинного взаимодействия, контроль качества продукции под управлением искусственного интеллекта, снижение расходов производства.

В работе [3] представлен эксперимент по созданию и обучению ИНС в среде разработки CoDeSys v2.3 на языке ST. Разработанная нейронная сеть тестировалась в задаче аппроксимации нелинейной функции, что можно рассматривать как настройку нейросети для регулирования параметра в технологическом процессе.

В статье [4] описано применение ИНС в составе управляющей программы ПЛК «Siemens» S7-1200 для подстройки коэффициентов ПИД-регулятора, управляющего температурой воды в емкости. По данным автора, разработанная система позволяет достичь отсутствия перерегулирования и нулевого (0,0 %) рассогласования в установившемся режиме. Графиков параметров в ходе процесса и сравнения с обычным ПИД-регулятором не представлено.

Исследование нейронного регулятора скорости потока жидкости, опубликованное в 2020 г. [5], описывает работу лабораторного стенда, включающего некий ПЛК и персональный компьютер со средой математического моделирования MATLAB, в которой запущена искусственная нейронная сеть. Нейросеть обучалась на результатах моделирования процесса. Связь между ПЛК и ПК реализована при помощи OPC-сервера. По результатам статьи, нейросетевой регулятор продемонстрировал более качественное регулирование (меньшие перерегулирование и статическая ошибка), чем настроенный ПИД-регулятор.

Применение нейронной сети в связке с ПЛК для повышения качества очистки сточных вод описано в работе коллектива авторов (Ž. Kavaliauskas и др.) [6]. Внедрение прогнозов изменения регулируемых величин при помощи нейросети позволило добиться значительных преимуществ в сравнении с ручным управлением процессом. Из пояснений авторов не совсем ясно, как именно происходит связь нейронной сети и ПЛК и где конкретно запущена ИНС.

В статье «Development of a Neural Network-Based Controller for a Greenhouse Irrigation System at Laboratory Scale» описано применение нейросети на ПЛК для управления системой полива растений в теплице [7]. Нейронный регулятор разработан и транслирован в контроллер средствами среды MATLAB в виде отдельного блока. Авторами доказана применимость такого регулятора, но непосредственно экспериментальное сравнение производилось только с релейным регулятором.

Аналогичный принцип реализации нейронного регулятора при помощи трансляции из среды MATLAB описан в статье [8]. Авторы используют ПЛК SIEMENS серии SIMATIC S7-1200 с двумя нейросетями для управления манипулятором с шестью степенями свободы как примером нелинейной системы. Результатов экспериментов по проверке точности позиционирования или скорости работы манипулятора, управляемого разработанными нейронными сетями, авторами не представлено.

В аналитическом обзоре [9] рассматривается большое количество статей по применению методов интеллектуального управления, в том числе на основе искусственных нейронных сетей. Авторы делают вывод о перспективности использования такого подхода для автоматизации сложных и нелинейных процессов, в частности работы с биотехнологическими объектами. Подходы по совмещению в одной системе

методов управления на основе нечеткой логики и искусственных нейронных сетей описываются в работах [10, 11]. Подобные решения позволяют улучшить качество управления сложными объектами и автоматизировать принятие решений на основе большого количества факторов.

Авторами работы «Формирование цифровых двойников объектов автоматического управления с использованием нейронных сетей в процессах холодной сушки рыбы» [12] описано применение нейронной сети для создания цифрового двойника объекта автоматизации. Полученная таким образом модель может быть использована как для моделирования различных сценариев работы с объектом, так и непосредственно в управлении, например, для подстройки традиционных регуляторов.

Цель исследования – изучение возможностей современных программируемых логических контроллеров по применению искусственных нейронных сетей для управления технологическим процессом на примере задач аппроксимации и классификации.

Материалы и методы исследования

Искусственная нейронная сеть в данном исследовании представлена в виде программного модуля (PRG) для программируемого логического контроллера с сенсорным экраном «ОВЕН» СПК107. Среда разработки программы под данный контроллер CODESYS V3.5 имеет достаточные программные средства для реализации масштабируемых нейронных сетей.

Эксперименты по применению нейронных сетей для регулирования температуры проводились на сушильной установке для обезвоживания рыбы УПОР-М2 Мурманского арктического университета. Управляющим устройством данной установки также является СПК107. Состав оборудования УПОР-М2 более подробно раскрыт в статье «Модернизация малогабаритной сушильной установки для поиска оптимальных режимов с применением тепловизионного контроля» [13].

С целью повышения скорости обучения нейронной сети в ряде экспериментов задействован сенсорный панельный контроллер «ОВЕН» СПК210-07. Повышение вычислительной мощности управляющего устройства позволило снизить время выполнения одного цикла программы на более чем 10 мс. СПК210-07 не входит в состав системы управления сушильной установкой, поэтому для проверки разработанной нейронной сети требовалось выполнить перенос управляющей программы на другую версию среды разработки CODESYS. Изменения включали только смену целевой платформы и версий библиотек для визуализации.

Разработанный программный модуль ИНС включает в себя:

– подмодуль инициализации нейронной сети;

– подмодуль задания псевдослучайных весов;

– подмодуль ввода данных в нейронную сеть;

– подмодуль расчета выходов нейронной сети (прямое распространение сигнала);

– подмодуль обучения нейронной сети (прямое и обратное распространение сигнала);

– подпрограмму архивации и развертывания нейронной сети из архива.

Программная реализация ИНС основана на архитектуре полносвязного многослойного перцептрона. Топология искусственной нейронной сети определяется общим количеством слоев $\bar{L}$ (где $\bar{L} \geq 3$, так как сеть содержит входной слой, как минимум один скрытый и выходной слой), числом нейронов в каждом из них и функцией активации. Поддерживается возможность добавления нейронов смещения с выходом, равным единице, в каждый слой сети. Указанные параметры нейросети задаются на этапе компиляции программы в виде посредством констант. Программные ограничения на максимальное количество слоев и нейронов отсутствуют.

В общем виде топология искусственной нейронной сети описывается в следующем виде:

$$\begin{aligned} &\bar{L} \in N, \bar{L} \geq 3, L \in N, L \geq 1, n_l \in N, \\ &l = 0, \ldots, L+1, n_0 = n_{in}, n_{L+1} = n_{out} \end{aligned} \quad (1)$$

где $\bar{L}$ – общее количество слоев;

L – число скрытых слоев, причем $L \geq 1$;

l – индекс слоя: $l = 0$ входной слой, $l = 0,\ldots,L$ скрытые слои, $l = L + 1$ выходной слой;

n_l – число нейронов в слое l, n_0 – число входов сети;

n_{L+1} – число выходных нейронов.

ИНС состоит из набора искусственных нейронов, выход которых можно описать выражениями

$$a_j^{(l)} = f_l\left(z_j^{(l)}\right), l = 1, \ldots, L+1, j = 1, \ldots, n_l, \quad (2)$$

где $a_j^{(l)}$ – выход j-го нейрона слоя l;

f_l – функция активации слоя l;

$z_j^{(l)}$ – взвешенная сумма j-го нейрона слоя l;

n_l – число нейронов в слое l.

$$z_j^{(l)} = \sum_{i=1}^{n_{l-1}} w_{ji}^{(l)} a_i^{(l-1)} + \beta_{l-1} w_{j0}^{(l)}, \quad l = 1,\ldots,L+1,\ j = 1,\ldots,n_l, \tag{3}$$

где $z_j^{(l)}$ – взвешенная сумма j-го нейрона слоя l;

n_{l-1} – число нейронов в слое l–1;

$w_{ji}^{(l)}$ – вес связи от i-го нейрона слоя l–1 к j-му нейрону слоя l;

$a_i^{(l-1)}$ – выход i-го нейрона слоя l–1;

β_{l-1} – наличие нейрона смещения в слое l–1, 1 – есть, 0 – нет;

$w_{j0}^{(l)}$ – вес связи от нейрона смещения слоя l–1 к j-му нейрону слоя l.

Функции активации нейронов задаются для каждого слоя отдельно. В программе реализованы и отдельно испытаны сигмоида, LeakyReLU, ELU, tanh, ступенчатая и линейная.

Обучение нейронной сети проводится методом стохастического градиентного спуска. Выбор обусловлен тем, что данный метод не требует вычисления градиента по всей обучающей выборке одновременно и может обновлять веса после каждого обучающего примера, что снижает затраты времени и позволяет обучать сеть на выборках достаточно большого объема.

Оптимизаторы процесса обучения в программу не внедрены, используется базовое правило градиентного спуска с фиксированной скоростью обучения. В качестве функции потерь используется половина квадрата разности между желаемым и полученным значениями выходного нейрона:

$$E = \frac{1}{2}\left(d - y\right)^2, \tag{4}$$

где E – значение функции потерь;

d – желаемое значение выходного нейрона;

y – полученное значение выходного нейрона.

Выбор квадратичной функции потерь обеспечивает дифференцируемость целевой функции по всем обучаемым параметрам и удобную форму производной, что необходимо для вычисления градиентов методом обратного распространения ошибки. С учетом выбранной функции потерь и отсутствия оптимизаторов правило обновления параметров метода стохастического градиентного спуска записывается в виде

$$w_{ji}^{(l)} \leftarrow w_{ji}^{(l)} - \eta \frac{\partial E}{\partial w_{ji}^{(l)}}, b_j^{(l)} \leftarrow b_j^{(l)} - \eta \frac{\partial E}{\partial b_j^{(l)}}, \tag{5}$$

где $w_{ji}^{(l)}$ – вес связи от i-го нейрона слоя l–1 к j-му нейрону слоя l;

$b_j^{(l)}$ – смещение i-го нейрона слоя l;

η – скорость обучения, $\eta > 0$;

$\partial E / \partial w_{ji}^{(l)}$ – градиент функции потерь по весу $w_{ji}^{(l)}$;

$\partial E / \partial b_j^{(l)}$ – градиент функции потерь по смещению $b_j^{(l)}$.

Численные значения градиентов вычисляются методом обратного распространения ошибки. Сначала определяются локальные ошибки $b_j^{(l)}$ нейронов, а затем через них выражаются градиенты (6) и (7):

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ji}^{(l)}} = \delta_j^{(l)} a_i^{(l-1)}, \tag{6}$$

где $\partial E / \partial w_{ji}^{(l)}$ – градиент функции потерь по весу $w_{ji}^{(l)}$;

$\delta_j^{(l)}$ – локальная ошибка j-го нейрона слоя l;

$a_i^{(l-1)}$ – выход i-го нейрона предыдущего слоя l–1.

$$\frac{\partial E}{\partial b_j^{(l)}} = \delta_j^{(l)}, \tag{7}$$

где $\partial E / \partial b_j^{(l)}$ – градиент функции потерь по смещению $b_j^{(l)}$.

$\delta_j^{(l)}$ – локальная ошибка j-го нейрона слоя l.

До начала обучения и до первого прямого прохода осуществляется псевдослучайная инициализация весов. Данная процедура предшествует любой обработке обучающих примеров и не повторяется в ходе стохастического градиентного спуска. Псевдослучайная инициализация весов необходима для нарушения симметрии нейронов, поскольку при одинаковых начальных весах нейроны одного слоя получали бы одинаковые градиенты и обучались бы одинаково. Псевдослучайные веса задаются с помощью генератора псевдослучайных чисел G с начальным значением S:

$$R_{ji}^{(l)} = G\left(S, l, j, i\right) \in \left[0,1\right), \tag{8}$$

где $R_{ji}^{(l)}$ – псевдослучайное число, используемое для инициализации веса $w_{ji}^{(l)}$;

G – функция генератора псевдослучайных чисел, возвращающая значение в полуинтервале [0, 1);

S – начальное значение генератора псевдослучайных чисел;

l – индекс слоя;

j – индекс нейрона в слое l;

i – индекс нейрона в предыдущем слое l–1, причем i = 0 используется для связи от нейрона смещения.

Итоговый случайный вес рассчитывается по формуле

$$w_{ji}^{(l)} = w_{min} + \left(w_{max} - w_{min}\right) R_{ji}^{(l)}, \tag{9}$$

где $w_{ji}^{(l)}$ – начальное значение веса связи от i-го нейрона слоя l–1 к j-му нейрону слоя l;

w_{min} – нижняя граница диапазона инициализации весов;

w_{max} – верхняя граница диапазона инициализации весов;

$R_{ji}^{(l)}$ – псевдослучайное число в полуинтервале [0, 1), полученное генератором G.

Индекс $i = 0$ используется только при $\beta_{l-1} = 1$, то есть при наличии нейрона смещения в предыдущем слое, при $\beta_{l-1} = 0$ веса $w_{j0}^{(l)}$ не задаются и не используются.

Весь расчет нейронной сети проводится за один цикл программы без применения матричных вычислений, указателей, ссылок и особых возможностей CODESYS, что позволит, при необходимости, повторить управляющую программу (возможно, без подпрограммы архивации) в другой среде разработки. Недостатком данного способа является увеличение времени выполнения цикла, что может негативно сказаться на выполнении программируемым логическим контроллером других задач.

В качестве одной из гипотез исследования выдвинуто предположение об успешном выполнении системой управления с нейронной сетью как минимум одной из двух задач:

1. Определение текущей стадии обезвоживания сырья.

2. Непосредственный расчет управляющего воздействия для регулятора температуры.

Для проверки данной гипотезы принято решение об испытании разработанной ИНС в следующих задачах:

1. Решение набора задач на классификацию.

2. Решение набора задач на аппроксимацию.

3. Регулирование температуры в реальном технологическом процессе.

Для каждого случая архитектура искусственной нейронной сети подбиралась индивидуально. Коэффициент скорости обучения равнялся 0,001. Время обучения включает в себя и операции по архивированию значений.

Одной из распространенных задач на классификацию считается определение принадлежности цветка ириса к одному из трех классов по четырем параметрам. Соответственно, нейронная сеть имеет четыре входных нейрона и три выходных. Набор данных для задачи включает 150 примеров, по 50 на каждый класс, и называется ирисами Фишера, по фамилии создателя.

Для проверки точности нейронной сети случайным образом от каждого класса были отобраны по 10 примеров, итого нейронная сеть обучалась на 120 примерах и испытывалась на 30. Также следует отметить, что в оригинальном наборе данных примеры были сгруппированы по классам, поэтому перед началом экспериментов проведено «перемешивание» данных случайным образом.

Более сложной и одновременно более популярной является задача классификации на основе базы данных MNIST (Modified National Institute of Standards and Technology, модифицировано Национальным институтом стандартов и технологий США[1]), включающей суммарно 70 000 образцов рукописных цифр от «0» до «9» в виде черно-белых изображений в разрешении 28x28 пикселей. Таким образом, для классификации данных изображений нейронная сеть должна иметь как минимум 784 входных нейрона и 10 выходных. Непосредственно в наборе данных уже сделано разделение на обучающую и проверочную выборки, 60 000 и 10 000 примеров соответственно.

При помощи набора данных MNIST можно сделать вывод о возможности работы нейронной сети на ПЛК и успешном решении задачи классификации. MNIST считается не очень сложным набором. Разработчики указывают, что некоторыми испытателями на данном наборе при помощи неглубокой нейронной сети получена точность порядка 97–98 % [14] при сотнях нейронов в скрытых слоях.

Более сложной задачей является модификация Kuzushiji-MNIST (далее K-MNIST) – такой же по размерам и числу классов набор данных, но содержащий вместо цифр 10 иероглифов японской азбуки хирагана, также с разрешением 28x28 пикселей. Согласно результатам на электронной странице разработчиков[2], размещенным авторами и добровольцами из числа пользователей, одинаковые нейронные сети показывают на наборе K-MNIST несколько меньшую точность (от 0,5 до 5 п. п.), чем на классическом MNIST. Связано это с большей сложностью иероглифов относительно арабских цифр. Имеются иные варианты K-MNIST, но в данной работе они не использовались.

Еще одной версией MNIST, подходящей для целей исследования, является Fashion-MNIST, в котором вместо цифр в данном наборе используются 10 классов одежды. Данный набор данных примечателен дополнительным исследованием точности человека на меньшей выборке примеров –

[1] URL: https://yann.lecun.org/exdb/mnist/ (дата обращения: 25.10.2026).

[2] URL: https://github.com/rois-codh/kmnist (дата обращения: 25.10.2026).

83,5 %. Согласно данным с сайта авторов[3], точность различных видов классификаторов при работе с этим набором данных находится в диапазоне от 75 до 90 %. Для сравнения, по информации с той же страницы, большая часть классификаторов, испытанных на оригинальном наборе MNIST, продемонстрировала точность свыше 90 %.

В качестве простейшей задачи на аппроксимацию выбрана логическая операция «исключающее ИЛИ» (XOR) за счет своей нелинейности и малого количества возможных вариантов. Для решения такой задачи нейронная сеть должна обладать двумя входными нейронами и одним выходным. Для проверки точности нейросети необходимо задействовать те же значения, что и для обучения, поэтому практического смысла такая задача не несет, используясь, как и MNIST, только для проверки работоспособности нейронной сети.

Еще одной задачей решено выбрать аппроксимацию по упомянутому в статье «Реализация алгоритма обучения нейронной сети на ПЛК ОВЕН в среде CoDeSys» [3] выражению (A + B) × C + D. Для решения данной задачи нейронная сеть должна иметь четыре входных нейрона и один входной. Набор данных для обучения и проверки составлен аналогично исходной статье.

Для проведения экспериментов выбран технологический процесс регулирования температуры в сушильной камере, для чего создан набор данных из 60 значений, описывающий эмпирически полученную зависимость мощности, подаваемой на трубчатый электронагреватель, от ошибки рассогласования по температуре. Для оценки точности нейронной сети из 60 значений отобраны 10, что уменьшает число обучающих примеров до 50. Для работы в качестве регулятора нейронная сеть должна иметь минимум один входной нейрон и один выходной.

В ходе первого опыта обученная для работы в качестве регулятора нейронная сеть интегрировалась в программу для управления сушильной установкой как замена используемому ПИ-регулятору. Для снижения нагрузки на центральный процессор СПК107 время выполнения цикла расчета нейронной сети увеличено до 100 мс.

В качестве второго опыта проводилась проверка возможности нейронной сети обучаться не заблаговременно, а в процессе работы системы, используя в качестве учителя настроенный регулятор. Опыт проводился в три этапа:

1. Работа настроенного ПИ-регулятора и параллельное обучение нейронной сети.

2. Работа нейронной сети на тех же заданных значениях, что и ПИ-регулятор, без прерывания процесса.

3. Работа нейронной сети на новых уставках, спустя некоторое время после обучения.

В процессе проведения опытов принято решение о необходимости увеличения числа входных нейронов нейронной сети до четырех. Первый входной нейрон принимает значение рассогласования, на остальные подается идентификатор текущей стадии процесса – нагрев, остывание или поддержание температуры.

Результаты исследования и их обсуждение

Для задач классификации точностью являлся процент правильно классифицированных примеров на проверочной выборке.

Время цикла подбиралось экспериментально кратно 5 мс. В некоторых случаях происходила перезагрузка контроллера по сторожевому таймеру спустя некоторое время работы программы (до нескольких эпох обучения), поэтому время цикла во всех представленных случаях выбиралось со значительным запасом.

Результаты обучения нейронной сети на различных наборах данных представлены на рис. 1. На графике представлена зависимость точности (A) от количества эпох обучения (N). В рамках одной эпохи обучение проводилось на всех примерах набора данных без изменения позиций примеров в наборе. Нулевая точность в нулевой эпохе является следствием отсутствия проверки инициализированной нейронной сети со стартовыми случайными весами. Это особенность работы разработанного алгоритма обучения. Проверка и архивация результатов работы нейронной сети проводились каждую эпоху для MNIST и каждые десять эпох в остальных случаях.

По результатам экспериментов точность классификации нейронной сети на более сложных вариантах MNIST оказалась ниже, чем при классификации исходного набора, при одинаковом количестве эпох. Использование функции активации LeakyReLU привело к повышению точности классификации и снижению времени цикла по сравнению с первыми экспериментами, но потребовало ограничить выходное значение нейронов в связи с риском получения значения типа NaN (Not-a-Number) на выходе нейрона.

Результаты экспериментов по решению задач классификации на ПЛК представлены в табл. 1.

[3] URL: http://fashion-mnist.s3-website.eu-central-1.amazonaws.com/ (дата обращения: 25.10.2026).

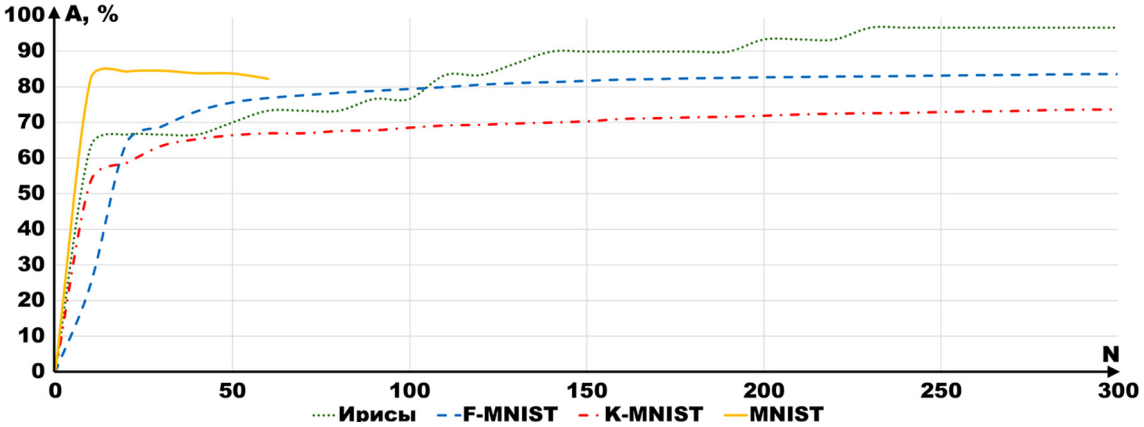


Рис. 1. Результаты обучения нейронной сети на ПЛК в решении различных задач классификации
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Таблица 1

Результаты обучения нейронных сетей
для решения задач классификации

Параметр	Ирисы Фишера	MNIST	K-MNIST	Fashion-MNIST
Максимальная точность, %	100	84,72	75,75	83,54
Эпоха максимальной точности	350	26	480	300
Время цикла программы	20	25	50	50
Время обучения, с	1000	111 000	1 460 000	920 000
Структура скрытых слоев	2–8	2–16	2–32	2–32
Функция активации	Сигмоида	Сигмоида	LeakyReLU + Сигмоида	LeakyReLU + Сигмоида

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Точность разработанных нейронных сетей на ПЛК при решении задач классификации наборов данных семейства MNIST сопоставима с результатами, выложенными авторами Fashion-MNIST[4], и ниже, чем в результатах авторов K-MNIST[5], что позволяет судить о возможности использования нейронных сетей на ПЛК для решения задач классификации по набору признаков, особенно при использовании большего числа нейронов в скрытых слоях.

Для задач аппроксимации критерием точности является сумма половин квадратов разности желаемого и полученного значений по всей проверочной выборке, поэтому в экспериментах на аппроксимацию минимальное значение критерия соответствует наилучшему результату.

Результаты работы нейронной сети для обучения в роли работы регулятора наглядно представлены на рисунке 2. На графике представлена зависимость точности (A) от количества эпох обучения (N). Причиной всплеска ошибки в задаче аппроксимации закона регулирования могли стать неудачно рассчитанные при обучении весовые коэффициенты, но не переобучение, так как впоследствии ошибка на проверочной выборке снизилась. Итоговые значения результатов экспериментов по решению задач аппроксимации представлены в табл. 2.

Разработанная нейронная сеть продемонстрировала возможность успешного обучения для аппроксимации операции XOR. Аппроксимация уравнения из [3] прошла хуже, чем у авторов исходной работы, возможно, из-за значительных отличий в обучающей и проверочной выборках. Суммарная ошибка при обучении нейронной сети на работу регулятором значительно выше из-за большего числа примеров из проверочной выборки и иного порядка требуемых выходных значений (единицы в XOR и уравнении, до сотни у регулятора).

[4] URL: http://fashion-mnist.s3-website.eu-central-1.amazonaws.com/ (дата обращения: 25.10.2026).

[5] URL: https://github.com/rois-codh/kmnist (дата обращения: 25.10.2026).

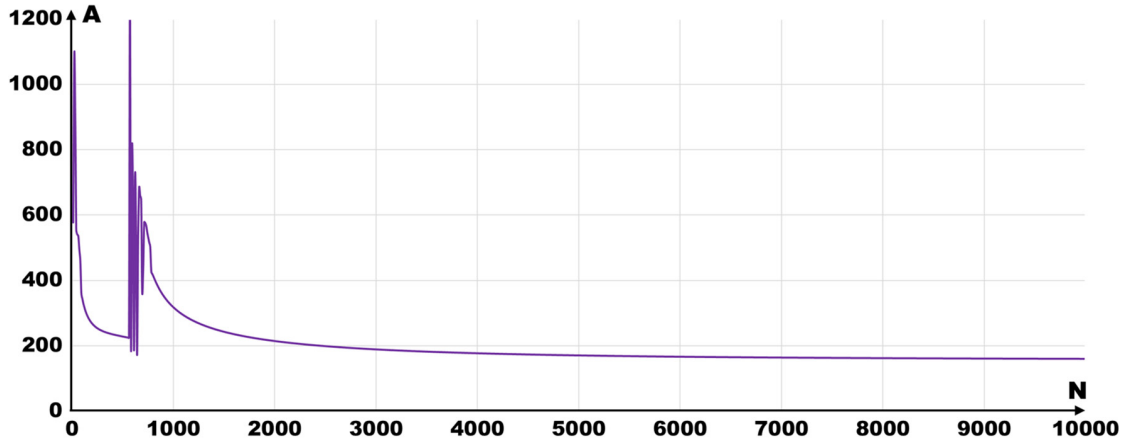


Рис. 2. Результат обучения нейронной сети для аппроксимации функции зависимости мощности, подаваемой на трубчатый электронагреватель
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Таблица 2

Результаты аппроксимации

Параметр	XOR	(A + B) * C + D	Регулятор
Минимальная ошибка	0,0286	0,979	160,25
Эпоха минимальной ошибки	8370	9670	10 220
Время цикла программы, мс	15	25	25
Время обучения, с	780	900	15 300
Структура скрытых слоев	2–8	4–16	2–16
Функция активации	LeakyReLU	LeakyReLU	LeakyReLU

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

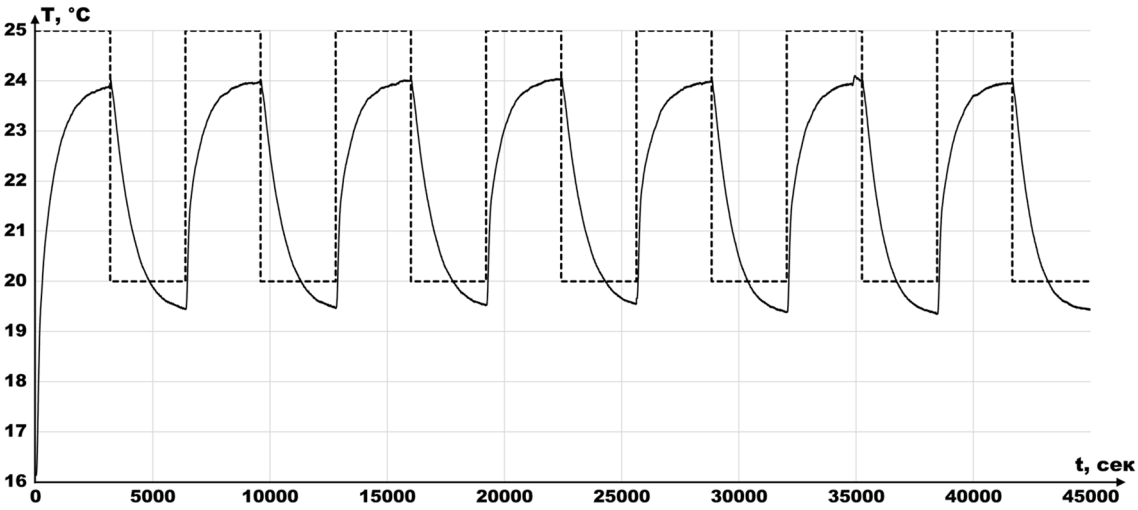


Рис. 3. Результат работы заранее обученного нейронного регулятора
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Для проведения экспериментов по управлению реальным технологическим процессом управляющая программа с искусственной нейронной сетью перенесена на СПК107, управляющий сушильной установкой УПОР-М2. Результат регулирования температуры при помощи нейронного регулятора представлен на рис. 3. Заданное значение контура регулирования по температуре меняется для имитации реального

процесса обезвоживания, сочетающего периоды активной сушки и релаксации. Объект управления подробно описан в [15].

Из графика видно, что регулирование при помощи нейронной сети приводит к наличию статической ошибки величиной более одного градуса Цельсия на этапе активной сушки. В рамках данной установки такая точность поддержания температуры является неприемлемой. Положительным результатом опыта является работоспособность нейронной сети, настроенной за пределами программируемого логического контроллера.

В ходе заключительного эксперимента предпринята попытка обучения нейронной сети непосредственно в процессе поддержания температуры, используя в качестве учителя текущий ПИ-регулятор. Результат эксперимента представлен на рис. 4 (изменение температуры) и рис. 5 (изменение управляющего воздействия).

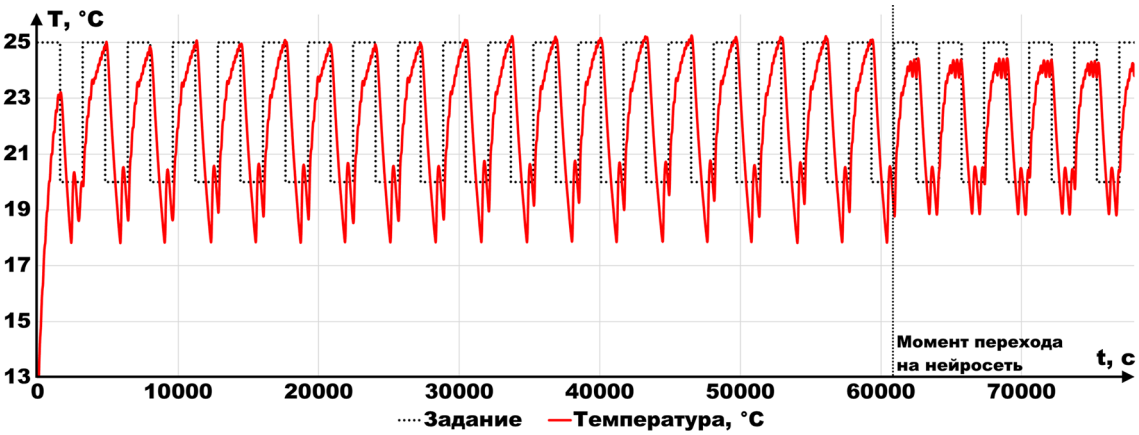


Рис. 4. Результат работы нейронного регулятора, обученного на ПИ-регуляторе
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

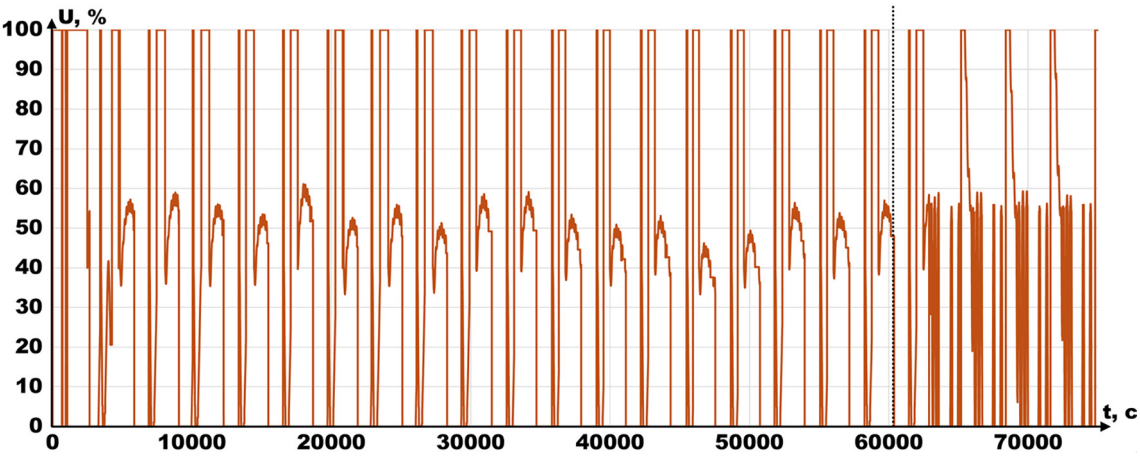


Рис. 5. Выход нейронного регулятора, обученного на ПИ-регуляторе
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Переход с ПИ-регулятора на нейросетевое регулирование осуществлено на отметке времени 60 000 с. Как и в случае с обучением вне технологического процесса, наблюдается статическая ошибка, но теперь менее одного градуса Цельсия, что является допустимым для данного процесса. Нейросетевой регулятор допускает меньшие недорегулирования по температуре при остывании, чем ПИ-регулятор, накапливающий значительное отрицательное управление в интегральной составляющей.

Для проверки полученной нейросети проведен еще один запуск системы с обученной нейросетью после остывания камер, при этом задающие воздействия снижены на два градуса Цельсия. Дообучение не проводилось, сразу активирован нейросетевой регулятор. Результат представлен на рис. 6 (изменение температуры) и рис. 7 (изменение управляющего воздействия).

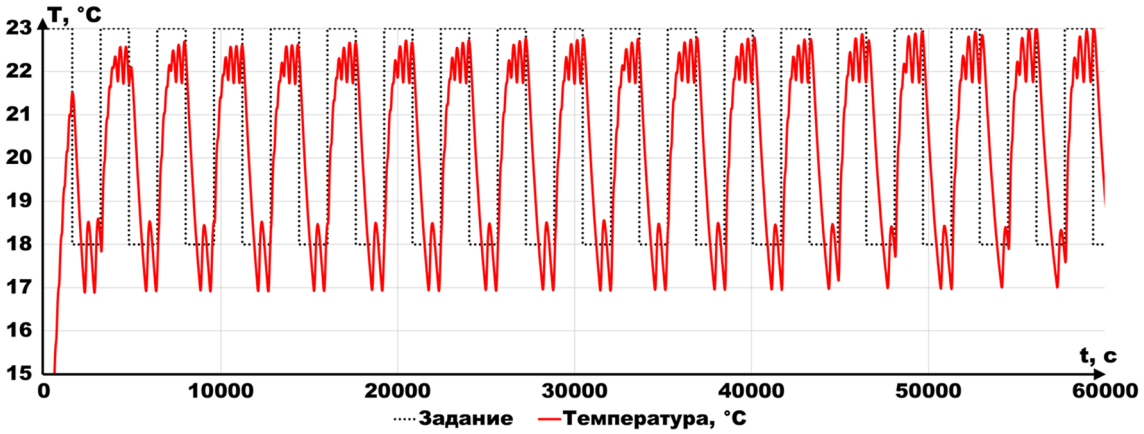


Рис. 6. Результат работы нейронного регулятора, обученного на ПИ-регуляторе, после перезапуска сушильной установки
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

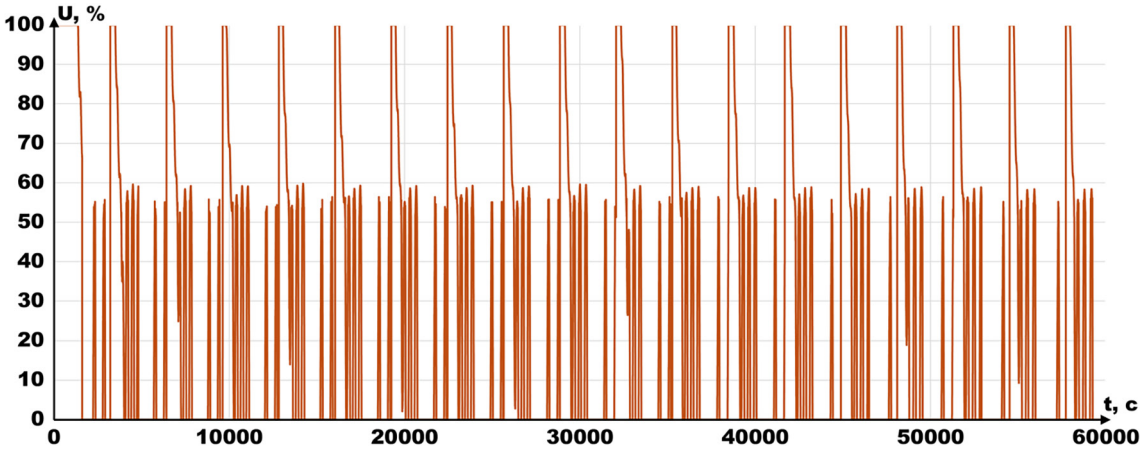


Рис. 7. Выход нейронного регулятора, обученного на ПИ-регуляторе, после перезапуска сушильной установки
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Таблица 3

Результаты опытов по обучению ИНС на работе ПИ-регулятора

Регулятор	ПИ	Нейронный сразу после ПИ	Нейронный после перезапуска
Перерегулирование, °С	0, 248	–	0,052
Недорегулирование при нагреве, °С	0,147	1,385	1,28
Недорегулирование при релаксации, °С	2,176	1,178	1,065
Средняя интегральная оценка за период	5573,726	4906,151	4543,068

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Как и в предыдущем случае, наблюдается статическая ошибка, примерно равная одному градусу Цельсия. Численные результаты опытов сведены в табл. 3. Перерегулированием является максимальное превышение заданного значения при нагреве. Недорегулирование – максимальная разница между заданной и текущей температурой в режиме установившихся колебаний при недостижении заданного значения при нагреве и релаксации соответственно. Интегральная оценка рассчитана как интеграл модулей рассогласования.

Учитывая стабильность результатов, сделан вывод о возможности более качественной настройки регулятора при соответству-

ющей доработке используемой в ПЛК структуры нейросети и процесса обучения.

Заключение

Разработанная для программируемого логического контроллера нейронная сеть продемонстрировала работоспособность для решения задач классификации и аппроксимации, которые достаточно распространены в технологических процессах. Несмотря на относительно высокое быстродействие программы, обучение нейросети непосредственно на контроллере требует значительного времени, что можно нивелировать возможностью обучения на внешней ЭВМ с последующим переносом коэффициентов, что также продемонстрировано в данной работе.

В случае отсутствия адекватной модели, ИНС способна обучаться в ходе технологического процесса, при этом в качестве учителя выступает оператор либо существующий регулятор. Полученный таким образом нейронный регулятор может превосходить традиционные регуляторы по отдельным параметрам.

По результатам проделанной работы сделан вывод о возможности практической реализации нейросетевого регулирования на современных программируемых логических контроллерах. Выдвинутая гипотеза подтверждена.

Список литературы

1. Topalova I., Tzokev A. Optimization of a MLP network structure for a real-time PLC application // IEEE 25th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel. IEEE, 2009. P. 396–398. [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/224366151_Optimization_of_a_MLP_network_structure_for_a_real-time_PLC_application (дата обращения: 14.09.2026). DOI: 10.1109/EEEI.2008.4736556.

2. Rodriguez M., Dhameliya N., Patel B. AI-Driven Programmable Logic Controllers: Enhancing Automation in Industrial Processes // Robotics Xplore: USA Tech Digest. 2024. Vol. 1. Is. 1. P. 1–14. URL: https://hal.science/hal-04787311v1/document (дата обращения: 14.09.2026). HAL Id: hal-04787311.

3. Олейников В. С., Киселева Л. А., Гуськов К. С., Зайцев В. В. Реализация алгоритма обучения нейронной сети на ПЛК ОВЕН в среде CODESYS // Modern Science. 2022. № 6–4. С. 208–216. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_48756638_47592141.pdf (дата обращения: 14.09.2026). EDN: LLMFJU.

4. Zhang X. Design and application of PLC control system based on neural network // Procedia Computer Science. 2025. № 261. P. 1005–1011. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050925015960 (дата обращения: 14.09.2026). DOI: 10.1016/j.procs.2025.04.493.

5. Barhanuddin A., Prawito P. Design of neural network and PLC-based water flow controller // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1528. Art. 012065. URL: https://www.researchgate.net/publication/342071068_Design_of_neural_network_and_PLC-based_water_flow_controller (дата обращения: 14.09.2026). DOI: 10.1088/1742-6596/1528/1/012065.

6. Development and Optimization of an Automated Industrial Wastewater Treatment System Using PLC and LSTM Neural Network / Ž. Kavaliauskas, G. Blažiunas, I. Šajev et al. // MDPI Applied Sciences. 2025. Vol. 15. Is. 8990. P. 1–20. URL: https://www.mdpi.com/2076-3417/15/16/8990 (дата обращения: 14.09.2026). DOI: 10.3390/app15168990.

7. Gerardo-Parra C., Barreto-Salazar L., Flores-López L., et al. Development of a Neural Network-Based Controller for a Greenhouse Irrigation System at Laboratory Scale // MDPI Agriculture. 2026. Vol. 16. Is. 245. P. 1–20. URL: https://www.mdpi.com/2077-0472/16/2/245 (дата обращения: 14.09.2026). DOI: 10.3390/agriculture16020245.

8. Duymazlar O., Engin M., Engin D. Embedded Artificial Neural Network on PLCs to Predict Nonlinear System Responses // 9th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). IEEE, 2020. URL: https://dblp.org/db/conf/meco/meco2020.html (дата обращения: 14.09.2026). DOI: 10.1109/MECO49872.2020.9134167.

9. Лубенцова Е. В., Петраков В. А. Интеллектуальные технологии – новая база построения и развития систем автоматизации сложных биотехнологических процессов // Научное обозрение. Технические науки. 2016. № 5. С. 64–80. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_26684438_90455300.pdf (дата обращения: 14.09.2026). EDN: UFOCEV.

10. Сохинов Д. Ю. Нейро-нечеткий подход к классификации яблок с учетом внешних дефектов // Автоматизированные системы управления биотехнологическими процессами: сборник научных докладов Всероссийской конференции с международным участием (г. Москва, 11 декабря 2024 г.) Курск: Университетская книга, 2025. С. 299–303. [Электронный ресурс]. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_80544375_23865792.pdf (дата обращения: 14.09.2026). EDN: ZAITXX.

11. Лукичев Д. В., Кузин А. Ю., Демидова Г. Л., Ловлин С. Ю., Жданов И. Н. Применение нечетких и нейронечетких регуляторов в системе управления двухмассовым объектом с нелинейными возмущениями // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2019. Т. 62. № 1. С. 32–39. URL: https://www.researchgate.net/publication/331059397_Application_of_fuzzy_and_neuro-fuzzy_controllers_in_the_control_system_of_two-mass_object_with_nonlinear_disturbances (дата обращения: 14.09.2026). DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-1-32-39. EDN: YWDIFN.

12. Вотинов М. В., Ершов М. А. Формирование цифровых двойников объектов автоматического управления с использованием нейронных сетей в процессах холодной сушки рыбы // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2022. Т. 25. № 4. С. 291–297. URL: https://vestnik.mauniver.ru/v25_4_n93ф/01_Votinov_291-297.pdf (дата обращения: 14.09.2026). DOI: 10.21443/1560-9278-2022-25-4-291-297. EDN: HSZCIU.

13. Лукин С. А., Кайченов А. В., Ерещенко В. В., Селяков И. Ю. Модернизация малогабаритной сушильной установки для поиска оптимальных режимов с применением тепловизионного контроля // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2024. Т. 27. № 3. С. 447–457. URL: https://vestnik.mauniver.ru/v27_3_n100/15_Lukin_447-457.pdf (дата обращения: 14.09.2026). DOI: 10.21443/1560-9278-2024-27-3-447-457. EDN: VKIYTL.

14. Lecun Y., Bottou L., Bengio Y., Haffner P. Gradient-Based Learning Applied to Document Recognition // Proceedings of the IEEE. 1998. Vol. 86. Is. 11. P. 2278–2324. URL: https://www.researchgate.net/publication/2985446_Gradient-based_learning_applied_to_document_recognition (дата обращения: 14.09.2026). DOI: 10.1109/5.726791.

15. Глазунов Ю. Т., Ершов А. М., Ершов М. А., Селяков И. Ю., Аминов В. А. Элементы теории «пунктирного» обезвоживания в процессах холодного копчения и вяления рыбы // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2012. Т. 15. № 1. С. 15–20. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_20502006_91724221.pdf (дата обращения: 14.09.2026). EDN: RGQUCX.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 004.942:621.313.333:621.316.9:681.527
DOI

CC BY 4.0

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ПОДАВЛЕНИЕ ОБРАТНЫХ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩИХ СИЛ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ КАК УСЛОВИЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

Маренич К. Н. ORCID ID 0000-0002-6309-4986, Денисова А. И.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донецкий национальный технический университет», Донецк, Российская Федерация, e-mail: denisova_anastasi@mail.ru

В статье рассмотрена проблематика актуальной научно-технической задачи – обеспечения защиты человека от поражения электрическим током, обусловленным действием обратной электродвижущей силы асинхронного двигателя в режиме выбега. В сложных условиях эксплуатации силового электрооборудования энергоемких промышленных электротехнических комплексов высока вероятность касания человеком фазного проводника и риск электропоражения. Действие средств автоматического защитного отключения при возникновении утечек тока на землю ограничивается отделением от сети энергетического потока, формируемого трансформаторной подстанцией технологического участка, и не распространяется на кабельные присоединения силовых коммутационных аппаратов, подвергающиеся воздействию обратных электродвижущих сил асинхронных двигателей потребителей, переходящих в режим выбега после отключения напряжения. Целью данной работы является обоснование технических решений реализации функции автоматического подавления обратных электродвижущих сил в электросети участка промышленного предприятия, адаптируемых к условиям автономного функционирования при размещении в структурах асинхронных двигателей и силовой коммутационной аппаратуры. Предложенное техническое решение позволяет распространить функцию автоматического контроля технического состояния силового кабельного присоединения на структурные компоненты, размещаемые непосредственно в асинхронном двигателе, и управляемого подавления электропоражающего действия обратной электродвижущей силы коммутацией фазных обмоток статора в двигателе, что является принципиально новым подходом к осуществлению автоматической защиты промышленных участковых электротехнических комплексов от возникновения аварийных и опасных состояний. Эту концепцию дополняет предложенный способ автоматического импульсного посткоммутационного закорачивания фаз, что дополняет основную коммутационную функцию магнитных пускателей эффектом управляемого обесточивания в их силовых кабельных присоединениях цепей утечки тока на землю.

Ключевые слова: электрическая сеть технологического участка, асинхронный двигатель, электропоражающее действие, обратная электродвижущая сила, устройства автоматической защиты, результаты исследования

AUTOMATIC SUPPRESSION OF BACK ELECTRIC FORCES OF ELECTRIC MOTORS AS A CONDITION FOR ENSURING THE SAFETY OF INDUSTRIAL ELECTRIC INSTALLATIONS

Marenich K. N. ORCID ID 0000-0002-6309-4986, Denisova A. I.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Donetsk National Technical University", Donetsk, Russian Federation, e-mail: denisova_anastasi@mail.ru

The article addresses a pressing scientific and technical challenge: protecting humans against electric shock caused by the back electromotive force (back EMF) generated by an induction motor during coast-down operation. Under demanding operating conditions of power electrical equipment in energy-intensive industrial electrical engineering complexes, there is a high probability of accidental human contact with a phase conductor, resulting in a significant risk of electric shock. The operation of automatic protective disconnection devices in the event of earth leakage currents is limited to isolating the energy flow supplied by the transformer substation of the industrial section. However, this protection does not extend to the power cable connections of switching devices exposed to the back electromotive forces generated by induction motors operating in coast-down mode after the supply voltage has been disconnected. The aim of this study is to substantiate technical solutions for implementing automatic back-EMF suppression in the electrical network of an industrial facility, with the capability of adapting these solutions to autonomous operation when integrated into the structures of induction motors and power switching equipment. The proposed technical solution makes it possible to extend the function of automatic monitoring of the technical condition of power cable connections to structural components installed directly within an induction motor. It also enables controlled suppression of the electric shock hazard associated with back EMF through the switching of the motor's stator phase windings. This represents a fundamentally new approach to providing automatic protection for industrial electrical engineering complexes against the development of emergency and hazardous conditions. This concept is further enhanced by the proposed method of automatic pulsed post-switching phase short-circuiting, which supplements the primary switching function of magnetic contactors by enabling controlled de-energization of earth leakage current circuits in their power cable connections.

Keywords: technological site electrical network, asynchronous motor, back electromotive force, electric shock, automatic protection devices, research results

Введение

Эффективная и безопасная эксплуатация промышленных электроустановок в значительной степени обеспечивается применением современных методов диагностики их технического состояния [1], организационными мероприятиями и техническими средствами защиты персонала от электропоражения. При этом имеющая место функциональная недостаточность защитного заземления электроустановок (включая нестационарные объекты) в промышленных электросетях с изолированной нейтралью трансформатора [2] обусловила необходимость применения дополнительных устройств автоматического выявления опасных состояний электрооборудования и управления процессом подавления электропоражающего фактора. Однако проблемными вопросами при функционировании технических средств защиты от возникновения цепей повышенной проводимости с фаз на землю остаются чувствительность к броскам тока в переходных режимах, существенно повышающаяся с увеличением емкости изоляции сети [3], а также деформация их характеристик при эксплуатации в электросетях, содержащих частотно регулируемые асинхронные электроприводы [4, с. 226–230], что является факторами, ограничивающими их область применения. Кроме этого, фактором ограничения защитной функции этих технических средств является нераспространение ее на кабельные присоединения магнитных пускателей (МП), подвергающиеся воздействию обратных электродвижущих сил (ЭДС) асинхронных двигателей (АД) электропотребителей, переходящих в режим выбега после отключения напряжения питания. Актуальность данной проблематики обоснована тенденцией повсеместного повышения мощности электроприводов горных машин, что сопровождается повышением продолжительности существования высоких уровней обратных ЭДС электродвигателей. Объектом воздействия обратных энергетических потоков являются, прежде всего, кабельные присоединения между магнитными пускателями и электродвигателями, отличающиеся большими протяженностями, отсутствием средств защиты от механических повреждений, что обуславливает наибольшую вероятность прикосновения человека к фазному проводнику, находящемуся под напряжением, и необходимость разработки и применения специальных средств автоматической защиты.

Анализ исследований и публикаций

Вопросы обеспечения безопасности эксплуатации шахтных участковых электрических сетей в основном касались разработки аппаратуры автоматической защиты (АЗ) от утечек тока на землю и освещены в работах [4, с. 140–210; 5] и др. Применяемый в настоящее время алгоритм их функционирования состоит в последовательности действий: измерение оперативного тока ($I_{оп}$) АЗ → сравнение с эталонным током ($I_{эт}$) АЗ → формирование команды на отключение напряжения питания электросети при $I_{оп} > I_{эт}$. В зависимости от типа АЗ процедура может сопровождаться выявлением поврежденной фазы методом сопоставления разностей потенциалов между фазами сети и землей с последующим закорачиванием поврежденной фазы на землю, а также частичной компенсацией емкости изоляции сети. Исполнительным элементом, реализующим защитную функцию АЗ, в этом случае является автоматический выключатель участковой трансформаторной подстанции ТП. В работах [6–8] рассмотрена проблематика ускорения коммутационных процессов защитного отключения ТП. При этом общим свойством, характеризующим специфику эксплуатации системы электроснабжения участка шахты, является то, что все виды применяемых средств автоматического защитного отключения действуют со стороны ТП, и их функция состоит в сопоставлении измеряемого (контролируемого) параметра ($F_{изм.}$) с заданным, допустимым ($F_{доп.}$) и ограничивается отделением от участковой электросети энергетического потока, формируемого ее силовым трансформатором при $F_{изм.} > F_{доп.}$ (рис. 1) [9]. Таким образом, защитная функция АЗ не распространяется на подавление электропоражающего действия обратных ЭДС АД, переходящих в режим выбега после отключения напряжения электропитания. Кроме этого, в исследовании [10] обоснованы факторы, ограничивающие функциональность и область применения АЗ в шахтных участковых электрических сетях. Концепция автоматического защитного обесточивания рудничных электротехнических комплексов обоснована в работе [11, с. 150–173, 217–219]. Предложены способы выявления опасного состояния электрической сети техническими средствами, действующими в автоматическом режиме, автономно со стороны АД электропотребителей, и обоснована целесообразность применения управляемых средств подавления обратных ЭДС, встраиваемых в структуру электрических машин.

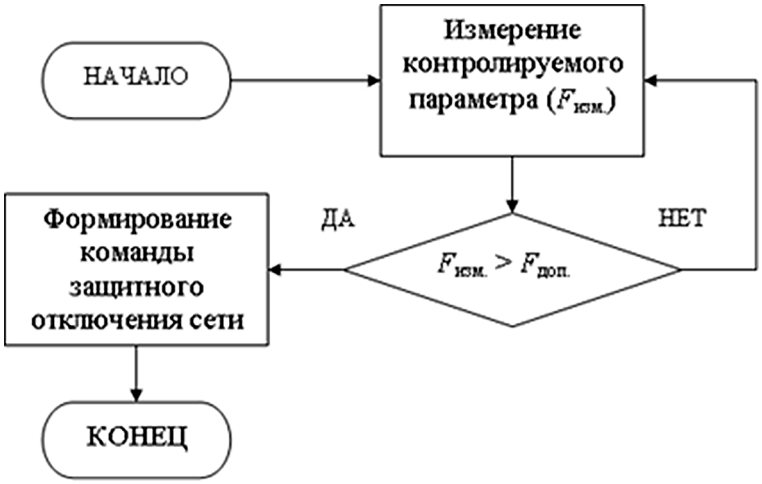


Рис. 1. Блок-схема алгоритма функционирования типового технического средства автоматической защиты от аварийных (опасных) состояний электрической сети участка шахты
Примечание: составлен авторами на основе источника [9]

В работах [12; 13] выполнен анализ технических возможностей подавления электропоражающего действия обратных ЭДС АД, включая варианты управления его электромагнитными параметрами, а также применение способа индукционно-динамического торможения ротора в процессе защитного отключения. Однако обоснованные в этих работах устройства представляют собой громоздкие конструкции, размещаемые в обособленных корпусах, что затрудняет либо делает невозможным их применение в качестве защитных устройств электромеханических установок, перемещаемых в штатных режимах эксплуатации. Кроме этого, предложенный способ индукционно-динамического торможения АД предполагает применение постоянно функционирующего в штатном режиме силового тиристорного коммутатора в цепи присоединения статора АД. Применительно к эксплуатации в условиях шахты его техническая реализация в рудничном исполнении связана со сложностью отвода тепла от силовых полупроводниковых приборов, размещенных в корпусе взрывозащищенного исполнения, и высокой стоимостью изготовления.

Цель исследования – обоснование технических решений реализации функции автоматического подавления обратных ЭДС в электросети участка промышленного предприятия, адаптируемых к условиям автономного функционирования, при размещении в структурах асинхронных двигателей и силовой коммутационной аппаратуры.

Материалы и методы исследования

В зависимости от способа исследуемого подавления электропоражающего действия обратной ЭДС АД объектом управления могут выступать:

− средство коммутации цепи «звезда» соединения фазных обмоток статора АД;

− коммутационное устройство закорачивания фаз на выходе магнитного пускателя в процессе его отключения.

В первом случае решается задача выявления техническим средством, действующим со стороны АД, опасного состояния силового кабельного присоединения (с последующей управляемой коммутацией цепи «звезда» обмоток статора), где контролируемым параметром выступает электрическая проводимость между фазой (фазами) сети и землей, что косвенно может быть представлено величиной напряжения на реагирующем органе технического средства контроля либо тока в его структуре. Критерием опасного состояния здесь выступает нормируемая для рудничных аппаратов защиты от утечек тока на землю [4; 5] величина сопротивления цепи между фазой и землей $R_{ут} \leq 30$ кОм (электросеть напряжения 660 В); $R_{ут} \leq 50$ кОм (электросеть напряжения 1140 В). Следует также учитывать и величину нормируемого показателя сопротивления тела человека $R_{ут.} = R_{чел.} = 1$ кОм.

Во втором случае решается задача автоматического подавления обратной ЭДС АД в процессе каждого отключения контактора магнитного пускателя независимо от наличия/отсутствия опасного состояния в силовом кабельном присоединении, что предотвращает саму возможность создания условий электропоражения в кабельном присоединении на интервале выбега асинхронных двигателей.

Результаты исследования и их обсуждение

Применительно к условиям эксплуатации нестационарных, перемещаемых в процессе выполнения технологических операций электромеханических установок участка промышленного предприятия, при разработке защитного средства подавления электропоражающего действия обратной ЭДС АД предпочтительно устройство, размещаемое непосредственно в структуре электродвигателя и совмещающее функции выявления опасного состояния в силовом присоединении и защитного воздействия на параметры обратной ЭДС. Таким образом, структура этого устройства должна содержать датчик опасного состояния силового присоединения (ДОС) асинхронного двигателя и управляемый им исполнительный функциональный узел. Из анализа схем выявления опасных состояний промышленных электрических сетей за основу схемы ДОС может быть взята схема выявления контакта фазы с корпусом электродвигателя, представляющая собой цепь последовательного соединения конденсатора, диода и реагирующего органа, подключенная между узлом соединения в «звезду» обмоток статора асинхронного двигателя и его металлическим корпусом [14].

При возникновении цепи утечки тока на землю в контролируемом со стороны электродвигателя кабельном присоединении к срабатыванию датчика приведет последовательность однополярных импульсов тока в реагирующем органе, снижающихся по величине по мере заряда конденсатора в последовательном соединении с диодом. В качестве воздействия на обратную ЭДС асинхронного двигателя в процессе подавления опасности электропоражения здесь следует рассматривать эффект разъединения цепи «звезда» обмоток статора. Приемлемым техническим решением является использование двухполюсного автоматического выключателя (АВ) в качестве средства разъединения цепи «звезда» фазных обмоток статора АД, поскольку:

− компактность двухполюсного автоматического выключателя (в частности, выключатели типа А3711Ф и А3711БЭ, рассчитанные на номинальный ток 160 А при линейном напряжении сети соответственно 380 и 660 В [15]) сопоставима с возможностью его размещения в металлическом коробе, сопоставимом по габаритам с отсеком кабельного ввода асинхронного двигателя средней мощности;

− независимый расцепитель автоматического выключателя может выполнять функцию реагирующего органа ДОС, что упрощает общую конструкцию и повышает надежность схемы в целом;

− функция средства коммутации согласуется с необходимостью поддержания трехфазного соединения «звезда» обмоток статора двигателя в штатном режиме эксплуатации и не предполагает дополнительного электропитания силового коммутационного устройства.

Анализ схем устройств автоматической защиты от утечек тока на землю позволяет сделать вывод, что функция короткозамыкателя (ускоренного обесточивания) поврежденной фазы (аппарат АЗУР-4 [16]) не может быть реализована при мгновенном (синхронном) появлении цепей одинаковой повышенной проводимости на землю от всех трех фаз сети. Это же ограничение касается и устройства, описанного в источнике [14], поскольку в этом случае схема датчика опасного состояния силового присоединения будет подключена между узлами одинаковых, нулевых по величине электрических потенциалов. Данное состояние относится к маловероятным, однако оно представляет потенциальную опасность и должно быть выявлено средствами автоматической защиты.

Решением этого проблемного вопроса является схема, представленная на рис. 2 [17]. Существенным дополнением здесь является применение источника напряжения (трансформатор TV1) в цепи формирования сигнала управления реагирующим органом, в данном случае реле К1, которое управляет расцепителем YU1 автоматического выключателя QF1. В этом случае достигается эффект выявления повышенной электрической проводимости на землю не одной, а любого числа фаз электрической сети. В соответствии со схемой, нарушается баланс потенциалов цепи «звезда» фазных обмоток статора АД и цепи «звезда» одинаковых проводимостей

$$(g_1 = 1/ R_{ут1} = g_2 = 1/ R_{ут2} = g_{3 =} 1/ R_{ут3} < \infty)$$

трех фаз на землю. При этом любая комбинация проводимостей фаз кабельного присоединения на землю в момент своего возникновения будет создавать условие протекания однополярных импульсов тока со вторичной обмотки трансформатора TV1 через С1-VD1-К1 – цепь. Таким образом, процесс выявления опасного состояния в кабельном присоединении и последующего подавления электропоражающего действия обратной ЭДС АД реализуется в соответствии с алгоритмом:

− исходное состояние: линейные напряжения сети поданы на статор АД → на вторичной обмотке трансформатора TV1 формируется напряжение промышленной часто-

ты; цепи повышенной проводимости ($1/R_{ут}$) между фазами сети и землей отсутствуют $R_{ут} \rightarrow$ ток в цепи C1-VD1-K1 ограничен сопротивлениями изоляции фаз кабеля электропитания;

− в момент формирования цепи повышенной проводимости ($1/ R_{ут}$) между землей и любым числом фаз сети → протекание однополупериодных импульсов тока со вторичной обмотки трансформатора TV1 по цепи C1-VD1-K1 → включение реле К1 → включение независимого расцепителя YU1 автоматического выключателя QF1 → разъединение контактов QF1.1 и QF1.2.

Сдвоенная кнопка SB1.1-SB1.2 служит для разряда конденсатора C1 с целью подготовки схемы к дальнейшему использованию.

Реакция схемы устройства на возникновение цепей повышенной проводимости между землей и фазами сети состоит в формировании сигнала на реагирующем органе (напряжения на обмотке реле К1), существенно превышающего амплитуду текущего электрического параметра (напряжения) в штатном режиме работы. Данный процесс исследован на компьютерной модели при допущениях:

− линейное напряжение трехфазной сети – 660 В, частота 50 Гц;

− принят кабель электропитания марки КГЭШ 3х35 мм^2 длиной 100 м с параметрами X_L = 0,0084 Ом при L = 0,0268 мГн (соответствует мощности 160 кВт электродвигателя потребителя); R = 0,050 Ом;

− сопротивление цепи утечки тока на землю в каждой фазе $R_{ут}$ = 30 кОм;$R_{ут}$ = 1 кОм;

− активное сопротивление и индуктивность нагрузки составляют, соответственно: R = 0,52 Ом и L = 7,1 мГн, что соответствует параметрам асинхронного двигателя 3ЭДКОФLD4 мощностью 160 кВт;

− активное сопротивление имитатора сопротивления катушки реле К1:R1 = 300 Ом, емкость конденсатора C1 – 100 мкФ.

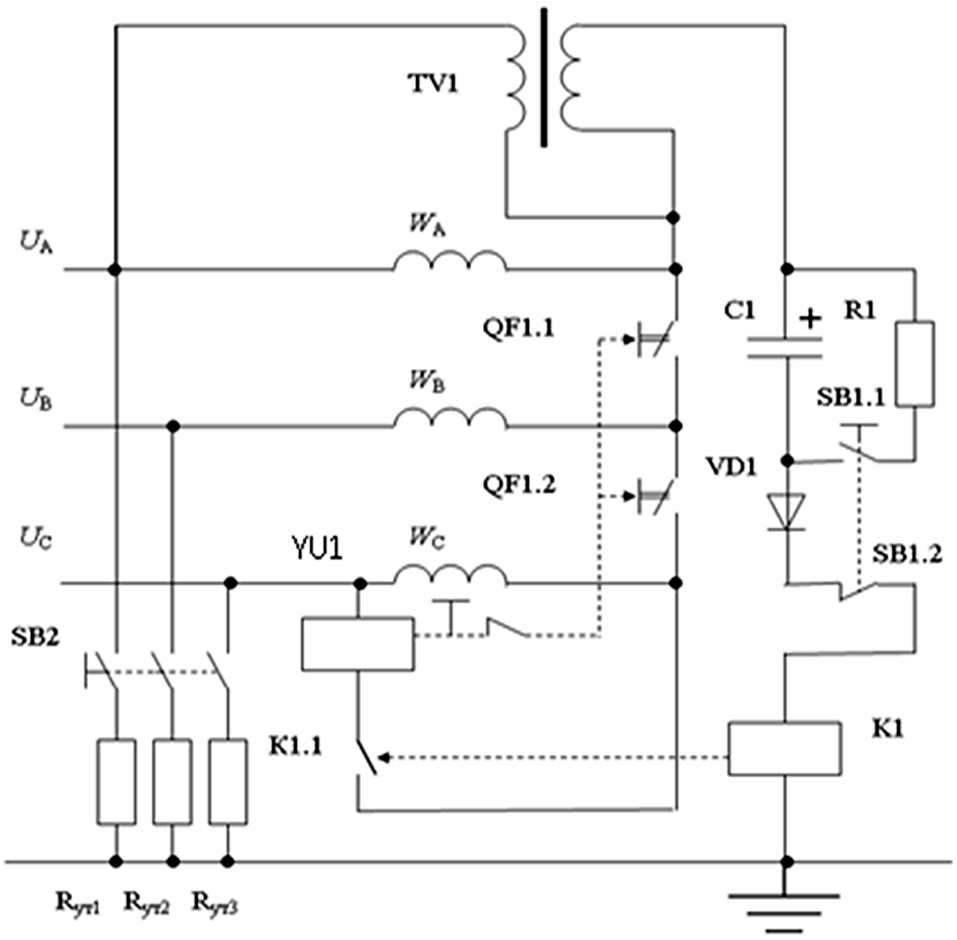


Рис. 2. Схема устройства контроля состояния кабеля электропитания асинхронного двигателя и управления процессом подавления электропоражающего действия его обратных ЭДС с функцией выявления синхронно возникающих цепей одинаковой проводимости на землю трех фаз кабельного присоединения
Примечание: составлен авторами на основе источника [17]

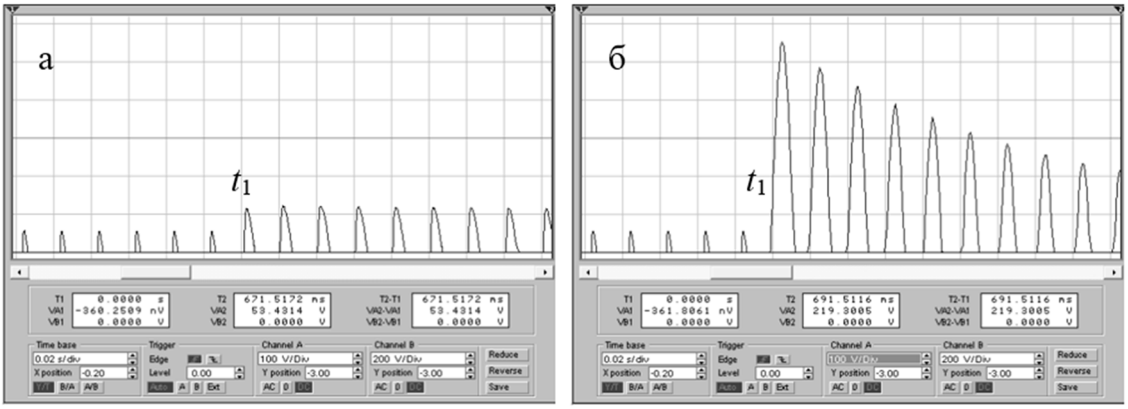


Рис. 3. Диаграммы напряжений на резисторе R1 = 300 Ом при активном сопротивлении цепи утечки каждой фазы на землю Rут = 30 кОм (а); Rут = 1 кОм (б); емкости изоляции сети Сиз = 0,5 мкФ/фазу; масштаб напряжения: 200 В/дел.; Rиз = 200 кОм/фазу
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

На рис. 3 представлены осциллограммы импульсов напряжения на катушке реле К1 при синхронном возникновении (в момент времени t_1) цепей утечки на землю с трех фаз электросети, превышающие амплитуду соответствующего параметра штатного режима, что существенно для инициализации управляющей команды на отключение автоматического выключателя (QF1) коммутации узла соединения фазных обмоток статора АД. Амплитуда импульсов напряжения высокого уровня на реагирующем органе находится в зависимости от величины активного сопротивления цепи утечки тока на землю. Так, при

$$R_{ут1} = R_{ут2} = R_{ут3} = = 30 \text{ кОм}$$

этот параметр превышает амплитуду импульсов напряжения на реагирующем органе в штатном режиме работы в 2,6 раза. При

$$R_{ут1} = R_{ут2} = R_{ут3} = 1 \text{ кОм}$$

данное соотношение достигает величины 11,08. Из этого следует возможность формирования информационного сигнала о синхронном возникновении цепей повышенной проводимости на землю со всех трех фаз электрической сети, что является существенным отличием от функциональных возможностей существующих средств автоматического выявления опасных состояний силовых присоединений промышленных участковых электросетей, где выявляется одна фаза с цепью утечки тока на землю [4, с. 145–149; 5].

Подавление электропоражающего действия обратной ЭДС АД может быть также осуществлено импульсным закорачиванием фаз на выходе магнитного пускателя, последующим после отключения его контактора. В соответствии со схемой (рис. 4) [18] исполнительным узлом устройства является короткозамыкатель VC1, выполненный по схеме мостового выпрямителя с присоединенным на выходе тиристором VS1. Процедура управления тиристором короткозамыкателя состоит в формировании пакета импульсов напряжения, подаваемых на его вход, в момент замыкания контакта КМ 1.4 контактора, перемещаемого совместно с его силовыми контактами КМ1.1 – КМ1.3 в процессе отключения пускателя, и реализуется цепью последовательного соединения дифференцирующего звена (ДЗ), одновибратора (ОВ), мультивибратора (МВ) и узла гальванической развязки (УГР).

Будучи размещенным в структуре магнитного пускателя, данное устройство позволяет подавлять обратную ЭДС присоединенного АД всякий раз при отключении контактора, действуя в автоматическом режиме. Применение данного технического решения позволяет получить принципиально новый технический результат – обеспечение схемой магнитного пускателя электробезопасного состояния силового присоединения после отключения контактора. В этом случае алгоритм защиты человека, прикоснувшегося к фазе сети, от электропоражения, завершающийся отключением автоматического выключателя участковой трансформаторной подстанции по команде аппарата защиты от утечек тока на землю, будет продолжен подавлением электропоражающего фактора в кабеле между магнитным пускателем и асинхронным двигателем электропотребителя, то есть в объекте, где прикосновение человека к фазному проводнику наиболее вероятно.

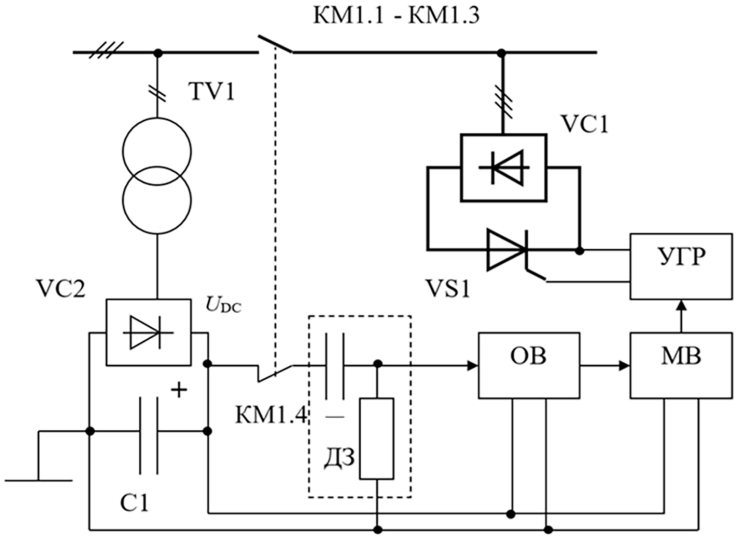


Рис. 4. Схема устройства посткоммутационного импульсного закорачивания фаз выхода коммутационного аппарата
Примечание: составлен авторами на основе источника [18]

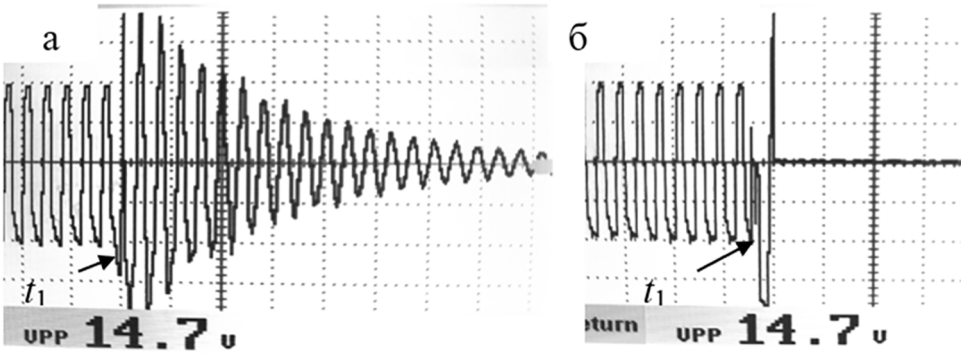


Рис. 5. Осциллограммы напряжения на резисторе утечки Rут = 1,0 кОм (масштаб делителя напряжения на входе осциллографа – 1:10): а – при отсутствии посткоммутационного закорачивания фаз на выходе контактора; б – при посткоммутационном закорачивании фаз на выходе контактора (t1 – момент отключения контактора; VPP – разность потенциалов между амплитудами напряжения положительной и отрицательной полярностей)
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Продолжительность воздействия на электросеть обратной ЭДС асинхронного двигателя в этом случае минимальна и будет определяться временем отключения контактора и временем срабатывания короткозамыкателя магнитного пускателя. Этот эффект подтвержден в ходе экспериментов (рис. 5), проведенных с целью установления специфики воздействия посткоммутационного импульсного закорачивания фаз на электрические параметры цепи утечки на землю с активным сопротивлением $R_{ут}$ = 1 кОм, имитирующей прикосновение человека к фазному проводнику, находящемуся под действием обратной ЭДС АД. В физической модели (рис. 6) работа короткозамыкателя фаз на выходе пускателя имитировалась контакторной схемой. В структуру стенда входят: КМ1; КМ2 – трехполюсные контакторы типа ПМЕ211 (напряжение катушки 220В, коммутационные параметры: напряжение 380 В, ток 25 А); SB1 – тумблер, SB2 – трехполюсный пакетный выключатель типа ПВ3-40М3. Кроме трехполюсной силовой контактной группы КМ1.1 – КМ1.3 контактор КМ1 оснащен слаботочным размыкаемым контактом КМ1.4. В качестве источника обратной ЭДС принят АД типа DK16N мощностью 1,5 кВт. Линейное напряжение сети 380 В. Активные сопротивления и емкости изоляции имитируются резисторами $R_{из}$ =150 кОм и конденсаторами, емкость которых в процессе исследования изменялась ступенчато в диапазоне $C_{из}$ = 0,2 ÷ 0,7 мкФ/фазу с шагом в 0,1 мкФ/фазу.

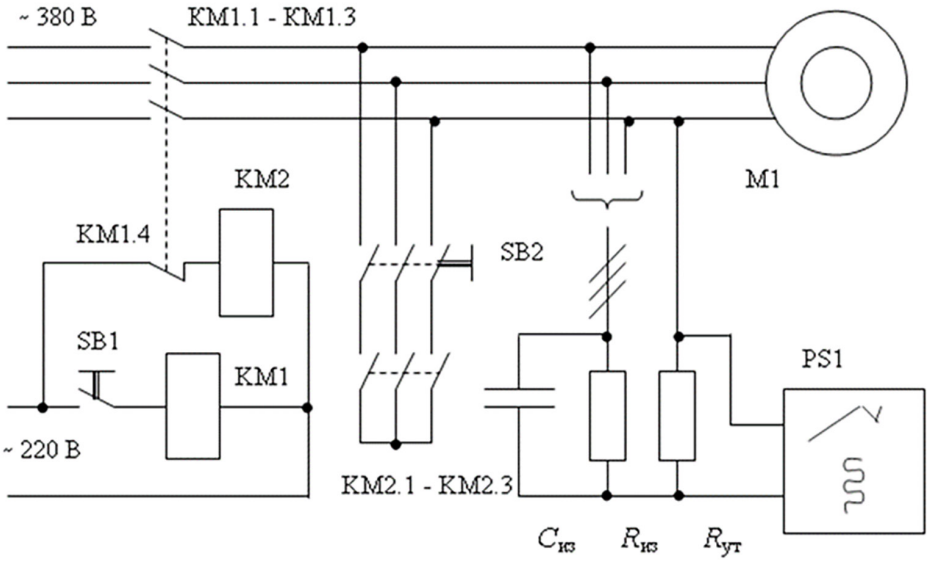


Рис. 6. Схема стенда исследования процесса подавления электропоражающего действия обратной ЭДС асинхронного двигателя (М1) методом посткоммутационного закорачивания фаз на выходе коммутационного аппарата (КМ1)
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Электронным осциллографом PS1 регистрируется напряжение на резисторе $R_{ут}$ = 1 кОм цепи утечки тока на землю, что позволяет выполнить пересчет напряжения на величину тока. Алгоритм проведения эксперимента состоит в последовательности действий:

− исходные установки: SB1, SB2 отключены → КМ1 отключен, КМ2 включен → КМ2.1 – КМ2.3 замкнуты; осциллограф PS1 включен;

− включение тумблера SB1→ включение КМ1 (замыкание КМ1.1 – КМ1.3, размыкание КМ1.4) → отключение КМ2 (размыкание КМ2.1 – КМ2.3);

− включение вручную пакетного выключателя SB2;

− отключение тумблера SB1→ отключение КМ1 (размыкание КМ1.1 – КМ1.3, замыкание КМ1.4) → включение КМ2 (замыкание КМ2.1 – КМ2.3);

− регистрация параметров схемой осциллографа PS1.

Данный алгоритм присоединения короткозамыкателя фаз в процессе их импульсного посткоммутационного закорачивания фаз на выходе контактора позволяет исключить эффект междуфазного короткого замыкания при наличии на силовом присоединении напряжения сети.

Анализ осциллограмм, полученных в ходе экспериментального исследования физической модели (схема по рис. 6), позволяет установить, что зафиксированный временной интервал подавления тока в цепи утечки на землю от момента t_1 отключения контактора КМ1 составляет $\Delta t = 0{,}024 \pm 0{,}006$ с. Отключение контактором напряжения питания асинхронного двигателя сопровождается переходным процессом изменения напряжения на резисторе цепи утечки на землю, где имеет место всплеск напряжения – обратной ЭДС АД ($e_{обр}(t)$) с разностью амплитуд в 147 В при последующем ее экспоненциальном снижении по амплитуде и частоте. За это время ($t_1 \le \Delta t \le t_2$) накопленный показатель количества электричества Δq в теле человека, оцениваемый по модулю тока, может быть определен из выражения

$$\Delta q = \int_{t_1}^{t_2} \left| i(t) \right| dt = \frac{1}{R_{ут}} \int_{t_1}^{t_2} \left| e_{обр}(t)\, dt \right|.$$

Однако, учитывая малую величину параметра Δt при срабатывании короткозамыкателя фаз на выходе магнитного пускателя, на данном интервале приближенно можно принять синусоидальный характер изменения напряжения, приложенного к цепи утечки тока на землю. Тогда действующее значение этого напряжения

$$U_{действ.} \approx 147/2\sqrt{2} = 51{,}97 \text{ В},$$

и рост количества электричества в теле человека будет составлять:

$$\Delta q = I_{действ} \cdot \Delta t = (51{,}97/1000) \cdot (0{,}024 \pm 0{,}006) = 0{,}0012472 \pm 0{,}0003116 \text{ А·с} \approx 1{,}25 \pm 0{,}31 \text{ мА·с}.$$

При пропорциональном пересчете на электросети линейных напряжений других номинальных уровней величина Δq составит

− сеть линейного напряжения 660 В: $\Delta q = (660/380) \cdot (1{,}25 \pm 0{,}31) = (2{,}17 \pm 0{,}54)$ мА·с;

− сеть линейного напряжения 1140 В: $\Delta q = (1140/380) \cdot (1{,}25 \pm 0{,}31) = (3{,}75 \pm 0{,}93)$ мА·с.

В сравнении с уровнями количества электричества в теле человека в условиях действия существующих автоматических защит от утечек тока на землю (в частности, применительно к шахтным участковым электросетям) эти величины несопоставимо малы, что позволяет утверждать о приемлемости технической реализации предложенного способа подавления электропоражающего действия обратной ЭДС асинхронного двигателя.

Заключение

Актуальная научно-техническая задача подавления электропоражающего действия обратной ЭДС асинхронного двигателя в процессе его отключения может быть решена при его дооснащении средством двухполюсной коммутации цепи соединения обмоток статора, управляемым устройством автоматического выявления опасного состояния в силовом кабельном присоединении. Присоединение данного устройства к узлу соединения фазных обмоток статора последовательно со вторичной обмоткой трансформатора напряжения, подключенного первичной обмоткой параллельно к одной из этих обмоток, позволяет выявлять момент возникновения цепи повышенной электрической проводимости между землей и любым числом фаз электрической сети. Данный эффект подтвержден результатами компьютерного моделирования.

Дооснащение схем магнитных пускателей средствами автоматического импульсного посткоммутационного закорачивания фаз электрической сети позволяет распространить функцию защиты человека от электропоражения, выполняемую аппаратами защиты от утечек тока на землю, на кабельные присоединения, находящиеся под воздействием обратных ЭДС асинхронных двигателей после отключения силовых коммутационных аппаратов. Обоснованный способ подавления обратных ЭДС асинхронных двигателей в процессе их отключения позволяет минимизировать временной интервал их воздействия на кабельные присоединения, препятствуя росту количества электричества в теле человека при его касании к фазе сети на выходе магнитного пускателя.

Список литературы

1. Жуковский Ю. Д., Козярук А. Е., Коржев А. А., Кривенко А. В. Система мониторинга и оценки остаточного ресурса силового электрооборудования // Записки горного института 2008. Т. 138. С. 17–21. URL: https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/7187/5112 (дата обращения: 09.10.2026).

2. Еремина Т. В., Санжиева С. Е., Ахаржанова Т. В. Вероятностная оценка системы защиты нестационарных электроустановок // Вестник КрасГАУ, Красноярск, 2017. № 7. С. 72–78. URL: https://kgau.editorum.ru/ru/storage/viewWindow/148504 (дата обращения: 07.09.2026).

3. Булычев А. В. Выбор параметров срабатывания защиты от однофазных замыканий на землю в распределительных сетях при разных режимах нейтрали // Релейная защита и автоматизация. 2022. № 1 С. 20–29. URL: https://ipk-rza.ru/sites/default/files/files/Булычев%20А.В._защ%20от%20ОЗЗ.pdf (дата обращения: 09.10.2026).

4. Колосюк В. П., Товстик Ю. В. Электробезопасность в горной промышленности: монография / под ред. В. П. Колосюка. Донецк, Ноулидж (Донецкое отделение), 2014. 475 с.

5. Белошистов А. И., Савицкий А. В., Савицкий В. Н. Модернизация аппаратов защиты от токов утечки АЗУР-1 // Взрывозащищенное электрооборудование. Донецк: ГУ НИИВЭ, 2017. № 1 (52). С. 45–57. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_36413570_10448739.pdf (дата обращения: 10.08.2026).

6. Маренич О. К., Ковалева И. В. Элементы конструкции автоматического выключателя А37ХХ как фактор возникновения его потенциально опасного состояния // Вестник Донецкого национального технического университета. Донецк: ДОННТУ, 2018. Вып 4 (14). С. 47–52. URL: http://vestnikdonntu.ru/dl/2018/04/kovalyova.pdf (дата обращения: 10.08.2026).

7. Маренич О. К. Повышение эффективности автоматической защиты от коротких замыканий средствами управляемой коммутации силовых цепей источника питания // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. Донецк: ДонИЖТ, 2019. Вып. 55. С. 11–19. URL: http://drti.donbass.com/wp-content/uploads/2021/05/sbornik-55.pdf (дата обращения: 10.08.2026).

8. Чернов И. Я., Золотарев Е. В., Ковалева И. В. Система автоматического ограничения перенапряжений как структура управления коммутационными процессами в силовом трансформаторе шахтной участковой трансформаторной подстанции // Информатика и кибернетика. Донецк: ДонНТУ, 2020. № 1 (19). С. 52–62. URL: https://old.infcyb.donntu.ru/IC_19.pdf (дата обращения: 10.08.2026).

9. Вареник Е. А., Чернов И. Я., Золотарев Е. В., Савицкий А. В., Савицкий В. Н. Идеология построения электрических защит взрывобезопасных трансформаторных подстанций серии ТВПШ // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. тр. ГУ «НИИВЭ». Донецк: ООО «Типография Восток Пресс», 2017. № 1 (52). С. 14–24. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_36413566_23861672.pdf (дата обращения: 10.08.2026).

10. Маренич К. Н., Денисова А. И. Анализ факторов ограничения функции защиты человека от электропоражения в электрической сети участка шахты // Горная промышленность. 2023. № 4. С. 54–58. URL: https://mining-media.ru/en/articles/original-paper/18140-analysis-of-factors-limiting-the-efficiency-of-human-protection-against-electric-shocks-in-the-power-supply-network-of-the-mine-site (дата обращения: 10.08.2026). DOI: 10.30686/1609-9192-2023-4-54-58.

11. Маренич К. Н. Теоретические основы и принципы применения защитного обесточивания рудничных электротехнических комплексов: монография М.-Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. 240 с. [Электронный ресурс]. URL: https://znanium.ru/catalog/document?id=382295 (дата обращения: 10.08.2026). ISBN 978-5-9729-0749-6.

12. Дубинка Е. С. Индукционно-динамическое торможение асинхронного двигателя как способ ограничения энергетического воздействия на шахтную электрическую сеть в процессе защитного отключения // Вестник Донецкого национального технического университета. Донецк: ДОННТУ, 2019. Вып. 2 (16). С. 80–88. URL: http://vestnik.donntu.org/dl/2019/02/dubinka.pdf (дата обращения: 10.08.2026).

13. Дубинка Е. С., Ковалева И. В. Анализ технических возможностей подавления обратного энергетического потока асинхронного двигателя // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. тр. ГУ «НИИВЭ». Донецк: ООО «Типография Восток Пресс», 2017. № 1 (52). С. 66–72. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_36413572_53769204.pdf (дата обращения: 10.08.2026).

14. Гуляева И. Б., Дубинка Е. С., Маренич М. К., Муфель Л. А., Демченко О. А. Проводимость изоляции электрической сети участка шахты как фактор риска электротравматизма. Проблемные вопросы и пути их решения // Вестник Донецкого национального технического университета. Донецк, 2021. Вып. 3 (25) С. 34–47. URL: https://old.vestnik.donntu.ru/dl/2021/03/guliaeva.pdf (дата обращения: 10.08.2026).

15. Выключатели автоматические серии А3700 Ф, Б, БР: техническое описание, 16 с. [Электронный ресурс]. URL: https://www.elec.ru/viewer?url=/files/127/000000972/attfile/a37fbbr.pdf (дата обращения: 10.08.2026).

16. Аппарат защиты от токов утечки унифицированный рудничный АЗУР-4. Руководство по эксплуатации (совмещено с паспортом) 0.06.466.179 РЭ / ООО «Завод взрывозащищенного и общепромышленного оборудования «Горэкс-Светотехника», Прокопьевск. 24 с. [Электронный ресурс]. URL: https://prkzavod.ru/d/azur4.pdf (дата обращения: 17.10.2026).

17. Патент № 2856118 Российская Федерация, МПК H02H7/08 (2006.01), H02H3/02 (2006.01) Устройство защиты от действия обратного энергетического потока асинхронного двигателя на точку повреждения в кабеле электропитания: № 2025117038: заявл. 18.06.2025: опубл. 11.02.2026 / Маренич К. Н., Руссиян С. А., Денисова А. И.; заявитель ФГБОУ ВО «ДонНТУ». 14 с.: 2 ил. // ФИПС. [Электронный ресурс]. URL: https://www1.fips.ru/iiss/document.xhtml?faces-redirect=true&id=49e8c273b40a9503e2ca79248cffda4c (дата обращения: 10.08.2026).

18. Маренич К. Н., Руссиян С. А., Денисова А. И. Постkоммутационное импульсное закорачивание фаз как фактор повышения безопасности эксплуатации шахтной участковой электрической сети напряжения 3,3 кВ // Горная промышленность. 2024. № 3. С. 40–44. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-3-40-44.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 004.942:621.865.8
DOI

CC BY 4.0

ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УПРАВЛЕНИЯ СЕМИЗВЕННЫМ ЭКЗОСКЕЛЕТОМ НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ДИНАМИКИ В СИСТЕМЕ СИМВОЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ И ПЕРСПЕКТИВЫ НЕЙРОСЕТЕВОЙ РЕАЛИЗАЦИИ

Маслова К. С. ORCID ID 0000-0003-2932-7202

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет „МЭИ”», Москва, Российская Федерация, e-mail: maslowaksusha1@yandex.ru

Проблема повышения эффективности системы управления сложными техническими объектами типа экзоскелетов становится особенно важной в контексте цифровизации и интеграции технологий искусственного интеллекта в системы управления движениями человекоподобных устройств. Разработка интеллектуальных моделей, позволяющих создать активно взаимодействующие с пользователем экзоскелетные механизмы, является перспективным направлением, что определяет актуальность темы предложенного исследования. Целью данной работы является исследование возможностей управления целенаправленным движением сложных технических объектов, которыми являются экзоскелеты, с применением классических методов механики и теории управления, и исследование возможности применения интеллектуальных цифровых систем, в том числе искусственных нейронных сетей. Объектом исследования стало программно-алгоритмическое обеспечение системы управления экзоскелетом, включающее математическую модель, численные алгоритмы решения задач динамики и программную реализацию вычислительного эксперимента в системе символьных вычислений Wolfram Mathematica 11.3. При исследовании процесса управления активными экзоскелетами использовались результаты теоретического анализа современных научно-технических изданий. Описаны возможности применения кинематического и динамического управления движениями модели. Для верификации предложенной модели осуществлена численная оценка погрешности решения прямой задачи динамики и оценка работы созданного программного обеспечения для реализации предложенной модели. В рамках исследования разработана схема применения системы дифференциальных уравнений движения при решении прямой и обратной задач динамики для модели экзоскелетного механизма с семью подвижными звеньями, описана методика ее применения в управлении биомехатронными комплексами человек – экзоскелет. Программная реализация вычислительного эксперимента осуществлена в системе символьных вычислений Wolfram Mathematica 11.3. Предложена архитектура программной системы, реализующей решения прямой и обратной задач динамики и создающей формальную основу для последующей интеграции нейросетевых алгоритмов. Представленные результаты исследования могут быть применены для создания базы движений при обучении нейронной сети в системе интеллектуального управления экзоскелетом.

Ключевые слова: экзоскелетный механизм, программно-алгоритмическое обеспечение, искусственные нейронные сети, символьные вычисления, семь звеньев, система дифференциальных уравнений, численные методы, верификация

SOFTWARE AND ALGORITHMIC SUPPORT FOR THE CONTROL OF SEVEN-LINK EXOSKELETON BASED ON SOLVING DYNAMICS PROBLEMS IN A SYSTEM OF SYMBOLIC CALCULATIONS AND THE PROSPECTS FOR NEURAL NETWORK IMPLEMENTATION

Maslova K. S. ORCID ID 0000-0003-2932-7202

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “National Research University “MEI”, Moscow, Russian Federation, e-mail: maslowaksusha1@yandex.ru

The problem of improving the efficiency of control systems for complex technical objects, such as exoskeletons, becomes particularly important in the context of digitalization and the integration of artificial intelligence technologies into control systems for the movements of human-like devices. The development of intelligent models that make it possible to create exoskeleton mechanisms that actively interact with the user is a promising direction, which determines the relevance of the topic of the proposed research. The aim of this work is to study the possibilities of controlling the purposeful movement of complex technical objects – in this case, exoskeletons – using classical methods of mechanics and control theory, and to investigate the possibility of using intelligent digital systems, including artificial neural networks. The object of the study was the software and algorithmic support for the exoskeleton control system, which includes a mathematical model, numerical algorithms for solving dynamic problems, and the software implementation of a computational experiment in the Wolfram Mathematica 11.3 symbolic computation system. When studying the process of controlling active exoskeletons, the results of a theoretical analysis of modern scientific and technical publications were used. The possibilities of applying kinematic and dynamic control of the model’s movements are described. To verify the proposed model, a numerical assessment of the error in solving the direct dynamic problem was carried out, along with an evaluation of the performance of the developed software for implementing the proposed model. Within the framework of the study, a scheme for applying a system of differential equations of motion in solving direct and inverse dynamic problems for a model of an exoskeleton mechanism with seven movable links has been developed; the methodology for its application in controlling human-exoskeleton bimechatronic systems is described. The software implementation of the computational experiment was carried out in the Wolfram Mathematica 11.3 symbolic computation system. An architecture of a software system is proposed that implements solutions to direct and inverse dynamic problems and creates a formal basis for the subsequent integration of neural network algorithms. The presented research results can be used to create a motion database when training a neural network in an exoskeleton’s intelligent control system.

Keywords: exoskeleton mechanism, seven links, software and algorithmic support, artificial neural networks, symbolic computation, system of differential equations, numerical methods, verification

Введение

Экзоскелетные механизмы широко применимы для решения медицинских [1, 2], промышленных и специальных задач [3]. Наиболее часто используют активные экзоскелеты с электромеханическим управлением [4, 5], конструкционным отличием моделей является различное количество звеньев [6]. Потребность в совершенствовании активных экзоскелетов с различными способами управления, в том числе интеллектуальными [7, 8], динамично возрастает в связи с широким спектром применения данного типа устройств, что определяет актуальность данного исследования[1]. Малое, в сравнении с опорно-двигательным аппаратом человека, число степеней свободы экзоскелетов приводит к недостаточной комфортабельности [9, 10] и оказывает отрицательное влияние на динамику мехатронной человеко-машинной системы. Это должно учитываться в процессе создания экзоскелетов, так как количество звеньев экзоскелета оказывает значительное влияние на движения человека в киберфизической системе [11, 12]. Практическая значимость исследования заключается в повышении комфортабельности модели экзоскелета путем добавления новых звеньев, а именно весомых стоп, и тем самым увеличения степеней подвижности механизма.

Цель исследования – анализ существующих подходов к классу задач, связанных с моделированием экзоскелетных систем. Разработка программно-алгоритмического обеспечения управлением математической модели экзоскелетного механизма с семью подвижными звеньями и поиск новых возможностей решения задачи управления с использованием искусственных нейронных сетей в качестве инструмента ускорения расчетов на основе предложенной модели.

Материалы и методы исследования

Исследование основано на теоретико-прикладном анализе актуальных научно-технических исследований. В ходе описания математической модели были использованы уравнения Лагранжа второго рода, моделирование проводилось в программной системе символьных вычислений Wolfram Mathematica 11.3. Для построения системы дифференциальных уравнений движения применялось символьное дифференцирование в пакете Wolfram Mathematica 11.3, полученные выражения левой части системы дифференциальных уравнений движения проверялись на размерность, затем система решалась численными методами.

Программная реализация модели выполнена в виде набора модулей, соответствующих блокам схемы (рис. 2): модуль формирования уравнений движения, модуль решения обратной задачи динамики, модуль аппроксимации и интерполяции управляющих моментов, модуль численного интегрирования прямой задачи динамики, модуль оценки погрешности и модуль визуализации. Обмен данными между модулями осуществляется через дискретные ряды значений с шагом $\Delta t = 0{,}01$ с (частота 100 Гц).

Для верификации результатов проводилось сравнение численного решения прямой задачи динамики с заданным кинематическим законом движения; в качестве количественных показателей использовались максимальная абсолютная и среднеквадратичная ошибки по углам звеньев. Вычислительная сложность и время расчета оценивались при решении прямой и обратной задач динамики для семизвенного механизма.

Методической основой послужили методы теории управления (программное кинематическое управление, динамическое управление по моментам), методы численного анализа (интегрирование систем обыкновенных дифференциальных уравнений, полиномиальная аппроксимация и интерполяция) и методы символьных вычислений. Перспективным направлением дальнейших исследований является замена блока численного интегрирования обученной искусственной нейронной сетью, что требует предварительного формирования базы эталонных движений на основе разработанной модели.

Результаты исследования и их обсуждение

В существующих подходах рассматриваются модели до пяти подвижных весомых звеньев, при этом контакт с опорной поверхностью предполагается точечным, то есть отсутствуют стопы. Такие модели являются недостаточно адекватными реальным режимам функционирования опорно-двигательного аппарата человека, так как стопы играют важную роль в динамике антропоморфной ходьбы. Следовательно, необходимо разработать новые модели экзоскелетов, которые бы учитывали наличие весомых инерционных стоп, приближенных к биологическому прототипу, в отличие от рассмотренных ранее [10, 13]. Добавление новых звеньев в конструкцию экзоскелета приводит к необходимости полной перестройки математической модели механизма. Это определяет особенность

[1] Следует учитывать, что к публикации [8] в 2026 г. издательством Nature выпущено редакционное примечание (Editor's Note), указывающее на возникшие вопросы к доступности данных и программного кода, необходимых для подтверждения результатов исследования.

рассматриваемой задачи моделирования экзоскелетного устройства – семь подвижных инерционных шарнирно соединенных звеньев. Вследствие введения двух новых обобщенных координат, описывающих положение стоп (рис. 1), в сравнении с моделью с пятью звеньями, полностью изменяется система дифференциальных уравнений движения. При использовании углов ϕ_i (i = 0, 1, 2, …, 6) между звеньями не подходят аналитические функции, которые управляли движением пятизвенного антропоида [10, 13], так как угол наклона голени в новой модели зависит от угла наклона стопы, и далее по цепочке углы наклона остальных звеньев также зависят от положения нового элемента – стопы опорной ноги. Соответственно, необходимы новые управляющие функции для всех семи звеньев при кинематическом управлении моделью экзоскелета со стопами.

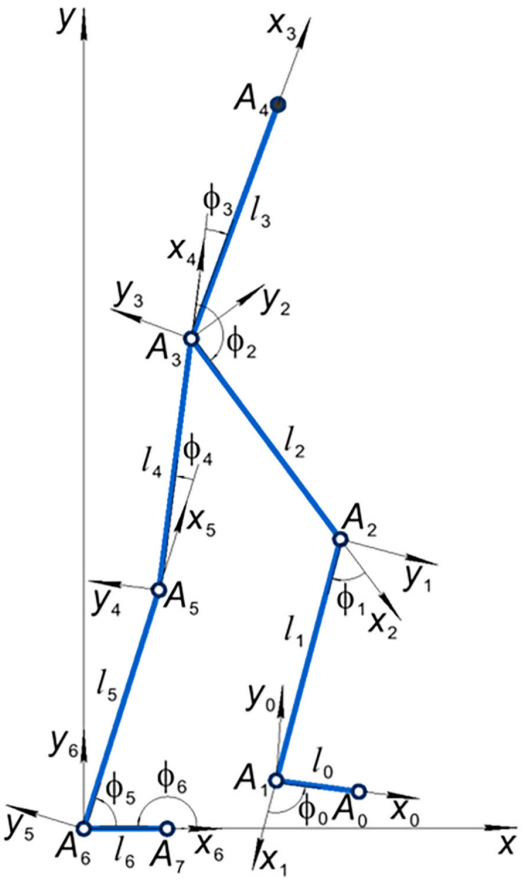


Рис. 1. Модель экзоскелетного механизма с семью подвижными звеньями со стопами в фазе постановки на опору переносимой ноги
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

Однако при увеличении количества звеньев сложность системы управления растет нелинейно, возникает новая особенность решения задачи управления походки семизвенного экзоскелета. Это требует новых подходов к решению задачи управления. Таким образом, предложенный в работе метод решения обратной задачи динамики отличается от существовавших ранее тем, что в управляющих моментах отсутствует полная периодичность движения, возникает только частично периодическая походка. Соответственно, при решении прямой задачи динамики возникает необходимость преобразования полученных управляющих моментов таким образом, чтобы была возможность их коррекции для достижения необходимой точности движений экзоскелета, что ранее не требовалось [10, 13]. Предложенная модель является развитием работ [11, 14] в направлении усложнения путем добавления новых звеньев в виде весомых стоп с целью приближения к биологическому прототипу и работы [15] путем включения в модель электроприводов и полезной нагрузки, расположенной на конце корпуса, с целью приближения к технической реализации. Соответственно, предложенная в данной работе модель является новой и оригинальной, отличающейся от всех моделей, созданных ранее [11–15]. Таким образом, новизна исследования заключается в возникновении трех новых составляющих при моделировании семизвенного экзоскелета с весомыми стопами и электроприводами – это новая механическая аналитическая модель в виде системы дифференциальных уравнений движения, новая кинематическая модель управления, новая динамическая модель управления.

Уровень безопасности эксплуатации мехатронной системы экзоскелетного механизма и повышение комфорта пользователя зависит от качества управления и стабилизации экзоскелета с человеком внутри во внешних условиях неопределенности [15]. При решении практической задачи управления движением активного семизвенного экзоскелета с наличием весомых стоп, возникает необходимость разработки модели и описания алгоритмов проектирования управления исполнительными механизмами экзоскелетного устройства.

Рассмотрим модель экзоскелета с семью подвижными, весомыми абсолютно твердыми шарнирно соединенными звеньями, с электроприводами и исполнительным механизмом, движущегося в вертикальной плоскости (рис. 1). Кинетическая энергия подвижных стержней A_iA_{i+1}, (i = 0,1,2,…, 6), с учетом точки ветвления A_3, в которой соединяются опорная нога, переносимая и корпус, может быть вычислена по формуле

$$T=\frac{1}{2}\sum_{i=0}^{3}\left[m_i\left(\dot{x}_{A_i}^2+\dot{y}_{A_i}^2\right)+2m_i\begin{vmatrix}\dot{x}_{A_i} & \dot{y}_{A_i} & 0\\ 0 & 0 & \sum_{j=0}^{i}\dot{\phi}_j\\ r_x & r_y & 0\end{vmatrix}+I_i\left(\sum_{j=0}^{i}\dot{\phi}_j\right)^2\right]+$$

$$+\left[m_4\left(\dot{x}_{A_3}^2+\dot{y}_{A_3}^2\right)+2m_4\begin{vmatrix}\dot{x}_{A_3} & \dot{y}_{A_3} & 0\\ 0 & 0 & \sum_{j=0,\,j\neq 3}^{4}\dot{\phi}_j\\ r_x & r_y & 0\end{vmatrix}+I_4\left(\sum_{j=0,\,j\neq 3}^{4}\dot{\phi}_j\right)^2\right]+$$

$$+\frac{1}{2}\sum_{i=5}^{6}\left[m_i\left(\dot{x}_{A_i}^2+\dot{y}_{A_i}^2\right)+2m_i\begin{vmatrix}\dot{x}_{A_i} & \dot{y}_{A_i} & 0\\ 0 & 0 & \sum_{j=0,\,j\neq 3}^{i}\dot{\phi}_j\\ r_x & r_y & 0\end{vmatrix}+I_i\left(\sum_{j=0,\,j\neq 3}^{i}\dot{\phi}_j\right)^2\right], \qquad (1)$$

где (1) x_{A_i}, y_{A_i} – координаты точки A_i, являющейся полюсом для рассматриваемого звена A_iA_{i+1}; r_x, r_y – координаты проекции радиус-вектора центра масс звена A_iA_{i+1} относительно полюса A_i; m_i – масса звена; I_i – момент инерции звена относительно полюса, то есть момент инерции стержня относительно его начала; l_i – длина звена, i – номер звена (i = 0, 1, 2, …, 6). В случае звена, соединенного с опорой, скорость полюса равна нулю.

Используя процедуру, предложенную в работе [16], подсчитывалась кинетическая энергия электроприводов и вращающихся роторов, расположенных в шарнирах A_i (i = 0, 1, 2, …, 6), с учетом передаточных чисел редукторов. Это отличает данную модель от работы [15], в которой в модели механизма отсутствовали электроприводы. В рассматриваемой модели экзоскелетного механизма предполагается, что центр масс каждого стержня, соединяющего шарниры, расположен посередине стержня. Наличие двигателей и редукторов учитывается дополнительными массами, их кинетическая и потенциальная энергии подсчитывались отдельно. Таким образом, кинетическая и потенциальная энергии всего экзоскелетного механизма, по свойству аддитивности, являются суммами кинетических и потенциальных энергий всех стержней, входящих в механизм, и всех электроприводов с учетом вращения массивных роторов и передаточных чисел.

Для данной модели выражения для энергий движения не поддаются обобщению, поэтому приведем выражение для фиксированного стержня, например № 3, условно соответствующего корпусу экзоскелетного механизма.

$$\begin{aligned}2T_3 = {} & I_3\left(\sum_{j=0}^{3}\phi_j\right)^2+m_3\Bigg(\Bigg(\sum_{j=0}^{2}l_j^2+2\left(l_0l_1\cos\phi_1+l_1l_2\cos\phi_2+l_0l_2\cos\left(\phi_1+\phi_2\right)\right)+\\ & +l_2l_3\cos\phi_3+l_1l_3\cos\left(\phi_2+\phi_3\right)+l_0l_3\cos\left(\phi_1+\phi_2+\phi_3\right)\Bigg)\dot{\phi}_0^2+\\ & +\left(l_1^2+l_2^2+2l_1l_2\cos\phi_2+l_2l_3\cos\phi_3+l_1l_3\cos\left(\phi_2+\phi_3\right)\right)\dot{\phi}_1^2+\\ & +\left(l_2^2+l_2l_3\cos\phi_3\right)\dot{\phi}_2^2+\Big(2\left(l_1^2+l_2^2+l_0l_1\cos\phi_1+2l_1l_2\cos\phi_2+l_0l_2\cos\left(\phi_1+\phi_2\right)\right)+\\ & +2\left(l_2l_3\cos\phi_3+l_1l_3\cos\left(\phi_2+\phi_3\right)\right)+l_0l_3\cos\left(\phi_1+\phi_2+\phi_3\right)\Big)\dot{\phi}_0\dot{\phi}_1+\\ & +\Big(2\left(l_2^2+l_1l_2\cos\phi_2+l_0l_2\cos\left(\phi_1+\phi_2\right)+l_2l_3\cos\phi_3\right)+\\ & +l_1l_3\cos\left(\phi_2+\phi_3\right)+l_0l_3\cos\left(\phi_1+\phi_2+\phi_3\right)\Big)\dot{\phi}_0\dot{\phi}_2+\\ & +\Big(2\left(l_2^2+l_1l_2\cos\phi_2+l_2l_3\cos\phi_3\right)+l_1l_3\cos\left(\phi_2+\phi_3\right)\Big)\dot{\phi}_1\dot{\phi}_2+\\ & +\left(l_2l_3\cos\phi_3+l_1l_3\cos\left(\phi_2+\phi_3\right)+l_0l_3\cos\left(\phi_1+\phi_2+\phi_3\right)\right)\dot{\phi}_0\dot{\phi}_3+\\ & +\left(l_2l_3\cos\phi_3+l_1l_3\cos\left(\phi_2+\phi_3\right)\right)\dot{\phi}_1\dot{\phi}_3+\left(l_2l_3\cos\phi_3\right)\dot{\phi}_2\dot{\phi}_3\Big). \qquad (2)\end{aligned}$$

Находим энергию гравитационного взаимодействия j-го стержня:

$$\Pi_j = m_j g\, y_{C_j}, \tag{3}$$

где y_{Cj} – ордината центра масс j-го стержня.

Управляющие моменты M_i, создаваемые электроприводами, приложены в цилиндрических шарнирах A_i (i = 0, 1, 2, …, 6). Положительным принято направление момента против хода стрелки часов. В зоне контакта опорной ноги с поверхностью крайний цилиндрический шарнир считается жестко закрепленным на опорной поверхности.

Составляя уравнения Лагранжа второго рода, формируем систему дифференциальных уравнений движения системы экзоскелетного механизма с семью подвижными звеньями с учетом массы электродвигателей совместно с редукторами и момента инерции вращающегося ротора электродвигателя [11]. Полная система в матричной форме:

$$A(\varphi)\ddot{\varphi} + B(\varphi,\dot{\varphi})\dot{\varphi} + C(\varphi) = M, \tag{4}$$

где A – матрица инерции 7×7, B – матрица кориолисовых и центробежных членов 7×7, C – гравитационные члены 7×1, M – вектор управляющих моментов 7×1. Элементы данных матриц привести не представляется возможным ввиду их громоздкости.

Приведем в качестве примера уравнение, условно соответствующее звену № 3.

$$\begin{aligned}
&\left(I_3 + m_H l_3^2 + 0.5\left(m_3 + 2m_H\right) l_3 \sum\nolimits_{j=0}^{2} l_j \cos\left(\sum\nolimits_{i=j+1}^{3}\phi_i\right)\right)\ddot{\phi}_0 + \\
&+\left(I_3 + m_H l_3^2 + 0.5\left(m_3 + 2m_H\right) l_3 \sum\nolimits_{j=1}^{2} l_j \cos\left(\sum\nolimits_{i=j+1}^{3}\phi_i\right)\right)\ddot{\phi}_1 + \\
&+\left(I_3 + m_H l_3^2 + 0.5\left(m_3 + 2m_H\right) l_3 l_2 \cos\left(\phi_3\right)\right)\ddot{\phi}_2 + \\
&+\left(I_3 + m_H l_3^2 + Ie_3 k_3^2\right)\ddot{\phi}_3 + 0.5 g\left(m_3 + 2m_H\right) l_3 \cos\left(\sum\nolimits_{i=0}^{3}\phi_i\right) + \\
&+0.5\left(m_3 + 2m_H\right) l_3 \left(\left(\sum\nolimits_{j=0}^{2} l_j \sin\left(\sum\nolimits_{i=j+1}^{3}\phi_i\right)\right)\dot{\phi}_0^2 + \right. \\
&\left.+\left(\sum\nolimits_{j=1}^{2} l_j \sin\left(\sum\nolimits_{i=j+1}^{3}\phi_i\right)\right)\dot{\phi}_1^2 + l_2 \sin\left(\phi_3\right)\dot{\phi}_2^2\right) + \\
&+\left(m_3 + 2m_H\right) l_3 \left(\left(\sum\nolimits_{j=1}^{2} l_j \sin\left(\sum\nolimits_{i=j+1}^{3}\phi_i\right)\right)\dot{\phi}_0\dot{\phi}_1 + \right. \\
&\left.+ l_2 \sin\left(\phi_3\right)\left(\dot{\phi}_0 + \dot{\phi}_1\right)\dot{\phi}_2\right) = M_3 - M_2.
\end{aligned} \tag{5}$$

где k_3 – передаточное число редуктора; Ie_3 – момент инерции ротора электродвигателя относительно оси вращения, приводящего в движение звено № 3; m_H – сосредоточенная масса, моделирующая полезную нагрузку, расположенная в точке A_4; g – ускорение свободного падения, $M_3 - M_2$ – это момент, действующий на звено № 3 со стороны приводов звеньев № 2 и 3.

Соответственно, в рассматриваемой математической модели экзоскелетного механизма в виде системы дифференциальных уравнений движения (4), (5) возникают дополнительные члены, связанные наличием дополнительных масс от полезной нагрузки и электроприводов и слагаемые, связанные с вращающимися роторами электродвигателей, и множители, учитывающие передаточное число редуктора. Следовательно, вычислительная сложность программной реализации в предложенной модели возросла как в плане символьных вычислений, так и численных расчетов. В этом принципиальное отличие данной работы от модели, представленной в работе [15], где все вышеуказанные элементы отсутствуют. Таким образом, данная работа развивает модель, представленную в [15], усложняя, делая более детализированной и подробной модель, приближая ее к возможной технической реализации. Этим разграничивается научная новизна относительно работы [15].

Таким образом, составлена система дифференциальных уравнений движения экзоскелетного механизма с семью подвижными звеньями.



Рис. 2. Блок-схема применения системы дифференциальных уравнений движения при решении первой и второй задач динамики для модели экзоскелетного механизма с семью подвижными звеньями
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

Она может использоваться для разностороннего исследования киберфизической системы экзоскелетного механизма с семью подвижными звеньями, в том числе для решения первой и второй задач динамики, для отработки моделей кинематического и динамического управления. Блок-схема применения системы уравнений движения при решении первой и второй задач динамики для модели киберфизической системы экзоскелетного механизма с семью подвижными звеньями, перемещающегося в вертикальной плоскости, имеет вид, представленный на рис. 2.

Полученная система дифференциальных уравнений движения применяется для решения первой, или обратной, и второй, или прямой, задач динамики для рассматриваемой модели семизвенного механизма. В перспективе для ускорения решения задач динамики возможно применение нейронных сетей или систем нечеткого вывода. Данный блок выделен пунктиром, как будущее направление исследований. Так как на практике для управления движениями экзоскелета необходимо решение обеих задач динамики, в данной работе разработаем методы управления и проведем моделирование, как при кинематическом управлении, так и при динамическом. Например, в простейшем случае управления система датчиков, регистрирующих электрические потенциалы на коже, закрепленная в области крупных мышц человека, фиксирует и передает информацию о силовых намерениях человека в систему управления экзоскелетом.

В этом случае решается прямая задача динамики, и в экзоскелете по известным усилиям синтезируются движения биомехатронной системы человек – экзоскелет. Вторая, более сложная задача возможна, когда экзоскелету необходимо самостоятельно синтезировать траекторию, например при установившихся, близких к периодическим, движениях человека, или когда чело-

век в экзоскелете по некоторым причинам не в состоянии выполнять функции управления экзоскелетом. Затем, спланировав траекторию, экзоскелету требуется определить управляющие моменты и реализовать их в приводах. При этом сначала решается обратная задача динамики, а потом прямая. На блок-схеме данная связь показана пунктирной стрелкой, так как не всегда есть необходимость в ее реализации.

В данном исследовании реализована следующая последовательность решения задач управления экзоскелетом в соответствии с блок-схемой (рис. 2). Решается обратная задача динамики на основе кинематического управления движением с использованием программного метода. На вход системы уравнений движения подаются аналитические дифференцируемые функции, определяющие антропоидное движение экзоскелета. Приведем в качестве примера функцию для звена № 3 (рис. 3) с длиной $l_3 = 0{,}771$ м и массой $m_3 = 28{,}93$ кг [11].

$$\phi_3(t) = 0.4\left(-0.25\cos\left(0.69 - 0.5\pi\left(1-\cos(\pi t / t_k)\right)\right) + 0.1\sin\left(0.5\pi\left(1+\cos(\pi t / t_k)\right)\right) + \right.$$
$$\left. -0.25\sin\left(0.5\pi\cos(\pi t / t_k)\right)\right), \qquad \left(j = 0,1,2,...,6\right), \tag{6}$$

где время движения модели $t_k = 0{,}36$ с.

Из алгебраического решения системы находятся управляющие моменты, являющиеся выходом на блок-схеме (рис. 2). Так как они представлены в виде внутренних функций пакета Wolfram Mathematica 11.3, то моменты преобразуются сначала в дискретный ряд значений с шагом дискретизации 0,01 с (частота 100 Гц).

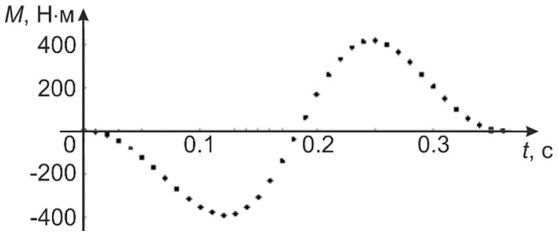


Рис. 3. Дискретный ряд значений момента для звена № 3, полученный в результате решения обратной задачи динамики
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

Сравнивая полученные в представленной модели управляющие моменты с моментами, полученными в работе [15] без учета электроприводов, получено увеличение моментов в данной работе, отличия в максимальных значениях которых представлены в табл. 1.

Полученные результаты показывают, что учет электроприводов значимо увеличил управляющие моменты. Это подтверждает адекватность работы созданной математической модели экзоскелетного механизма – при возрастании массы управляющие моменты возрастают при одном и том же кинематическом управлении. Следовательно, в моделях реальных экзоскелетов нельзя пренебрегать электроприводами, так как они оказывают существенное влияние на динамику всей мехатронной системы. Это новый научный результат, который стало возможным получить благодаря сравнению полученных результатов с расчетами, представленными в [15].

Затем моменты приближаются полиномами шестой степени и интерполяционными многочленами. На рис. 2 – это пунктирная стрелка между блоками «Управляющие моменты» и «Динамическое управление движением». Для решения прямой задачи динамики с использованием динамического управления движением преобразованные моменты подаются на вход системы дифференциальных уравнений, которая дополняется начальными условиями и численно интегрируется. На выходе получаются углы поворота звеньев экзоскелета в виде функций времени (рис. 4). Сплошными кривыми показаны результаты численного решения прямой задачи динамики, пунктирными – исходное движение, заданное формулой (6).

Таблица 1

Результаты сравнения отношения абсолютных максимальных значений моментов, полученных в данной работе, к моментам, полученным в работе [15]

Шарнир	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
Отношение моментов	1,20	1,16	1,07	1,35	1,93	2,58	3,80

Примечание: составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования.

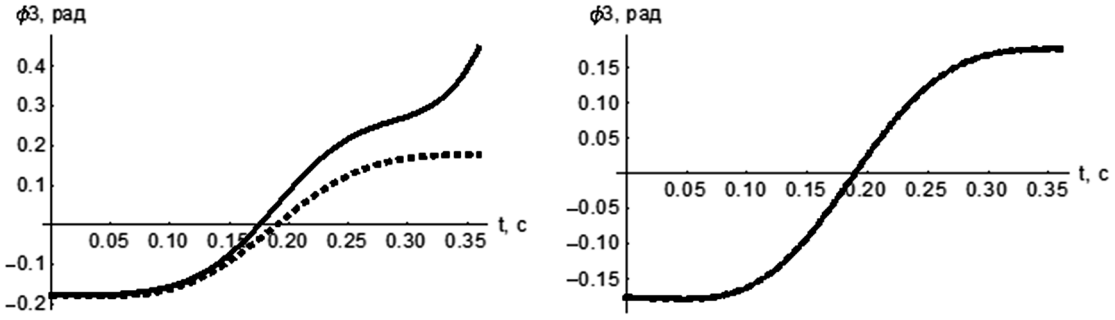


Рис. 4. Результаты решения прямой задачи динамики для звена № 3 с управляющими моментами, приближенными аппроксимационными полиномами шестой степени и интерполяционными многочленами соответственно слева направо
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

При анализе двух первых графиков на рис. 4 видно, что применение аппроксимационных полиномов дает значительное расхождение во второй половине шага с исходным движением. Способ приближения функции построением интерполяционного многочлена дал при управлении движением экзоскелетного механизма очень хорошее совпадение с исходным движением (табл. 2), удовлетворяя критериям блока «Движения экзоскелета удовлетворяют условиям антропоидности?» (рис. 2).

Далее проводится верификация и тестирование предложенной модели и процедуры моделирования. В данном исследовании осуществлены оценки погрешности (табл. 2) и времени расчетов в Wolfram Mathematica 11.3 (t = 1092 с). С целью оценки качества созданной программной реализации модели и способов управления предусмотрена визуальная оценка адекватности движения в блоке «Подпрограмма для визуализации движений экзоскелета». Если все проверки при верификации и тестировании выполняются, то информация для управления движением антропоида считается удовлетворяющей и процедура моделирования останавливается. В итоге впервые создана система управления экзоскелетом, решающая обе задачи динамики и позволяющая отрабатывать большое число различных вариантов управления и их верификацию.

Таблица 2

Результаты расчетов суммарной по всем звеньям абсолютной и среднеквадратичной ошибок

	Δφ	σφ
Полиномы шестой степени	0,3602	0,2283
Интерполяция	0,0001	0,0001

Примечание: составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования.

Как показывают результаты, представленные в табл. 2, рассчитанная погрешность при интерполяции исчезающе мала.

В случае, если требуется найти решение прямой задачи динамики для рассматриваемой модели экзоскелета (рис. 1), например, если имеется эмпирическая информация о мышечных импульсах, поступающих с датчиков, закрепленных на коже человека, реализуется динамическое управление движением экзоскелета. По прилагаемым усилиям необходимо найти углы поворота звеньев (рис. 2, правая часть), то есть положение, скорость и ускорение каждого из семи звеньев экзоскелета во все моменты времени. Использование эмпирической информации с датчиков о мышечных усилиях человека и обученной нейронной сети открывает широкие возможности по созданию эффективных интеллектуальных экзоскелетов различного назначения, активно взаимодействующих с пользователем. Следует отметить, что в рамках настоящей работы нейронные сети непосредственно не применяются для решения задач динамики. Однако разработанная математическая модель семизвенного экзоскелета (рис. 1) и предложенная блок-схема цикла управления (рис. 2) создают формальную основу для последующей интеграции нейросетевых алгоритмов. В частности, высокая вычислительная сложность системы дифференциальных уравнений (4), обусловленная добавлением весомых стоп, делает классические численные методы недостаточно оперативными для работы в реальном времени. В этой связи в качестве одного из направлений дальнейших исследований рассматривается замена блока численного интегрирования (рис. 2, пунктирная область) обученной искусственной нейронной сетью, что позволит сократить время расчета управляющих моментов. Однако обучение такой сети требует предварительного формирования базы эталонных движений, что достигается именно с помощью разра-

ботанного в данной работе алгоритма. Следовательно, настоящая статья закладывает механическую, математическую и алгоритмическую базу, а нейросетевая надстройка является логическим продолжением и направлением дальнейших исследований.

Заключение

В результате проведенного исследования создана новая математическая модель экзоскелетного механизма с семью подвижными звеньями, движущегося в вертикальной плоскости. Предложены новые способы решения задачи управления с использованием нейронных сетей. На основе новых методов кинематического и динамического управления, численно решены обратная и прямая задачи динамики для рассматриваемой модели. Разработано программно-алгоритмическое обеспечение системы управления, включающее модули формирования уравнений движения, решения обратной и прямой задач динамики, аппроксимации и интерполяции управляющих моментов, оценки погрешности и визуализации. Обмен данными между модулями осуществляется через дискретные ряды с шагом $\Delta t = 0{,}01$ с (частота 100 Гц). Достоверность полученных результатов подтверждена путем приведения результатов моделирования среде Wolfram Mathematica 11.3. Для верификации модели проведены проверка на размерность, а также численная оценка погрешности решения прямой задачи динамики по максимальной абсолютной и среднеквадратичной ошибкам углов звеньев. Рассмотрены новые перспективные способы решения задачи управления с использованием нейронных сетей. Показано, что разработанная модель и архитектура программной системы создают формальную основу для замены блока численного интегрирования обученной искусственной нейронной сетью, что является направлением дальнейших исследований.

Список литературы

1. Даминов В. Д., Ткаченко П. В. Экзоскелеты в медицине: мировой опыт и клиническая практика Пироговского центра // Вестник Национального медико-хирургического центра им. Н. И. Пирогова. 2017. Т. 12. № 4. Ч. 2. С. 17–22. EDN: YLUIKH.

2. O'Connor S. Exoskeletons in Nursing and Healthcare: A Bionic Future // Clinical Nursing Research. 2021. Vol. 30. Is. 8. P. 1123–1126. DOI: 10.1177/10547738211038365. EDN: KAZXKZ.

3. Орлов И. А., Алисейчик А. П., Меркулова А. Г., Комарова С. В., Белая О. В., Грибков Д. А., Подопросветов А. В., Павловский В. Е., Ефимов А. Р., Бетц К. В. Актуальность использования промышленных экзоскелетов для снижения количества профессиональных заболеваний опорно-двигательного аппарата верхней части тела // Медицина труда и промышленная экология. 2019. Т. 59. № 7. С. 412–416. DOI: 10.31089/1026-9428-2019-59-7-412-416. EDN: YQTMAC.

4. Borisov A. V., Kaspirovich I. E., Mukharlyamov R. G., Filippenkov K. D. Robotic Controlled Electromechanical Model of Two Links of Variable Length for Aerospace Purposes // Russian Aeronautics. 2022. Vol. 65. Is. 1. P. 68–80. DOI: 10.3103/s1068799822010081. EDN: PIOQQG.

5. Borisov A., Chigarev A., Volkova I., et al. Interdisciplinary Engineering of Using Hydraulics in Developing a Comfort Soft Exoskeleton for Construction Workers // Hydraulic and Civil Engineering Technology X: Proceedings of the 10th International Technical Conference (HCET 2025), Xiamen, China, September 26–28, 2025. Amsterdam: IOS Press, 2025. P. 14–20. DOI: 10.3233/ATDE251204.

6. Blinov A. O., Borisov A. V., Mukharlyamov R. G., Goncharov M. V., Abushinov A. E. 3D Model of Three Links for Exosuit with a Mobile Pole // Russian Aeronautics. 2024. Vol. 67. Is. 3. P. 484–496. DOI: 10.3103/S1068799824030036.

7. Blinov A. O., Blinov V. O., Kulikova M. G., Maslova K. S. Using neural-fuzzy inference to control the functioning of a human-machine system in the form of an exoskeleton with links of variable length, taking into account the effects of lag and synchronization of electric drives // Proceedings of SPIE. Vol. 12986: Third International Scientific and Practical Symposium on Materials Science and Technology (MST-III 2023) (г. Душанбе, 25–27 октября 2023 г.). Washington: SPIE – International Society for Optics and Photonics, 2024. Art. No. 129860Y. DOI: 10.1117/12.3017812. EDN: TZJBAQ.

8. Luo S., Jiang M., Zhang S., Zhu J., Yu S., Dominguez Silva I., Wang T., Rouse E., Zhou B., Yuk H., Zhou X., Su H. Experiment-free exoskeleton assistance via learning in simulation // Nature. 2024. Vol. 630. Is. 8016. P. 353–359. DOI: 10.1038/s41586-024-07382-4. EDN: ESRPXQ.

9. Герегей А. М., Шитова Е. С., Малахова И. С., Шупорин Е. С., Бондарук Е. В., Ефимов А. Р., Тах В. Х. Современные методы исследования безопасности и физиологической эффективности применения промышленных экзоскелетов // Анализ риска здоровью. 2020. № 3. С. 148–159. DOI: 10.21668/health.risk/2020.3.18. EDN: ORTBXQ.

10. Борисов А. В., Аршиненко И. А., Блинов А. О., Кончина Л. В., Новикова М. А., Борисова В. Л. Анализ запатентованных конструкций экзоскелетов и способ повышения их комфортабельности // Справочник. Инженерный журнал. 2024. № 6 (327). С. 63–80. DOI: 10.14489/hb.2024.06.pp.063-080. EDN: HIJKQK.

11. Blinov A. O., Borisov A. V., Kaspirovich I. E., Mukharlyamov R. G. Dynamics of a Telescopic Link with Active Damping Based on the Magnetorheological Fluid // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2025. Vol. 64. Is 6. P. 1084–1101. DOI: 10.1134/S106423072570087X. EDN: DJFHKY.

12. Borisov A. V., Chigarev A. V. Mathematical Models of Exoskeleton: Dynamics, Strength, Control. Cham: Springer, 2022. XIII, 224 p. (Studies in Systems, Decision and Control; Vol. 431). DOI: 10.1007/978-3-030-97733-7.

13. Блинов А. О., Борисов А. В., Кончина Л. В., Маслова К. С. Математическое моделирование электромеханической модели экзоскелета с тремя активными управляемыми звеньями // Прикладная информатика. 2023. Т. 18. № 5 (107). С. 120–132. DOI: 10.37791/2687-0649-2023-18-5-120-132. EDN: TYWWMD.

14. Blinov A. O., Borisov A. V., Konchina L. V., Maslova K. S., Filippenkov K. D. Modeling the dynamics of an exoskeleton link of variable length using the Lagrange-Maxwell system of differential equations of motion // Journal of Applied Informatics. 2022. Vol. 17. Is. 3 (99). P. 117–130. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-3-117-130. EDN: HKSEQD.

15. Маслова К. С., Соколов А. М. Модель киберфизической системы экзоскелетного механизма с семью подвижными звеньями // Прикладная информатика. 2026. Т. 21. № 3 (123). С. 65–86. DOI: 10.37791/2687-0649-2026-21-3-65-86. EDN: OVIRAL.

16. Колюбин С. А. Динамика робототехнических систем: учебное пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2017. 117 с.

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest.

Финансирование: Автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 004.94:332.1
DOI

CC BY 4.0

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕЖРЕГИОНАЛЬНОГО ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ С УЧЕТОМ ФРАНЧАЙЗИНГОВЫХ ПРОЕКТОВ

Медведев А. В. ORCID ID 0000-0002-7654-056X,
Казакова О. А., Казаков Н. Л.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кемеровский государственный университет», Кемерово, Российская Федерация, e-mail: alexm_62@mail.ru

Франчайзинг является одним из эффективных инструментов масштабирования бизнеса и роста производства продукции, в связи с чем возникает необходимость решения ряда ключевых задач оценки экономической эффективности франшиз, построения их математических моделей, ориентированных на дальнейшее применение инструментов автоматизированного численного анализа и оптимизации параметров франчайзингового взаимодействия. Основной целью данной работы является обоснование оптимальных параметров межрегионального франчайзингового взаимодействия франшизодателя и франшизоприобретателя на межрегиональном уровне. Приведена содержательная постановка задачи франчайзингового взаимодействия на региональном уровне, построена оптимизационная, двухкритериальная математическая модель как задача линейного программирования, для численного анализа которой можно применить эффективные алгоритмы ее решения. Обосновано, что для построенной модели существует решение при любых допустимых значениях параметров. Описаны критерии эффективности и ограничения функционирования франшизодателя и франшизоприобретателя, приведены их содержательные трактовки. Решение рассматриваемой задачи может быть получено путем рассмотрения выпуклой линейной свертки критериев модели. Проведена апробация модели на экономических данных известной франчайзинговой сети, соответствующих мезоэкономическому уровню. С использованием авторского программного комплекса получены результаты, не противоречащие содержательному смыслу задачи. Построенная математическая модель может быть положена в основу систем поддержки принятия решений при управлении франчайзинговыми сетями в регионах.

Ключевые слова: математическое моделирование, двухкритериальная оптимизация, франшизоприобретатель, региональное экономическое взаимодействие, франчайзинг, вычислительный эксперимент, франшизодатель

MODELING INTERREGIONAL ECONOMIC DEVELOPMENT WITH FRANCHISING PROJECTS

Medvedev A. V. ORCID ID 0000-0002-7654-056X,
Kazakova O. A., Kazakov N. L.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kemerovo State University", Kemerovo, Russian Federation, e-mail: alexm_62@mail.ru

Franchising serves as an effective tool for scaling businesses and increasing production output; consequently, there is a need to address key tasks such as evaluating the economic efficiency of franchises and constructing mathematical models designed for automated numerical analysis and the optimization of franchising interaction parameters. The primary objective of this study is to determine the optimal parameters for interregional franchising interactions between the franchisor and the franchisee. The study presents a conceptual formulation of the franchising interaction problem at the regional level and constructs a bi-criteria optimization mathematical model—formulated as a linear programming problem–that allows for the application of efficient numerical solution algorithms. It is demonstrated that the constructed model yields a solution for all permissible parameter values. The study outlines the efficiency criteria and operational constraints for both the franchisor and the franchisee, providing a conceptual interpretation of each. A solution to the problem is obtained by analyzing a convex linear combination of the model's criteria. The model was validated using economic data from a well-known franchise network at the mesoeconomic level. Results obtained using a proprietary software suite were found to be consistent with the conceptual logic of the problem. The resulting mathematical model can serve as a foundation for decision-support systems used in managing regional franchise networks.

Keywords: mathematical modeling, multi-objective optimization, franchisee, regional economic interaction, franchising, computational experiment, franchisor

Введение

Совершенствование современных региональных социально-экономических систем предполагает как развитие крупных предприятий, так и формирование мощного сегмента малого бизнеса, являющихся залогом стабильности и благополучия регионов и всего государства. Одним из наиболее успешных способов развития субъектов крупного и малого бизнеса, а также их эффективного сотрудничества является франчайзинг, представляющий собой такую форму делового взаимодействия, при которой одна компания на договорной

основе предоставляет право производства своей продукции (товара и/или услуги) под собственной торговой маркой другой компании или предпринимателю [1]. Растущий оборот рынка франчайзинга в России свидетельствует о высокой эффективности, а также актуализирует необходимость решения ряда ключевых задач выбора бизнес-моделей такой формы взаимодействия, что требует разработки унифицированных методик оценки экономической эффективности франшиз [2], оптимизации потоков паушальных взносов и роялти, в том числе с использованием методов их математического моделирования.

В настоящее время опубликовано значительное количество работ, касающихся вопросов математического моделирования взаимодействия франчайзера (франшизодателя, ФД) и франчайзи (франшизоприобретателя, ФП) на различных экономических уровнях. А. А. Бойко, Т. А. Бойко моделируют франчайзинговое взаимодействие для конкретного предприятия малого бизнеса с целью выбора оптимального объекта налогообложения [3]. Е. С. Замбржицкая и Д. Н. Аревкин рассматривают вопросы применения методов математического моделирования в условиях сетевых франчайзинговых структур с множеством независимых агентов [4]. Д. Г. Алгазина и Г. И. Алгазин применяют детерминированную математическую модель взаимодействия ФД и ФП на конкурентном рынке продукции с неограниченным спросом [5]. Вопросы инновационного развития франчайзинговых бизнес-систем поднимаются и решаются на мезо- и микроэкономическом уровнях в работах И. Б. Дзюбенко [6] и Ф. Н. Велиевой [7]. В статье И. Д. Котлярова строится модель принятия решений при выборе между приобретением франшизы и созданием собственного независимого предприятия на основе вероятностного подхода [8]. А. Г. Соломаха рассматривает подход к оптимизации параметров франчайзингового договора ФД и ФП в виде иерархической игры с получением аналитических решений в случаях линейных и нелинейных функций переменных затрат и функций спроса субъектов франчайзинговых отношений [9], а А. Н. Булатов и Р. Сафин моделируют франчайзинговое взаимодействие на основе опционной модели Блэка – Шоулза [10]. Авторы В. Д. Маркова и С. А. Кузнецова разрабатывают модели франчайзинговых взаимодействий в экосистемах бизнеса при стратегическом управлении компаниями [11]. Отметим, что во всех указанных работах подчеркиваются сложный, многосторонний характер взаимодействия субъектов франчайзинга, а также необходимость разработки алгоритмов и методов оптимизации такого взаимодействия на различных уровнях – микро-, мезо- и макроэкономическом. При этом в настоящее время имеется небольшое количество оптимизационных математических моделей, в которых с достаточной подробностью описываются доходные и расходные потоки универсального производителя продукции, включая финансовые потоки франчайзингового взаимодействия ФД и ФП на мезоэкономическом уровне.

Цель исследования – обоснование оптимальных параметров межрегионального франчайзингового взаимодействия франшизодателя и франшизоприобретателя на межрегиональном уровне. Для достижения цели в работе решаются задачи содержательного описания, формулировки ограничений и критериев эффективности функционирования франшизодателя и франшизоприобретателя, построения и апробации оптимизационной математической модели на данных, соответствующих мезоэкономическому уровню указанного взаимодействия.

Материалы и методы исследования

Экономическая суть франчайзинга заключается в лизинге основных средств производства продуктового бренда, выступающего в качестве нематериального стратегического актива предприятия. В этом смысле франчайзинговые потоки, как для ФД, так и для ФП, представляют собой стратегические доходные потоки, с той разницей, что для первого они имеют смысл прямых доходных потоков, а для второго, в частности, – косвенных потоков экономии на рекламе продаваемой брендовой продукции. Таким образом, оценка эффективности франшизы рассматривается как задача описания взаимодействия двух активных сторон (ФД и ФП), которые решают для себя, вообще говоря, противоположные задачи оптимизации таких финансовых потоков, как паушальный взнос (разовый платеж, вносимый при покупке франшизоприобретателем франшизодателю за использование его бренда), и роялти (периодические взносы, которые франшизоприобретатель выплачивает франшизодателю за то, что пользуется его брендом). В этой связи целесообразно применение двухкритериальных математических моделей, нацеленных на получение оптимальных характеристик франшизы (паушального взноса и роялти) с учетом интересов и автоматического выявления экономического потенциала ее участников.

Ниже представлена содержательная постановка задачи взаимодействия ФД и ФП на мезоэкономическом (региональном) уровне. Назовем регион-франчайзер, в котором производится продукция франшизы, донором, а регион-франчайзи – реципиентом. Пусть экономическая деятельность в регионе-доноре характеризуется набором видов экономической деятельности (ВЭД), соответствующих общероссийскому классификатору[1], для которых заданы (экспертно оценены или взяты из открытой региональной экономической статистики[2]) следующие рыночные и технико-экономические показатели: стоимость, средние сроки полезного использования и производительности комплекта основных производственных фондов (ОПФ), средние цены единицы, стоимостные спросы, зарплатоемкости и материалоемкости производства каждого вида франчайзинговой продукции. В случае отсутствия или недостатка информации о ценах единицы продукции и средних производительностях комплектов ОПФ, можно рассматривать такой показатель, как средняя выручка от продажи всех видов франчайзинговой продукции, информация о которых, как правило, доступна из открытых региональных статистических данных.

Введем далее следующие обозначения:

n – количество видов продукции франшизы;

R_k – средняя выручка от продажи производимой ФД продукции k-го ($k = 1, \ldots, n$) вида, денежных единиц (далее д. е.);

Z_k – текущие затраты ФД (сумма амортизации, фонда оплаты труда, налогов и материальных затрат) при производстве продукции k-го вида, д. е.;

$(I_k)_{max}$ – максимальные инвестиции ФД в производство продукции k-го вида, д. е.;

c_k – стоимость комплекта ОПФ k-го вида, д. е. за комплект ОПФ);

V_k – средняя производительность ОПФ k-го вида, единиц продукции на комплект ОПФ);

T_k – средний срок службы комплекта ОПФ k-го вида, экономических циклов (далее э. ц.);

P_k – средняя цена единицы продукции k-го вида, д. е. за единицу продукции;

$\delta_k = P_k V_k / c_k$ – фондоотдача комплекта ОПФ k-го вида;

q_k – средний стоимостной спрос на продукцию k-го вида ФД, д. е.;

β_k – средняя зарплатоемкость производства k-го вида (доля затрат на оплату труда в сумме общепроизводственных затрат);

p_k – средняя материалоемкость производства k-го вида (доля затрат на сырье и материалы в сумме общепроизводственных затрат);

α_i ($i = 1, \ldots, 4$) – соответственно ставки налогов на добавленную стоимость, на имущество, на прибыль, страховых взносов в социальные фонды;

α_5 – ставка дополнительных налоговых (неналоговых) затрат;

T – горизонт планирования, э. ц.;

r – средняя ставка дисконтирования.

Предположим, что в регионах производства франчайзинговой продукции k-го вида взаимодействие ФД и ФП характеризуется следующими параметрами:

π_k – коэффициент спроса или отношение спроса на продукцию ФП к спросу на продукцию ФД;

ρ_k – коэффициент роялти или отношение выручки ФП к выручке ФД от продажи продукции;

i_k – коэффициент инвестиций или отношение инвестиций ФП и ФД в производство продукции;

ω_k – отношение общепроизводственных затрат ФП и ФД при производстве продукции.

С помощью коэффициентов π_k может быть оценена относительная доля рынка ФП от рынка ФД, отражающая долгосрочные особенности сложившегося рынка франчайзинговой продукции в регионе, поэтому они могут быть применены для оценки размера паушального взноса. Коэффициенты ρ_k позволяют оценить относительную долю выручки от продажи, а коэффициенты ω_k – относительную долю общепроизводственных затрат ФП по сравнению с ФД, что отражает текущие особенности сложившегося рынка франчайзинговой продукции региона-реципиента франшизы и позволяет применить их для оценки потоков роялти. Коэффициенты i_k переносят на регион-реципиент ориентировочный уровень необходимых инвестиционных вложений ФП для производства в нем брендовой продукции. Они также имеют стратегический смысл, отражая уровень финансовых возможностей ФП по организации производства продукции ФД. Через введенные параметры тогда могут быть рассчитаны следующие характеристики взаимодействия ФД и ФП по k-му виду продукции: $\pi_k R_k$ – денежный поток выручки ФП; $\rho_k R_k$ – денежный поток роялти за франшизу от ФП к ФД; $\pi_k I_k$ – денежный поток паушального взноса ФП за франшизу ФД; $i_k I_k$ – денежный

[1] Общероссийский классификатор видов экономической деятельности. [Электронный ресурс]. URL: https://classifikators.ru/okved#codes/ (дата обращения: 21.08.2026).

[2] Федеральная служба государственной статистики. [Электронный ресурс]. URL: https://rosstat.gov.ru/ (дата обращения: 21.08.2026).

поток инвестиций ФП в производство продукции ФД.

Рассмотрим следующую математическую постановку задачи оптимизации взаимодействия ФП и ФД в регионе.

Пусть $X_{2n\times1}=\left(x_1,...,x_n;x_{n+1},...,x_{2n}\right)^T$ – вектор искомых (оптимизируемых) величин, где x_k – инвестиции в k-й вид продукции (приобретение k-го комплекта ОПФ), x_{n+k} – стоимостной объем производства (выручка от продажи) франчайзинговой продукции k-го вида. При функционировании производства ФД целесообразно рассмотреть следующие ограничения: 1) инвестиционные, когда инвестиции в производство k-й продукции не превосходят заданной максимальной суммы $(I_k)_{max}$; 2) производственные, когда объем производства каждого вида продукции не превосходит либо среднего стоимостного спроса q_k на нее, либо максимальных производственных мощностей ОПФ k-го вида, определяемых их средней производительностью V_k; 3) финансовые, когда текущая прибыль по каждому виду продукции как для ФД, так и для ФП (данные условия трактуются как условия текущей финансовой состоятельности франчайзингового проекта для ФД и ФП на горизонте T) неотрицательны. Необходимо определить значения вектора, доставляющие максимум значений критериев обоих участников рассматриваемого проекта.

Результаты исследования и их обсуждение

В соответствии с изложенной выше содержательной постановкой задачи математическую модель франчайзингового взаимодействия ФД и ФП можно записать в виде двухкритериальной задачи линейного программирования:

$$x_k \le \left(I_k\right)_{max},\quad x_{n+k}\le\delta_k x_k,\quad x_{n+k}\le q_k;\quad (W_k)_{ФД}\ge 0,\quad (W_k)_{ФП}\ge 0,\quad k=1,\ldots,n;$$

$$x_m\ge 0,\ m=1,...,2n;$$

$$J_{ФП}=\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{n}\frac{(W_k)_{ФП}+i_k Am_k}{\left(1+r\right)^t}-\pi_k i_k I_k(0)-i_k I_k(0)\to max,$$

$$J_{ФД}=\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{n}\frac{(W_k)_{ФД}+Am_k}{\left(1+r\right)^t}+\pi_k i_k I_k(0)-I_k(0)\to max, \qquad (1)$$

где $I_k(0)=x_k$, $Am_k=\dfrac{T}{T_k}x_k$;

$$\left(W_k\right)_{ФД}=\left(1+\rho_k\right)R_k-Z_k,\quad \left(W_k\right)_{ФП}=(\pi_k-\rho_k)R_k-o_k Z_k;\ R_k=(1+\rho_k)x_{n+k};$$

$$Z_k=\omega_k\left\{\left[\frac{T}{T_k}+\alpha_2\left(1-\frac{T}{T_k}\right)\right]x_k+\left(\alpha_1+\alpha_5\right)(1+\rho_k)x_{n+k}\right\};\quad o_k=\frac{1}{\left(1-\beta_k\left(1+\alpha_4\right)-p_k\right)}.$$

Первые n неравенств модели (1) соответствуют инвестиционным ограничениям, 2-я и 3-я группы по n неравенств – соответственно ограничения производственными мощностями и спросом на продукцию, 4-я и 5-я группы из n неравенств – соответственно ограничения финансовой состоятельности проекта для ФД и ФП по каждому виду продукции, остальные неравенства – естественные содержательные ограничения неотрицательности искомых переменных. Последние два условия в (1) отражают критерии экономической эффективности функционирования ФД и ФП в проекте. Опираясь на интегральную теорему Лагранжа о среднем, искомые потоки прибыли и амортизации в критериях модели (1) можно, без потери точности, принять за постоянные на всем горизонте планирования и вынести за знак суммы по переменной t, превращая оставшееся выражение в конечную геометрическую прогрессию с известной суммой. Это позволяет преобразовать исходную динамическую модель в статическую форму, где функцию «отслеживания динамики» процесса принимает показатель горизонта планирования T. Построенная модель содержит $2n$ переменных, $5n$ содержательных ограничений, два критерия оптимальности и является линей-

ной по всем переменным, причем условия неотрицательности искомых переменных считаются имманентным математическим свойством задачи линейного программирования в стандартном виде. Согласно теории многокритериальной оптимизации построенная модель, путем рассмотрения выпуклой линейной свертки критериев

$$J = \mu J_{ФД} + (1-\mu) J_{ФП},$$

где $\mu \in (0;1)$, может быть преобразована в эквивалентную, однокритериальную задачу линейного программирования. Это позволяет применить для ее расчета симплекс-метод Дж. Данцига. Легко проверяемое наличие тривиального решения и нестрогость ограничений-неравенств гарантирует существование решения такой задачи при всех допустимых значениях входящих в нее параметров. В отличие от работы [12], в которой авторами приведены лишь критерии оптимизации, построенная модель является многопараметрической, двухкритериальной задачей линейной оптимизации, содержащей инвестиционные, производственные и финансовые ограничения функционирования ФД и ФП. Нетривиальные решения построенной модели могут быть получены с помощью описанного в монографии [13, с. 96–111] оптимизационного многопараметрического анализатора, обладающего инструментами многокритериального анализа (нахождения и визуализации Парето-множеств) линейных оптимизационных задач.

Работоспособность построенной модели проверялась в условиях реализации франчайзингового проекта производства продукции бренда магазинов натуральных продуктов «Калина-Малина» [14] с осредненными значениями характеристик продукции: $n = 1$; $\delta_1 = 4{,}6$; $(I_1)_{max} = 15000$ тыс. руб.; $T_1 = 10$ э. ц.; $q_1 = 20000$ тыс. руб.; $\beta_1 = 0{,}25$; $p_1 = 0{,}3$; с текущими значениями показателей рыночного окружения $r = 0{,}3$; $T = 5$ э. ц.; с актуальными ставками упрощенного налогообложения: $\alpha_1 = \alpha_5 = 0$, $\alpha_2 = 0{,}02$, $\alpha_3 = 0{,}15$ (база «доходы минус расходы»), $\alpha_4 = 0{,}3$. При этом были заданы следующие условия для параметров $i_1 = 0{,}3$, $\pi_1 \in [0; 2]$, $\rho_1 \in [0; 1]$, $\omega_1 \in [0; 10]$. Полученные с помощью указанного многопараметрического анализатора зависимости критерия J соответственно от параметра ρ_1 и от параметра ω_1 при варьировании π_1 представлены на рис. 1 и 2.

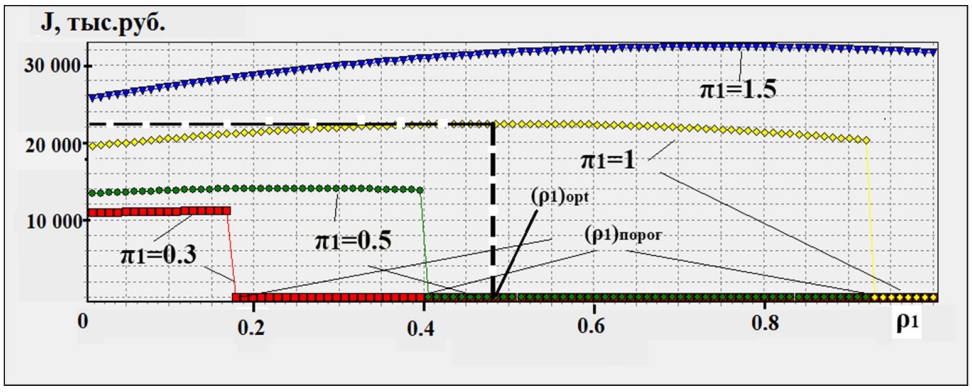


Рис. 1. Зависимости J(ρ1)
Примечание: составлен авторами по результатам исследования

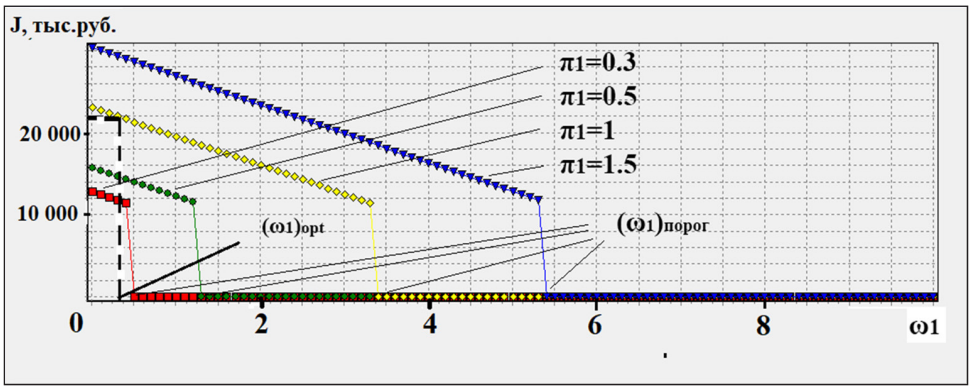


Рис. 2. Зависимости J(ω1)
Примечание: составлен авторами по результатам исследования

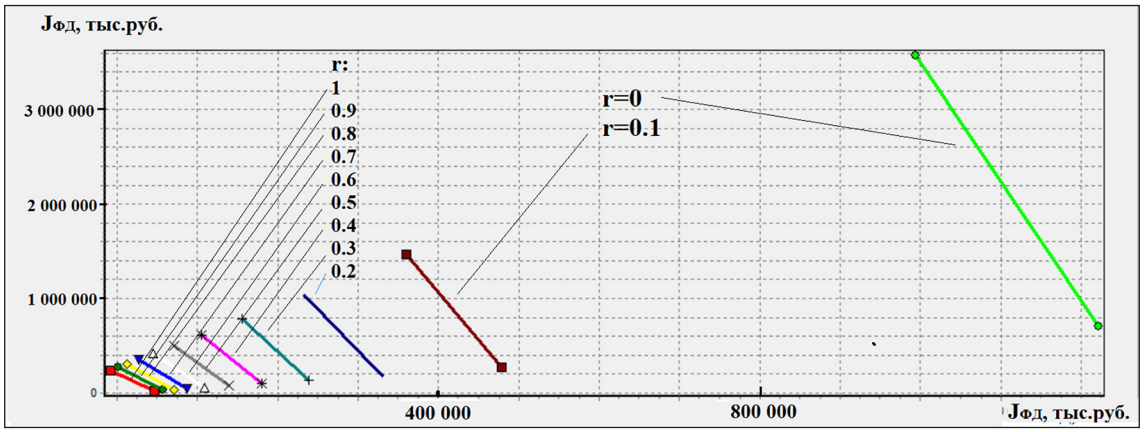


Рис. 3. Парето-множества задачи (1) при варьировании средней ставки дисконтирования r от 0 до 1 с шагом 0,1 (справа налево)
Примечание: составлен авторами по результатам исследования

Представленная на рис. 1 и 2 информация позволяет обосновывать выбор некоторых оптимальных характеристик франшизы. Например, при изменении параметра π_1 для каждого его значения можно найти пороговые значения $(\rho_1)_{порог}$, $(\omega_1)_{порог}$, при которых проект взаимодействия ФД и ФП в регионе становится невыгодным для обеих сторон при равномерном ($\mu = 0{,}5$) учете их интересов. При равенстве спроса на продукцию в регионе-доноре и регионе-реципиенте ($\pi_1 = 1$) по графику на рис. 1 можно оценить оптимальное значение параметра $(\rho_1)_{opt} \approx 0{,}48$, а по графику на рис. 2 – соответствующее ему оптимальное значение параметра $(\omega_1)_{opt} \approx 0{,}3 \div 0{,}35$.

На рис. 3 представлены Парето-множества задачи (1) при варьировании средней ставки дисконтирования *r*.

Информация, полученная из рис. 3, дает инвестиционному аналитику возможность обоснованного выбора диапазонов значений критериев $J_{ФД}$ и $J_{ФП}$, в рамках которых целесообразен торг между ними по установлению оптимальных параметров франчайзинга в регионе. В частности, наблюдается факт, что с ростом значений параметра *r* уменьшаются значения каждого из критериев и, соответственно, возможности торга участников проекта.

Решение задачи (1) дает возможность получить оптимальные объемы инвестиций в производство, а также оптимальные объемы производства франчайзинговой продукции с учетом инвестиционных, производственных и финансовых (при необходимости экологических [15]) ограничений функционирования франчайзинговой сети в регионе, что повышает конкурентоспособность регионов с учетом их нематериальной составляющей [16, с. 84–105].

Заключение

Построена новая оптимизационная математическая модель франчайзингового взаимодействия, отражающая основные законы функционирования франшизодателя региона-донора и франшизоприобретателя региона-реципиента. Применение модели и ее автоматизированный анализ обеспечивают возможности многовариантного сценарного анализа, оценки инвестиционного потенциала, сроков окупаемости, безубыточности и целесообразных моментов реинвестирования региональных проектов, что помогает подобрать оптимальные размеры роялти и паушального взноса и обосновывает практическую значимость модели. Предварительные оценки показателей регионального франчайзинга дают основание полагать, что построенная математическая модель может быть положена в основу системы поддержки принятия решений при управлении региональной франчайзинговой сетью в регионах, позволяя перевести управленческие решения из интуитивной в количественно обоснованную плоскость, создать устойчивую систему масштабирования бизнеса с предсказуемыми результатами за счет точности и объективности оценки влияния межрегионального франчайзинга на развитие региональных социально-экономических систем.

Список литературы

1. Грисько Е. С. Тенденции и проблемы развития франчайзинга в России // Вестник Сибирского института бизнеса и информационных технологий. 2018. № 2 (26). С. 16–21. EDN: XQRVBZ.

2. Филатов В. В., Беспалова В. В., Нечаев Б. П., Шишкин П. А. Разработка бизнес-модели предприятия на основе технологий регионального сетевого франчайзинга // Инно-

вационная экономика: информация, аналитика, прогнозы. 2024. № 2. С. 28–40. DOI: 10.47576/2949-1894.2024.2.2.003.

3. Бойко А. А., Бойко Т. А. Анализ математической модели выбора решения по объекту налогообложения для франшизы по проведению биометрических исследований // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2017. № 2 (38). С. 120–132. EDN: ZBKKOJ.

4. Замбржицкая Е. С., Аревкин Д. Н. Возможности оптимизационного моделирования для стратегических и операционных маркетинговых решений в управлении портфелем франшиз на примере детского развлекательного центра // Прикладные экономические исследования. 2024. № 4. С. 88–99. EDN: STDELX.

5. Алгазина Д. Г., Алгазин Г. И. Моделирование взаимосвязи прибыли франчайзера и развития франчайзинговой системы на конкурентном рынке // Известия Алтайского государственного университета. 2011. № 2–1 (70). С. 261–264. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=16853300 (дата обращения: 02.10.2026).

6. Дзюбенко И. Б. Франчайзинг как инструмент активизации инновационного потенциала предпринимательства // Экономика и предпринимательство. 2017. № 10–1 (87). С. 419–427. EDN: ZXYPOD.

7. Велиева Ф. Н. Региональный франчайзинговый центр – новая модель развития франчайзинга в регионах // Микроэкономика. 2022. № 3. С. 75–86. DOI: 10.33917/mic-3.104.2022.75-86.

8. Котляров И. Д. Принятие решения о приобретении франшизы: вероятностный подход // Труды Института системного анализа Российской академии наук. 2011. Т. 61. № 3. С. 84–91. EDN: PHGMSV.

9. Соломаха А. Г. Определение параметров франчайзингового договора при нелинейной функции спроса в условиях неопределенности // Вестник Тверского государственного университета. Серия «Экономика и управление». Тверь. 2015. Т. 2. № 1. С. 129–135. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=23320358 (дата обращения: 29.09.2026).

10. Булатов А. Н., Сафин Р. Модель оценки экономически справедливой стоимости франшизы масштабирования бизнеса, основанная на модифицированной методологии Блэка – Шоулза // Московский экономический журнал. 2019. № 7. С. 26. DOI: 10.24411/2413-046X-2019-17046.

11. Маркова В. Д., Кузнецова С. А. Экосистемы как инновационный инструмент роста бизнеса // ЭКО. 2021. № 8 (566). С. 151–168. DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2021-8-151-168.

12. Медведев А. В., Казакова О. А., Казаков Н. Л. Моделирование франчайзинговых проектов как одного из способов управления качеством анализа региональной экономики // Ресурсосберегающие технологии в контроле, управлении качеством и безопасности: сборник научных трудов XIV Международной конференции студентов, аспирантов, молодых ученых. В 2 ч. Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2025. С. 188–191. EDN: KSXNMC.

13. Медведев А. В. Автоматизированная поддержка принятия оптимальных решений в инвестиционно-производственных проектах развития социально-экономических систем. М.: Издательский Дом «Академия Естествознания», 2020. 200 с. DOI: 10.17513/np.421.

14. Франшиза Калина-Малина. [Электронный ресурс]. URL: https://busyspace.ru/franshizy/kalina-malina-franshiza. (дата обращения: 30.08.2026).

15. Медведев А. В. Оптимизационная социо-эколого-экономическая модель региона // Современные наукоемкие технологии. 2023. № 12–1. С. 54–59. DOI: 10.17513/snt.39860.

16. Щетинина Е. Д., Кондрашов И. Б. Управление конкурентоспособностью региона на основе структурного развития его нематериальных активов. Белгород: БелГТУ им. В. Г. Шухова, 2017. 192 с. EDN: XVDOPR.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 621.865.8
DOI

CC BY 4.0

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАДАНИЙ В ГРУППЕ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ ПРИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ЭНЕРГОЗАТРАТ С УЧЕТОМ ПОДЗАРЯДКИ

Мигранов А. Б. ORCID ID 0000-0002-7610-301X

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт механики имени Р. Р. Мавлютова Уфимского научного центра Российской академии наук, Уфа, Российская Федерация, e-mail: abm.imech.anrb@mail.ru

Цель исследования – оценить влияние дополнительного энергетического резерва на распределение заданий и планирование подзарядки мобильных роботов при случайных энергозатратах. Группа неоднородных роботов выполняет задания на известной карте с препятствиями и общими стационарными зарядными станциями. Энергозатраты при движении и выполнении заданий имеют логнормальное распределение. Сравниваются варианты без дополнительного резерва, с постоянным резервом в долях емкости батареи и с резервом, пропорциональным стандартному отклонению суммарных энергозатрат между подзарядками. Коэффициенты резервирования выбираются на отдельной настроечной выборке с использованием нижней односторонней 95 %-й границы Уилсона для доли успешных реализаций плана. Распределение и порядок заданий определяются локальным поиском, а посещения станций роботами – динамическим программированием. В экспериментах при резерве по стандартному отклонению суммарных энергозатрат условное время и число зарядок были меньше, чем при постоянном резерве, при этом наблюдаемая доля успешных реализаций была ниже. В отдельной серии экспериментов на всех шести проверочных картах изменение распределения и порядка заданий уменьшило время выполнения плана. В эксперименте с корреляцией энергозатрат, не учитываемой при планировании, доля успешного выполнения планов роботами снизилась.

Ключевые слова: группа роботов, распределение заданий, неопределенность, подзарядка, планирование

TASK ALLOCATION IN A GROUP OF MOBILE ROBOTS UNDER ENERGY CONSUMPTION UNCERTAINTY WITH RECHARGING

Migranov A. B. ORCID ID 0000-0002-7610-301X

Federal State Budgetary Institution of Science, R. R. Mavlyutov Institute of Mechanics, Ufa Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russian Federation, e-mail: abm.imech.anrb@mail.ru

The aim of the study is to assess the effect of an additional energy reserve on task allocation and recharging planning for mobile robots under stochastic energy consumption. A heterogeneous group of robots performs tasks on a known map with obstacles and shared stationary charging stations. Energy consumption during motion and task execution follows a lognormal distribution. Three variants are compared: without an additional reserve, with a constant reserve expressed as a fraction of battery capacity, and with a reserve proportional to the standard deviation of total energy consumption between recharges. Reserve coefficients are selected on a separate calibration set using the one-sided 95 % Wilson lower confidence bound for the rate of successful plan executions. Task allocation and ordering are determined by local search, while visits to charging stations are determined by dynamic programming. In the experiments, the reserve based on the standard deviation of total energy consumption resulted in lower conditional completion time and fewer charging events than the constant reserve, while the observed success rate was also lower. In a separate series of experiments, changing task allocation and ordering reduced plan completion time on all six test maps. In the experiment with correlated energy consumption not accounted for in planning, the plan success rate decreased.

Keywords: multi-robot systems, task allocation, uncertainty, recharging, planning

Введение

При случайных энергозатратах мобильному роботу может не хватить заряда для движения по запланированному маршруту и выполнения предусмотренных операций. Это требует алгоритмов распределения заданий и планирования подзарядки, учитывающих неопределенность энергозатрат. А. Б. Мигранов [1] рассмотрел нейродинамический алгоритм распределения заданий при погрешностях наблюдения координат. В настоящей работе геометрия считается известной, а неопределенность связана с энергозатратами. Рассматриваемая задача также отличается от исследованной в [1] источником случайности, ограничениями и критерием оценки.

F. Yang и N. Chakraborty [2] предложили алгоритм распределения заданий при вероятностных ограничениях на потребление ресурса. B. Fu, W. Smith, D. Rizzo, M. Castanier и K. Barton [3] применили вероятностный подход к построению маршрутов неоднородных роботов при гауссов-

ской неопределенности энергозатрат. Таким образом, при планировании в условиях случайных энергозатрат необходимо учитывать не только их средние значения, но и разброс.

G. Notomista, S. Mayya, Y. Emam, C. Kroninger, A. Bohannon, S. Hutchinson и M. Egerstedt [4] рассмотрели распределение заданий с учетом энергозатрат и отказов оборудования. J. Herynek и S. Edelkamp [5] рассмотрели совместное планирование движения и пополнения энергии при неоднородном энергопотреблении. Эти результаты показывают взаимосвязь распределения заданий и планирования пополнения энергии.

H. Do, J. Jang и J. Kim [6] исследовали кооперативную подзарядку в гетерогенной группе роботов с выбором точек встречи, при которой выполнение миссии связано с организацией пополнения энергии. T. Ito, R. Funada, M. Sampei и G. Notomista [7] рассмотрели распределение заданий для роботов с несколькими режимами работы с учетом энергетических ограничений. Из этих работ следует, что энергетические ограничения влияют не только на допустимость отдельных маршрутов, но и на распределение заданий и координацию действий роботов. Поэтому энергетические ограничения следует учитывать непосредственно при построении группового плана.

B. P. Gerkey и M. J. Matarić [8] предложили классификацию задач распределения заданий. P. Mohajerin Esfahani и D. Kuhn [9] рассмотрели робастную оптимизацию при неопределенности распределения. M. C. Campi и S. Garatti [10] исследовали сценарный подход с вероятностными оценками допустимости решений. Подходы робастной и сценарной оптимизации показывают, что при выборе решения в условиях неопределенности необходимо учитывать не только значение выбранного критерия, но и устойчивость к неопределенности и вероятность выполнения ограничений. В настоящей работе этот принцип реализуется при настройке коэффициентов резервирования по доле успешных реализаций на отдельной настроечной выборке, а полученные решения оцениваются на независимой проверочной выборке.

N. Kumar, J. J. Lee, S. Rathinam, S. Darbha, P. B. Sujit и R. Raman [11] исследовали планирование подзарядки для длительной автономной работы роботов. T. Kundu и I. Saha [12] совместно рассмотрели маршрут робота, выполняющего подзарядку, и расписание зарядки. A. B. Asghar, S. Sundaram и S. L. Smith [13] исследовали длительное выполнение задач при ограничениях на подзарядку. K. B. Naveed, A. Dang, R. Kumar и D. Panagou [14] рассмотрели длительное выполнение заданий с учетом энергетических ограничений. M. S. Mondal, S. Ramasamy и P. Bhounsule [15] совместно планировали маршруты воздушных и наземных роботов при ограниченном запасе энергии. Анализ этих работ показывает, что распределение заданий и планирование подзарядки исследуются при различных энергетических ограничениях, однако влияние способа формирования энергетического резерва на групповой план отдельно не рассматривается.

Для оценки этого влияния сравниваются постоянный энергетический резерв и резерв, пропорциональный стандартному отклонению суммарных энергозатрат между подзарядками. Коэффициенты резервирования настраиваются по доле успешных реализаций планов. Учет энергетического резерва при построении плана может влиять на выбор зарядных станций и число их посещений, а также на распределение заданий между роботами и порядок их выполнения.

Цель исследования – оценить влияние дополнительного энергетического резерва на распределение заданий и планирование подзарядки мобильных роботов при случайных энергозатратах. Для этого сравниваются два способа резервирования по времени выполнения плана, числу зарядок и доле успешных реализаций, а также оценивается влияние изменения распределения и порядка заданий на время выполнения плана. Отдельно исследуется влияние корреляции энергозатрат, не учитываемой при планировании, на вероятность выполнения плана.

Материалы и методы исследования

Постановка задачи. Заданы m роботов, n заданий и p зарядных станций. Индексы роботов, заданий и станций обозначены соответственно $i = 1,\ldots,m$, $j = 1,\ldots,n$, и $h = 1,\ldots,p$. Каждое задание выполняется одним роботом один раз. План П задает для каждого робота упорядоченный список заданий π_i и посещения станций. После выполнения заданий робот возвращается на свою базу. Кратчайшее расстояние d_{xy} между узлами x, y, представляющими базы, задания и станции, находят поиском в ширину на сетке с четырьмя направлениями.

Для робота i заданы скорость v_i, средние удельные энергозатраты c_i, емкость $B_i^{\max}$, начальный заряд B_i^0 и минимально допустимый заряд $B_i^{\min}$. Для задания j средние энергозатраты робота i равны w_{ij}, а длительность выполнения – τ_{ij}. Скорость зарядки робота i на станции h равна γ_{ih}. Для движения между

узлами x, y время и средние энергозатраты равны соответственно d_{xy} / v_i и $c_i d_{xy}$. Минимизируется номинальное время выполнения плана:

$$T^0(\Pi) = \max_{1 \le i \le m} T_i^0(\Pi) \to \min, \quad (1)$$

где $T_i^0(\Pi)$ – время возврата робота, рассчитанное по средним энергозатратам с учетом ожидания освобождения зарядных станций. Минимизация выполняется по планам, удовлетворяющим ограничениям распределения заданий и выбранному условию резервирования. Между соседними заданиями допускается не более одного посещения станции. Зарядка также возможна до первого и после последнего задания. Переезд от одной зарядной станции к другой без выполнения задания не допускается.

Модель энергозатрат. Для действия a робота i средние энергозатраты μ_{ia} равны $c_i d_{xy}$ при движении и w_{ij} при выполнении задания j. Одним действием движения считается весь переход между двумя узлами по найденному маршруту. Энергозатраты действия a робота i в отдельной реализации задаются выражением

$$E_{ia} = \mu_{ia} \exp(s_i Z_{ia} - s_i^2 / 2), \qquad s_i = \sqrt{\ln(1 + \upsilon_i^2)}. \quad (2)$$

В выражении (2) Z_{ia} – независимые стандартные нормальные величины, а $\upsilon_i = \upsilon q_j$ – коэффициент вариации энергозатрат. Параметр υ задает общий уровень неопределенности, а q_j определяет различия υ_i между роботами. Начальный заряд, время движения и длительность выполнения заданий считаются известными. Ожидание освобождения зарядной станции не сопровождается энергозатратами.

Резерв и подзарядка. Пусть $A_{i\ell}$ – действия робота i на участке ℓ от старта или окончания зарядки до следующей станции либо базы. При независимых энергозатратах среднее и дисперсия их суммы равны

$$M_{i\ell} = \sum_{a \in A_{i\ell}} \mu_{ia}, \qquad V_{i\ell} = \sum_{a \in A_{i\ell}} (\upsilon_i \mu_{ia})^2. \quad (3)$$

Участок считается допустимым, если выполняется условие

$$M_{i\ell} + R_{i\ell} + B_i^{\min} \le B_{i\ell}^{\text{start}}, \quad (4)$$

где $R_{i\ell}$ – энергетический резерв робота i на участке ℓ; $B_{i\ell}^{\text{start}}$ – заряд робота в начале участка: B_j^0 для первого участка и $B_i^{\max}$ после полной зарядки. Сравниваются три варианта резервирования: D – без резерва, F – с постоянным резервом и U – с резервом по стандартному отклонению:

$$R_{i\ell}^D = 0,\ R_{i\ell}^F = \eta B_i^{\max},\ R_{i\ell}^U = \kappa \sqrt{V_{i\ell}}. \quad (5)$$

Коэффициенты $\eta, \kappa \ge 0$ в (5) определяются на этапе настройки вариантов F и U. При вычислении $V_{i\ell}$ выполнение задания не разделяет участок на части. Минимально допустимый заряд $B_i^{\min}$ учитывается один раз для каждого участка.

Станция обслуживает роботов в порядке прибытия, а при одновременном прибытии приоритет получает робот с меньшим индексом. Время зарядки робота i на станции h до полного заряда равно $(B_i^{\max} - B_i) / \gamma_{ih}$. Для каждой реализации пересчитываются моменты прибытия, время ожидания освобождения станции и длительность зарядки. Распределение заданий, порядок их выполнения и посещения станций фиксированы. Реализация успешна, если все задания выполнены, роботы вернулись на базы и их заряд не снижался ниже $B_i^{\min}$. Энергия при выполнении каждого действия расходуется равномерно по времени.

Построение плана. Для заданной последовательности n_i заданий робота i посещения станций выбираются динамическим программированием. Состояние (k,h) означает, что робот выполнил первые $k = 0,\ldots,n_i$ заданий и завершил зарядку на станции h. Переход к следующей станции допускается после выполнения хотя бы одного задания при соблюдении условия (4). Зарядка перед стартом и старт без зарядки задаются отдельными состояниями. При выборе посещений станций учитываются время движения, выполнения заданий и зарядки без учета очередей других роботов. После выбора посещений станций групповой план оценивается по расписанию подзарядок, рассчитанному по средним энергозатратам.

Начальное распределение заданий получают жадным алгоритмом, выбирая робота с минимальным значением $L_i + d_{x,j} / v_i + \tau_{ij}$, где L_i – накопленное время, а x_i – текущий узел. При построении начального распределения подзарядки не учитываются. На один запуск поиска отводится 320 оценок вариантов плана, включая начальный. Применяются операции переноса, обмена и инверсии с вероятностями 0,55; 0,30 и 0,15 соответственно. Допустимый план с большим по сравнению с текущим номинальным временем может быть принят с вероятностью $\exp(-\Delta T / \theta_b)$, где $\Delta T > 0$ – увеличение номинального времени, b – номер оценки.

$$\theta_b = \max\{0,001;\ 0,03 \max(1, T_{\text{best}}^0)(1 - b/320)^2\},$$

где T^0_{best} – номинальное время лучшего найденного плана.

Для недопустимого плана используется штраф

$$10^7 + 10^5 N_f + \sum_i P_i ,$$

где N_f – число недопустимых маршрутов, а $P_i = 1 + E_i^0 / B_i^{\max}$ – для недопустимого маршрута и $P_i = 0$ иначе. Здесь E_i^0 – номинальные энергозатраты по заданной последовательности база – задания – база без посещения станций. Для D, F и U одинаковы операции, число оценок и начальные состояния генератора случайных чисел. Для оценки влияния распределения и порядка заданий введен вариант UD: распределение и порядок фиксируются по D, а κ берется из настройки U. Посещения станций повторно выбираются динамическим программированием.

Настройка коэффициентов. Коэффициенты резервирования для F и U настраиваются независимо на настроечных картах. Для каждого коэффициента на каждой настроечной карте моделируются 1000 реализаций энергозатрат. Использовались значения η: 0; 0,04; 0,08; 0,12; 0,18; 0,24; 0,32; 0,40; 0,50; κ: 0; 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,75; 4,5.

Значение коэффициента считается допустимым, если для всех настроечных карт построены планы и нижняя односторонняя 95 %-я граница Уилсона для доли успешных реализаций каждого плана не ниже целевого уровня p^*. Из допустимых выбирается значение с минимальным средним по настроечным картам значением критерия (1). Если допустимых значений нет, выбирается коэффициент, для которого наименьшая по настроечным картам нижняя граница Уилсона максимальна (максиминный критерий), а при равенстве значений этого критерия – коэффициент с минимальным средним номинальным временем.

Вычислительный эксперимент. Использованы 5 роботов, 30 заданий и 2 зарядные станции на сетке 70×70. Для каждого из двух типов карт сформированы 5 настроечных и 10 независимых проверочных карт. На рассеянных картах формировались 10 прямоугольных препятствий со сторонами 3–5 ячеек. На коридорных картах задавались две вертикальные стены толщиной 2 ячейки с двумя проходами высотой 5 ячеек. Базы и станции размещались в наибольшей свободной области у заданных опорных точек, обеспечивая достижимость и сопоставимое размещение. 30 заданий случайно выбирались без повторений из свободных ячеек, не занятых базами и станциями. На каждой проверочной карте выполнены три независимых запуска алгоритма поиска, а на каждой настроечной – один.

Емкости роботов задавались случайной перестановкой значений 225,4; 235,2; 245; 254,8 и 264,6. Начальный и минимально допустимый заряды составляли соответственно 90 и 8 % емкости батареи. Скорости и средние удельные энергозатраты задавались случайными перестановками значений 0,90; 0,97; 1,04; 1,11; 1,18 и 0,95; 1,00; 1,05; 1,10; 1,15 соответственно. Коэффициенты q_i задавались случайной перестановкой значений 0,8; 0,9; 1; 1,1 и 1,2. Значения w_{ij} и τ_{ij} независимо выбирались из равномерного распределения на [2; 5], а γ_{ih} – на [2,6;3,2]. Размерные величины заданы в условных единицах.

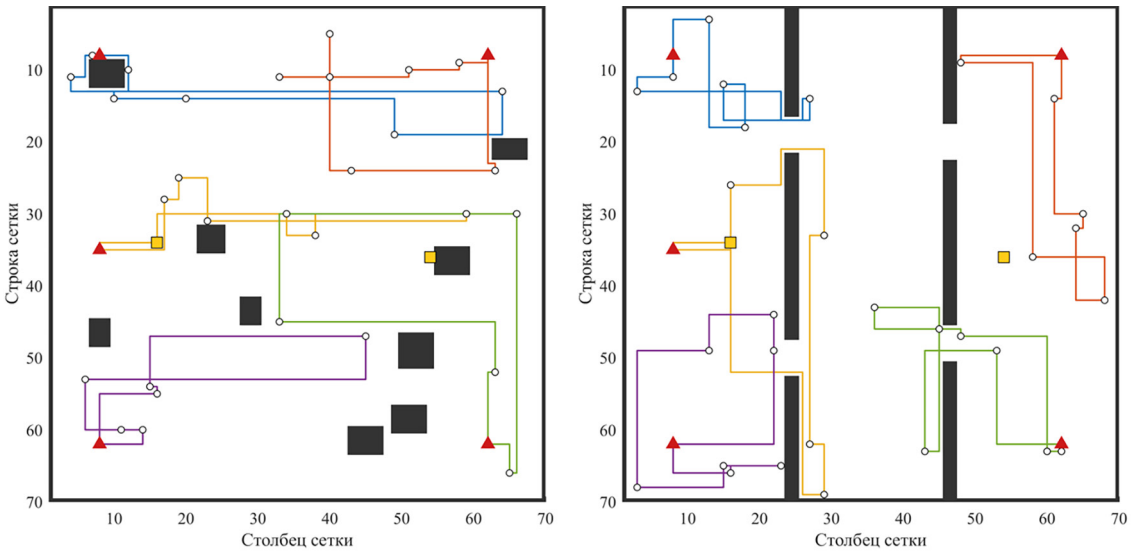


Рис. 1. Проверочные карты и маршруты U при υ = 0,20, p^* = 0,95:
а – рассеянная карта (слева), б – коридорная карта (справа)
Примечание: составлен автором по результатам вычислительных экспериментов

В основной серии исследовались значения υ: 0; 0,05; 0,10 и 0,20 при $p^* = 0{,}95$ и по 500 реализаций на план. При $\upsilon = 0{,}20$ дополнительно исследованы уровни $p^* = 0{,}90$ и 0,99. Для $p^* = 0{,}99$ использовано 1000 реализаций на план. Вариант UD проверялся на первых трех проверочных картах каждого типа: всего 6 карт, 18 планов и 9000 реализаций. Примеры планов варианта U на рис. 1, где круги – задания; квадраты – станции; треугольники – базы.

В эксперименте с коррелированными энергозатратами при $\upsilon = 0{,}20$ использовалась модель

$$Z_{ia} = \sqrt{\rho}\, Z_i + \sqrt{1-\rho}\, Z_{ia}^{\text{ind}},$$

где $\rho = 0{,}5$, а Z_i и Z_{ia}^{ind} – независимые стандартные нормальные величины. Параметр ρ задает общую случайную компоненту энергозатрат для действий одного робота. Использовались планы и коэффициенты, полученные при независимых энергозатратах и $p^* = 0{,}95$. Для каждого плана выполнено 500 реализаций.

Обработка результатов. Вероятность выполнения плана оценивается долей успешных реализаций. Время, энергозатраты и число зарядок усредняются только по успешным реализациям. Для сравнения вариантов используются одинаковые случайные величины по роботам и номерам реализаций, а для действий – по парам узлов или номерам заданий.

Повторные запуски усредняются по карте, затем карты учитываются с одинаковым весом. 95 %-е интервалы определяются по 2,5- и 97,5 %-м квантилям 2000 выборок с возвращением для каждого типа карт. Время сравнивается только для реализаций, успешных в обоих вариантах. Относительное изменение времени усредняется по запускам и картам.

Результаты исследования и их обсуждение

Для $\upsilon = 0{,}05$ при целевом уровне $p^* = 0{,}95$ по результатам настройки выбраны $\eta = \kappa = 0$. На проверочных картах варианты D, F и U дали одинаковые результаты (рис. 2), а сводная доля успешных реализаций составила 92,49 % [86,25; 97,52] %. На проверочной выборке точечная оценка ниже целевого уровня, но 95 %-й интервал его включает.

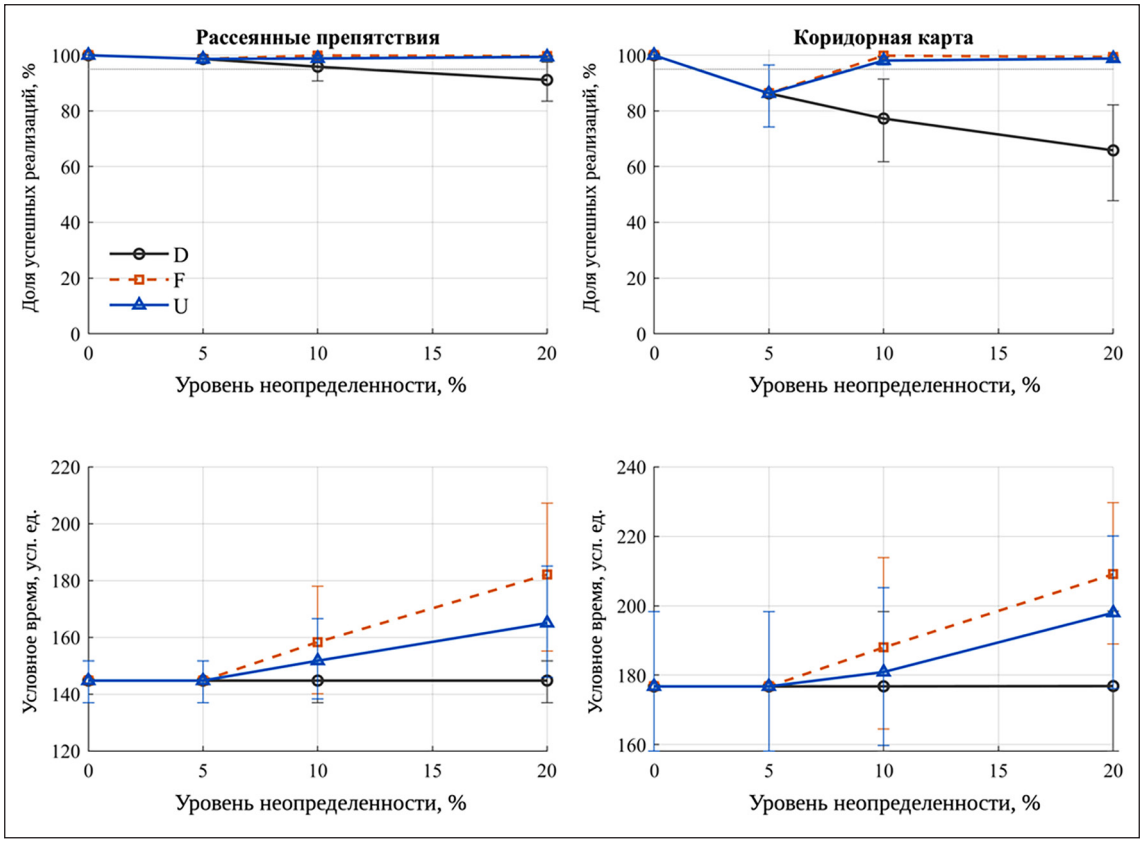


Рис. 2. Доля успешных реализаций плана и условное время его выполнения для двух типов карт. Интервалы построены по независимым картам
Примечание: составлен автором по результатам вычислительных экспериментов

Таблица 1

Сравнение вариантов резервирования на 20 проверочных картах

υ / p^*	Вариант	Доля успешных реализаций плана, % [95 %-й интервал]	Условное время	Число зарядок	Энергозатраты
0,10 / 0,95	F	99,887 [99,787; 99,963]	173,16	1,08	800,86
0,10 / 0,95	U	98,477 [97,596; 99,290]	166,34	0,55	777,24
0,20 / 0,95	F	99,533 [99,257; 99,773]	195,60	2,33	827,38
0,20 / 0,95	U	99,117 [98,773; 99,413]	181,52	1,57	808,20
0,20 / 0,99	F	99,993 [99,983; 100,000]	226,30	4,70	904,05
0,20 / 0,99	U	99,940 [99,917; 99,960]	201,15	2,55	830,44

Примечание: составлена автором по результатам вычислительных экспериментов.

Таблица 2

Парные различия показателей сравниваемых вариантов планирования

Варианты	υ / p^*	Число карт	Разность долей успешных реализаций плана, п. п. [95 %-й интервал]	Разность времени [95 %-й интервал]	Изменение времени, %
U-F	0,10 / 0,95	20	-1,410 [-2,237; -0,657]	-6,82 [-11,85; -2,40]	-3,17
U-F	0,20 / 0,95	20	-0,417 [-0,780; -0,023]	-14,0 [-26,27; -4,60]	-6,13
U-F	0,20 / 0,99	20	-0,053 [-0,077; -0,032]	-25,15 [-36,80; -14,96]	-10,80
U-UD	0,20 / 0,95	6	-0,022 [-0,189; 0,078]	-18,83 [-32,60; -6,06]	-9,11

Примечание: составлена автором по результатам вычислительных экспериментов.

Для $\upsilon = 0{,}10$ и $p^* = 0{,}95$ выбраны $\eta = 0{,}08$ и $\kappa = 1{,}5$. Для $\upsilon = 0{,}20$ при $p^* = 0{,}95$ выбраны $\eta = 0{,}18$ и $\kappa = 2{,}5$, а при $p^* = 0{,}99$ – $\eta = 0{,}32$ и $\kappa = 3{,}75$. При $\upsilon = 0{,}20$ коэффициенты при $p^* = 0{,}90$ и $p^* = 0{,}95$ совпали.

Для U условное время и число зарядок меньше, чем для F, но доля успешных реализаций также ниже (табл. 1). Поскольку F и U настраиваются раздельно, время, число зарядок и энергозатраты сравниваются при разных долях успешных реализаций.

Влияние распределения и порядка заданий на время выполнения плана. Для варианта UD доля успешных реализаций составила 99,133 % [98,733; 99,444] %, а условное время – 190,76 [167,14; 219,30]. На этих же шести картах условное время для U было меньше, чем для UD, на 18,83 единицы, или 9,11 % (табл. 2). Статистически значимых различий между U и UD по доле успешных реализаций не выявлено.

Коррелированные энергозатраты. При $\rho = 0{,}5$ сводная доля успешных реализаций плана составила 93,00 % [91,42; 94,50] % для F и 87,62 % [85,21; 89,90] % для U. В этом эксперименте корреляция энергозатрат не учитывалась при планировании: расчет по (3) выполнялся в предположении независимости энергозатрат отдельных действий.

Заключение

Предложен способ резервирования по стандартному отклонению суммарных энергозатрат между подзарядками, учитываемый при распределении заданий. При $\upsilon = 0{,}10$ и $\upsilon = 0{,}20$ у U условное время и число зарядок были меньше, чем у F, но доля успешных реализаций плана была ниже. На всех шести проверочных картах изменение распределения и порядка заданий уменьшило время выполнения плана. При $\upsilon = 0{,}05$ точечная оценка доли успешных реализаций была ниже 95 %. При корреляции энергозатрат, не учитываемой при планировании, доля успешных реализаций была ниже 95 % для обоих вариантов.

Список литературы

1. Мигранов А. Б. Гибридный нейродинамический алгоритм распределения заданий в группах мобильных роботов при неопределенности наблюдений и параметрической настройке // Современные наукоемкие технологии. 2026. № 4. С. 76–84. DOI: 10.17513/snt.40731.

2. Yang F., Chakraborty N. Algorithm for Multi-Robot Chance-Constrained Generalized Assignment Problem with Stochastic Resource Consumption // 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2020. P. 4329–4336. DOI: 10.1109/IROS45743.2020.9341726.

3. Fu B., Smith W., Rizzo D., Castanier M., Barton K. Heterogeneous Vehicle Routing and Teaming with Gaussian Distributed Energy Uncertainty // 2020 IEEE/RSJ International

Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2020. P. 4315–4322. DOI: 10.1109/IROS45743.2020.9341433.

4. Notomista G., Mayya S., Emam Y., Kroninger C., Bohannon A., Hutchinson S., Egerstedt M. A Resilient and Energy-Aware Task Allocation Framework for Heterogeneous Multirobot Systems // IEEE Transactions on Robotics. 2022. Vol. 38. Is. 1. P. 159–179. DOI: 10.1109/TRO.2021.3102379.

5. Herynek J., Edelkamp S. Multi-Robot Multi-Goal Mission Planning in Terrains of Varying Energy Consumption // 2024 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2024. P. 12064–12069. DOI: 10.1109/IROS58592.2024.10802578.

6. Do H., Jang J., Kim J. Heterogeneous multi-robot system mission planning with cooperative replenishment through data-driven rendezvous point selection // Intelligent Service Robotics. 2025. Vol. 18. Is. 1. P. 61–73. DOI: 10.1007/s11370-024-00568-9.

7. Ito T., Funada R., Sampei M., Notomista G. Energy-Aware Task Allocation for Teams of Multi-Mode Robots // IEEE Control Systems Letters. 2025. Vol. 9. P. 1964–1969. DOI: 10.1109/LCSYS.2025.3590426.

8. Gerkey B. P., Matarić M. J. A Formal Analysis and Taxonomy of Task Allocation in Multi-Robot Systems // The International Journal of Robotics Research. 2004. Vol. 23. Is. 9. P. 939–954. DOI: 10.1177/0278364904045564.

9. Mohajerin Esfahani P., Kuhn D. Data-driven distributionally robust optimization using the Wasserstein metric: performance guarantees and tractable reformulations // Mathematical Programming. 2018. Vol. 171. P. 115–166. DOI: 10.1007/s10107-017-1172-1.

10. Campi M. C., Garatti S. The Exact Feasibility of Randomized Solutions of Uncertain Convex Programs // SIAM Journal on Optimization. 2008. Vol. 19. Is. 3. P. 1211–1230. DOI: 10.1137/07069821X.

11. Kumar N., Lee J. J., Rathinam S., Darbha S., Sujit P. B., Raman R. The Persistent Robot Charging Problem for Long-Duration Autonomy // IEEE Robotics and Automation Letters. 2025. Vol. 10. Is. 3. P. 2191–2198. DOI: 10.1109/LRA.2024.3524897.

12. Kundu T., Saha I. Mobile Recharger Path Planning and Recharge Scheduling in a Multi-Robot Environment // 2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2021. P. 3635–3642. DOI: 10.1109/IROS51168.2021.9636078.

13. Asghar A. B., Sundaram S., Smith S. L. Multirobot Persistent Monitoring: Minimizing Latency and Number of Robots With Recharging Constraints // IEEE Transactions on Robotics. 2025. Vol. 41. P. 236–252. DOI: 10.1109/TRO.2024.3502497.

14. Naveed K. B., Dang A., Kumar R., Panagou D. meSch: Multi-Agent Energy-Aware Scheduling for Task Persistence // 2025 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2025. P. 21458–21465. DOI: 10.1109/IROS60139.2025.11247605.

15. Mondal M. S., Ramasamy S., Bhounsule P. How to Coordinate UAVs and UGVs for Efficient Mission Planning? Optimizing Energy-Constrained Cooperative Routing with a DRL Framework // Proceedings of Robotics: Science and Systems XXI. 2025. DOI: 10.15607/RSS.2025.XXI.101.

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest.

Финансирование: Автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 519.876.2:004.896
DOI

CC BY 4.0

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭВАКУАЦИЕЙ ПЕШЕХОДНЫХ ПОТОКОВ НА ОСНОВЕ ГИБРИДНОЙ МЕЗОСКОПИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ПЛОТНОСТИ ПОТОКА

Наумова Н. А. ORCID ID 0000-0003-1944-1642,
Чубырь Н. О. ORCID ID 0000-0003-3535-0361

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный университет», Краснодар, Российская Федерация,
e-mail: Nataly_Naumova@mail.ru

Обеспечение безопасной эвакуации людей из мест массового пребывания остается актуальной междисциплинарной задачей, поскольку традиционные статические нормативы не учитывают динамическое поведение толпы и не позволяют предотвращать возникновение давки и ударных волн. Существующие модели пешеходных потоков обладают либо высокой вычислительной сложностью, либо недостаточной точностью для оперативного управления. Целью исследования является разработка и математическое обоснование аппарата адаптивного оптимального управления эвакуационными потоками на основе гибридной мезоскопической модели, интегрированной с системами искусственного интеллекта для мониторинга и управления в реальном времени. В работе предлагается развитие гибридной модели эвакуации, в которой параметры системы массового обслуживания аналитически связываются с плотностью и скоростью потока, измеряемыми средствами искусственного интеллекта. Модель использует фундаментальную диаграмму Гриншилдса для определения скорости по плотности потока, а условие Рэнкина – Гюгонио применяется для обнаружения предвестников ударных волн, что позволяет инициировать перераспределение потоков до достижения критической плотности. Сформулировано и доказано достаточное условие предотвращения перегрузки выходов, разработаны два алгоритма управления: локальный (коррекция ширины перегруженного выхода) и глобальный (маршрутизация потоков по алгоритму Дейкстры с динамическими весами). Глобальный алгоритм обеспечивает более высокую эффективность за счет предотвращения перегрузок, а не только реагирования на них. Впервые разработан математически обоснованный аппарат адаптивного управления эвакуационными потоками, интегрирующий данные искусственного интеллекта о плотности и скорости потока с динамикой систем массового обслуживания в едином замкнутом контуре управления, включающем мониторинг, прогнозирование, перераспределение маршрутов и информирование.

Ключевые слова: математическое моделирование, искусственный интеллект, пешеходные потоки, эвакуация, система массового обслуживания, ударные волны, адаптивное управление, матрица корреспонденций

ADAPTIVE MANAGEMENT OF PEDESTRIAN FLOWS BASED ON A HYBRID MESOSCOPIC MODEL AND INTELLIGENT ANALYSIS OF FLOW DENSITY

Naumova N. A. ORCID ID 0000-0003-1944-1642,
Chubyr N. O. ORCID ID 0000-0003-3535-0361

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kuban State University", Krasnodar, Russian Federation,
e-mail: Nataly_Naumova@mail.ru

Ensuring the safe evacuation of people from places of mass gathering remains a relevant interdisciplinary task, since traditional static standards do not take into account the dynamic behavior of crowds and do not allow preventing the occurrence of crush and shock waves. Existing models of pedestrian flows either have high computational complexity or insufficient accuracy for operational management. The aim of the study is to develop and mathematically substantiate an apparatus for adaptive optimal management of evacuation flows based on a hybrid mesoscopic model integrated with artificial intelligence systems for real-time monitoring and management. The paper proposes the development of a hybrid evacuation model in which the parameters of the queuing system are analytically linked to the density and flow velocity, which are measured using artificial intelligence tools. The model uses the fundamental Greenshields diagram to determine the flow velocity based on the density, and the Rankine–Hugoniot condition is applied to detect the precursors of shock waves, which makes it possible to initiate the redistribution of flows before the critical density is reached. A sufficient condition for preventing output overload has been formulated and proven; two control algorithms have been developed: a local one (adjusting the width of an overloaded output) and a global one (routing flows using Dijkstra's algorithm with dynamic weights). The global algorithm ensures higher efficiency by preventing overloads rather than merely responding to them. For the first time, a mathematically grounded apparatus for adaptive management of evacuation flows has been developed; it integrates artificial intelligence data on flow density and speed with the dynamics of queuing systems in a single closed control loop that includes monitoring, forecasting, route redistribution, and information provision.

Keywords: mathematical modeling, artificial intelligence, pedestrian flows, evacuation, queuing system, shock waves, adaptive control, origin-destination matrix

Введение

Обеспечение безопасной и эффективной эвакуации людей из зданий и сооружений при возникновении чрезвычайных ситуаций остается одной из наиболее актуальных задач в области гражданской обороны, пожарной безопасности и организации массовых мероприятий [1]. По данным Международной ассоциации пожарной безопасности, за последние два десятилетия в мире произошло более 50 крупных инцидентов с давкой в местах массового пребывания людей, каждый из которых унес не менее 10 жизней [1]. Наиболее резонансные из них – трагедия на фестивале Love Parade в Дуйсбурге (2010, 21 погибший), давка во время хаджа в Мине (2015, более 2000 погибших), инциденты в ночных клубах Бухареста (2015) и Кошице (2018) – демонстрируют, что соблюдение формальных строительных нормативов по ширине выходов и количеству эвакуационных путей не гарантирует безопасности, если не учитываются динамические эффекты самоорганизации толпы, возникновения волн остановок и ударных волн. Эмпирические исследования колебания плотности людского потока [2] показывают, что ударные волны возникают при превышении критического значения плотности и могут распространяться со скоростью, превышающей скорость движения людей, что приводит к цепной реакции падения и травматизма.

Существующие подходы к моделированию пешеходных потоков можно разделить на три основные группы. Микроскопические модели, такие как модель социальных сил и клеточные автоматы [3, с. 23–25], описывают траектории каждого человека, однако их вычислительная сложность и трудность калибровки ограничивают применение для оперативного управления в реальном времени. Макроскопические модели [3, с. 20–22; 4] описывают поток в целом, но не позволяют учитывать индивидуальные особенности движения. Однако макроскопические модели не позволяют описывать дискретные эффекты, такие как формирование очередей у выходов или взаимодействие разнонаправленных потоков, что ограничивает их применимость для расчета пропускной способности эвакуационных путей.

Мезоскопический подход, занимающий промежуточное положение, описывает группы пешеходов или потоки через вероятностные характеристики. Аналогичный подход ранее успешно применялся для управления автотранспортными потоками [3, с. 26–27]. В рамках этого направления особое место занимают модели на основе теории массового обслуживания (СМО), где выход рассматривается как многоканальная система с очередью. Работы И. А. Корелина [5, с. 39–71] и классические монографии Б. В. Гнеденко и И. Н. Коваленко [6, с. 12–83] заложили основы применения СМО в пешеходной динамике. В последние годы появились гибридные модели, объединяющие макроскопические и мезоскопические описания, – например, модель Чжана и Цзя [7], где макроскопический поток взаимодействует с микроскопическим поведением у выходов. Однако большинство существующих мезоскопических моделей используют стационарные предположения о постоянстве плотности потока на интервале расчета, что не соответствует реальной динамике эвакуации.

Параллельно с развитием моделей происходил прогресс в технологиях сбора данных. Системы компьютерного зрения на основе сверточных нейросетей (YOLO, Detectron2) и алгоритмы трекинга (DeepSORT, ByteTrack) позволяют в реальном времени определять плотность, скорость и направления движения больших групп людей с точностью до 85–95% [8]. Это создало технологические предпосылки для перехода от ретроспективного моделирования к активному управлению потоками.

Актуальность работы определяется отсутствием математически обоснованного аппарата интеграции данных искусственного интеллекта о пешеходных потоках с управлением эвакуацией в реальном времени. Существующие подходы не обеспечивают замкнутого контура управления, позволяющего перейти от реагирования на перегрузки к их предотвращению. Разработка такого аппарата, включающего аналитическую связь параметров потока с динамикой очередей, алгоритмы перераспределения маршрутов и систему информирования, является востребованной задачей для повышения безопасности массовых мероприятий.

Цель исследования – разработка и математическое обоснование аппарата адаптивного оптимального управления эвакуационными потоками на основе гибридной мезоскопической модели, интегрированной с системами искусственного интеллекта для мониторинга и управления в реальном времени.

Материалы и методы исследования

Рассмотрим площадь, разбитую на N участков (зон) с площадями S_i, $i = 1,2,\ldots,N$. Каждый участок характеризуется двумерной плотностью $\rho_i^{2D}(t)$ (чел/м^2), получае-

мой по данным видеодетектора, и количеством людей:

$$N_i(t) = \rho_i^{2D}(t) \cdot S_i .$$

Участки образуют ориентированный граф. Между соседними участками существуют проходы, для каждого из которых известна ширина и пропускная способность. Маршрут из зоны № i к выходу № j определяется как перечень участков, которые необходимо пройти.

В работе [9] была введена матрица корреспонденций

$$ODMatPed_0 = \left\| \rho_{ij} \right\|_{m \times n},$$

где ρ_{ij} – количество пешеходов («корреспонденций»), выходящих из зоны № i к выходу № j в течение всего периода. С учетом данных матрицы корреспонденций доля потока, направляющаяся через k-й проход i-й зоны, определяется следующим образом:

$$\beta_{i \to k}(t) = \frac{\sum_{j=1}^{M} \rho_{ij} \cdot \alpha_{i \to k}^{(j)}}{\sum_{j=1}^{M} \rho_{ij}},$$

где $\alpha_{i \to k}^{(j)}$ – индикатор принадлежности k-го прохода маршруту от зоны № i к выходу № j. Обозначим $w_{i \to k}$ ширину потока (в метрах) через k-й проход i-й зоны. Известно, что линейная плотность потока $\rho_i^{1D}(t)$, равная количеству людей на единицу длины, может быть определена через двумерную плотность $\rho_i^{2D}(t)$ при известной ширине потока $w_{i \to k}$ следующим образом:

$$\rho_i^{1D}(t) = \rho_i^{2D}(t) \cdot w_{i \to k} .$$

Тогда при введенных выше обозначениях интенсивность пешеходного потока через k-й проход i-й зоны рассчитывается следующим образом:

$$J_{i \to k}(t) = \rho_i^{2D}(t) \cdot v_i(t) \cdot w_{i \to k} \cdot \beta_{i \to k}(t).$$

Ключевой момент для адаптивного управления – расчет плотности и интенсивности на каждом участке. Изменение плотности на участке № i описывается уравнением неразрывности (законом сохранения) [4; 10, с. 49–57]:

$$\frac{d\rho_i^{2D}(t)}{dt} = \frac{1}{S_i}\left(\sum_{k \in In(i)} J_{k \to i}(t) - \sum_{k \in Out(i)} J_{i \to k}(t) \right),$$

где $In(i)$ – множество входящих в зону № i потоков,

$Out(i)$ – множество исходящих из зоны № i потоков.

Дискретная форма закона для численного решения имеет вид

$$\rho_i^{2D}(t + \Delta t) = \rho_i^{2D}(t) + \frac{\Delta t}{S_i}\left(\sum_{k \in In(i)} J_{k \to i}(t) - \sum_{k \in Out(i)} J_{i \to k}(t) \right).$$

Скорость движения на участке может быть спрогнозирована через эмпирическую зависимость от плотности (модель Гриншилдса):

$$v_i(t) = v_f \cdot \left(1 - \frac{\rho_i^{2D}(t)}{\rho_{\max}} \right),$$

где v_f – скорость свободного движения (для пешеходных потоков v_f = 1,66 м/с),

$\rho_{\max}$ – максимальная плотность ($\rho_{\max}$ = 5,0 чел/м²) [11; 12].

Порядок распределения Эрланга k_j у j-го выхода можно выбирать, опираясь на линейную плотность $\rho_i^{1D}(t)$ пешеходного потока у данного выхода:

$$k_j = \begin{cases} 1, если\ \rho_j^{1D}(t) < 0,5\ чел/м, \\ 3, если\ 0,5 \le \rho_j^{1D}(t) < 1,5\ чел/м, \\ 6, если\ \rho_j^{1D}(t) \ge 1,5\ чел/м. \end{cases}$$

Параметр Эрланга λ_j у j-го выхода рассчитывается следующим образом:

$$\lambda_j = k_j \cdot \sum_{i=1}^{N} J_{i \to j} = k_j \cdot \sum_{i=1}^{N} \rho_i^{2D}(t) \cdot v_i(t) \cdot w_{i \to j} \cdot \beta_{i \to j}(t) .$$

Таким образом, параметр λ_j в СМО становится функцией плотности и скорости, и система СМО автоматически учитывает изменение плотности потока через параметр λ_j.

Для вычисления характеристик качества функционирования СМО применяются формулы [9]:

$L_{qj}(t) = \sum_{n=M_j}^{N_Q} (n - M_j) r_n(t)$ – математическое ожидание длины очереди в зависимости от времени;

$W_{qj}(t) = \sum_{n=M_j}^{N_Q} (n - M_j + 1) \frac{r_n(t)}{M_j \mu_j}$ – зависимость ожидания в очереди от времени,

где M_j – число турникетов у данного выхода (число каналов обслуживания), N_Q – число мест в очереди, $r_n(t)$ – вероятность нахождения в СМО n заявок, μ_j – интенсивность обслуживания одного канала.

Результаты исследования и их обсуждение

1. Теоретическое обоснование алгоритмов управления

Как отмечено выше, параметры Эрланга входного потока в СМО являются функциями плотности и скорости пешеходного потока. Этот факт позволяет установить связь между параметрами СМО и риском возникновения ударной волны в пешеходном потоке.

Теорема 1 (о достаточном условии предотвращения перегрузки)

Пусть для каждого выхода j задано критическое значение математического ожидания длины очереди L_{qj}^{crit}. Если на интервале $[t_{m-1};t_m]$ выполняется условие для параметра Эрланга:

$$\lambda_j^{(m)} < \lambda_j^{crit} = k_j \cdot \mu_j \cdot M_j \cdot \left(1 - \frac{L_{qj}^{crit}}{M_j + L_{qj}^{crit}}\right),$$

где μ_j – интенсивность обслуживания одного канала, M_j – число каналов, то длина очереди на этом интервале не превышает L_{qj}^{crit}:

$$L_{qj}(t) \le L_{qj}^{crit} \; \forall t \in [t_{m-1};t_m].$$

Доказательство.

Для СМО типа $E_k / M / Mj / N_q$ стационарная длина очереди выражается через безразмерную величину – параметр загрузки СМО у выхода j следующим образом:

$$\rho_{sys,j} = \frac{\lambda_j^{(m)}}{\mu_j \cdot M_j}$$ [13, с. 108–114].

При выполнении условия: $\lambda_j^{(m)} < \lambda_j^{crit}$ справедливо неравенство

$$\rho_{sys,j}^{(m)} < \rho_{sys,j}^{crit} = \frac{\lambda_j^{crit}}{\mu_j \cdot M_j}$$

для каждого интервала $[t_{m-1};t_m]$. Монотонность функции $L_{qj}^{crit}(\rho_{sys,j})$ обеспечивает достаточность условия. *Утверждение доказано.*

Если на интервале обнаружено нарушение условия теоремы 1, необходимо скорректировать эффективные ширины проходов $w_{i\to j}$ к выходу j. Уменьшение $w_{i\to j}$ приведет к уменьшению параметра λ_j и снижению $L_{qj}(t)$. Это позволит снизить риск возникновения ударной волны.

Ударная волна в пешеходном потоке возникает при резком скачке плотности и скорости [14; 15]. Скорость ударной волны определяется условием Рэнкина – Гюгонио [16]:

$$s = \frac{F(\rho_+^{1D}) - F(\rho_-^{1D})}{\rho_+^{1D} - \rho_-^{1D}},$$

где ρ_+^{1D} и ρ_-^{1D} – значения линейной плотности перед и за фронтом ударной волны соответственно;

$F(\rho_i^{1D}(t)) = \rho_i^{1D}(t) \cdot v_f \cdot \left(1 - \frac{\rho_i^{1D}(t)}{\rho^{1D}{}_{\max}}\right)$ – функция потока.

Критерии обнаружения риска образования ударной волны следующие:

$$\begin{cases} \rho_i^{1D}(t) > \rho^{1D}{}_{crit} = 2{,}5\,чел/м, \\ \left|\frac{d\rho_i^{1D}(t)}{dx}\right| > 0{,}5\,чел/м^2, \\ v_i(t) < 0{,}5\,м/с. \end{cases}$$

Регулирование ширины прохода – это управляющее воздействие, которое позволяет адаптивно менять пропускную способность эвакуационного пути, чтобы предотвратить перегрузку (как следствие из теоремы 1):

$$w_{i\to j}^{new} = w_{i\to j}^{old} \cdot \left(1 - \alpha \cdot \frac{\lambda_j - \lambda_j^{crit}}{\lambda_j},\right).$$

На практике этого можно добиться при помощи динамического управления очередью (физические барьеры, электронная очередь), информационных табло и аудиооповещения, адаптивной архитектуры (раздвижные перегородки или «умные» двери меняют геометрию пространства).

Таблица 1

Стратегии предотвращения ударных волн

Стратегия	Действие	Эффект
Увеличение пропускной способности	Расширить выходы	Снижение плотности
Регулирование потока	Ограничить вход к выходу	Снижение скорости волны
Информирование	Табло с рекомендациями	Равномерное распределение
Барьеры	Направляющие ограждения	Упорядочивание потока

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 2

Классификация уровней угрозы

Уровень	Цвет	Условия	Действие
0	Зеленый	$\rho_i^{1D}(t) < 1{,}5$	Мониторинг
1	Желтый	$1{,}5 \le \rho_i^{1D}(t) < 2{,}5$	Упреждение
2	Оранжевый	$2{,}5 \le \rho_i^{1D}(t) < 3{,}5$	Активное вмешательство

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Возможные действия при перегрузке указаны в табл. 1.

Классификация возможных угроз представлена в табл. 2.

Для количественной оценки эффективности управления введем *интегральную длину очереди* L_q^{int}, определяемую как суммарное «человеко-время», проведенное всеми эвакуируемыми в очереди за весь период эвакуации:

$$L_q^{int} = \int_0^T L_q(t)\,dt \approx \sum_{k=0}^{K} L_q(t_k)\,\Delta t,$$

где $L_q(t)$ – мгновенная длина очереди в момент времени t (чел), T – общее время эвакуации (с), Δt – шаг дискретизации (с), $K = T / \Delta t$ – число шагов дискретизации.

2. Алгоритмы управления пешеходными потоками

Для определения оптимальных маршрутов движения пешеходов от каждой зоны к эвакуационным выходам предлагается использовать *алгоритм Дейкстры* на графе, вершинами которого являются зоны, а ребрами – проходы между ними.

Вес $\tau_{i\to k}(t)$ ребра (i,k) в момент времени t определяется как

$$\tau_{i\to k}(t) = \frac{Lng_{i\to k}}{v_i(t)},$$

где $Lng_{i\to k}$ – длина ребра (i,k) (прохода из зоны № i в зону № k), $v_i(t)$ – текущая скорость в зоне № i.

Вес ребра $\tau_{i\to k}(t)$ с учетом загруженности выхода j, к которому направляется поток (математического ожидания длины очереди L_{qj}) следующий:

$$\tau_{i\to k}(t)^{eff}(t) = \frac{Lng_{i\to k}}{v_i(t)} + \beta \cdot L_{qj}.$$

На каждом шаге алгоритма для каждой зоны № i определяются кратчайшие пути ко всем выходам и выбирается выход с минимальным полным временем. Это позволяет динамически перераспределять потоки, учитывая текущую плотность и загрузку выходов. Обновленные маршруты фиксируются в матрице корреспонденций.

Таким образом, возможны следующие *два метода управления* (рис. 1):

– регулирование только ширины – это локальное, реактивное управление, то есть происходит реагирование на перегрузку, но не меняется структура потоков;

– маршрутизация потоков (алгоритм Дейкстры с регулированием ширины) – это глобальное, проективное управление. В этом случае перестраивается вся система маршрутов в реальном времени, направляя каждый поток по оптимальному пути с учетом текущей загрузки всех выходов.

Предлагается следующая система рекомендаций для информационных табло, интегрированная с контуром управления (табл. 3).

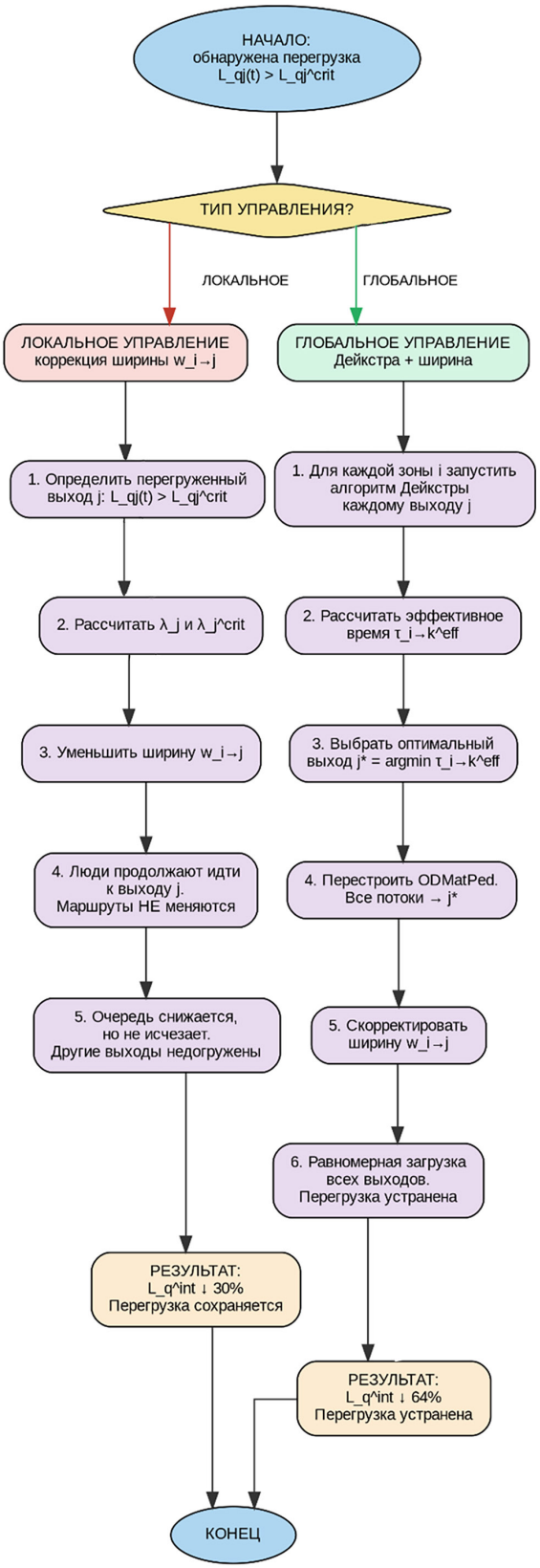


Рис. 1. Блок-схема алгоритма управления процессом эвакуации
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Алгоритм 1. *Основной цикл управления эвакуацией*

1. Инициализация:
$t = 0$, $ODMatPed = ODMatPed_0$.
2. Цикл:
2.1. Получить $\rho_i^{2D}(t)$,(t) с камер видеомониторинга.
2.2. Рассчитать $J_{i\to k}(t)$.
2.3. Обновить $\rho_i^{2D}(t + \Delta t)$ по уравнению непрерывности.
2.4. Рассчитать $\lambda_j(t)$
2.5. Решить СМО на интервале $(t; t + \Delta t)$
2.6. Вычислить $L_{qj}(t)$, $W_{qj}(t)$ для каждого выхода.
2.7. Если $L_{qj}(t) > L_{qj}^{crit}$ → запустить Алгоритм 2.
2.8. Вывести рекомендации на табло.
2.9. Обновить $t = t + \Delta t$.
3. Конец.

Алгоритм 2. *Предотвращение перегрузки выходов*

1. Обнаружено: $L_{qj}(t) > L_{qj}^{crit}$ для выхода j.
2. Найти свободные выходы (Теорема 1).
3. Для каждого участка № i, направляющего поток к выходу № j:
– найти альтернативный маршрут к выходу № j (алгоритм Дейкстры);
– рассчитать стоимость перераспределения.
4. Решить задачу оптимизации потоков при ограничениях баланса.
5. Обновить *ODMatPed*.
6. Скорректировать $w_{i\to j}^{new}$.
7. Сформировать сообщения для табло.

3. Численные эксперименты

Для проверки разработанного алгоритма был проведен численный эксперимент для площадки (концертный зал) на 2000 мест – 6 зон и 3 выхода. Параметры модели следующие:

v_f = 1.66 м/с, $\rho_{\max}$ = 5,0 чел/м²,

μ_j = 0,5 чел/с, L_{qj}^{crit} =2,5 чел. – для всех выходов.

Составлена начальная матрица корреспонденций (табл. 4).

Результаты численных экспериментов представлены в табл. 5.

Сравнение двух стратегий управления – локальной и глобальной – показывает принципиальное различие в их эффективности (рис. 2). Локальное управление, основанное на сужении перегруженного выхода, позволяет снизить интегральную длину очереди на 30 % (с 500 до 350 чел·с). Однако оно не устраняет перегрузку полностью: часть выходов остается перегруженной, а часть – недогруженной. Это связано с тем, что маршруты не меняются и люди продолжают стремиться к перегруженному выходу, несмотря на снижение его пропускной способности.

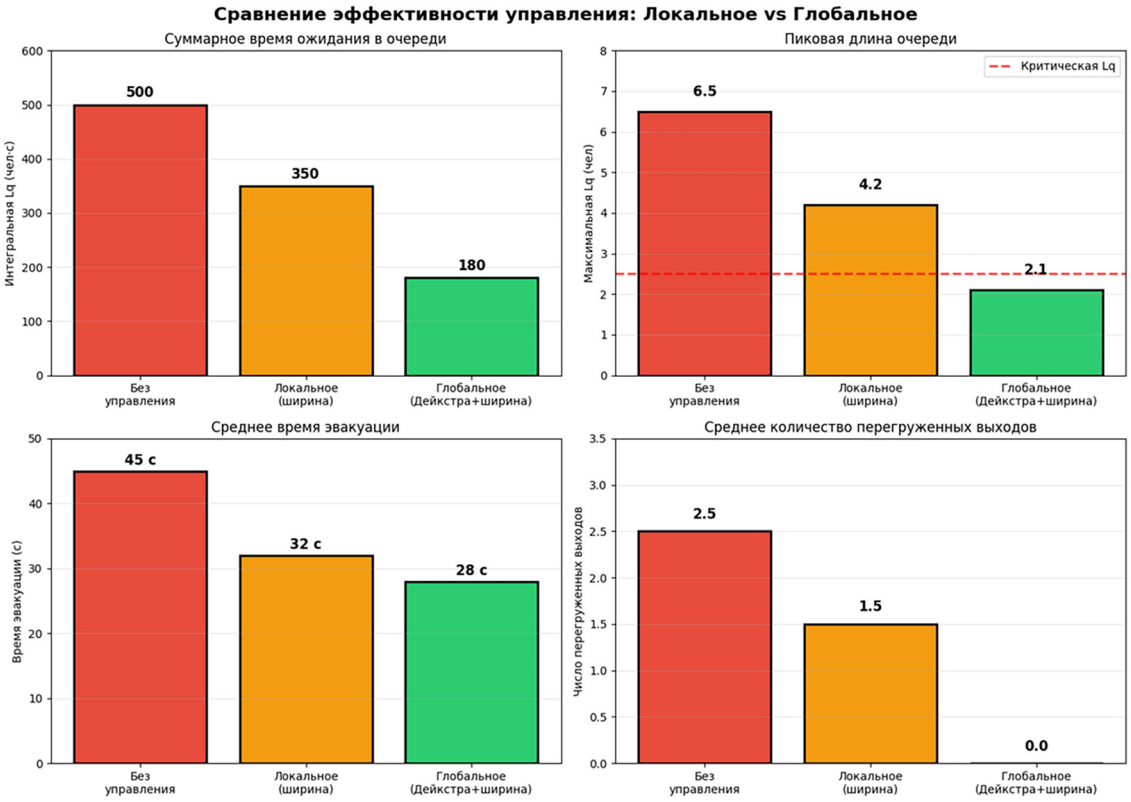


Рис. 2. Сравнение эффективности управления эвакуационными потоками: (а) интегральная длина очереди; (б) максимальная длина очереди; (в) среднее время эвакуации; (г) количество перегруженных выходов
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Таблица 3

Пример системы рекомендаций для информационного табло

Код	Уровень	Цвет	Сообщение	Действие
I-01	Информация	Синий	Все выходы свободны	Продолжайте движение
W-01	Внимание	Желтый	Скопление у выхода 1	Используйте выход 2
W-02	Предупреждение	Оранжевый	Очередь растет	Рекомендуем выход 3
C-01	Критический	Красный	Выход 1 перегружен	Немедленно к выходу 4
E-01	Экстренный	Красный + мигание	Ударная волна	Следуйте указаниям

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 4

Начальная матрица корреспонденций

Зона \ Выход	Выход 1	Выход 2	Выход 3	Всего
1 (Сцена)	180	120	100	400
2 (Центр)	350	200	200	750
3 (Левая)	80	50	150	280
4 (Правая)	70	150	25	245
5 (Балкон Л)	40	60	80	180
6 (Балкон П)	30	20	95	145
Всего	750	600	650	2000

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 5

Сравнение сценариев управления эвакуацией

Показатель	Без управления	Локальное	Глобальное
Максимальная длина очереди (чел.)	6,5	4,2	2,1
Средняя длина очереди (чел.)	2,8	1,9	0,9
Интегральная длина очереди L_q^{int} (чел.·с)	500	350	180
Снижение L_q^{int} (%)	0	30	64
Время безопасной работы (с)	85	120	185
Количество перегруженных выходов	2–3	1–2	0
Среднее время эвакуации (с)	45	32	28

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Глобальное управление, включающее маршрутизацию по алгоритму Дейкстры и адаптивную коррекцию ширины, обеспечивает снижение интегральной L_q^{int} на 64 % (до 180 чел.·с), полное устранение перегруженных выходов и сокращение среднего времени эвакуации на 38 % (с 45 до 28 с). Это достигается за счет активного перераспределения потоков: для каждой зоны выбирается оптимальный выход с учетом текущей скорости и загрузки всех выходов.

Таким образом, ключевое отличие заключается в том, что локальное управление реагирует на перегрузку, а глобальное – предотвращает ее за счет перестройки всей системы маршрутов. Это подтверждает целесообразность использования алгоритма Дейкстры как инструмента глобальной оптимизации эвакуационных потоков.

Заключение

В данной работе усовершенствована гибридная модель эвакуации пешеходных потоков, а именно внедрены два алгоритма управления: локального, адаптивное изменение ширины перегруженного выхода) и глобального (перераспределение потоков по алгоритму Дейкстры с динамическими весами, учитывающими загрузку всех выходов). Впервые разработан математически обоснованный аппарат адаптивного управления эвакуационными потоками, интегрирующий данные искусственного интеллекта о плотности и скорости потока с динамикой систем массового обслуживания в едином замкнутом контуре управления, включающем мониторинг, прогнозирование, перераспределение маршрутов и информирование. Численные эксперименты подтвердили эффективность разработанного подхода. Разработанные алгоритмы предполагается в дальнейшем верифицировать на реальных данных, учитывая гетерогенность толпы, моделирование панического поведения. Таким образом, полученные разработки могут быть внедрены в системы безопасности массовых мероприятий, а также могут использоваться при формировании системы «умный город».

Список литературы

1. Мельников Р. В. Моделирование пешеходных потоков при подготовке к проведению метасобытий // Инженерный вестник Дона. 2017. № 2 (45). С. 72. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-peshehodnyh-potokov-pri-podgotovke-k-provedeniyu-mega-sobytiy (дата обращения: 03.08.2026). EDN: ZEONIF.

2. Helbing D., Molnar P. Social force model for pedestrian dynamics // Physical Review E. 1995. Vol. 51. Is. 5. P. 4282–4286. URL: https://www.researchgate.net/publication/1947096_Social_force_model_for_pedestrian_dynamics (дата обращения: 03.08.2026). DOI: 10.1103/physreve.51.4282.

3. Наумова Н. А., Зырянов В. В., Наумов Р. А. Автоматизированное управление транспортными потоками средствами мезоскопического моделирования. Краснодар: КубГТУ, 2018. 266 с. [Электронный ресурс]. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36604119 (дата обращения: 03.08.2026). ISBN 978-5-8333-0803-5.

4. Hughes R. L. A continuum theory for the flow of pedestrians // Transportation Research Part B. 2002. Vol. 36. Is. 6. P. 507–535. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0191261501000157?via%3Dihub (дата обращения: 03.08.2026). DOI: 10.1016/S0191-2615(01)00015-7.

5. Корелин И. А. Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения для анализа динамики контрольно-пропускных систем объектов проведения массовых мероприятий): дис. … канд. техн. наук. Екатеринбург, 2021. 208 с. [Электронный ресурс]. URL: https://elar.urfu.ru/handle/10995/98063 (дата обращения: 03.08.2026).

6. Гнеденко Б. В., Коваленко И. Н. Введение в теорию массового обслуживания. 4-е изд. М.: ЛКИ, 2021. 400 с. [Электронный ресурс]. URL: https://urss.ru/cgi-bin/db.pl?lang=Ru&blang=ru&page=Book&id=250425 (дата обращения: 03.08.2026). ISBN 978-5-382-02044-0.

7. Zhang Z., Jia L. Optimal guidance strategy for crowd evacuation with multiple exits: A hybrid multiscale modeling approach // Applied Mathematical Modelling. 2021. Vol. 90. P. 488–504. URL: https://www.sci-hub.ru/10.1016/j.apm.2020.08.075 (дата обращения: 03.08.2026). DOI: 10.1016/j.apm.2020.08.075.

8. Wang J., Gao M., Li Q., Kim H., Jeon G. A Survey on Supervised, Unsupervised, and Semi-Supervised Approaches in Crowd Counting // Computers, Materials & Continua. 2024. Vol. 81. Is. 3. P. 3561–3582. URL: https://www.researchgate.net/publication/386880232_A_Survey_on_Supervised_Un-

supervised_and_Semi-Supervised_Approaches_in_Crowd_Counting (дата обращения: 03.09.2026). DOI: 10.32604/cmc.2024.058637.

9. Наумова Н. А., Чубырь Н. О. Моделирование эвакуации пешеходных потоков с применением искусственного интеллекта // Современные наукоемкие технологии. 2026. № 6. С. 132–141. URL: https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=40826 (дата обращения: 07.07.2026). DOI: 10.17513/snt.40826.

10. Арнольд В. И. Обыкновенные дифференциальные уравнения: учебное пособие для вузов. 3-е изд., стер. М.: МЦНМО, 2024. 344 с. [Электронный ресурс]. URL: https://biblio.mccme.ru/bookstore/books?order=field_isbn_value&sort=desc&fuzzy_everywhere=%09Арнольд%2C+В.+И.+Обыкновенные+дифференциальные+уравнения%3A+учебное+пособие+для+вузов+%2F+&isbn=&author=&title= (дата обращения: 25.09.2026). ISBN 978-5-4439-4548-4.

11. Холщевников В. В., Шишов И. А. Моделирование свободного движения людских потоков // Вестник ТГАСУ. 2011. № 2. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16387376 (дата обращения: 03.08.2026). EDN: NVKGZN.

12. Самошин Д. А., Истратов Р. Н., Шаранова М. М., Кочетыгов В. А., Томин С. В., Фролов А. Г. Исследование времени начала эвакуации людей в жилых многоэтажных зданиях без систем оповещения о пожаре // Пожарная безопасность. 2022. № 31 (4). С. 38–55. URL: https://www.firesmi.ru/jour/article/view/1139 (дата обращения: 03.08.2026). DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.04.38-55.

13. Плескунов М. А. Теория массового обслуживания: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2022. 264 с. [Электронный ресурс]. URL: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/117140/1/978-5-7996-3539-8_2022.pdf (дата обращения: 25.09.2026). ISBN 978-5-7996-3539-8.

14. Song Y., Huang H., Shen L., Wang J., Weng W. Experimental study on pushing propagation in a dynamic Pedestrian Queue // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2026. Vol. 688. Art. 131408. DOI: 10.1016/j.physa.2026.131408.

15. Lu H., Li J., Sun S., Wang J., Ye R., Wu J., Wang Y. Study on the propagation characteristics of shockwave in dense crowd in corner passage // International Journal of Disaster Risk Reduction. 2024. Vol. 113. Art. 104826. URL: https://www.researchgate.net/publication/384045578_Study_on_the_propagation_characteristics_of_shockwave_in_dense_crowd_in_corner_passage (дата обращения: 03.08.2026). DOI: 10.1016/j.ijdrr.2024.104826.

16. Wang J., Ma J., Lin P., Sarvi M., Li R. Propagation characteristics of the pedestrian shockwave in dense crowd: Experiment and simulation // International Journal of Disaster Risk Reduction. 2019. Vol. 40. Art. 101287. URL: https://www.researchgate.net/publication/335280518_Propagation_characteristics_of_the_pedestrian_shockwave_in_dense_Crowd_Experiment_and_simulation (дата обращения: 25.09.2026). DOI: 10.1016/j.ijdrr.2019.101287.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Исследование поддержано грантом на организацию подготовки студентов по программам высшего образования ведущих специалистов в области искусственного интеллекта, предоставленным Аналитическим центром при Правительстве Российской Федерации № 70-2025-000735 от 29 мая 2025 г. ИГК 000000Ц330325Р2Ж0002.

Financing: The research was supported by a grant for the organization of training of students in higher education programs for leading specialists in the field of artificial intelligence, provided by the Analytical Center under the Government of the Russian Federation No. 70-2025-000735 dated May 29, 2025. IGK 000000Ts330325R2Zh0002.

УДК 004.942:005
DOI

CC BY 4.0

ПОДХОД К КОНФИГУРАЦИИ И ОПТИМИЗАЦИИ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Поспелов К. Н. ORCID ID 0009-0001-6160-8218,
Лундаева К. А. ORCID ID 0009-0002-4995-3059,
Бекетов С. М. ORCID ID 0009-0009-6448-9486,
Дергачев М. В. ORCID ID 0009-0004-4030-7258,
Гинцяк А. М. ORCID ID 0000-0002-9703-5079

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: salbek.beketov@spbpu.com

Имитационные модели организационных систем широко применяются для анализа и обоснования управленческих решений, однако их параметрическая настройка и поиск эффективных конфигураций сопряжены с высокой вычислительной сложностью, обусловленной стохастическим характером процессов и высокой размерностью пространства параметров. Это существенно ограничивает возможности их эффективного использования в задачах многократного сценарного анализа и оптимизации. Целью исследования является разработка подхода к конфигурации и оптимизации имитационных моделей организационных систем, обеспечивающего сокращение вычислительных затрат при сохранении качества принимаемых решений. В работе используется концепция суррогатного моделирования, в рамках которой исходная имитационная модель дополняется прокси-моделью, аппроксимирующей зависимость между параметрами управления и агрегированными выходными показателями. Предложена концептуальная архитектура системы, объединяющая имитационную модель, модуль оптимизации и прокси-модель, а также общий алгоритм работы оптимизатора с адаптивным формированием обучающей выборки через генератор параметров управления. На тестовой имитационной модели организационной системы со стохастическими входными параметрами показано, что предложенный подход сокращает число прогонов по сравнению с прямым перебором параметров, не уступая ему по качеству найденных конфигураций. Такой подход может применяться как надстройка над имитационными моделями для ускорения вычислительных экспериментов и сценарного анализа.

Ключевые слова: оптимизация, имитационное моделирование, суррогатное моделирование, конфигурация, организационные системы

AN APPROACH TO THE CONFIGURATION AND OPTIMIZATION OF SIMULATION MODELS OF ORGANIZATIONAL SYSTEMS

Pospelov K. N. ORCID ID 0009-0001-6160-8218,
Lundaeva K. A. ORCID ID 0009-0002-4995-3059,
Beketov S. M. ORCID ID 0009-0009-6448-9486,
Dergachev M. V. ORCID ID 0009-0004-4030-7258,
Gintsyak A. M. ORCID ID0000-0002-9703-5079

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University", Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: salbek.beketov@spbpu.com

Simulation models of organizational systems are widely applied to analyze and justify managerial decisions. At the same time, tuning their parameters and searching for effective configurations is computationally demanding, owing to the stochastic nature of the underlying processes and the large dimensionality of the parameter space involved. As a result, using these models repeatedly for scenario analysis or optimization becomes impractical. This study aims to propose an approach for configuring and optimizing simulation models of organizational systems that reduces computational costs while preserving the quality of the resulting decisions. The proposed approach is based on the concept of surrogate modeling, in which the original simulation model is complemented by a proxy model that approximates the relationship between control parameters and aggregated output performance indicators. A conceptual system architecture is developed, including a simulation model, an optimization module, and a proxy model, and a general algorithm for the optimizer is proposed that implements adaptive formation of the training dataset via a control-parameter generator. The approach is validated on a test simulation model of an organizational system with stochastic input parameters, where a reduction in the number of simulation runs is demonstrated in comparison with exhaustive parameter search, while maintaining comparable quality of the identified configurations. The approach can be applied on top of existing simulation models to make computational experiments and scenario analysis more efficient.

Keywords: optimization, simulation modeling, surrogate modeling, configuration, organizational systems

Введение

Имитационное моделирование давно используется как способ проверки управленческих решений в сложных системах [1] – и организационные системы здесь не исключение: им свойственны сложная структура, стохастичность протекающих процессов и заметный разброс входных данных [2]. Проблема в том, что прямая оптимизация таких моделей предполагает множество прогонов для перебора конфигураций параметров, а значит – существенные вычислительные затраты. Ситуацию осложняют и сами особенности организационных систем: помимо стохастичности и изменчивости процессов для них характерны высокая размерность пространства параметров, нелинейные зависимости с множеством локальных экстремумов, динамичность, нестационарность, а зачастую и несколько конкурирующих критериев управления [3]. Вместе эти факторы задают набор вычислительных и методологических ограничений, которые необходимо учитывать при построении методов оптимизации.

В этих условиях применение методов искусственного интеллекта, в частности суррогатного (прокси-) моделирования, позволяет существенно снизить вычислительную нагрузку. Суть прокси-моделирования заключается в замещении исходной имитационной модели ее многомерной аппроксимацией, описывающей зависимости между входными и выходными параметрами на основе статистических закономерностей [4]. Использование прокси-моделей позволяет значительно ускорить оценку целевых показателей при сохранении приемлемой точности [5]. Далее используется термин «прокси-модель» (синонимы – суррогатная, аппроксимирующая модель).

В данной работе предлагается архитектура универсальной системы для конфигурации и оптимизации имитационных моделей организационных систем на основе гауссовских процессов, выступающих в качестве суррогатной модели. Под конфигурацией имитационной модели понимается выбор и задание совокупности значений управляющих параметров модели, определяющих сценарий ее функционирования и поведение моделируемой системы. Предлагаемый подход не привязан к конкретной предметной области и рассчитан на широкий класс задач имитационного моделирования. Далее в статье излагаются концептуальная архитектура системы и общий алгоритм работы модуля оптимизатора с адаптивным формированием обучающей выборки.

Цель исследования – предложить подход к конфигурации и оптимизации имитационных моделей организационных систем, позволяющий сократить вычислительные затраты, не теряя в качестве принимаемых решений, что и демонстрируется на тестовом сценарии.

Материалы и методы исследования

По результатам обзора литературы для дальнейшего рассмотрения были отобраны наиболее распространенные методы суррогатного моделирования на основе машинного обучения (ML): гауссовские процессы, случайные леса, разложение по полиномиальному хаосу и многомерная линейная интерполяция – все они хорошо подходят для аппроксимации сложных нелинейных зависимостей [6].

Гауссовские процессы (GP) – вероятностная модель, в которой значения функции задаются многомерным нормальным распределением через функцию среднего и ковариационную функцию [7]. Кроме аппроксимации, такой подход дает оценку неопределенности предсказаний. Случайный лес устроен иначе: строится ансамбль решающих деревьев на подвыборках данных со случайными подмножествами признаков, а итоговый прогноз получается усреднением по всем деревьям – за счет этого метод обеспечивает высокую точность аппроксимации при наличии существенно нелинейных зависимостей между входными параметрами и выходными показателями модели [8]. Разложение по полиномиальному хаосу (PCE) раскладывает случайную функцию по ортогональным полиномам, соответствующим распределениям входных параметров [9]. А многомерная линейная интерполяция строит аппроксимацию по значениям функции в узлах регулярной сетки, интерполируя отдельно по каждой размерности пространства [10].

Методы также сравнивались по вычислительной сложности обучения и получения предсказаний: она зависит прежде всего от размерности задачи и определяет, насколько быстро можно построить прокси-модель и подключить ее к оптимизационному контуру. По этой метрике гауссовские процессы обходятся кубической сложностью $O(n^3)$, случайным лесам требуется $O(n\ log(n)\cdot m\cdot d)$, полиномиальному хаотическому расширению – $O(P\cdot n)$, а многомерной линейной интерполяции – $O(2^d\cdot n)$, то есть сложность растет экспоненциально с ростом размерности пространства параметров. Это особенно важно именно для имитационных моделей: они и без того вычислительно затратны, требуют множе-

ства прогонов и оперируют пространствами параметров высокой размерности.

Одним из способов справиться с этими ограничениями остается суррогатное моделирование, воплощающее идею «машинно-обучаемых ассистированных симуляций» [11]. Работает это так: суррогатная модель встраивается прямо в контур оптимизации, и часть обращений к «тяжелой» имитационной модели подменяется ее быстрой аппроксимацией, а весь процесс выстраивается цепочкой взаимосвязанных шагов.

Если сравнивать все четыре метода, у гауссовских процессов сразу несколько сильных сторон: точная интерполяция обучающих данных, встроенная оценка неопределенности, приемлемые результаты даже на небольших выборках [12]. Альтернативные методы, как правило, не обладают всей совокупностью перечисленных свойств: одни не обеспечивают вероятностной интерпретации получаемых результатов, другие плохо масштабируются с ростом размерности пространства параметров. Отсюда и компромисс, который приходится закладывать при выборе алгоритма: между точностью модели, нужным объемом данных, необходимостью оценивать неопределенность и тем, насколько результат вообще поддается интерпретации [13, 14]. Для задач с активным адаптивным сэмплированием гауссовские процессы по-прежнему выглядят предпочтительнее [15]; теоретическую основу этого выбора и самой идеи суррогатного моделирования составляют работы [16–18].

Результаты исследования и их обсуждение

По итогам исследования была построена концептуальная архитектура системы для конфигурации и оптимизации имитационных моделей организационных систем на базе суррогатного моделирования. В ее основе лежит связка имитационной модели с интеллектуальным оптимизатором внутри единого итеративного контура – именно она обеспечивает автоматизированный поиск эффективных конфигураций параметров. Систему образуют три ключевых компонента: имитационная модель, оптимизатор и встроенная в него прокси-модель. В реализованной архитектуре используется гауссовский процесс с радиально-базисным (RBF) ядром, параметры которого (масштаб и длины корреляции) обучаются путем максимизации логарифма маргинального правдоподобия. Перед обучением прокси-модели входные параметры управления и значения целевой функции подвергаются стандартной нормализации. Стохастический характер имитационной модели учитывается за счет включения аддитивного шумового члена в ковариационную функцию. Для каждой конфигурации параметров выполняется один прогон имитационной модели по нескольким репликациям, что соответствует сценарию оптимизации вычислительно затратных стохастических систем. Критерием остановки оптимизационного процесса является достижение заданного вычислительного бюджета (итераций запуска имитационной модели), либо отсутствие значимого улучшения значения целевой функции.

Предложенная структура отражает общий принцип функционирования системы, основанный на взаимодействии имитационной модели и оптимизационного модуля. Оптимизатор, реализованный на основе методов машинного обучения (с ядром на гауссовских процессах), формирует параметры управления и генерирует новые сценарии, которые передаются в имитационную модель. Управляя прогонами модели, оптимизатор генерирует исходные данные для обучения прокси-модели, и после обучения прокси-модель подбирает оптимальное решение. Имитационная модель, в свою очередь, использует как управляющие, так и конфигурационные параметры и возвращает выходные данные, характеризующие качество функционирования системы (рис. 1).

Таким образом, система выполняет двойственную функцию: конфигурирует имитационную модель и оптимизирует результаты ее работы. Под конфигурацией в данном случае понимается генерация входных данных модели (параметров управления), а также управление прогонами, необходимыми для обучения и дообучения прокси-модели.

Оптимизатор обучается на основе обучающей выборки, сформированной из n прогонов имитационной модели. Каждый прогон включает m репликаций, что позволяет учитывать стохастический характер системы. Результатом отдельного запуска является значение оптимизируемого показателя, тогда как результат прогона определяется как усредненное значение данного показателя по всем m репликациям.

После завершения этапа обучения выполняется проверка качества работы оптимизатора на основе анализа значения коэффициента детерминации R^2. В случае, если значение метрики не соответствует заданному пороговому уровню, инициируется процесс дообучения, основанный на расширении обучающей выборки за счет дополнительных прогонов имитационной модели.



Рис. 1. Концептуальная схема системы конфигурации и оптимизации имитационных моделей
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Процесс обучения и дообучения носит итеративный характер: после каждого этапа дообучения выполняется повторная оценка качества модели, и цикл продолжается до достижения заданных критериев. Общий алгоритм работы модуля оптимизатора представлен на рис. 2.

Предлагаемый алгоритм основан на построении прокси-модели имитационной модели и состоит из трех последовательных этапов: первичного обучения прокси-модели, ее итерационного дообучения и финальной оптимизации. На вход алгоритм получает от оптимизатора исходные данные: пространство варьируемых параметров с ограничениями, целевые показатели, число репликаций и допустимый вычислительный бюджет. На этапе первичного обучения для каждой точки начального плана эксперимента выполняется прогон имитационной модели в нескольких репликациях. Полученные показатели усредняются по репликациям, чтобы снизить влияние стохастической составляющей. По результатам формируется начальная обучающая выборка (1), на которой обучается статистическая модель, выступающая в роли прокси-модели. Далее начинается этап дообучения. В начале каждой итерации проверяется выполнение критериев качества обучения (4). Если они не выполнены, в новых точках проводятся прогоны имитационной модели (2), результаты усредняются по репликациям (3) и добавляются в обучающую выборку, после чего прокси-модель дообучается (3). Цикл повторяется до достижения требуемого качества аппроксимации. После этого выполняется финальная оптимизация: на прокси-модели ищется оптимум (6), и для полученного набора точек-кандидатов проводятся прогоны имитационной модели (7). Так, предсказания прокси-модели проверяются на исходной модели. Затем повторно проверяются критерии качества обучения (4). Если они нарушены, алгоритм возвращается к этапу дообучения, и новые точки дополняют выборку в наиболее перспективной области пространства параметров. Если критерии выполнены, проверяется критерий остановки (8), то есть достижение вычислительного лимита. Пока лимит не исчерпан, алгоритм продолжает итерации дообучения и уточняет как прокси-модель, так и найденное решение. При достижении лимита выводятся результаты оптимизации.

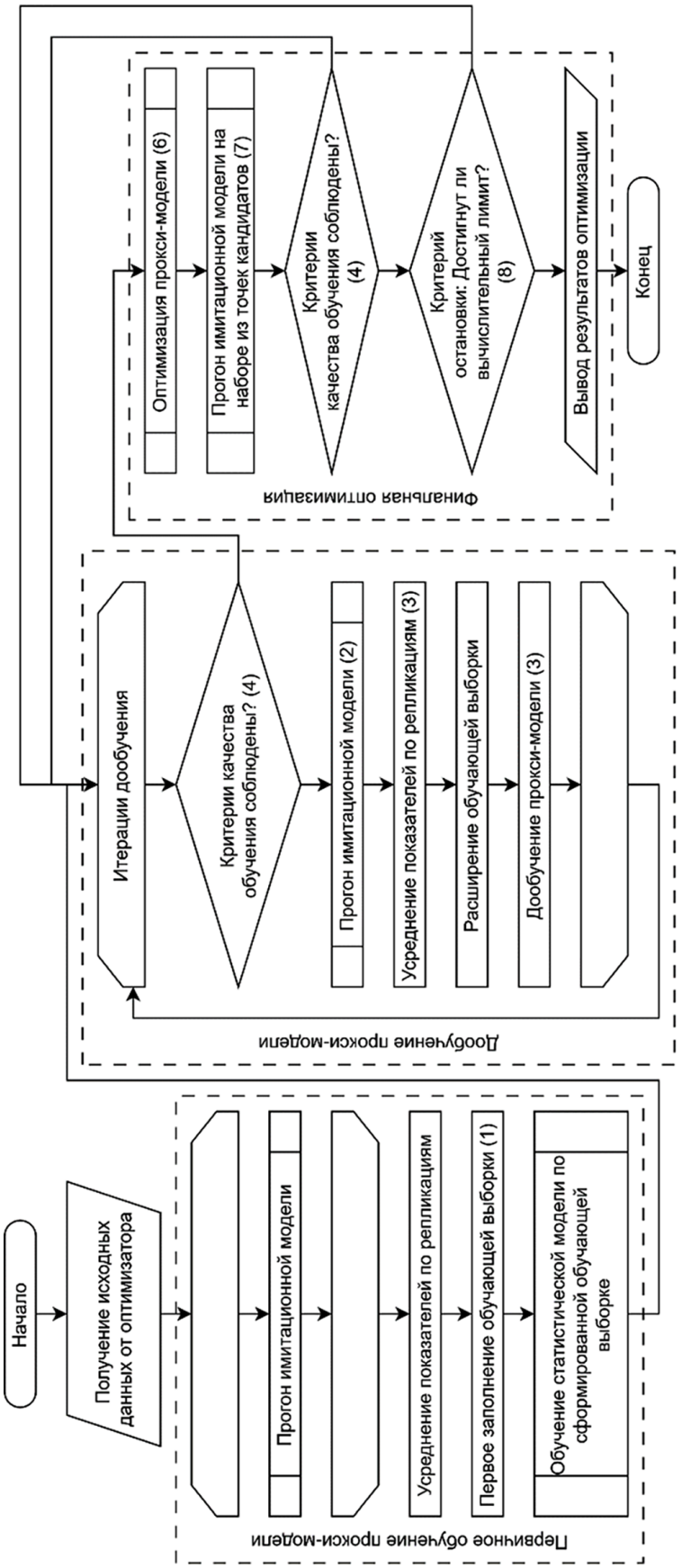


Рис. 2. Общий алгоритм работы модуля оптимизатора
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Таким образом, в работе методы суррогатного моделирования применяются не для анализа внутренней структуры имитационной модели или идентификации законов распределения, а для аппроксимации зависимости между параметрами управления и агрегированными выходными показателями, полученными в результате многократных прогонов модели. В рамках исследования гауссовские процессы не рассматриваются как средство проверки корректности или адекватности имитационной модели. Напротив, имитационная модель априори принимается как более точное и детализированное представление исследуемой системы. Имитационная модель является «источником истины» и единственным средством оценки конфигураций, а прокси-модель – аппроксиматором, ускоряющим поиск. Она не выполняет функций оптимизатора или конфигуратора и используется только для управления перебором конфигураций, адаптивного формирования обучающей выборки и сокращения вычислительных затрат.

В качестве тестовой модели для оптимизатора была разработана дискретно-событийная имитационная модель одного маршрута пассажирского транспорта, предназначенная для анализа влияния конфигурации маршрута на показатели эффективности процесса. Управляли моделью через два параметра: характеристики подвижного состава (тип и вместимость автобуса) и интенсивность его выхода на линию, причем оба задавались в пределах, допустимых эксплуатационными условиями. Ограничивали задачу вместимость подвижного состава, неотрицательность интервалов движения и фиксированная длительность моделируемого периода. За оптимальность отвечал единый агрегированный показатель – свертка нескольких частных критериев (среднее время ожидания пассажиров на остановках, число перевезенных пассажиров, загрузка подвижного состава, влияние маршрута на дорожную обстановку), полученная после их нормализации.

Границы допустимых значений управляющих параметров задают стартовую обучающую выборку; качество построенной по ней прокси-модели затем проверяется метрикой *RMSE*. Где именно аппроксимация ошибается больше всего, показывает метод роя частиц – в этих зонах параметрического пространства и генерируются точки для дополнительных прогонов имитационной модели и дообучения прокси-модели. А сама модель работает на уровне событий: выход автобуса на линию, его прибытие на остановку – и на каждом пересчитывает интервалы движения, число подошедших пассажиров, среднее время ожидания, посадку и высадку с учетом вместимости транспорта.

За качеством прокси-модели следят две метрики – R^2 и *RMSE*, посчитанные отдельно по каждому компоненту целевой функции. Порогом служит $R2$ не ниже 0,95 и отсутствие заметного падения *RMSE* на последних итерациях дообучения – как только оба условия выполнены, дообучение останавливается. K-кратную кросс-валидацию, отдельную тестовую выборку и доверительные интервалы метрик здесь сознательно не использовали – эта проверка оставлена на будущее.

Для этого сценария взяли 700 точек, накопленных по прогонам имитационной модели, и на них обучили прокси-модель. Точность аппроксимации отслеживали по R^2 и среднеквадратичной ошибке (*RMSE*) – отдельно по каждому выходному показателю целевой функции. По метрике *RMSE* оценивали число обслуженных пассажиров, загруженность автобусов (относительное отклонение в процентах), среднее время ожидания пассажиров (в минутах) и влияние маршрута на транспортный поток. Коэффициент детерминации R^2 рос у прокси-модели быстро: высокое качество аппроксимации достигалось уже на начальных итерациях: при объеме обучающей выборки 50 точек значения R^2 составляли около 0,99; после 100 итераций рост замедлился, но ниже 0,97 показатель не опускался. Наилучшее качество аппроксимации получено для параметров пассажиропотока: значение коэффициента детерминации составило 0,999. Дальше выборку наращивали, но точность менялась уже незначительно: около 100 прогонов имитационной модели оказывалось достаточно, чтобы прокси-модель воспроизводила поведение системы в этой конфигурации с приемлемой точностью. Общее число прогонов имитационной модели и соответствующее время вычислений возрастают линейно с увеличением размера обучающей выборки. Зависимости *RMSE* от размера обучающей выборки для значений до 180 обучающих точек подробно приведены на рис. 3.

Приведенные зависимости *RMSE* от размера обучающей выборки свидетельствуют о достижении практической сходимости прокси-модели и позволяют определить достаточный объем обучающих данных, обеспечивающий сокращение числа вычислительно затратных прогонов имитационной модели по сравнению с базовым методом прямого перебора параметров без существенной потери точности оценки целевой функции.

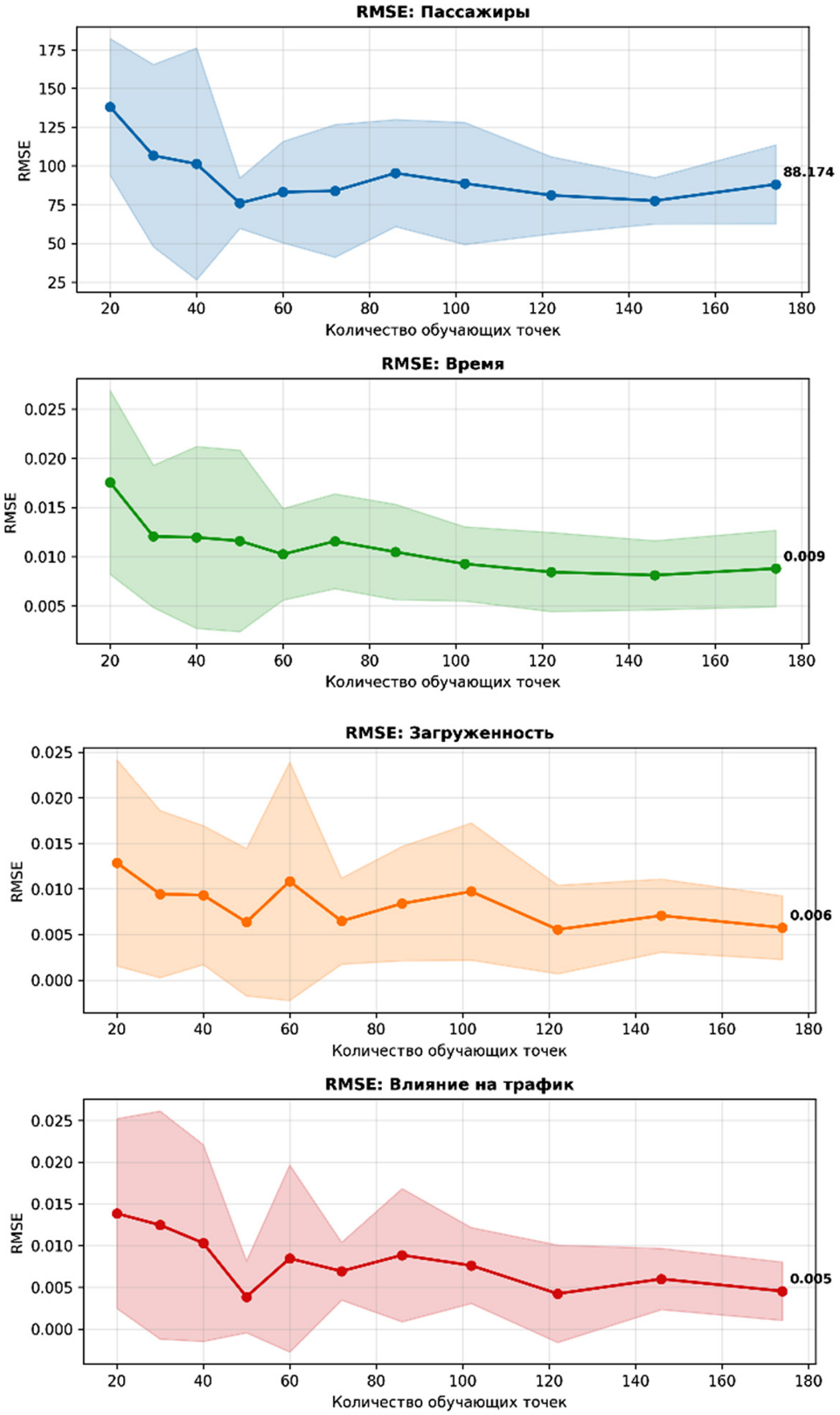


Рис. 3. Оценка качества предсказаний прокси-модели
(ось X – число обучающих точек, то есть уникальных конфигураций параметров;
ось Y – RMSE в единицах показателя: пассажиры – чел., загрузка – %, время ожидания – мин)
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Анализ зависимости *RMSE* от объема обучающей выборки показывает, что для всех рассматриваемых выходных показателей наблюдается тенденция к снижению ошибки аппроксимации с увеличением числа обучающих точек и последующей стабилизации ее значений. Для оцениваемых параметров ошибка аппроксимации быстро уменьшается и после формирования обучающей выборки объемом порядка 100–120 точек остается практически неизменной. Оценка указанных метрик позволила количественно охарактеризовать точность прокси-модели по каждому компоненту целевой функции и подтвердить ее пригодность для использования в оптимизационном контуре. Полученные значения R^2 и *RMSE* использовались не только для контроля качества аппроксимации, но и в качестве критерия остановки дообучения, что обеспечило адаптивное формирование обучающей выборки. Научная значимость работы заключается в разработке универсальной архитектуры системы и алгоритма адаптивного формирования обучающей выборки на основе суррогатного моделирования, которые не зависят от предметной области и могут быть интегрированы с различными имитационными моделями. Тестовая модель является частным случаем имитационной модели организационной системы. Поскольку предложенный алгоритм не использует предметно-ориентированные особенности транспортной модели и взаимодействует с имитационной моделью исключительно через входные параметры и выходные показатели, полученные результаты обосновывают возможность его применения к широкому классу имитационных моделей организационных систем аналогичной структуры.

Подход имеет ряд ограничений. Обучение гауссовского процесса характеризуется сложностью $O(n^3)$, что ограничивает его применение при размерности свыше 20–30 параметров [15, 16]. Апробация выполнена на одной дискретно-событийной модели. Базовым методом сравнения служил прямой перебор; сопоставление с байесовской оптимизацией и эволюционными алгоритмами по числу прогонов, времени расчета и качеству решения не проводилось [18].

Заключение

В работе предложен подход к конфигурации и параметрической оптимизации имитационных моделей организационных систем на основе суррогатного моделирования с использованием гауссовских процессов. Разработанная система реализована в виде надстройки над имитационной моделью и ориентирована на автоматизацию настройки параметров управления и поиск эффективных конфигураций при ограниченных вычислительных ресурсах. Апробация подхода выполнена на тестовой дискретно-событийной модели одного маршрута наземного пассажирского транспорта, что позволило исследовать его основные свойства, включая сходимость обучения прокси-модели и эффективность оптимизационного контура в условиях ограниченного числа прогонов имитационной модели. В то же время обобщение результатов на другие классы организационных систем, многопараметрические сценарии и альтернативные постановки оптимизационных задач требует проведения дополнительных вычислительных экспериментов и рассматривается как направление дальнейших исследований.

Список литературы

1. Гинцяк А. М., Бурлуцкая Ж. В., Федяевская Д. Э., Поспелов К. Н., Ракова В. В. Цифровое моделирование социотехнических и социально-экономических систем. СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2023. 164 с. DOI: 10.18720/SPBPU/2/i23-253.

2. Воеводин В. А., Черняев В. С., Буренок Д. С., Виноградов И. В. Методика оценки защищенности автоматизированной системы управления критической информационной инфраструктуры от DDoS-атак на основе имитационного моделирования методом Монте-Карло // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023. № 50 (1). С. 62–74. DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-1-62-74.

3. Уткин О. В. Алгоритм и программные средства многокритериальной оценки и выбора в организационных системах // Вестник СПб ун-та ГПС МЧС России. 2025. № 3. С. 77–90. DOI: 10.61260/2218-130X-2025-3-77-90.

4. Мерега О. С., Еремин Н. А. Создание прокси-модели для подбора оптимальных параметров системы разработки с применением горизонтальных скважин с многостадийным гидроразрывом // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2024. № 4 (166). С. 136–146. DOI: 10.31660/0445-0108-2024-4-136-146.

5. Косяков В. П., Маркелова М. Р. Методика использования упрощенной гидродинамической прокси-модели для решения задачи восстановления недостающих замеров забойного давления // Вестник Тюменского государственного университета. Серия: Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2025. Т. 11. № 1 (41). С. 53–67. DOI: 10.21684/2411-7978-2025-11-1-53-67.

6. Дарвиш А., Леоненко В. Н. Снижение вычислительных затрат при агентном моделировании распространения респираторной инфекции с помощью суррогатной модели на основе машинного обучения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2026. Т. 26. № 1. С. 177–184. DOI: 10.17586/2226-1494-2026-26-1-177-184.

7. Marrel A., Iooss B. Probabilistic surrogate modeling by Gaussian process: A review on recent insights in estimation and

validation // Reliability Engineering & System Safety. 2024. Vol. 247. P. 110094. DOI: 10.1016/j.ress.2024.110094.

8. Zhu T. Analysis on the applicability of the random forest // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2020. Vol. 1607. Is. 1. P. 012123. DOI: 10.1088/1742-6596/1607/1/012123.

9. Jakeman J. D. et al. Polynomial chaos expansions for dependent random variables // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2019. Vol. 351. P. 643–666. DOI: 10.1016/j.cma.2019.03.049.

10. Prado D. R., López-Fernández J. A., Arrebola M. Efficient general reflectarray design and direct layout optimization with a simple and accurate database using multilinear interpolation // Electronics. 2022. Vol. 11. Is. 2. P. 191. DOI: 10.3390/electronics11020191.

11. Хабибуллина Л. М., Поспелов К. Н. Технологии искусственного интеллекта в имитационном моделировании // Двенадцатая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2025). Труды конференции (г. Санкт-Петербург, 15–17 октября 2025 г.). СПб.: АО «ЦТСС», 2025. 918 с. С. 550–558. ISBN 978-5-902241-61-4.

12. Костюхин Ю. Ю., Богачев А. С. Управление инвестиционной привлекательностью предприятия в период высокой волатильности рынка на основе прогнозирования ожиданий // Экономика промышленности / Russian Journal of Industrial Economics. 2024. Т. 17. № 1. С. 20–28. DOI: 10.17073/2072-1633-2024-1-1265.

13. Zheng Y., Fu X., Xuan Y. Data-driven optimization based on random forest surrogate // 2019 6th international conference on systems and informatics (ICSAI). IEEE, 2019. P. 487–491. DOI: 10.1109/ICSAI48974.2019.9010547.

14. Бекетов С. М., Хабибуллина Л. М., Поспелов К. Н. [и др.] Гибридные цифровые модели с применением технологий искусственного интеллекта // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2026. Т. 28. № 2–2 (130). С. 369–380. DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-2(2)-369-380.

15. Binois M., Wycoff N. A survey on high-dimensional Gaussian process modeling with application to Bayesian optimization // ACM Transactions on Evolutionary Learning and Optimization. 2022. Vol. 2. Is. 2. P. 1–26. DOI: 10.1145/3545611.

16. Rasmussen C. E., Williams C. K. I. Gaussian Processes for Machine Learning. Cambridge, MA: The MIT Press, 2006. 272 p. ISBN 978-0-262-18253-9.

17. Forrester A., Sóbester A., Keane A. Engineering Design via Surrogate Modelling: A Practical Guide. Chichester: John Wiley & Sons, 2008. 210 p. DOI: 10.1002/9780470770801.

18. Jones D. R., Schonlau M., Welch W. J. Efficient global optimization of expensive black-box functions // Journal of Global Optimization. 1998. Vol. 13. Is. 4. P. 455–492. DOI: 10.1023/A:1008306431147.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» (соглашение № 075-15-2026-097 от 03 апреля 2026 г.).

Financing: The research is funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the strategic academic leadership program “Priority 2030” (Agreement 075-15-2026-097 dated 03 April 2026).

УДК 004.932.2
DOI

CC BY 4.0

МЕТОД ВЫЯВЛЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ ДНИЩА АВТОМОБИЛЕЙ НА ОСНОВЕ ЭТАЛОННОГО СРАВНЕНИЯ

[1]Слесарев В. Е., [1, 2]Белкин Е. Н. ORCID ID 0009-0007-5848-5433

[1]Акционерное общество «АЛГОНТ», Калуга, Российская Федерация;
[2]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана», Москва, Российская Федерация, e-mail: belkinen@algont.ru

При повторном досмотре изображение днища автомобиля сравнивают с ранее полученным изображением без посторонних предметов. Ошибки совмещения и различия освещения затрудняют выделение изменений. Цель исследования – разработать метод формирования областей для проверки оператором и определить, как источник кандидатов связан с порядком их оценки и объединения. Метод выбирает эталон того же автомобиля, локально совмещает изображения, выделяет прямоугольные кандидаты по контурам и остаточной разности и оценивает их градиентным бустингом. На корпусе панорамных изображений с разметкой зон размещения муляжей сопоставлены шесть конфигураций. Каждый автомобиль поочередно исключался из обучения оценщика. Комбинирование контурных и разностных кандидатов с оценкой до объединения дало наибольший охват размеченных зон среди рассмотренных конфигураций, однако сопровождалось увеличением площади выделений вне разметки. Преимущество по охвату перед контурным контролем сохранялось при близкой общей площади предъявляемых областей. Разностная конфигурация с объединением до оценки обеспечила более точную локализацию при меньшем охвате. Таким образом, в исследованном корпусе выбор порядка операций зависит от источника кандидатов и допустимой площади срабатываний. Проверка имеет пилотный ретроспективный характер: архитектура и пороги выбирались на тех же данных. Применение метода на новых автомобилях требует внешней проверки с заранее зафиксированными настройками. Выделенные области предназначены для просмотра оператором и не заменяют его решение о причине изменения.

Ключевые слова: UVIS, досмотр, эталон, контуры, совмещение изображений, выявление изменений

A REFERENCE-BASED METHOD FOR DETECTING CHANGES IN VEHICLE UNDERBODY IMAGES

[1]Slesarev V. E., [1, 2]Belkin E. N. ORCID ID 0009-0007-5848-5433

[1]Joint Stock Company "ALGONT", Kaluga, Russian Federation;
[2] Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Moscow State Technical University named after N. E. Bauman (National Research University), Moscow, Russian Federation, e-mail: belkinen@algont.ru

During repeated vehicle inspection, an underbody image is compared with a previously acquired image without foreign objects. Registration errors and illumination differences make changes difficult to isolate. This study develops a method for generating regions for operator review and examines how candidate source relates to the order of scoring and merging. The method selects a reference of the same vehicle, performs local registration, generates rectangular candidates from contours and residual differences, and scores them using gradient boosting. Six configurations were compared using panoramic images with annotated regions marking mock object placements. Each vehicle was excluded in turn from scorer training. Combining contour and difference candidates with scoring before merging yielded the largest number of overlapped annotated regions among the configurations studied, but increased the highlighted area outside annotations. The overlap advantage over the contour control persisted at similar total highlighted areas. Difference candidates merged before scoring provided more accurate localization while overlapping fewer regions. Within this dataset, the preferred processing order therefore depends on candidate source and allowable alarm area. The evaluation is a retrospective pilot: architecture and thresholds were selected using the same data. Application to new vehicles requires external evaluation with settings fixed beforehand. Highlighted regions are intended for operator review and do not replace the operator's judgment about the cause of a change.

Keywords: UVIS, inspection, reference, contours, image registration, change detection

Введение

При повторном досмотре днище автомобиля можно сравнивать с его ранее зарегистрированным состоянием без посторонних предметов. Система выделяет участки для проверки, а оператор определяет причину различия. Такой режим применим в составе интегрированных систем безопасности [1]. Выделению предметов мешают изменения освещения, загрязнение и остаточные ошибки совмещения: каждый из этих факторов также создает различия между текущим изображением и эталоном.

Эталонный анализ днища на основе локальных признаков рассматривается в работе [2]. Влиянию освещения на сопоставление изображений движущегося автомобиля посвящена работа [3], а контролю подвагон-

ного оборудования с использованием модели с памятью – работа [4]. Для промышленного обнаружения визуальных аномалий разработаны набор AutoVI [5] и методы PatchCore [6] и EfficientAD [7]. Набор MVTec AD 2 включает усложненные условия съемки [8]. Эти подходы различаются способом представления нормального состояния и объемом данных, необходимым для обучения.

В предлагаемом методе кандидатом называется прямоугольная область возможного изменения, выделенная по контурам или остаточной разности изображений. Кандидатов оценивает градиентный бустинг. Соседние и пересекающиеся области объединяются перед предъявлением оператору. Если объединение выполняется до оценки, меняются размер области и используемые признаки; при обратном порядке каждый исходный кандидат отбирается отдельно. Поэтому одна и та же последовательность операций может давать разные результаты для контурных и разностных областей.

Цель исследования – разработать метод эталонного выявления изменений на изображениях днища и проверить связь между источником кандидатов и порядком их оценки и объединения. На одном корпусе сопоставлены шесть конфигураций с одинаковым правилом формирования обучающей метки. Научный вклад работы состоит в установлении для этого корпуса различий в охвате, локализации и внешней площади срабатываний при совместном изменении источника кандидатов и порядка обработки. Исследование имеет пилотный характер; его результаты определяют варианты для последующей независимой проверки.

Материалы и методы исследования

Корпус и проверка. Исследованы 195 панорамных полутоновых кадров 12 физических автомобилей, полученных системой «Автодосмотр» ЦРПА.421423.027-01 производства АО «АЛГОНТ». В 149 положительных кадрах размечены 823 прямоугольные зоны размещения муляжей посторонних предметов; 46 отрицательных кадров не содержат таких размещений. Разметка описывает зоны размещения, а не точные маски предметов. Дубликаты и записи отсутствующих изображений исключены.

Банк сравнения содержит 245 чистых эталонов; метрики рассчитываются по 195 текущим кадрам. В архиве выделены 23 группы «автомобиль – сторона»: метка стороны задает внутримашинную подгруппу для выбора сопоставимого эталона. При обучении и проверке все подгруппы одной машины объединены; единица группировки – физический автомобиль.

В каждом из 12 разбиений оценщик обучается на кандидатах остальных автомобилей и проверяется на всех кадрах исключенной из обучения машины. Итоговые метрики рассчитываются по объединенным проверочным предсказаниям. Группировка по физическим автомобилям учитывает зависимость повторных наблюдений [9]. Чистые эталоны проверяемой машины доступны по условиям повторного досмотра; ее размеченные кандидаты в обучение оценщика не входят. Архитектура и рабочие пороги, однако, выбирались ретроспективно по тому же корпусу. Такое использование данных может завышать итоговые оценки [10], поэтому данная проверка не является независимым внешним испытанием уже зафиксированного метода.

Сравнение построено по схеме 3×2: три источника кандидатов (контуры, остаточная разность, их комбинация) и два порядка обработки (объединение до оценки или после нее). Во всех шести конфигурациях фиксирована обучающая цель: отношение площади пересечения кандидата с размеченной зоной к площади их объединения (IoU) не ниже 0,5. Порог балла 0,6 задает общую рабочую точку; частоты срабатываний оцениваются отдельно.

При отказе штатного совмещения в расчете метрик используется пустой набор детекций. Сам кадр и все его размеченные зоны остаются в знаменателях, поэтому отказ не исключает трудный пример из оценки. В системе досмотра этому событию должен соответствовать отдельный статус, требующий ручного просмотра изображения.

Эталон и совмещение. Эталон из той же внутримашинной группы выбирается по структурному хешу пространственно-ориентационного распределения контуров. Отсутствие посторонних предметов на эталоне подтверждается при включении в банк.

Совмещение приводит изображения к общей системе координат [11]. После локального контрастно-ограниченного выравнивания гистограммы на уменьшенных в 6 раз кадрах вычисляются до 3000 ORB-признаков [12], распределенных по сетке 4×8. Соответствия FLANN-LSH фильтруются по расстоянию дескрипторов, отношению расстояний и устойчивым оценкам смещений.

Поле смещений строится по средним в занятых ячейках сетки 20×7; угловые опоры задаются медианным глобальным сдвигом. Линейная интерполяция и кубическое растяжение формируют обратную координатную карту в плоскости изображения. Критерий приема – не менее 250 соответствий; повторные соответствия одной опорной точке сохраняются.

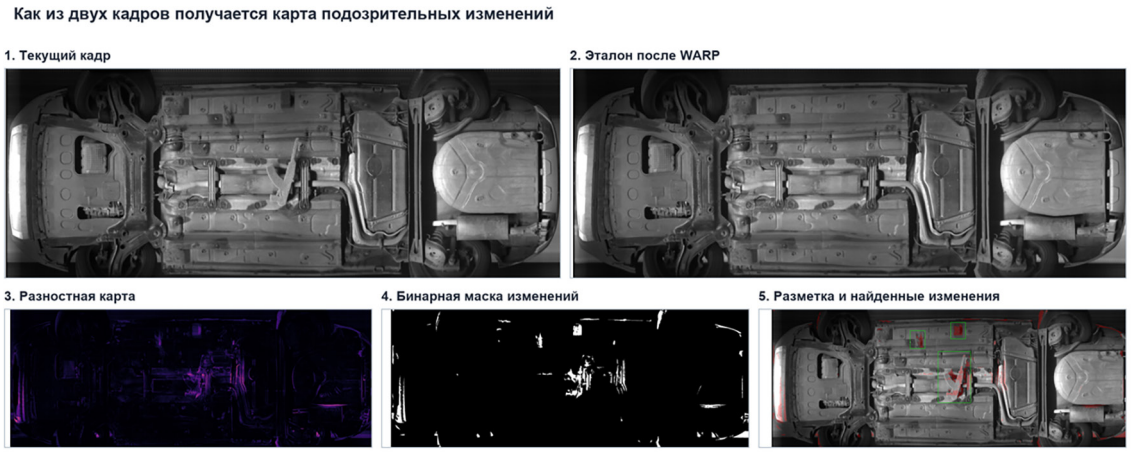


Рис. 1. Текущий кадр, совмещенный эталон, разностная карта, бинарная маска и ее наложение. Зеленые рамки – разметка; красные пиксели – промежуточная маска
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Кандидаты. Для яркости текущего кадра I(x), совмещенного эталона T_W(x) и области сравнения Ω остаточная разность с компенсацией среднего аддитивного сдвига b равна

$$D(x) = \left| I(x) - T_W(x) - b \right|, \quad b = \frac{1}{|\Omega|} \sum_{x \in \Omega} \left[I(x) - T_W(x) \right]. \tag{1}$$

Здесь |Ω| – число пикселей. Разность до взятия модуля вычисляется в расширенном числовом типе. К неотрицательной карте D(x) применяются четыре эрозии ядром 5×5, затем обнуляются значения ниже 40 уровней восьмибитной яркости. Модуль сохраняет отклонения обоих знаков после компенсации среднего сдвига. Локальные тени, блики и ошибки совмещения могут сохраняться в промежуточных представлениях, показанных на рис. 1.

Контуры выделяются на изображениях половинного размера после открытия, сглаживания и детектора Canny. Хотя бы одна сторона прямоугольника должна превышать 20 пикселей, каждая – быть не больше трети соответствующего размера кадра. Контурная новизна определяется локальным поиском максимального перекрытия:

$$q(\Gamma) = 1 - \max_{\delta \in \Delta} \frac{\left| (\Gamma + \delta) \cap S_T \right|}{|\Gamma|}, \tag{2}$$

где Γ – пиксели текущего контура, S_T – утолщенная опора эталона, Δ – допустимые смещения δ. Окно 30×30 и толщины границ 2 и 10 пикселей заданы в полуразмерных координатах. При равном перекрытии выбирается меньшее смещение; прошедший контур задает прямоугольник-кандидат.

Разностные кандидаты – восьмисвязные компоненты ненулевой карты площадью не менее 128 пикселей, со сторонами прямоугольника не менее 8 пикселей и его площадью не более 10 % кадра. В комбинированном источнике контуры включаются первыми; разностный прямоугольник добавляется при IoU < 0,90 со всеми принятыми.

Оценка и объединение. Кандидат расширяется в 1,5 раза. Вектор оценщика содержит контурную новизну, среднюю разность, долю ненулевых пикселей разности, единицу минус сходство, логарифмически нормированную площадь, нормированное число компонент и отношение ширины к сумме сторон. В используемом семимерном представлении новизна совпадает с единицей минус сходство, а число компонент до слияния постоянно. Таким образом, семь входных значений не являются семью независимыми признаками: до слияния изменяются не более пяти различающихся сигналов.

Применяется HistGradientBoostingClassifier: скорость обучения 0,05, до 140 итераций и 7 листьев, минимум 20 примеров в листе, L2 = 1, начальное состояние генератора 0; веса классов балансируются. Метка положительна при IoU ≥ 0,5 хотя бы с одной зоной. Ранняя остановка scikit-learn 1.5.2 использует внутреннее разбиение кандидатов обучающих автомобилей без группировки; удержанная машина в нем не участвует.

При позднем слиянии кандидаты, прошедшие порог оценщика, доводятся до размера не менее 40×40 пикселей, транзитивно объединяются с нулевым зазором и обрезаются по границам кадра. При раннем слиянии объединение выполняется до оценки,

а признаки исходных кандидатов усредняются с весами по площади. Следовательно, сравниваемые схемы различаются порядком операций и способом получения признаков объединенной области. Балл классификатора используется для отбора; итоговые области после постобработки далее называются детекциями.

Метрики. Метрики согласованы с разметкой и уровнем решения [13]. Для кадра i обозначим объединения детекций и разметки через P_i и G_i, отдельную зону – G_{ij}, область кадра – Ω_i. Доля покрытия зоны:

$$c_{ij} = \frac{\left|G_{ij} \cap P_i\right|}{\left|G_{ij}\right|}. \quad (3)$$

При N = 823 зонах и n = 195 кадрах охват зон A, среднее покрытие C и средняя площадь срабатываний вне разметки B равны

$$A = \frac{100}{N}\sum\nolimits_{i,j} 1\left\{c_{ij} > 0\right\},\ C = \frac{100}{N}\sum\nolimits_{i,j} c_{ij}, \quad (4)$$

$$B = \frac{100}{n}\sum\nolimits_{i=1}^{n} \frac{\left|P_i \setminus G_i\right|}{\left|\Omega_i\right|}. \quad (5)$$

A и C усредняются по размеченным зонам, B – по всем 195 кадрам, включая отрицательные. Перекрывающиеся площади учитываются один раз. Зона входит в охват A, если ее пересечение с выделенными областями имеет положительную площадь; касание границ не учитывается. Показатель B описывает среднюю долю кадра, выделенную за пределами разметки. Для характеристики локализации и частоты тревог используются дополнительные показатели.

Детекции сопоставляются с размеченными зонами при IoU ≥ 0,5. Каждой детекции и каждой зоне допускается не более одного соответствия. Сначала максимизируется число допустимых пар, затем их суммарный IoU. По числу сопоставленных и несопоставленных областей рассчитываются точность, полнота и их гармоническое среднее F1. Отдельно подсчитываются полностью ложные области – детекции, не имеющие с разметкой пересечения положительной площади. Их число не совпадает с числом ложноположительных детекций при IoU ≥ 0,5: область может частично пересекать разметку и не достигать этого порога. Также рассчитываются среднее число полностью ложных областей на кадр и доля отрицательных кадров хотя бы с одной тревогой.

Для дополнительного описания соотношения охвата, покрытия и внешней площади используется безразмерный индекс с экспертно заданными весами

$$MQ = A - 2B + \frac{C}{4}. \quad (6)$$

Основные выводы опираются на A, C, F1 и B по отдельности: более высокие значения первых трех показателей и более низкое значение B считаются предпочтительными. Конфигурация недоминируема, если среди проверенных вариантов нет другого, который был бы не хуже по всем четырем показателям и лучше хотя бы по одному. MQ служит вспомогательной сводной характеристикой; его веса не определялись по измерениям работы оператора. Время обработки и число полностью ложных областей анализируются отдельно.

Для каждого ограничения рассматриваются сохраненные результаты при порогах от 0,1 до 1,0 с шагом 0,1. Из допустимых точек выбирается точка с наибольшим A; при равенстве A предпочтение отдается меньшему значению ограничиваемого показателя, затем более высокому порогу. По отдельности задаются пределы для B, доли отрицательных кадров с тревогой, числа полностью ложных областей на кадр и общей площади выделений. Интерполяция между порогами не выполняется. Выбор сделан ретроспективно; общий верхний предел не означает равенства фактической нагрузки у сравниваемых конфигураций.

Для фиксированных предсказаний выполнен парный процентильный бутстреп по 12 автомобилям: 2000 выборок с возвращением, начальное состояние генератора 42. Кадры одного автомобиля в каждой перевыборке сохраняются вместе [14]. Интервалы уровня 95 % характеризуют межавтомобильную вариабельность при фиксированных предсказаниях. Они не учитывают повторное обучение и выбор конфигурации; малое число автомобилей ограничивает точность оценки неопределенности [15]. Поправка на весь выполненный поиск конфигураций и порогов не применялась. Для воспроизведения проверки необходимо сохранять состав разбиений, предсказания, параметры и версии программного окружения [16].

Результаты исследования и их обсуждение

К1–К6 – конфигурации одного метода, различающиеся источником кандидатов и порядком операций (табл. 1): К1 – контуры, объединение до оценки; К2 – контуры, оценка до объединения; К3 – контуры и разность, объединение до оценки; К4 – контуры и разность, оценка до объединения; К5 – разность, объединение до оценки; К6 – разность, оценка до объединения. Основной исследуемый вариант – К4.

Таблица 1

Пилотная групповая проверка по автомобилям при пороге 0,6

Код	A, %	B, %	C, %	Контакт / пропуск	Ложные области	F1	MQ
K1	39,125	2,621	27,706	322 / 501	271	0,184	40,811
K2	49,818	2,526	32,693	410 / 413	208	0,231	52,939
K3	35,115	2,281	28,747	289 / 534	171	0,241	37,741
K4	61,361	3,620	45,528	505 / 318	271	0,346	65,504
K5	39,368	0,697	29,864	324 / 499	82	0,395	45,440
K6	37,060	0,794	27,631	305 / 518	78	0,357	42,379

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Каждая строка: 195 кадров, 823 зоны, 12 автомобилей; F1 при IoU ≥ 0,5. В столбце «Ложные области» указано суммарное число полностью ложных детекций; MQ – вспомогательный безразмерный индекс.

Таблица 2

Рабочие точки при ограничениях на срабатывания

Ограничение	Код	Порог	Фактическая нагрузка	A, %	Контакт / пропуск	Ложные области
B ≤ 5 %	K1	0,4	3,554 %	45,565	375 / 448	398
B ≤ 5 %	K4	0,5	4,383 %	63,183	520 / 303	304
Доля тревожных отрицательных кадров ≤ 0,5	K1	0,7	0,435	36,209	298 / 525	207
Доля тревожных отрицательных кадров ≤ 0,5	K4	0,8	0,457	55,650	458 / 365	206
Ложных областей на кадр ≤ 2	K1	0,5	1,692	42,406	349 / 474	330
Ложных областей на кадр ≤ 2	K4	0,4	1,785	64,763	533 / 290	348
Общая площадь срабатываний ≤ 5 %	K1	0,4	4,792 %	45,565	375 / 448	398
Общая площадь срабатываний ≤ 5 %	K4	0,7	4,725 %	58,809	484 / 339	241

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Пределы применяются отдельно; пороги выбраны ретроспективно.

При пороге 0,6 K4 охватил 505 зон против 322 у K1: прирост составил 183 зоны, или 22,236 п. п. F1 увеличился с 0,184 до 0,346, а B – с 2,621 до 3,620 %. Число полностью ложных областей в обеих конфигурациях равно 271. Комбинированный вариант K3 с ранним объединением уступил K1 по охвату. Следовательно, добавление разностных кандидатов само по себе не обеспечило улучшения этого показателя.

Контурный K2 превосходит K1 по A, B, C и F1. При таком же порядке операций комбинированный K4 охватывает еще 95 зон, или 11,543 п. п., и повышает F1 с 0,231 до 0,346. При этом B возрастает на 1,094 п. п. По сравнению с K3 у K4 также выше охват, покрытие и F1, но больше внешняя площадь; по всем четырем критериям K4 не доминирует K3.

Разностный K5 дает F1 = 0,395, B = 0,697 % и 82 полностью ложные области при охвате 324 зон. Раннее объединение K5 предпочтительнее позднего K6 по A, B, C и F1. Среди шести конфигураций недоминируемы K2, K4 и K5.

Таблица 2 сопоставляет K1 и K4 при одинаковых верхних пределах срабатываний: эта пара характеризует суммарный эффект добавления разностных кандидатов и переноса оценки перед объединением.

При каждом из четырех рассмотренных ограничений K4 сохраняет прирост охвата относительно K1. В точках с близкой общей площадью выделений – 4,725 и 4,792 % – охвачены 484 и 375 зон соответственно. Разница составляет 109 зон, или 13,244 п. п. Это сравнение относится к выбранным точкам K1 и K4; результаты K2 и K5 в табл. 1 приведены при общем пороге 0,6.

Для разности K4−K1 при пороге 0,6 интервалы уровня 95 % составляют: A – [17,316; 28,269] п. п.; C – [11,886; 24,836] п. п.; F1 – [0,1261; 0,1989]. Прирост A и F1 положителен у всех 12 автомобилей. Интервал B [−0,198; 2,118] п. п. включает ноль; это не устанавливает эквивалентность конфигураций по внешней площади.

Таблица 3

Чувствительность К4 к размеру разметки

Масштаб	A, %	B, %	C, %	Контакт / пропуск	F1	MQ
0,80	60,753	4,130	50,169	500 / 323	0,2670	65,037
1,00	61,361	3,620	45,528	505 / 318	0,3463	65,504
1,20	62,211	3,241	38,753	512 / 311	0,3186	65,417

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования. Предсказания фиксированы.

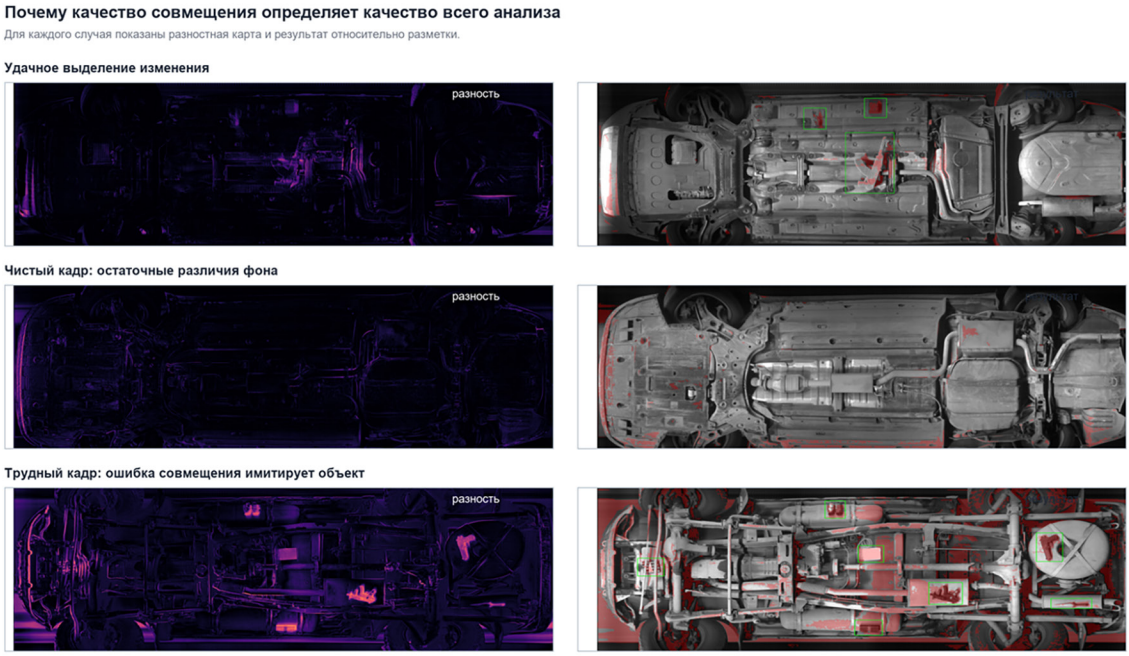


Рис. 2. Примеры обработки положительного и отрицательного кадров и влияния совмещения. Слева – разностные карты, справа – наложение промежуточной маски. Зеленые рамки – разметка; красные пиксели – маска
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Для пары К4–К1 дополнительно рассчитаны номинальные p-значения по направлениям изменения A и F1. В условной модели независимых знаков с вероятностью положительного изменения 1/2 двусторонний критерий знаков для 12 положительных различий дает p = 0,000488 для каждого показателя. После поправки Холма на эти два показателя p = 0,000977. Расчет оценивает согласованность направления изменений по автомобилям и не является тестом разности совокупного F1. Обучающие части групповой проверки перекрываются, поэтому независимость знаков не гарантирована [17]. Ретроспективный выбор сравниваемой пары и порогов также не учтен: приведенные p-значения не следует трактовать как подтверждение превосходства процедуры обучения на новых данных.

В табл. 3 оценена чувствительность метрик к масштабированию разметки при фиксированных предсказаниях.

При покрытии не менее 25 % зоны К4 имеет 480 контактов (58,3 %), К2 – 373 (45,3 %), К1 – 287 (34,9 %): прирост сохраняется при содержательном перекрытии разметки. Строгие точность и полнота К4 равны 0,359 и 0,334; средний IoU сопоставленных пар – 0,695. Тревоги есть на 60,9 % отрицательных кадров; 271 полностью ложная область дает 1,39 на кадр всего корпуса.

Изменение MQ менее 0,5 при заметных изменениях F1 и C показывает необходимость совместного анализа свертки и ее компонентов. Примеры остаточных различий и влияния совмещения приведены на рис. 2.

Таблица 4

Сопоставление с нейросетевыми методами при общем пределе B*

Метод	A, %	B, %	C, %	Контакт / пропуск	F1	Ложные области
K4	61,361	3,620	45,528	505 / 318	0,346	271
PatchCore	59,417	2,965	44,102	489 / 334	0,410	236
EfficientAD-S	56,865	2,408	41,386	468 / 355	0,424	187

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования. 195 кадров, 823 зоны, 12 автомобилей; F1 при IoU ≥ 0,5. Ложные области – полностью ложные детекции.

Сравнение с нейросетевыми методами. Нейросетевой контроль включает PatchCore [6] и EfficientAD-S [7]. Для проверки используются те же 195 текущих кадров и банк из 245 чистых эталонов. Нормальные эталоны проверяемого автомобиля доступны всем методам как данные предварительной регистрации; текущие проверочные кадры не включаются в обучение сетей или их банк признаков. PatchCore использует Wide-ResNet-50-2, признаки второго и третьего блоков и подвыборку 10 % банка. EfficientAD-S обучается на нормальных эталонах. Собственный оценщик дополнительно использует разметку кандидатов обучающих автомобилей; условия обучения методов тем самым различаются и учитываются при интерпретации результатов.

Чтобы сохранить локальные детали панорамы, нейросетевые методы обрабатывают окна 512×512 пикселей с шагом 384 пикселя; каждое окно приводится к 256×256 пикселям. Полутоновое изображение повторяется в трех каналах. Карты оценок возвращаются в исходные координаты, в пересечениях окон усредняются; дополненные участки за границами кадра исключаются. Из бинарной карты выделяются восьмисвязные компоненты площадью не менее 128 пикселей; их прямоугольники доводятся до размера не менее 40×40 пикселей, объединяются с нулевым зазором и обрезаются по кадру. Версии реализаций, контрольные суммы весов и правила нормирования карт фиксируются вместе с результатами.

Рабочую точку каждого нейросетевого метода выбирают по максимуму A при B ≤ B*; предел B* равен неокругленному значению B конфигурации K4 при пороге 0,6 (в табл. 4 – 3,620 %). Пороги перебираются по 101 равномерной точке нормированного диапазона оценок, а при равном A выбирается меньшее B. Подбор на этом корпусе является ретроспективным. Таблица 4 сопоставляет результаты при общем верхнем пределе, а не при равной фактической внешней площади.

В рассматриваемых точках K4 охватывает больше зон, но уступает обоим нейросетевым вариантам по F1 и внешней площади. Поэтому преимущество метода относится к охвату при данном ограничении, а не к совокупности всех показателей. Сравнение на том же корпусе не заменяет испытание с заранее зафиксированными настройками на новых автомобилях.

Время обработки. Для K4 на 46 отрицательных кадрах выполнены три прохода (138 замеров); два разогревочных кадра и предварительная загрузка эталонов исключены из измерений. При одном пороге среднее время формирования и оценки кандидатов составляет 1,5367 с, медиана – 1,5276 с, 95-й процентиль – 1,8590 с. Эти значения относятся к одному этапу и не являются временем полного цикла досмотра.

Использована платформа Windows 11 с процессором AMD Ryzen 9 7950X (32 логических процессора). Рабочие пулы и OpenCV ограничены четырьмя потоками. Такое ограничение задает воспроизводимый бюджет вычислений; из числа доступных логических процессоров нельзя непосредственно вывести ускорение при снятии ограничения.

Полный цикл отсчитывается от начала регистрации проезда до готовности результата на экране оператора. Он включает получение и сборку панорамы, выбор и получение эталона, предобработку, совмещение, формирование и оценку кандидатов, их объединение и подготовку отображения. Время принятия решения оператором учитывается отдельно. Алгоритмическая задержка отсчитывается от готовности полной панорамы до готовности результата.

В табл. 5 приведен хронометраж при четырех потоках и последовательной обработке панорам. Серия включает по три прохода для каждого из 195 кадров: 447 измерений положительных и 138 отрицательных примеров. Загрузка программного окружения выполняется до начала серии; банк эталонов подготовлен заранее. Длительности суммарных интервалов регистрируются непосредственно для каждого прохода; медианы и 95-е процентили этапов не складываются.

Таблица 5

Длительность этапов и полного цикла К4

Этап или интервал	Среднее, с	Медиана, с	95-й процентиль, с
Получение и сборка панорамы	4,482	4,405	5,877
Выбор и получение эталона	0,112	0,112	0,154
Предобработка и совмещение	0,794	0,784	1,041
Формирование и оценка кандидатов	1,723	1,711	2,211
Объединение и подготовка отображения	0,083	0,082	0,109
Алгоритмическая обработка панорамы	2,712	2,688	3,240
Полный цикл до готовности результата	7,194	7,132	8,689

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования. 585 проходов, 195 различных кадров, 4 потока. Суммарные строки перекрываются с перечисленными этапами и повторно не складываются.

Для положительных кадров средняя алгоритмическая задержка составляет 2,767 с, для отрицательных – 2,532 с. По всем кадрам среднее время полного цикла равно 7,194 с, а 95-й процентиль – 8,689 с. Эти оценки относятся к указанной платформе и режиму получения панорам; их перенос на другую скорость проезда, разрешение или вычислительную конфигурацию требует отдельного измерения.

Порядок обработки дал разные результаты для трех источников кандидатов. У контурного варианта К2 по сравнению с К1 улучшились A, C и F1 и уменьшилось B. У комбинированного К4 по сравнению с К3 выросли охват, покрытие и F1, но увеличилась площадь срабатываний вне разметки. Для разностных кандидатов раннее объединение К5 оказалось предпочтительнее позднего К6 по всем четырем основным показателям. Эти наблюдения относятся к реализованным схемам, включая усреднение признаков при раннем слиянии; они не изолируют эффект простой перестановки двух неизменных операций.

К4 дал наибольший охват среди шести конфигураций при пороге 0,6, а К5 – наибольший F1 и наименьшую внешнюю площадь. Выбор между ними зависит от требований к пропускам и площади изображения, которую необходимо проверить оператору. При этом охват A означает любое пересечение положительной площади с зоной размещения. Для К4 строгие точность и полнота составили 0,359 и 0,334, а тревоги возникли на 60,9 % отрицательных кадров. Таким образом, достигнутый охват не следует отождествлять с вероятностью правильного распознавания предмета или с готовностью к автономному досмотру.

Пилотный характер исследования обусловлен ретроспективным выбором архитектуры и порогов, малым числом автомобилей и зональной разметкой. Группировка по автомобилям исключает прямое обучение оценщика на проверяемой машине, но не устраняет влияние выбора метода по итогам того же корпуса. Бутстреп по фиксированным предсказаниям и номинальные критерии знаков не учитывают неопределенность всей процедуры разработки. Прямоугольные зоны размещения муляжей также не позволяют оценивать точность сегментации реальных предметов по их границам.

Внешнюю проверку следует выполнять на новых автомобилях и проездах после фиксации источника кандидатов, предобработки, числа итераций, правил объединения и порогов. Для предварительной настройки пригодна вложенная групповая схема: все решения принимаются внутри обучающих автомобилей, а исключенный автомобиль используется только для итоговой оценки. Разбиение для ранней остановки также должно учитывать автомобиль. В отдельном испытании необходимо измерить время и ошибки оператора, частоту отказов совмещения и поведение системы при изменении условий съемки.

В эксплуатации нужен проверенный и обновляемый банк эталонов. Отказ совмещения должен направлять изображение на ручной просмотр и не считаться подтверждением отсутствия предмета. Хранение исходных предсказаний и версий программного окружения позволяет повторить расчет метрик после изменения порогов или уточнения разметки [16].

Заключение

Предложен метод выявления изменений на изображениях днища при повторном досмотре автомобиля с зарегистрированным эталоном. Метод сочетает локальное совмещение, выделение прямоугольных кандидатов по контурам и остаточной разности, их оценку градиентным бустингом и геометрическое объединение. Результатом служат области изображения для проверки оператором.

В пилотной ретроспективной проверке на 195 кадрах 12 автомобилей комбинированная конфигурация К4 с оценкой до объединения охватила 505 из 823 зон, или 61,361 %, при F1 = 0,346 и внешней площади 3,620 %. Преимущество перед внутренними контурными контролями выражается в большем охвате и F1: у К2 получены 410 зон и 0,231, у К1 – 322 зоны и 0,184. При близкой общей площади выделений К4 охватил 484 зоны против 375 у К1. Разностный К5 обеспечил более высокое значение F1 = 0,395 и меньшую внешнюю площадь 0,697 %, но охватил 324 зоны.

Практическое преимущество предложенного решения состоит в возможности выбирать конфигурацию по требуемому соотношению охвата и локализации: в исследованном корпусе К4 соответствует приоритету охвата, К5 – локализации с меньшей внешней площадью. Один порядок обработки не оказался лучшим для всех источников кандидатов. Результаты ограничены рассмотренным корпусом и ретроспективной настройкой; применимость к новым автомобилям и влияние на работу оператора должны быть установлены независимыми испытаниями.

Список литературы

1. Белкин Е. Н., Зайончковская Д. А. Построение защищенных интегрированных систем безопасности объектов УИС // Информатизация и техническое обеспечение уголовно-исполнительной системы Российской Федерации: проблемы, решения и перспективы развития: сборник материалов II Всероссийской научно-практической конференции (г. Тверь, 04–05 октября 2023 г.). Тверь: Научно-исследовательский институт информационных технологий ФСИН России, 2023. С. 28–34. URL: https://elibrary.ru/ohzojh (дата обращения: 23.10.2026). EDN: OHZOJH.

2. Gao X., Wu Y., Yang K., Li J. Vehicle bottom anomaly detection algorithm based on SIFT // Optik. 2015. Vol. 126. Is. 23. P. 3562–3566. DOI: 10.1016/j.ijleo.2015.08.268.

3. El Saer A., Grammatikopoulos L., Sfikas G., Karras G., Petsa E. A novel framework for image matching and stitching for moving car inspection under illumination challenges // Sensors. 2024. Vol. 24. Is. 4. Art. 1083. DOI: 10.3390/s24041083.

4. Wang L., Zhang K., Zheng Q., Ding G., Zhang W., Chen D., Liu B. An undercarriage image driven anomaly detection method for metro vehicle based on adversarial memory enhancement // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. 2024. Vol. 238. Is. 5. P. 489–500. DOI: 10.1177/09544097231201519.

5. Carvalho P., Lafou M., Durupt A., Leblanc A., Grandvalet Y. Detecting visual anomalies in an industrial environment: Unsupervised methods put to the test on the AutoVI dataset // Computers in Industry. 2024. Vol. 163. Art. 104151. DOI: 10.1016/j.compind.2024.104151.

6. Roth K., Pemula L., Zepeda J., Schölkopf B., Brox T., Gehler P. Towards total recall in industrial anomaly detection // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2022. P. 14298–14308. DOI: 10.1109/CVPR52688.2022.01392.

7. Batzner K., Heckler L., König R. EfficientAD: Accurate visual anomaly detection at millisecond-level latencies // Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision. 2024. P. 127–137. DOI: 10.1109/WACV57701.2024.00020.

8. Heckler-Kram L., Neudeck J.-H., Scheler U., König R., Steger C. The MVTec AD 2 dataset: Advanced scenarios for unsupervised anomaly detection // International Journal of Computer Vision. 2026. Vol. 134. Art. 175. DOI: 10.1007/s11263-026-02743-0.

9. Roberts D. R., Bahn V., Ciuti S., Boyce M. S., Elith J., Guillera-Arroita G., Hauenstein S., Lahoz-Monfort J. J., Schröder B., Thuiller W., Warton D. I., Wintle B. A., Hartig F., Dormann C. F. Cross-validation strategies for data with temporal, spatial, hierarchical, or phylogenetic structure // Ecography. 2017. Vol. 40. Is. 8. P. 913–929. DOI: 10.1111/ecog.02881.

10. Kapoor S., Narayanan A. Leakage and the reproducibility crisis in machine-learning-based science // Patterns. 2023. Vol. 4. Is. 9. Art. 100804. DOI: 10.1016/j.patter.2023.100804.

11. Zitová B., Flusser J. Image registration methods: A survey // Image and Vision Computing. 2003. Vol. 21. Is. 11. P. 977–1000. DOI: 10.1016/S0262-8856(03)00137-9.

12. Rublee E., Rabaud V., Konolige K., Bradski G. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF // Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. 2011. P. 2564–2571. DOI: 10.1109/ICCV.2011.6126544.

13. Maier-Hein L., Reinke A., Godau P., Tizabi M. D., Buettner F., Christodoulou E., Glocker B., Isensee F., Kleesiek J., Kozubek M., Reyes M., Riegler M. A., Wiesenfarth M., Kavur A. E., Sudre C. H., Baumgartner M., Eisenmann M., Heckmann-Nötzel D., Rädsch T., Acion L., Antonelli M., Arbel T., Bakas S., Benis A., Blaschko M. B., Cardoso M. J., Cheplygina V., Cimini B. A., Collins G. S., Farahani K., Ferrer L., Galdran A., van Ginneken B., Haase R., Hashimoto D. A., Hoffman M. M., Huisman M., Jannin P., Kahn C. E., Kainmueller D., Kainz B., Karargyris A., Karthikesalingam A., Kofler F., Kopp-Schneider A., Kreshuk A., Kurc T., Landman B. A., Litjens G., Madani A., Maier-Hein K., Martel A. L., Mattson P., Meijering E., Menze B., Moons K. G. M., Müller H., Nichyporuk B., Nickel F., Petersen J., Rajpoot N., Rieke N., Saez-Rodriguez J., Sánchez C. I., Shetty S., van Smeden M., Summers R. M., Taha A. A., Tiulpin A., Tsaftaris S. A., Van Calster B., Varoquaux G., Jäger P. F. Metrics reloaded: Recommendations for image analysis validation // Nature Methods. 2024. Vol. 21. Is. 2. P. 195–212. DOI: 10.1038/s41592-023-02151-z.

14. Field C. A., Welsh A. H. Bootstrapping clustered data // Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology). 2007. Vol. 69. Is. 3. P. 369–390. DOI: 10.1111/j.1467-9868.2007.00593.x.

15. MacKinnon J. G., Nielsen M. Ø., Webb M. D. Cluster-robust inference: A guide to empirical practice // Journal of Econometrics. 2023. Vol. 232. Is. 2. P. 272–299. DOI: 10.1016/j.jeconom.2022.04.001.

16. Горбунов В. И., Салимов Т. А., Горбань Е. В. Инструменты автоматизации для обеспечения воспроизводимости исследований в науке о данных // Современные наукоемкие технологии. 2025. № 5. С. 119–126. URL: https://top-technologies.ru/article/view?id = 40399 (дата обращения: 07.10.2026). DOI: 10.17513/snt.40399.

17. Bengio Y., Grandvalet Y. No unbiased estimator of the variance of k-fold cross-validation // Journal of Machine Learning Research. 2004. Vol. 5. P. 1089–1105. URL: https://jmlr.org/papers/v5/grandvalet04a.html (дата обращения: 07.10.2026).

Конфликт интересов: Авторы заявляют о наличии следующих конфликтов интересов: авторы являются сотрудниками предприятия – разработчика систем досмотра транспортных средств, в которых применяются рассматриваемые в работе методы. В статье отсутствуют сравнения с коммерческими продуктами.

Conflict of interest: The authors declare the following conflicts of interest: they are employees of the company that developed the vehicle inspection systems utilizing the methods discussed in the paper. The article does not include comparisons with commercial products.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования. Исследование проводилось с применением инфраструктуры АО «АЛГОНТ».

Financing: The research was performed without external funding. The study was conducted using the infrastructure of ALGONT JSC.

УДК 004.6:504.064.2
DOI

CC BY 4.0

АВТОМАТИЗАЦИЯ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ТЕРРИТОРИЙ РЕЧНЫХ БАССЕЙНОВ СРЕДСТВАМИ ЯЗЫКА R И СРЕДЫ RSTUDIO

[1,2]Табунщик В. А. ORCID ID 0000-0003-3555-6087

[1]Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», Севастополь, Российская Федерация;
[2]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М. Д. Миллионщикова», Грозный, Российская Федерация, e-mail: Tabunshchyk@ibss-ras.ru

Цель исследования – разработать и программно реализовать автоматизированный конвейер обработки геопространственных данных на языке R для балльной геоэкологической оценки территории речного бассейна, выполнить вычислительный эксперимент на девяти бассейнах Юго-Западного Прикаспия и оценить влияние метода классификации и числа классов на интегральную карту. Предметная балльная схема оценки, включающая 34 критерия, принята по ранее опубликованной методике; в настоящей работе она рассматривается как постановка вычислительной задачи. Конвейер реализован на открытых пакетах R (terra, sf, classInt, parallel) и включает четыре этапа: извлечение идентификаторов бассейнов; перепроецирование и маскирование растров по векторным границам; классификацию методами equal и quantile, при числе классов k=4, 5, 6, 7; поэлементное суммирование классифицированных слоёв и запись итоговой карты. Расчёт выполнен для бассейнов рек Сунжа, Сулак, Шураозень, Уллучай, Самур, Карачай, Атачай, Хераз и Горган. Результаты представлены интегральными растрами и сводными характеристиками вычислительного прогона. Ограничениями являются равные веса критериев после приведения к ординальной шкале, зависимость интегральной карты от выбора критериев, а также требование единообразного именования исходных файлов. Полученные материалы могут использоваться при бассейновом тематическом картографировании, планирования природоохранных мероприятий и интеграции в геопортал для поддержки принятия управленческих решений.

Ключевые слова: геоинформационные системы, Прикаспий, язык программирования R, геоэкологическая оценка

AUTOMATION OF GEOECOLOGICAL ASSESSMENT OF RIVER BASIN TERRITORIES USING THE R LANGUAGE AND RSTUDIO IDE

[1,2]Tabunshchik V. A. ORCID ID 0000-0003-3555-6087

[1]Federal State Budgetary Institution of Science Federal Research Center "Institute of Biology of the Southern Seas named after A. O. Kovalevsky of the Russian Academy of Sciences", Sevastopol, Russian Federation;
[2]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Grozny State Petroleum Technical University named after Academician M. D. Millionshchikov», Grozny, Russian Federation, e-mail: Tabunshchyk@ibss-ras.ru

The aim of the study is to develop and implement an automated R pipeline for processing geospatial data for a score-based geoecological assessment of a river basin, to run a computational experiment for nine basins of the South-Western Caspian region, and to evaluate the effect of the classification method and the number of classes on the integral map. The underlying 34-criterion scoring scheme is taken from a previously published methodology and is treated here as the statement of a computational problem. The pipeline is implemented with open-source R packages (terra, sf, classInt, and parallel) and comprises four stages: extraction of basin identifiers; reprojection and masking of rasters by vector boundaries; classification with the equal and quantile methods for k=4,5,6,7 classes; and cell-wise summation of the classified layers followed by export of the final map. The calculation was performed for the Sunzha, Sulak, Shuraozen, Ulluchay, Samur, Karachay, Atachay, Heraz, and Gorgan basins. The results are integral rasters and summary statistics of the computational run. The limitations include equal criterion weights after conversion to an ordinal scale, sensitivity of the integral map and a strict file-naming convention. The obtained materials can be used for basin mapping, planning environmental protection measures, and integration into a geoportal to support management decision-making.

Keywords: Geoinformation systems, Caspian region, geo-ecological assessment, R programming language

Введение

Современные задачи обработки данных дистанционного зондирования Земли характеризуются экспоненциальным ростом объёмов пространственной информации. Согласно обзору Ma et al. [1], архивы данных NASA превышают 7,5 петабайта, ежедневно пополняясь на 4 ТБ, а глобальный объём архивных данных спутниковых наблюдений, по оценкам OGC, может превы-

сить один ЭБ [1]. Эффективная обработка таких массивов требует специализированного программного обеспечения, способного загружать и обрабатывать данные над конкретными территориями, в том числе и речными бассейнами.

Традиционно проведение геоэкологической оценки территории речных бассейнов сталкивается с рядом трудностей, главнейшей из которых является сложность обработки большого количества разрозненных геопространственных данных, представленных часто в различном разрешении, различных картографических проекциях и различных форматах данных (табличные статистические сводки, растровые файлы, шейп-файлы и пр.). Ручная обработка таких массивов данных представляет собой довольно сложную задачу по времязатратам и трудозатратам, даже при проведении геоэкологической оценки одного бассейна.

Для решения данной проблемы целесообразно использовать пакетную обработку и преобразование пространственных данных, которое в последние годы удобно реализовать с использованием языка программирования R.

Язык программирования R, изначально разработанный как среда для статистических вычислений, за последние два десятилетия превратился в мощный инструмент для работы с пространственными данными. Как отмечается в обзоре Hesselbarth et al. [2], проведённый опрос сообщества показал, что 90,8% исследователей в области ландшафтной экологии оценивают R как «очень полезный» или «полезный» для решения своих задач [2]. Slater et al. [3] подчёркивают, что R играет центральную роль в гидрологических науках благодаря демократизации вычислительных методов, поддержке воспроизводимости и доступу к широкому спектру статистических инструментов [3]. Ключевым преимуществом R является его открытая архитектура и возможность расширения через пакеты. Совокупность этих возможностей делает среду RStudio рекомендованным инструментом как для научных исследований, так и для практического мониторинга и управления речными бассейнами [3-5]. Bivand [6] отмечает, что более 900 пакетов в CRAN так или иначе используют классы пространственных данных, причём количество пакетов, зависящих от пакета «sp», продолжает расти [6]. Naveena et al. [7] отмечают, что рост использования R в науке о воде отражается в количестве новых пакетов, посвященных проблемам водоснабжения, и это решает задачи, связанные с осадками, засухой, эвапотранспирацией, анализом речного стока и т. д. К примеру, Kaya et al. [8] с помощью программы RStudio анализируют качество воды у плотины Мамасын (Турция). В исследовании Kobal et al. [9] демонстрируются возможности R на примере пространственного анализа лесного массива в Снежнике (Южная Словения), где показаны возможности импорта, преобразования и экспорта данных в различные форматы ГИС (геоинформационные системы), а также возможности геостатистики, пространственного моделирования и пространственной визуализации.

Цель исследования – разработать и программно реализовать автоматизированный конвейер обработки геопространственных данных на языке R для балльной геоэкологической оценки территории речного бассейна, выполнить вычислительный эксперимент на девяти бассейнах Юго-Западного Прикаспия и оценить влияние метода классификации и числа классов на интегральную карту. Практическая цель – сократить долю ручных операций при массовой подготовке согласованных растровых слоёв и обеспечить воспроизводимый пересчёт интегральной карты при смене классификационной схемы. Методика ориентирована на тематическое картографирование по бассейновому принципу; архитектура конвейера допускает адаптацию к иным полигональным объектам при сохранении схемы именования файлов.

Материалы и методы исследования

Современные задачи дистанционного зондирования и геоинформационного моделирования требуют унифицированных подходов к предварительной обработке, перепроецированию, маскированию и классификации растровых данных в границах природных объектов (речных бассейнов, водосборов, административных единиц). Предлагаемая методика базируется на открытом программном обеспечении R и реализует полный конвейер: от исходных мультивременных растров до агрегированных многоклассовых карт и их суммирования. Основные особенности: автоматическое извлечение идентификаторов бассейнов из имён файлов, перепроецирование по эталонному растру, построение масок по векторным границам и параллельная классификация несколькими методами с последующим накоплением.

Геоэкологическая оценка речного бассейна представляет собой комплексный подход к изучению и анализу состояния природной и антропогенной среды в конкретном речном бассейне. Геоэкологическая оценка речного бассейна является комплексной и позволяет выявить уязвимые

точки, прогнозировать возможные негативные изменения и разрабатывать стратегии управления и использования ресурсов с учетом принципов и целей устойчивого развития. Геоэкологическая оценка включает в себя оценку различных критериев и их последующее совместное воздействие [10-12]. Геоэкологической оценке территорий речных бассейнов посвящено незначительное количество работ. Практически все они выполнены по различным методикам и трудно сопоставимы между собой. Например, Карпенко Н. П. [13] исследовал бассейн реки Медвенка в Московской области с использованием балльной оценки, которая включала в себя 10 различных показателей; Сысоева П. С. [14] при оценке геоэкологической ситуации в бассейне реки Днепр при балльной оценке использует 6 показателей; Белов Н. С. в работе [15] при оценке геоэкологической ситуации в речных бассейнах Калининградской области использовал балльный подход и коэффициенты, рассчитанные по 16 показателям.

Проведение геоэкологической оценки в настоящей работе реализуется для девяти речных бассейнов Юго-Западного Прикаспия. В качестве критериев выбраны 34 фактора, суммарное воздействие которых и представляет собой результат балльной геоэкологической оценки территории речного бассейна. Методика получения данных подробно описана в [16, с. 46]. В то же время в [16] проведение геоэкологической оценки выполнялось в полуавтоматическом режиме, для территорий речных бассейнов с малой площадью и требовало больших затрат времени и ресурсов.

Геоэкологическая оценка в данной работе понимается как балльная интегральная характеристика территории водосбора по набору критериев природной и антропогенной среды. Настоящее исследование реализует исполнение геоэкологической оценки речного бассейна как воспроизводимый вычислительный конвейер. В [16] расчёт выполнялся не как полностью автономная пакетная процедура, и это требовало полного участия оператора на стадиях подготовки и классификации слоёв. Предложенная методика полностью автономна и производит вычисления на основе исходных растровых данных критериев оценивания (34 показателя) и границы водосборного бассейна. Настоящая статья не вводит новую предметную шкалу, а задаёт вычислительную реализацию: приведение слоёв к единой сетке, маскирование, перекодировку в баллы и суммирование.

Вычислительный эксперимент. Вычислительный эксперимент состоял в пакетном прогоне четырёхмодульного конвейера на полном наборе исходных данных девяти речных бассейнов Юго-Западного Прикаспия (Сунжа, Сулак, Уллучай, Карачай, Атачай, Хераз, Горган, Самур и Шураозень) и в сопоставлении интегральных растров, полученных при разных классификационных схемах. Предметная интерпретация критериев не варьировалась: менялись только вычислительные правила перекодировки и последующего суммирования. Имена растров имеют вид XX_YY_…, где XX – номер критерия, YY – номер бассейна.

Эталонной сеткой бассейна принят растр критерия 26 (26_YY_…), и к его разрешению и экстенту после перепроецирования в CRS шейпа приводятся все остальные слои того же бассейна. Перепроецирование выполняется методом ближайшего соседа. После приведения к сетке каждый растр маскируется полигоном бассейна; значения вне границы получают NA и в расчёт границ классов не входят. Входной набор содержит 34 растровых критерия на бассейн.

Пусть на территории бассейна заданы растровые критерии $x_1,\ldots,x_m$, m=34. Обозначим множество включённых критериев через S.

Для метода M ∈ {equal, quantile} и числа классов k ∈ {4,5,6,7} слой-критерий i ∈ S переводится в баллы $c_i(p)$. Интегральный индекс в ячейке p

$$I(M, k, p) = c_1(p) + c_2(p) + \ldots + c_n(p),$$

где суммируются только критерии из множества S, n – число таких слоёв-критериев, $c_i(p)$ – балл i-го критерия в ячейке p. Если в ячейке значение критерия отсутствует (NA), это слагаемое пропускается. Веса включённых слоёв-критериев равны единице. Равные веса позволяют сравнивать классификационные варианты, не смешивая эффект метода разбиения с экспертным взвешиванием. В таблице 1 представлен список критериев оценивания.

Итого 8 классификационных схем на каждый включённый в обычную процедуру слой. Полный факториальный план по бассейнам имеет 72 интегральных растра. Методы fisher и kmeans в программном модуле предусмотрены, но в данной работе не представлены в результатах (в описываемый прогон не входили и в сопоставление карт не включались).

Разработанный программный конвейер реализован на языке R (версия 4.5.1) и состоит из четырёх последовательных этапов, каждый из которых отвечает за свой определённый этап обработки геопространственных данных.

Таблица 1

Перечень критериев оценивания

№	Наименование критерия	Шкала
1	Абсолютная высота	обычная классификация
2	Наклон поверхности	обычная классификация
3	Глубина расчленения	обычная классификация
4	Густота расчленения	обычная классификация
5	Сейсмичность	обычная классификация
6	Лавиноопасность	обычная классификация
7	Селеопасность	обычная классификация
8	Подверженность оползням	обычная классификация
9	Карстоопасность	обычная классификация
10	Потенциальные потери почвы	обычная классификация
11	Подверженность подтоплению и затоплению	обычная классификация
12	Ландшафтное разнообразие	классификация с инверсией шкалы
13	Плотность ландшафтных границ	классификация с инверсией шкалы
14	Изменение численности населения	обычная классификация
15	Плотность населения	обычная классификация
16	Изменение температуры	обычная классификация
17	Изменение количества осадков	обычная классификация
18	Климатические аномалии	обычная классификация
19	Комплексный индекс загрязнения атмосферы	обычная классификация
20	Загрязнение почв тяжёлыми металлами	обычная классификация
21	Загрязнение поверхностных вод тяжелыми металлами	обычная классификация
22	Загрязнение донных отложений тяжелыми металлами	обычная классификация
23	Загрязнение почв нефтепродуктами	обычная классификация
24	Загрязнение растений тяжёлыми металлами	обычная классификация
25	Степень обогащения почв микроорганизмами	обычная классификация
26	Изменение типов наземного покрова	обычная классификация
27	Сокращение лесистости	обычная классификация
28	Динамика растительного покрова	обычная классификация
29	Индекс Херста	классификация с инверсией шкалы
30	Тепловое загрязнение территории	обычная классификация
31	Коэффициент антропогенной преобразованности	обычная классификация
32	Степень антропогенной преобразованности	обычная классификация
33	Индекс урбанизированности	обычная классификация
34	Индекс антропогенной нарушенности земель	обычная классификация

Выбор R обусловлен наличием высокопроизводительных пакетов для пространственных вычислений («terra»), работы с векторными данными («sf»), статистической классификации («classInt») и параллельной обработки («parallel»). Для вычислений используется высокоскоростной персональный компьютер (AMD Ryzen 9 9950X3D OEM; GIGABYTE B850 GAMING X WIFI6E; 128 ГБ оперативной памяти; твердотельный накопитель Solid State Drive (SSD) 4 ТБ). Для пакета terra задавалось terraOptions(memfrac = 0.85, todisk = FALSE), то есть процедуре был доступен контролируемый объём оперативной памяти, а не весь физический объём памяти.

1. Исходными данными являются каталог с шейп-файлами бассейнов (9 речных бассейнов) и каталог с растрами (34 показателя для каждого речного бассейна). Модуль выполняет сканирование файловой системы, извлечение идентификаторов бассейнов из имён файлов с использованием регулярных выражений и построение ассо-

циативных словарей. Для каждого бассейна, для которого найдены и шейп, и эталонный растр, выполняется перепроецирование с помощью функции project() пакета «terra». Используется метод ближайшего соседа.

2. На втором этапе выполняется рекурсивный обход корневого каталога для выявления всех растровых файлов. Для каждого файла, удовлетворяющего формату именования, производится: загрузка растра в объект SpatRaster; извлечение соответствующего шейпа из словаря; проверка и при необходимости преобразование системы координат шейпа к CRS растра; применение операции маскирования mask(r, vect) с заменой значений вне полигона границы бассейна на NA; сохранение результата в формате GeoTIFF со сжатием LZW.

3. Третий этап заключается в проведении переклассификации растровых карт критериев и является центральным вычислительным звеном разработанного конвейера. Для каждого замаскированного растра извлекаются немаскированные значения, для каждой пары (M,k) вычисляются границы классов, строится матрица перекодировки и выполняется переклассификация. Полученные классифицированные растры сохраняются в иерархическую файловую структуру исходного вида. Обработка файлов происходит в параллельном режиме с использованием всех ядер процессора и оперативной памяти, за счет чего достигается значительное ускорение вычислений. По завершении обработки формируется сводная статистика, включающая число успешно классифицированных растров, количество ошибок и причины пропусков, что обеспечивает прозрачность и контроль качества на каждом шаге.

4. На 4-м этапе выполняется суммирование всех классифицированных растров внутри каждой конечной папки (комбинация «бассейн – метод – число классов»). Для каждой группы производится загрузка всех растров в коллекцию sds(); проверка идентичности размеров и экстентов; вычисление поэлементной суммы с игнорированием пропусков; сохранение результата с именем, содержащим все идентификационные параметры. В результате создается растр со значениями геоэкологической оценки территории речного бассейна.

Выбор R обусловлен наличием указанных пакетов и возможностью описать весь конвейер в виде воспроизводимых скриптов. RStudio используется только как среда разработки и запуска, но не является самостоятельным программным комплексом оценки.

Результаты исследования и их обсуждение

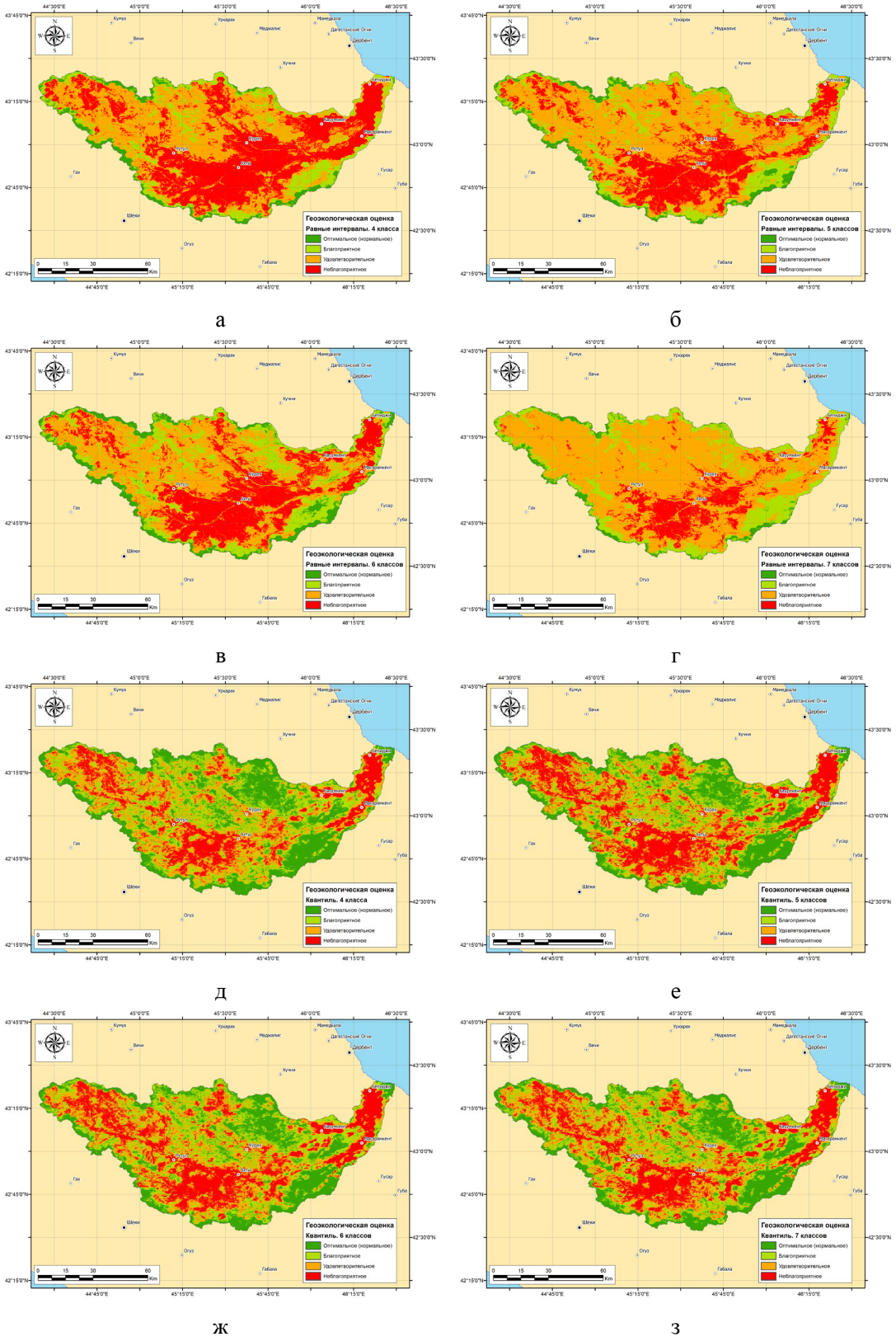
В результате исследования проведена геоэкологическая оценка для девяти речных бассейнов Юго-Западного Прикаспия (Сунжа, Сулак, Шураозень, Уллучай, Самур, Карачай, Атачай, Хераз, Горган). На рисунке представлены результаты геоэкологической оценки для бассейна реки Самур (карты построены в проекции WGS-84).

Разработанный программный конвейер хорошо справляется с массовой обработкой растровых геоданных. Его главные плюсы заключаются в том, что он разделён на независимые этапы, поэтому отдельные части скриптов можно менять или заменять, не ломая всю систему обработки данных. Как видно из рисунка, бассейн реки Самур характеризуется неблагоприятным геоэкологическим состоянием в центральной своей части в районе крупных населенных пунктов Касумкент, Рутул, Ахты и др. В целом использование метода классификации quantile показывает более низкие значения неблагоприятной геоэкологической оценки, чем использование метода equal (табл. 2).

Таблица 2

Доля площади бассейна реки Самур (%), занятая каждым из классов геоэкологической оценки, выполненной по методам equal и quantile

Метод и число классов разбиения	Геоэкологическая оценка (% от общей площади бассейна)			
	оптимальная (нормальная)	благоприятная	удовлетворительная	неблагоприятная
Equal, 4 класса	35,2	25,2	20,8	18,8
Quantile, 4 класса	26,2	32,2	23,2	18,4
Equal, 5 классов	26,2	31,9	19,0	22,9
Quantile, 5 классов	27,7	25,9	26,4	20,0
Equal, 6 классов	31,0	27,8	17,2	24,0
Quantile, 6 классов	28,8	21,3	27,9	22,0
Equal, 7 классов	28,8	23,2	23,4	24,6
Quantile, 7 классов	25,0	27,8	24,4	22,8



Геоэкологическая оценка бассейна реки Самур, полученная по результатам различных методик классификации и числа классов: а) равные интервалы, 4 класса; б) равные интервалы, 5 классов; в) равные интервалы, 6 классов; г) равные интервалы, 7 классов; д) квантиль, 4 класса; е) квантиль, 5 классов; ж) квантиль, 6 классов; з) квантиль, 7 классов.
Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования

Расчет площадей выполнен с использованием перепроецирования растровых данных в метрическую систему координат (UTM 38N) и округления до одного знака после запятой, в связи с чем получена итоговая сумма, соответствующая площади бассейна.

Валидация и ограничения исследования. Способы валидации интегрального показателя в этой постановке ограничены устройством самого индекса. I (M, k, p) есть сумма баллов при равных весах и особых правилах. Для такой величины нет эталонного числового поля «истинной» геоэкологической оценки, с которым можно было бы сравнить полученную карту или долю неверно классифицированных ячеек. Поэтому классические критерии погрешности, устойчивости и сходимости, принятые для итерационных численных методов, здесь неприменимы: алгоритм конечен, не решает уравнение относительно неизвестного поля и не уточняет приближение от шага к шагу.

Ограничения исследования связаны с постановкой вычислительной задачи, правилами конвейера и полнотой иллюстрации результатов.

Во-первых, конвейер зависит от имен исходных файлов. Обрабатываются только растры с именем вида *XX_YY_...* и только те бассейны, для которых есть и шейп-файл с границами. Нарушение шаблона даёт пропуск файла, а не автоматическое сопоставление по другому признаку. В связи с этим необходимо тщательно готовить исходные данные и выполнять их проверку. Приведение разнородных исходных материалов к этому соглашению остаётся ручной операцией.

Во-вторых, веса всех входящих в сумму слоёв равны единице. Экспертное или статистическое взвешивание не проводилось, это является перспективой будущих исследований.

В-третьих, в опубликованном эксперименте использованы только методы equal и quantile. В коде конвейера предусмотрена реализация других методов классификации. Это также является перспективным направлением анализа.

В-четвертых, границы интервалов классификации вычисляются по выборке значений в пределах отдельного бассейна. Вследствие этого одному и тому же номеру класса в разных бассейнах соответствуют различные диапазоны физических величин, и интегральные оценки сопоставимы внутри бассейна, но несопоставимы между бассейнами. Для внутрибассейнового зонирования, на которое ориентирована предложенная методика, такая схема корректна и предпочтительна, поскольку обеспечивает максимальную дифференциацию в пределах анализируемой территории. Для межбассейновых сопоставлений требуется переход к единым границам интервалов, вычисляемым по объединённой выборке значений всех рассматриваемых бассейнов; такой режим работы конвейера составляет направление дальнейшей работы. Два критерия обрабатываются вне общей схемы классификации в силу своей структуры: один задан в бинарной шкале, другой изначально представлен в порядковой шкале и переклассификации не требует. Расширение множества агрегируемых критериев требует предварительного приведения их к общей порядковой шкале с согласованным направлением. Исходные критерии имеют различное пространственное разрешение и приводятся к единой сетке методом ближайшего соседа. Такой выбор сохраняет исходное множество значений и статистическую структуру растра, необходимую для корректного определения границ интервалов, но вносит геометрическое смещение до половины размера ячейки.

В-пятых, оценка является статической. Частные критерии получены из источников и характеризуют состояние территории на некоторый осреднённый момент времени. Динамика геоэкологического состояния, сезонная изменчивость и тренды в рамках предложенной модели не рассматриваются, при этом архитектура конвейера допускает построение разновременных серий оценок при наличии соответствующих данных, и это является перспективой дальнейших исследований.

Хотя язык программирования R изначально предназначался для статистических вычислений, он проложил себе путь в область ГИС благодаря разработке специализированных пакетов расширения. Язык программирования R предлагает широкий спектр функций на всех уровнях ГИС: сбор данных, обработка данных, графическое представление и количественный анализ. В данной статье R представлен как альтернатива с открытым исходным кодом существующему коммерческому программному обеспечению ГИС. Анализ более 60 тыс. статей [4] в 30 ведущих экологических журналах показал, что доля публикаций, использующих R для анализа данных, выросла линейно: с 11,4% в 2008 г. до 58% в 2017 г. Язык программирования R особенно хорошо зарекомендовал себя, когда необходимы передовые количественные методы обработки пространственных данных (например, пространственное моделирование) [9].

Заключение

В работе реализован автоматизированный конвейер балльной геоэкологической оценки территории речного бассейна на языке R в среде RStudio. Предложена формализованная модель интегральной балльной геоэкологической оценки территории речного бассейна. В отличие от словесных описаний балльного подхода, принятых в практике геоэкологических исследований, модель задаёт в явном виде оператор классификации частных критериев, правило приведения шкал к единому направлению для критериев и формирования итоговой карты, у которой рост значения соответствует ухудшению состояния территории. Разработан алгоритм многовариантной классификации разнородных растровых данных и реализующий его комплекс программ на языке R, состоящий из четырёх функционально независимых модулей: приведения растров к эталонной сетке бассейна, маскирования по векторным границам водосбора, многовариантной классификации и агрегирования с построением итоговой карты. Проведён вычислительный эксперимент на данных по девяти речным бассейнам Юго-Западного Прикаспия. Полученные растры пригодны для бассейнового тематического картографирования. Дальнейшее развитие связано с введением обоснованных весов критериев, расширением набора классификаторов и интеграцией выходных слоёв в геопортал.

Список литературы

1. Ma Y., Wu H., Wang L., Huang B., Ranjan R., Zomaya A., Jie W. Remote sensing big data computing: Challenges and opportunities // Future Gener. Comput. Syst. 2015. Vol. 51. P. 47–60. DOI: 10.1016/j.future.2014.10.029.

2. Hesselbarth M.H., Nowosad J., Signer J., Graham L.J. Open-source Tools in R for Landscape Ecology // Curr. Landsc. Ecol. Rep. 2021. Vol. 6. P. 97–111. DOI: 10.1007/s40823-021-00067-y.

3. Slater L. J., Thirel G., Harrigan S., Delaigue O., Hurley A., Khouakhi A., Prosdocimi I., Vitolo C., Smith K. Using R in hydrology: a review of recent developments and future directions // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2019. Vol. 23. P. 2939–2963. DOI: 10.5194/hess-23-2939-2019.

4. Lai J., Lortie C. J., Muenchen R. A., Yang J., Ma K. Evaluating the Popularity of R in Ecology. Ecosphere 2019. № 10(1). e02567 DOI: 10.1002/ecs2.2567.

5. Anderson E., Chlumsky R., McCaffrey D., Trubilowicz J., Shook K. R., Whitfield P. H. R-functions for Canadian hydrologists: a Canada-wide collaboration. Can. Water Resour. J. / Rev. Can. des ressources hydriques. 2019. Vol. 44(1). 108–112. DOI: 10.1080/07011784.2018.1492884.

6. Bivand R. S. Progress in the R ecosystem for representing and handling spatial data // J. Geogr. Syst. 2021. Vol. 23. P. 515–546. DOI: 10.1007/s10109-020-00336-0.

7. R Programming and Its Applications in Water Resources Management / ed. by Naveena K., K. Ch. V. Naga Kumar, Surendran U. New Delhi: New India Publishing Agency, 2024. 250 p. DOI: 10.59317/9789358873429.

8. Kaya E., Agca M., Adıgüzel F., Çetin M. Spatial data analysis with R programming for environment // Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal. 2019. Vol. 25. № 6. P. 1521–1530. DOI: 10.1080/10807039.2018.1470896.

9. Kobal M., Ceglar A., Eler K., Medved-Cvikl B., Honzak L., Simončič P., Hladnik D. On the use of R programming language in the analyses of spatial data // Acta Silvae et Ligni. 2013. Vol. 102. P. 55–62. DOI: 10.20315/ASetL.102.5.

10. Широкова В. А., Юрова Ю. Д. Комплексная геоэкологическая оценка водосборной территории р. Осетр в условиях антропогенного воздействия // Региональные геосистемы. 2022. Вып. 45(4). С. 601-616. DOI: 10.52575/2712-7443-2021-45-4-601-616

11. Буковский М. Е., Коломейцева Н. Н., Решетов И. С. Геоэкологическая оценка состояния реки Вороны в среднем течении // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2013. Т. 18. № 1. С. 440-444. EDN: PWMIJD.

12. Штырова В. К., Нестерова О. Е. Картографическая модель геоэкологической оценки территории // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2009. Т. 9. № 2. С. 23-27. EDN: MEHCFT.

13. Карпенко Н. П. Оценка геоэкологической ситуации речных бассейнов на основе атрибутивных показателей и обобщенных геоэкологических рисков // Природообустройство. 2018. № 2. С. 15-22. DOI: 10.26897/1997-6011/2018-2-15-22.

14. Сысоева П. С. Оценка геоэкологической ситуации в бассейне реки Днепр // Вестник молодежной науки. 2017. № 1(8). С. 14. EDN: YNZXLD.

15. Белов Н. С. Геоэкологическая ситуация в речных бассейнах Калининградской области // Природообустройство. 2011. № 3. С. 67-73. EDN: OFXGXN.

16. Табунщик В. А., Горбунов Р. В. Оценка геоэкологического состояния бассейнов рек северо-западного склона Крымских гор. Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2025. 224 с. ISBN: 978-5-907983-04-5.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Проекта Российской Федерации в лице Минобрнауки России: грант в форме субсидий на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технического развития (Соглашение № 075-15-2024-644).

Financing: This work was supported by the Russian Federation Ministry of Science and Higher Education (Grant Agreement No. 075-15-2024-644) under the program for large scientific projects in priority areas of scientific and technological development.

УДК 004.89:378.147
DOI

CC BY 4.0

МЕХАНИЗМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРЕДМЕТНОЙ ПОДГОТОВКОЙ СТУДЕНТОВ МЛАДШИХ КУРСОВ

Тарасова Л. С. ORCID ID 0000-0003-1819-4723,
Столбова И. Д. ORCID ID 0000-0002-0546-9428

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Российская Федерация, e-mail: liebe_perm@mail.ru

Традиционные системы управления обучением ориентированы преимущественно на регистрацию результатов промежуточной аттестации и не обеспечивают поддержку управленческих решений в режиме реального времени. В свою очередь, трансформация высшего образования обусловливает необходимость разработки новых механизмов управления предметной подготовкой студентов, обеспечивающих оперативное выявление академических рисков и своевременную корректировку образовательного процесса. Целью исследования является разработка механизмов интеллектуального управления предметной подготовкой студентов младших курсов на основе непрерывного анализа образовательных данных, адаптивного маршрута освоения дисциплины и математической модели управления состоянием обучающегося. Методологическую основу исследования составляют системный и кибернетический подходы, методы Learning Analytics и Educational Data Mining, методы интеллектуального анализа образовательных данных, математического моделирования, методы наблюдательного сравнительного исследования и статистического анализа результатов обучения. Предметная подготовка формализована как организационная система с обратной связью, в которой состояние обучающегося описывается многомерным вектором образовательных показателей. В исследовании представлена математическая модель адаптивного управления обучением, которая анализирует цифровые следы студентов, оценивает их фактический уровень освоения материала и позволяет формировать оценку академического риска на основе текущего состояния и динамики образовательных показателей. Научная новизна работы заключается в разработке механизмов интеллектуального управления предметной подготовкой: система не только непрерывно мониторит состояние обучающихся, но и автоматически формирует конкретные корректирующие меры, превращая пассивную аналитику в активное управление образовательным процессом. Практическая апробация разработанной модели выполнена на примере геометро-графической подготовки студентов первого курса технического университета. В период апробации в 2024–2025 и 2025–2026 учебных годах наблюдалось увеличение доли студентов, освоивших дисциплину без академической задолженности, с 72,51 до 76,1 %. С учетом наблюдательного характера исследования выявленная динамика рассматривается как ассоциация с комплексом проведенных мероприятий и не интерпретируется как доказанный причинный эффект интеллектуальной системы управления.

Ключевые слова: адаптивное управление обучением, Learning Analytics (учебная аналитика), Educational Data Mining (интеллектуальный анализ образовательных данных), процессный подход, предиктивное управление, аналитические дашборды

INTELLIGENT MANAGEMENT MECHANISMS FOR SUBJECT-SPECIFIC LEARNING AMONG JUNIOR UNIVERSITY STUDENTS

Tarasova L. S. ORCID ID 0000-0003-1819-4723,
Stolbova I. D. ORCID ID 0000-0002-0546-9428

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Perm National Research Polytechnic University", Perm, Russian Federation, e-mail: liebe_perm@mail.ru

Traditional learning management systems are primarily focused on recording the results of interim assessments and do not provide support for real-time management decisions. In turn, the transformation of higher education necessitates the development of new mechanisms for managing students' subject-specific training, ensuring the prompt identification of academic risks and the timely adjustment of the educational process. The aim of the study is to develop mechanisms for intelligent management of the subject-specific training of first-year students based on continuous analysis of educational data, an adaptive route for mastering the discipline, and a mathematical model for managing the student's learning state. The methodological basis of the study consists of systemic and cybernetic approaches, as well as Learning Analytics and Educational Data Mining methods, methods of intellectual analysis of educational data, mathematical modeling, an observational comparative study and statistical analysis of learning outcomes. Subject-specific training is formalized as an organizational system with feedback, in which the student's learning state is described by a multidimensional vector of educational indicators. The study presents a mathematical model of adaptive learning management that analyzes students' digital footprints, assesses their actual level of material mastery, and makes it possible to identify academic risk based on current educational indicators and their dynamics. The scientific novelty of the work lies in the creation of an intelligent management system for subject-specific training: the system not only continuously monitors the students' learning state but also automatically generates specific corrective measures, transforming passive analytics into active management of the educational process. The practical testing of the developed model was carried out using the example of geometro-graphic training for first-year students at a technical university. During the testing period in the 2024/2025 and 2025/2026 academic years, there was an increase in the share of students who completed the discipline without academic debt, from 72.51 to 76.1 %. Given the observational nature of the study, the observed dynamics are considered to be associated with the set of measures implemented and are not interpreted as a proven causal effect of the intelligent management system.

Keywords: adaptive learning management, Learning Analytics, Educational Data Mining, process representation, predictive management, analytical dashboards

Введение

В современных условиях функционирования высшей школы как сложной организационной системы эффективность образовательного процесса напрямую зависит от качества информационного обеспечения управленческих решений. Существующие системы управления предметной подготовкой часто опираются на ретроспективные данные, что не позволяет осуществлять оперативное вмешательство в процесс обучения. Трансформация высшего образования в условиях цифровизации требует перехода от традиционных методов администрирования к интеллектуальному управлению на основе данных (Data-Driven Management) [1]. Внедрение методов интеллектуального анализа данных и технологий прогностического моделирования позволяет перейти к управлению в реальном времени [2, 3]. Особую сложность представляет управление предметной подготовкой студентов младших курсов, где закладывается фундамент профессиональных компетенций [4]. Сложность управления предметным обучением на данном этапе обусловлена тремя критическими факторами:

1. Высокая дисперсия входных характеристик (неоднородность системы). В отличие от старших курсов, «входной поток» (абитуриенты) обладает максимальным разбросом по уровню базовой подготовки, когнитивным способностям и мотивации. С точки зрения теории управления мы имеем дело с объектом, параметры которого на старте неизвестны, что исключает применение унифицированных (жестких) стратегий управления.

2. Нестационарность процесса (адаптационный период). Студенты младших курсов находятся в фазе перехода от школьной системы к вузовской. В этот период динамические характеристики объекта управления (скорость усвоения материала, реакция на нагрузку) постоянно меняются. Система находится в переходном режиме, где стандартные управляющие воздействия могут приводить к непредсказуемым отклонениям.

3. Критичность «запоздалого управления». В дисциплинах типа геометро-графической подготовки учебный процесс носит кумулятивный характер: пробел в первой теме делает невозможным выполнение последующих заданий. Традиционный цикл управления (сессионный контроль) здесь неэффективен, так как обратная связь поступает слишком поздно (оценка постфактум). Требуется *упреждающее управление* (feed-forward control).

Внедрение современных технологий Learning Analytics (LA) и Educational Data Mining (EDM) [5] позволяет не только фиксировать результаты, но и прогнозировать академические риски, обеспечивая своевременную коррекцию учебного процесса. Learning Analytics («Аналитика обучения») – это измерение, сбор, анализ и представление данных о студентах и контекстах, в которых происходит обучение, с целью понимания и оптимизации процессов подготовки, а также среды, в которой они протекают. Educational Data Mining поставляет предиктивные метрики для принятия решений, определяющие текущие параметры системы (уровень знаний, скорость освоения программы), требуемых для формирования управляющих воздействий [6].

В силу вышесказанного разработка систем адаптивного управления, интегрированных в цифровую среду предметного обучения, является актуальной научно-технической задачей, направленной на минимизацию рисков академической неуспеваемости и оптимизацию распределения ресурсов образовательной системы [7].

Цель исследования – изучение эффективных механизмов сопровождения предметной подготовки студентов младших курсов на примере геометро-графической подготовки в технических вузах.

Материалы и методы исследования

Для реализации поставленной цели используется комплексный научно-методический инструментарий, интегрирующий классические педагогические парадигмы с современными технологиями интеллектуального анализа данных и управления сложными системами [8].

Методология исследования формируется на пересечении системного и кибернетического подходов. Первый позволяет интерпретировать предметную геометро-графическую подготовку как целостный образовательный комплекс, включающий целевой, содержательный и контрольно-оценочный компоненты. Второй подход, в свою очередь, обосновывает применение адаптивных механизмов управления, где процесс обучения моделируется как система с активной обратной связью, подстраивающаяся под текущее состояние субъекта. В качестве прикладного вектора задается деятельностный подход, который конкретизирует механизмы формирования геометро-графических компетенций в условиях работы с высокотехнологичными инструментами инженерного проектирования.

Нормативно-методическую базу исследования составили федеральные образовательные стандарты и актуальные рабочие программы дисциплин «Начертательная геометрия» и «Инженерная и компьютерная

графика». Эмпирический фундамент работы опирается на массивы цифрового следа обучающихся. Источниками данных являются логи активности в системах управления обучением Learning Management System (LMS Moodle), протоколы выполнения работ в средах автоматизированного проектирования (NanoCAD, КОМПАС-3D) и результаты промежуточного тестирования, формирующие эмпирическую базу для интеллектуального анализа [9].

Использование цифровых следов обучающихся в технологиях LA требует учета этических аспектов сбора, обработки и интерпретации образовательных данных. К числу основных рисков относятся нарушение конфиденциальности, недостаточная прозрачность целей и способов использования данных, возможность ошибочной категоризации обучающихся и алгоритмической предвзятости. В связи с этим аналитические показатели и оценки академического риска целесообразно рассматривать как информационную основу для поддержки управленческих решений, а не как самостоятельное основание для автоматического принятия значимых решений в отношении обучающегося [10].

Поскольку исследование проводится в рамках образовательного процесса, в работе применяются классические педагогические методы исследования: обзор и системный анализ научно-педагогической и технической литературы; педагогическое наблюдение, анкетирование и тестирование студентов младших курсов. Финальным этапом проведено наблюдательное сравнительное исследование двух последовательных учебных периодов.

Также применен многоступенчатый комплекс методов и специфических интеллектуальных инструментов [11, 8]:

– *Метод проектирования образовательной траектории:* разработка интеллектуальной дорожной карты предметной подготовки. Данный механизм позволяет визуализировать логику освоения дисциплины и динамически корректировать темп прохождения модулей на основе предиктивной аналитики, учитывающей базовый уровень и текущие достижения студента.

– *Методы комплексного мониторинга:* внедрение системы контроля посещаемости с интегрированным анализом понимания учебного материала. В отличие от формальной фиксации присутствия, данный механизм использует методы оперативного тестирования и анализа активности в цифровой среде, что позволяет сопоставлять факт нахождения студента на занятии с уровнем усвоения конкретных дидактических единиц.

– *Методы визуализации и когнитивной графики:* автоматизированный сбор метрик в интерактивные дашборды. Интеллектуальные панели управления аккумулируют данные о скорости выполнения графических заданий, количестве допущенных ошибок и времени работы в системе автоматизированного проектирования (САПР/англ. Computer-Aided Design, CAD). Это обеспечивает преподавателю возможность оперативного вмешательства (тьюторской поддержки), а студенту – наглядную рефлексию собственных дефицитов.

– *Методы интеллектуального анализа* (Data Mining): использование алгоритмов классификации и кластеризации для сегментации студентов по группам риска, а также методов прогнозной аналитики для выявления корреляции между посещаемостью, активностью в дорожной карте и итоговой успеваемостью.

В функциональном описании модели используется процессное представление предметной подготовки как совокупности взаимосвязанных этапов с определенными входами, выходами, контрольными точками и распределением ролей между субъектами образовательного взаимодействия (преподавателем, тьютором и обучающимся). Применимость процессного подхода к образовательной деятельности вуза рассмотрена Н. Н. Матушкиным, С. И. Пахомовым и И. Д. Столбовой [12]. При этом базовыми методологическими основаниями настоящего исследования остаются системный и кибернетический подходы. Сочетание процессного представления с интеллектуальными механизмами обеспечивает реализацию принципа адаптивного сопровождения, предполагающего оперативное подключение корректирующих инструментов на критических этапах освоения дисциплины.

Практическая реализация указанной методологической позиции обеспечивается следующими механизмами:

Процессная декомпозиция учебного курса. Содержание геометро-графической подготовки структурируется в виде последовательности дидактических этапов. Для каждого этапа задаются контрольные точки и пороговые значения диагностических индикаторов; при отклонении текущих показателей от нормативных значений система инициирует соответствующее управляющее воздействие.

Событийно-обусловленное (триггерное) управление. На основе непрерывного сбора и анализа образовательных данных формируется алгоритм автоматизированного реагирования. В случае фиксации аномального

снижения динамики освоения учебной траектории или недостаточного уровня усвоения содержания (по результатам микротестов) активируется адресный механизм поддержки: обучающемуся предоставляются дифференцированные учебные материалы, а преподавателю направляется уведомление о целесообразности проведения индивидуальной консультативной коррекции.

Динамическая маршрутизация. В зависимости от текущих показателей успеваемости и вовлеченности обучающихся механизм сопровождения динамически адаптируется – происходит переключение между различными сценариями поддержки на основе адаптивного подхода. Это позволяет избежать накопления существенных учебных дефицитов, типичных для младших курсов, и трансформировать линейное обучение в адаптивный управляемый процесс.

Сбор и агрегация метрик в реальном времени. Процессная модель связывает посещаемость, активность в САПР и результаты тестирований в единый поток данных. Это дает возможность не просто констатировать факт неуспеваемости, а диагностировать «узкие места» в процессе передачи знаний и оперативно корректировать методику преподавания конкретных тем.

Такая организация учебного процесса превращает предметную подготовку из статичного набора лекций в *гибкую систему интеллектуального сопровождения*, где каждый инструмент активируется ровно в тот момент, когда это требуется для поддержания заданной траектории развития студента [8, 13]. Сочетание данных методов и материалов позволяет обеспечить объективность выводов и создать масштабируемую модель управления, применимую для повышения качества фундаментальной подготовки будущих инженеров.

Результаты исследования и их обсуждение

Электронная информационно-образовательная среда

Сложность управления предметной подготовкой на младших курсах обусловлена необходимостью идентификации нормативных параметров результатов обучения в реальном времени. Особую проблему создает то, что младшие курсы представляют собой масштабный и крайне неоднородный поток студентов с существенно различающимся уровнем начальной подготовки. В условиях высокой размерности факторов (от баллов ЕГЭ до активности в *электронной информационно-образовательной среде* – ЭИОС) и нестационарности психолого-педагогических характеристик и выраженной гетерогенности аудитории классические методы административного мониторинга не обеспечивают необходимой точности прогноза. Это требует разработки *интеллектуальных алгоритмов*, способных выявлять скрытые закономерности в поведении студенческого сообщества на ранних этапах и формировать корректирующие воздействия до момента наступления критических состояний (отчисления или академической неуспеваемости).

Существующие ЭИОС вузов в основном выполняют функцию хранения контента и фиксации итоговых оценок, однако их потенциал как *источника данных для предиктивного анализа* используется не в полной мере. Создание интеллектуальной надстройки над ЭИОС позволяет трансформировать пассивное накопление информации в активный контур управления качеством предметной подготовки [14].

Чаще всего в качестве инструмента принятия решений при управлении процессом обучения ЭИОС выполняет роль измерительного комплекса, который поставляет «сырые» данные для интеллектуального анализа. К функциональным возможностям ЭИОС в системе интеллектуального управления, например геометро-графической подготовки студентов, относятся:

1. Генерация «цифровых следов» (Digital Footprints). ЭИОС фиксирует каждое действие студента (время входа, длительность просмотра материалов, количество попыток в тестах, скорость выполнения графических заданий). В терминах управления – это *логирование состояния системы* с высокой дискретностью [15].

2. ЭИОС как канал обратной связи. Традиционное управление (через деканат) имеет огромную инерцию. ЭИОС позволяет реализовать *малоинерционную обратную связь*: студент мгновенно получает результат теста, а система управления – сигнал об отклонении от заданной траектории.

3. Интеграционная шина: *ЭИОС выступает как база, к которой «подключается»* аналитический модуль. Система должна «забирать» данные из ЭИОС (через API или SQL-запросы) и «отдавать» обратно готовые решения (например, уведомления преподавателю или рекомендации студенту).

Например, ЭИОС позволяет отследить специфические параметры для *геометро-графической подготовки,* такие как время работы над чертежом (если используются облачные САПР-системы), количество скачиваний методических указаний перед выполнением графической работы, корреляция между временем изучения теории в ЭИОС и качеством финального чертежа.

Таким образом, ЭИОС трансформируется из пассивного хранилища данных в *динамический измерительный канал* в структуре организационной системы предметной подготовки. Агрегирование указанных параметров позволяет сформировать многомерный вектор состояния объекта управления (студента или учебной группы). Наличие такого детализированного потока данных в реальном времени создает необходимую базу для применения вышеуказанных технологий *LA* и *EDM*. Указанный подход обеспечивает смену парадигмы оценки: от экспертно-интуитивных суждений к формализованной оценке состояния и академического риска освоения дисциплины. Итогом такой интеграции является создание *замкнутого контура управления*, в котором результаты интеллектуального анализа используются для формирования рекомендаций по управляющим воздействиям. Они варьируются от точечной адаптации образовательного контента до активации научно обоснованных сценариев оптимизации всего учебного процесса.

Процессная модель замкнутого цикла адаптивного управления предметной подготовкой

Практическая реализация процесса предметного обучения обусловлена необходимостью применения интеллектуальных адаптивных инструментов. Функциональная архитектура должна строго соответствовать предусмотренной концептуальной модели управления и учитывать особенности контингента студентов младших курсов обучения. На рис. 1 представлена процессная модель адаптивного управления предметным обучением, разработанная на базе ранее предложенного подхода [12] и существенно переработанная в ходе настоящего исследования. В связи с внесенными изменениями модель рассматривается как авторская разработка, имеющая спиралевидный характер и замкнутые этапы освоения программы с опорой на ключевые интеллектуальные инструменты, обеспечивающие эффективность образовательного процесса и качественное освоение предметной области. Результаты текущего мониторинга и оперативной диагностики используются для актуализации состояния обучающегося и корректировки дорожной карты. После реализации выбранного воздействия выполняется повторное измерение показателей, что обеспечивает замыкание контура обратной связи.

Для студентов младших курсов, которые часто сталкиваются с проблемой адаптации и дефицитом навыков самоорганизации [16], адаптивные инструменты должны выполнять следующие ключевые функции:

1. Диагностика и адаптация: автоматическое определение уровня знаний на входе и в текущий момент времени с формированием *адаптивного маршрута освоения дисциплины.*

2. Непрерывная обратная связь *с оперативным разбором ошибок студента и* предоставлением персонализированной информационной поддержки.



Рис. 1. Процессная модель замкнутого цикла управления предметной подготовкой
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Предлагаемые механизмы: дорожная карта предметной подготовки; контроль посещаемости учебных занятий с оперативным анализом понимания учебного материала и постоянный сбор информации по текущим нормативным показателям на основе дашбордов – согласуются с архитектурой системы *предиктивного управления* обучением [17]. *Интерактивная дорожная карта* является динамическим навигатором по учебному контенту, она визуализирует связи между темами и показывает студенту его *прогресс в реальном времени. Автоматизированный контроль посещаемости с Flash-диагностикой* вместо простой переклички предлагает входной или выходной мини-тест (2–3 вопроса) через QR-код. Короткий визуальный тест (30–60 с) в рамках геометро-графической подготовки может предложить типовые задачи, например:

– Сопоставить 3D-модель с ее проекцией.

– Найти недостающую линию на чертеже.

– Определить тип поверхности по ее определителю.

Аналитика позволяет мгновенно анализировать ответы, выявить затруднения в освоении учебного материала конкретного студента, а также на текущий момент аналитический модуль формирует для преподавателя «тепловую карту» понимания аудитории в целом. Если 70 % группы не поняли концепт, преподаватель может скорректировать лекцию прямо на месте.

Управленческий дашборд агрегирует данные для кафедры, выявляет зоны академических рисков студентов, у которых сочетание пропусков и низких баллов за экспресс-контроль сигнализирует о *высоком риске неуспеваемости*. Такой *замкнутый цикл* управления (от планирования до коррекции) превращает формализованную отчетность в инструмент оперативного влияния на качество предметного обучения.

Концептуальная модель управления предметным обучением

Функционирование современной образовательной среды как сложной организационной системы требует перехода к *адаптивному управлению*, способному гибко реагировать на динамику изменения состояния объекта. Адаптивность в данном контексте подразумевает наличие механизмов саморегулирования, где управляющие воздействия корректируются на основе непрерывного анализа рассогласования между текущими и целевыми показателями подготовки [18]. *Адаптивная структура управления* – это гибкая система организации, способная быстро приспосабливаться к изменениям внешней среды за счет отсутствия строгой регламентации, децентрализации принятия решений и активных коммуникаций [19].

На рис. 2 приведена адаптивная структура системы управления предметной подготовкой. Во внешней структуре управления учебно-методическое управление (УМУ) вуза и выпускающие кафедры с учетом мнения работодателей определяют целевые установки, составляют учебные планы образовательной программы подготовки специалистов определенного направления и вырабатывают основные нормативы предметного обучения, определяющие требуемое качество подготовки будущих выпускников. Центральной частью схемы является блок инструментально-методической поддержки предметной подготовки, обеспечивающий актуальное воздействие на обучаемых в определенный момент времени и в соответствии с учебной программой дисциплины.

Взаимодействие между блоками иллюстрируется направлениями передачи управляющей и измерительной информации. Целевые установки во внешнем контуре преобразуются в предметные нормативы, которые затем поступают во внутренний контур управления. Внутренний контур, в свою очередь, формирует учебно-методическое воздействие на образовательную среду.

Блок мониторинга собирает фактические образовательные показатели и передает их в адаптер. Адаптер анализирует рассогласование между нормативным и фактическим состояниями и на этой основе формирует рекомендации по выбору управляющего воздействия. При систематических отклонениях данные также используются для корректировки предметных нормативов и совершенствования организации учебного процесса.

При реализации учебного процесса осуществляется сбор метрических характеристик, данные по которым аккумулируются во внешнем блоке мониторинга. Текущее состояние освоения предметной подготовки в виде очередного учебного результата описывается параметром Y_{fact}, который сравнивается с требуемым эталонным результатом Y_{norm}. В случае недопустимого отклонения в адаптере системы предлагается определенное управляющее воздействие U, предусматривающее дополнительные коррекционные действия по освоению учебного материала.

По мере необходимости при систематических отклонениях с учетом собранной информации происходит корректировка программы предметной подготовки в целом и инструментария обучения в частности.

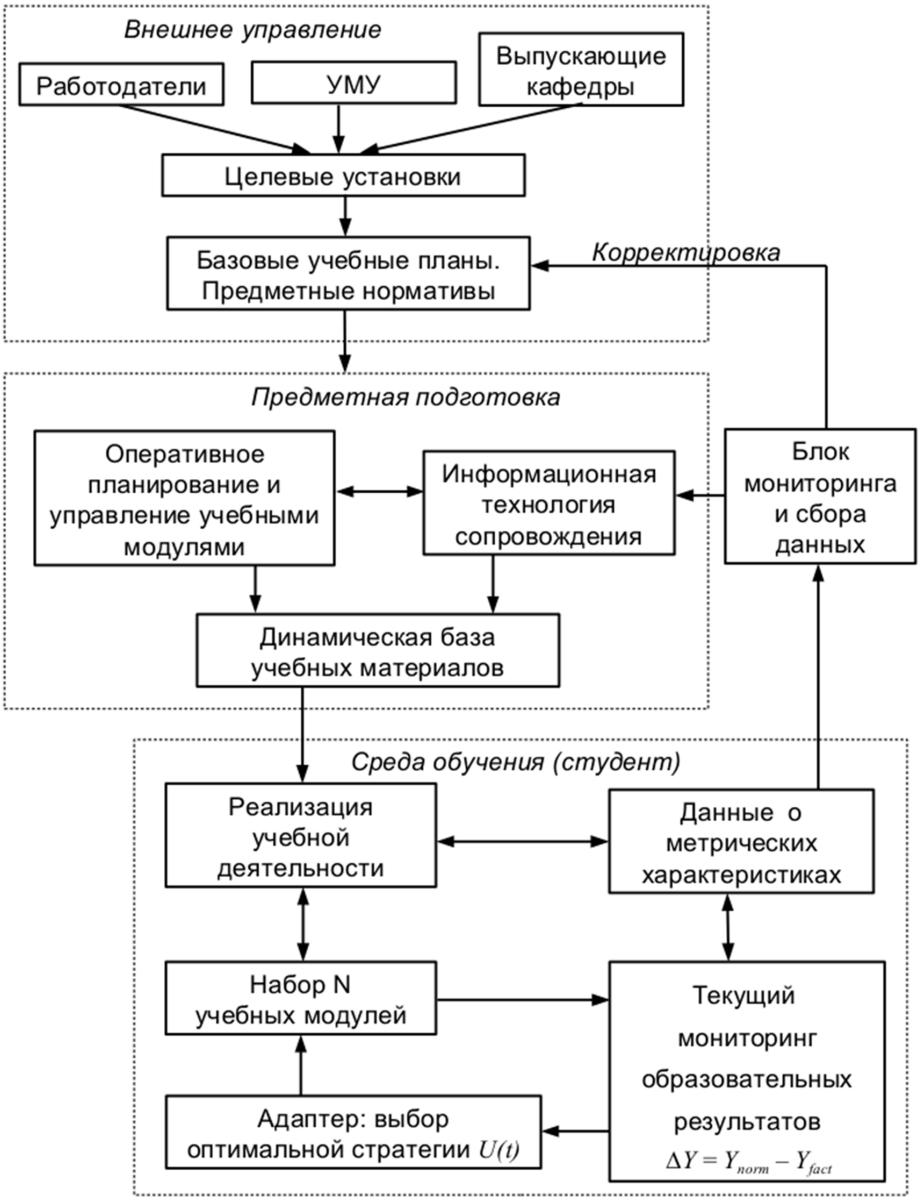


Рис. 2. Общая структура системы адаптивного управления предметной подготовкой
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Таким образом, внешний контур управления (УМУ, кафедры, работодатели) – задает установки (setpoints) системы. Внутренний контур (блок поддержки) реализует оперативное управление. Обратная связь (мониторинг) обеспечивает идентификацию параметров и позволяет системе реализовать принцип адаптации (самонастройки) под конкретного студента и студенческий поток в целом.

Формализуем общепедагогическое описание системы адаптивного управления в виде математической задачи. Математически задачу адаптивного управления предметной подготовкой можно представить как задачу *минимизации отклонения* текущего состояния системы от заданных нормативных показателей.

Пусть $Y_{norm}(t)$ – вектор нормативных значений (целевых компетенций и результатов обучения), установленных учебным планом и требованиями работодателей на момент времени t. Текущее состояние подготовки конкретного студента или группы описывается вектором фактических метрик $Y_{fact}(t)$, полученных из блока мониторинга ЭИОС. Отметим, что под t понимается дискретное время с шагом дискретизации в одну неделю, то есть $t = 0,1,2,3,\ldots,18$ в соответствии с количеством учебных недель в семестре.

Тогда цель управления заключается в нахождении такого вектора управляющих воздействий $U(t)$ (корректировка траектории, изменение интенсивности учебного материала, дополнительные консультации), при котором функционал ошибки J стремится к минимуму:

$$J = \sum_{t=0}^{T} \left(Y_{norm}(t) - Y_{fact}(t, U(t)) \right)^2 \Delta t \to \min \quad (1)$$

при соблюдении ресурсных ограничений:

$$G(U) \le C, \quad (2)$$

где T – период обучения (семестр);

$G(U)$ – затраты ресурсов (временных, кадровых, вычислительных);

C – предельно допустимый объем ресурсов организационной системы.

Здесь в качестве ресурсных ограничений выступают: количество попыток контрольного тестирования, количество консультаций преподавателя, количество практических заданий и лабораторных работ, время работы в САПР-системе и т. д.

В данной модели блок интеллектуального анализа данных (LA) выступает в роли *идентификатора*, оценивающего текущее значение Y_{fact}, а аналитический дашборд [20] визуализирует величину рассогласования

$$\Delta Y = Y_{norm} - Y_{fact}(t, U),$$

предоставляя лицу, принимающему решения, основу для выбора оптимальной стратегии $U(t)$.

В рамках настоящего исследования состояние обучающегося представляется вектором образовательных показателей $Y_{norm}(t)$ и $Y_{fact}(t, U)$ имеет вид

$$Y_{norm}(t) = \left(y_1(t), y_2(t), \ldots y_5(t) \right),$$

где $y_1(t)$ – уровень освоения учебного материала (балл к моменту t);

$y_2(t)$ – посещаемость занятий (% за неделю);

$y_3(t)$ – активность в электронной образовательной среде (минут за неделю);

$y_4(t)$ – интенсивность работы в САПР-системах (минут за неделю);

$y_5(t)$ – результаты текущего контроля (балл на текущем шаге).

Продолжительность активности в LMS и САПР учитывается в минутах за установленное окно наблюдения и используется как косвенный показатель интенсивности учебной деятельности в освоении графических инструментов.

Поскольку показатели имеют различную размерность, осуществляется их приведение к единой безразмерной шкале:

$$\bar{y}_i(t) = \frac{y_i(t) - y_i^{min}}{y_i^{max} - y_i^{min}}, i = 1, \ldots, 5, \quad (3)$$

где $y_i(t)$ – текущее значение показателей;

y_i^{min}, y_i^{max} – минимальное и максимальное значения показателя.

После нормирования все параметры принимают значения

$$0 \le \bar{y}_i(t) \le 1, i = 1, \ldots 5. \quad (4)$$

Для интегральной оценки состояния обучающегося вводится показатель успешности:

$$K(t) = \sum_{i=1}^{5} w_i \bar{y}_i(t), \quad (5)$$

где w_i – заданные веса, $w_i > 0$;

$$\sum_{i=1}^{5} w_i = 1.$$

Значения весовых коэффициентов сформированы авторами на основе содержательной значимости показателей для геометро-графической подготовки и обсуждены экспертной группой из 12 преподавателей-практиков, ведущих дисциплины геометро-графического цикла. Коэффициенты используются в расчетных сценариях и требуют дальнейшей эмпирической валидации. Указанные коэффициенты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Веса показателей учебных достижений

№	Показатель	Вес
		Очная
1.	Успеваемость	0,35
2.	Посещаемость	0,20
3.	Активность в LMS	0,15
4.	Работа в САПР-системах	0,20
5.	Экспресс-контроль	0,10

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Для формирования управляющего воздействия недостаточно учитывать только текущее состояние обучающегося. В системе адаптивного управления дополнительно учитывается направление изменения состояния во времени. Поскольку наблюдение осуществляется в дискретные моменты времени, для каждого обучающегося на каждом шаге рассчитывается текущий вектор показателей. Динамика состояния определяется сравнением текущего состояния с состоянием на предыдущем шаге и характеризует направление изменения состояния

обучающегося. Положительная динамика соответствует приближению фактических показателей к нормативным значениям, отрицательная – увеличению рассогласования, а отсутствие существенного изменения характеризует устойчивое состояние.

Таким образом, формирование управляющего воздействия осуществляется с учетом не только текущего уровня предметной подготовки, но и динамики его изменения. Это позволяет различать обучающихся с близкими текущими значениями показателей, но различными тенденциями освоения дисциплины. При равном текущем уровне подготовки приоритет корректирующего воздействия повышается для обучающегося с отрицательной динамикой и может быть снижен при устойчивой положительной динамике.

В качестве управляющих воздействий в работе используется следующий вектор:

$$U(t) = \left(u_1(t), u_2(t), \ldots, u_5(t)\right), \quad (6)$$

где $u_1(t)$ – назначить консультацию (1 – да; 0 – нет);
$u_2(t)$ – назначение дополнительного учебного материала (1 – да; 0 – нет);
$u_3(t)$ – дополнительное автоматическое тестирование (1 – да; 0 – нет);
$u_4(t)$ – назначить корректирующее практическое задание, в том числе САПР (1 – да, 0 – нет);
$u_5(t)$ – уведомление преподавателя о неуспеваемости студента (1 – да; 0 – нет).

Состав допустимых воздействий сформирован с учетом апробированных в LA подходов к адресным педагогическим вмешательствам, включающих консультационную поддержку, предоставление персонализированных образовательных ресурсов, дополнительные диагностические и практические действия [21].

Информирование преподавателя о выявленном академическом риске рассматривается отдельно как информационное воздействие на лицо, принимающее решение. Для этого вводится индикатор:

$$u_i(t) \in \{0;1\}, i = 1,\ldots,5; t = 1,\ldots,T, \quad (7)$$

где $u_i(t) = 1$ – система реагирует необходимым управленческим воздействием;

$u_i(t) = 0$ – система сохраняет стандартный режим.

В рамках управления образовательным процессом время t считается дискретным с шагом $\Delta t = 1$ неделя. Каждую неделю обновляются текущие показатели каждого студента и реализуются управляющие воздействия с помощью заданного набора логических правил.

Таблица 2

Расчетные сценарии формирования управляющих воздействий в зависимости от состояния обучающегося

Показатели	Интеграция оценки	Анализ	Управляющее воздействие	Рекомендации
Ситуация 1: Студент регулярно посещал занятия, выполнял работы в САПР				
$\bar{y}_1(8) = 0{,}90$ $\bar{y}_2(8) = 0{,}95$ $\bar{y}_3(8) = 0{,}88$ $\bar{y}_4(8) = 0{,}92$ $\bar{y}_5(8) = 0{,}94$	$K(8) = 0{,}915$	Порог успешного освоения дисциплины принят $K > 0{,}8$	$U(8) = (0,0,0,0,0)$ сохранить стандартный режим	Корректировка методики освоения предметного обучения не требуется
Ситуация 2: Студент испытывает трудности при выполнении графических работ				
$\bar{y}_1(8) = 0{,}75$ $\bar{y}_2(8) = 0{,}90$ $\bar{y}_3(8) = 0{,}84$ $\bar{y}_4(8) = 0{,}35$ $\bar{y}_5(8) = 0{,}78$	$K(8) = 0{,}717$	Общая успеваемость удовлетворительная, однако наблюдается критическое значение $y_4 = 0{,}35$	$U(8) = (0,0,0,1,0)$ Система реагирует необходимым воздействием	− корректирующее практическое задание. Повторная диагностика проводится через неделю
Ситуация 3: Студент систематически не посещает занятия				
$\bar{y}_1(8) = 0{,}42$ $\bar{y}_2(8) = 0{,}38$ $\bar{y}_3(8) = 0{,}30$ $\bar{y}_4(8) = 0{,}27$ $\bar{y}_5(8) = 0{,}36$	$K(8) = 0{,}358$	Интегральный показатель значительно ниже допустимого значения $K < 0{,}50$, следовательно, вероятность академической неуспеваемости	$U(8) = (1,1,1,1,1)$ Система реагирует необходимым воздействием	− назначить консультацию; − назначить корректирующее практическое задание; − назначение дополнительного учебного материала; − дополнительное автоматическое тестирование; уведомление преподавателя о неуспеваемости студента

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Предлагаемая система реализует событийно-обусловленное управление (табл. 2), где приводятся варианты корректирующих воздействий по результатам текущего контроля в зависимости от ситуации, сложившейся у студента в течение первых восьми недель предметного обучения.

Следует отметить, что управление здесь ведется по отклонению от нормативных показателей текущих результатов каждого студента. На каждом шаге дискретизации по времени выбирается такой вектор управления $U(t)$, $t = 1,\ldots,T$ при котором происходит снижение отклонения по критерию (1), значение которого к окончанию семестра должно достигать своего минимума при выполнении студентом рекомендаций на достигнутом множестве ресурсных ограничений.

Представленные расчетные сценарии иллюстрируют логику выбора управляющих воздействий при различных состояниях обучающегося и не являются результатами эмпирической апробации модели. На основе интегральной оценки предметной подготовки, формируемой по совокупности образовательных показателей, система автоматически идентифицирует уровень академического риска и выбирает соответствующее управляющее воздействие: от сохранения стандартной образовательной траектории для успешно обучающихся студентов до назначения индивидуального сопровождения и корректирующих мероприятий для студентов группы риска. Таким образом, представленные сценарии демонстрируют формальную работоспособность правил выбора управляющих воздействий. Проверка их влияния на образовательные результаты выполняется отдельно на эмпирических данных.

Результаты апробации

Апробация предложенной модели проводилась в 2024–2026 гг. в рамках реализации дисциплин геометро-графического цикла «Инженерная геометрия и компьютерная графика» на ряде факультетов при участии 52 учебных групп и 12 профильных преподавателей. Вмешательство осуществлялось в установленные сроки в рамках учебного процесса, при этом процедура аттестации оставалась унифицированной для всех групп. Распределение студентов по группам не осуществлялось исследователем, поэтому анализировались естественно сформированные учебные группы. В исследовании задействован контингент студентов дневной формы обучения: в 2024–2025 учебном году – 1368 чел., в 2025–2026 учебном году – 1204 чел. Критерии включения предполагали освоение указанных дисциплин в рамках основной образовательной программы. Студенты с отсутствующими итоговыми данными включались как имеющие задолженность. В качестве ключевого критерия выступала доля студентов, успешно освоивших дисциплину без академической задолженности; сведения по данному показателю представлены в табл. 3.

Таблица 3

Сводная таблица результатов успеваемости, 2024–2026 учебные годы

Факультет	2024/25, успешно / N	2024/25, %	2025/26, успешно / N	2025/26, %	Δ, п. п.	95 % ДИ для Δ, п. п.	p
Аэрокосмический	186 / 259	71,81	182 / 234	77,78	+5,96	[-1,74; 13,50]	0,129
Горно-нефтяной	278 / 347	80,12	243 / 303	80,20	+0,08	[-6,12; 6,18]	0,979
Механико-технологический	96 / 178	53,93	102 / 159	64,15	+10,22	[-0,30; 20,38]	0,057
Строительный	238 / 294	80,95	206 / 251	82,07	+1,12	[-5,50; 7,59]	0,737
Химико-технологический	82 / 131	62,60	82 / 121	67,77	+5,17	[-6,57; 16,65]	0,389
Электротехнический	112 / 159	70,44	101 / 136	74,26	+3,82	[-6,47; 13,83]	0,465
Сводная по кафедре	992 / 1368	72,51	916 / 1204	76,08	+3,57	[+0,18; +6,93]	0,039

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования. Доли успешно освоивших дисциплину рассчитаны как отношение числа студентов, освоивших дисциплину без академической задолженности, к общей численности обучающихся соответствующего факультета и учебного года. Изменение показателя Δ представлено в процентных пунктах как разность долей в 2025–2026 и 2024–2025 учебных годах. 95 %-е доверительные интервалы для разности двух независимых долей рассчитаны методом Newcombe. Статистическая значимость различий оценивалась с использованием двустороннего z-критерия для двух независимых долей; статистически значимыми считались различия при $p < 0,05$. Сводная доля по кафедре рассчитана как отношение суммарного числа успешно освоивших дисциплину ко всей численности студентов, а не как среднее арифметическое факультетских процентов.

В 2024–2025 учебном году дисциплину без академической задолженности освоили 992 из 1368 студентов (72,51 %), в 2025–2026 учебном году – 916 из 1204 студентов (76,08 %). Таким образом, абсолютное увеличение доли успешно освоивших дисциплину составило 3,57 п. п. 95 %-й доверительный интервал разности долей составил от 0,18 до 6,93 п. п.; различие статистически значимо при двустороннем сравнении двух независимых долей $p = 0{,}039$. Наибольший абсолютный прирост отмечен на механико-технологическом факультете – 10,22 п. п., однако на уровне отдельного факультета различие не достигло принятого уровня статистической значимости $p = 0{,}057$. С учетом наблюдательного дизайна исследования выявленные различия характеризуют динамику показателей между двумя последовательными учебными периодами и сами по себе не доказывают причинный эффект внедренных механизмов интеллектуального управления.

Заключение

В результате проведенного исследования разработана концептуальная модель интеллектуального управления предметной подготовкой студентов младших курсов, рассматривающая образовательный процесс как организационную систему с непрерывной обратной связью и адаптивным механизмом принятия управленческих решений. Интеграция предложенных механизмов: адаптивной дорожной карты, систем экспресс-контроля (Flash-диагностики) и аналитических дашбордов – позволяет трансформировать пассивное накопление знаний в управляемый и прозрачный процесс, что подтверждает необходимость перехода к *замкнутому циклу интеллектуального управления*. В отличие от традиционного подхода, основанного на фиксации итоговых результатов обучения, предложенная модель ориентирована на непрерывный мониторинг текущего состояния обучающихся, оценку и раннее выявление академических рисков, и оперативную корректировку образовательного процесса.

Предложена модель представления состояния обучающегося в виде многомерного вектора образовательных показателей, включающего характеристики успеваемости, посещаемости, активности в электронной информационно-образовательной среде, результатов работы в системах автоматизированного проектирования и текущего контроля знаний. Для обеспечения сопоставимости разнородных образовательных данных разработана процедура их нормирования и вычисления интегрального показателя предметной подготовки, характеризующего текущее состояние объекта управления.

Разработанный математический аппарат дополнен системой событийно-обусловленного управления, реализующей автоматическое формирование управляющих воздействий на основе анализа текущего состояния студента. Использование триггерных правил позволяет своевременно выявлять студентов группы риска, формировать индивидуальные рекомендации, назначать корректирующие мероприятия и адаптировать образовательную траекторию без ожидания результатов промежуточной аттестации. Рассмотренные типовые сценарии подтвердили возможность применения предложенной модели для поддержки принятия управленческих решений в условиях цифровой образовательной среды.

Предложенный алгоритм формирует основу для персонализированной обратной связи студенту и информационной поддержки преподавателя; оценка влияния данных механизмов на мотивационные и психолого-педагогические характеристики требует отдельного исследования.

Практическая апробация разработанной модели проводилась при реализации дисциплин геометро-графического цикла кафедры «Дизайн, графика и начертательная геометрия». В образовательный процесс были последовательно внедрены адаптивная дорожная карта предметной подготовки, система Flash-диагностики, механизмы мониторинга цифровых следов студентов, аналитические дашборды и алгоритмы раннего выявления академических рисков. Анализ результатов показал положительную динамику качества предметной подготовки студентов различных факультетов. Сводная доля студентов, освоивших дисциплину без академической задолженности, увеличилась с 72,51 до 76,08 % по итогам экзаменационных сессий, при этом наибольший абсолютный прирост доли студентов, освоивших дисциплину без академической задолженности, наблюдался на механико-технологическом факультете и составил 10,22 п. п.; при этом различие на уровне отдельного факультета не достигло принятого уровня статистической значимости ($p = 0{,}057$).

Полученные результаты наблюдения предложенной модели демонстрируют возможность ее использования в качестве инструмента оперативного управления предметной подготовкой студентов технического университета. Разработанный подход ориентирован на своевременное выявление

учебных дефицитов и может использоваться для поддержки решений, направленных на снижение академических рисков.

Внедрение данных механизмов формирует цифровую среду, в которой посещаемость и успеваемость анализируются как взаимосвязанные показатели состояния обучающихся. Дальнейшее развитие модели видится в глубокой интеграции автоматизированной диагностики с профессиональным инженерным ПО (САПР-системами) для автоматизированного анализа графических ошибок в реальном времени.

Список литературы

1. Kustitskaya T. A., Esin R. V., Kytmanov A. A., Zykova T. V. Designing an Education Database in a Higher Education Institution for the Data-Driven Management of the Educational Process // Education Sciences. 2023. Vol. 13. Is. 9. P. 947. DOI: 10.3390/educsci13090947. EDN: JNYEKV.

2. Мартынов В. В., Филосова Е. И. Дизайн цифрового двойника человека и классов задач на нем в приложении к подготовке кадров // Эргодизайн. 2022. № 3(17). С. 168-176. DOI: 10.30987/2658-4026-2022-3-168-176. EDN: UBWDLA.

3. Баранников К. А., Сулейманов Р. С., Лесин С. М., Куприянов Р. Б. Аналитика обучения как способ повышения эффективности системы управления образованием // Вестник Московского университета. Серия 20: Педагогическое образование. 2020. № 2. С. 16–33. DOI: 10.51314/2073-2635-2020-2-16-33. EDN: NYLADJ.

4. Арсентьева М. В. Особенности научно-исследовательской работы студентов младших курсов обучения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 11–2. С. 208–210. EDN: YSJJBP.

5. Веряев А. А., Татарникова Г. В. Educational Data Mining и Learning Analytics – направления развития образовательной квалитологии // Преподаватель XXI век. 2016. № 2–1. С. 150–160. EDN: VZXQQX.

6. Никулина Ю. В. Анализ средств Data Mining // Экономика и социум. 2015. № 1–1 (14). С. 133–140. EDN: TSOFPD.

7. Смоленцева Т. Е. Проектирование модульной автоматизированной информационной системы поддержки принятия решений в цифровой образовательной среде // Computational Nanotechnology. 2025. Т. 12. № 3. С. 141–151. DOI: 10.33693/2313-223X-2025-12-3-141-151. EDN: BPDJWS.

8. Конколь М. М., Слесарев М. А., Марьина Е. Д., Черная С. Н. Теоретико-методологические основы проектирования образовательных инструментов на основе искусственного интеллекта // Современные наукоемкие технологии. 2026. № 2. С. 161–171. DOI: 10.17513/snt.40686. EDN: JOGUZG.

9. Столбова И. Д., Александрова Е. П., Крайнова М. Н. Модульная технология управления предметной подготовкой студентов // Университетское управление: практика и анализ. 2012. № 5 (81). С. 88–95. EDN: PJBIDX.

10. Мартынова М. Д. Учебная аналитика в образовательном процессе: куда нас ведут большие данные? // Социальные нормы и практики. 2024. № 4 (14). С. 39–49. DOI: 10.24412/2713-1033-2024-4-39-49. EDN: EFFLVP.

11. Хлопотов М. В., Коцюба И. Ю. Методы интеллектуального анализа данных для мониторинга и диагностики качества образования // Дистанционное и виртуальное обучение. 2014. № 5 (83). С. 18–25. EDN: SAWLVH.

12. Матушкин Н. Н., Пахомов С. И., Столбова И. Д. Формирование компетенций выпускника вуза на основе процессного подхода // Университетское управление: практика и анализ. 2011. № 1 (71). С. 58–63. EDN: NUVNLV.

13. Ржеуцкая С. Ю., Харина М. В. Способ автоматического подбора учебно-тренировочных заданий в информационной среде обучения студентов ИТ-направлений // Открытое образование. 2020. Т. 24. № 2. С. 17–28. DOI: 10.21686/1818-4243-2020-2-17-28. EDN: KIDGAV.

14. Баранников К. А., Лесин С. М. Методология анализа больших данных в образовании (Системно-методологический подход, основанный на анализе образовательных данных, поиска стратегии принятия управленческих и организационно-педагогических решений в образовании) // Народное образование. 2020. № 2 (1479). С. 81–90. EDN: WWCCKR.

15. Логинова А. А., Денисов А. Р. Применение инструментов анализа цифрового следа системы управления обучением в деятельности информационно-аналитического отдела университета // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2025. № 2 (70). С. 76–83. EDN: DUTKJP.

16. Одинцова М. В., Лысенкова А. В., Перминова Е. А. Организация самостоятельной работы студентов на младших курсах как фактор повышения эффективности обучения // Проблемы здоровья и экологии. 2013. № 3 (37). С. 31–34. DOI: 10.51523/2708-6011.2013-10-3-5. EDN: UMCARX.

17. Заруба Н. А. Адаптивный подход в управлении образованием: принципы управления // Профессиональное образование в России и за рубежом. 2012. № 2 (6). С. 75–79. EDN: OYJEXF.

18. Токтарова В. И., Пашкова Ю. А. Предиктивная аналитика в цифровом образовании: анализ и оценка успешности обучения студентов // Сибирский педагогический журнал. 2022. № 1. С. 97–106. DOI: 10.15293/1813-4718.2201.09. EDN: NSPMDR.

19. Пономарев М. А. Направления совершенствования управленческих процессов в организациях высшего образования // Вестник Евразийской науки. 2025. Т. 17. № S1. URL: https://esj.today/PDF/17FAVN125.pdf (дата обращения: 30.08.2026). EDN: NEPMSF.

20. Бенко Е. В., Томин Б. П. Дашборд как эффективный инструмент анализа данных в системе образования // Научно-методическое обеспечение оценки качества образования. 2023. № 1 (17). С. 75–82. EDN: SDBOQT.

21. Arnold K. E., Pistilli M. D. Course signals at Purdue: using learning analytics to increase student success // Proceedings of the 2nd International Conference on Learning Analytics and Knowledge (LAK ‘12). New York : Association for Computing Machinery, 2012. P. 267–270. DOI: 10.1145/2330601.2330666.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 519.65
DOI

CC BY 4.0

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ЧИСЛОВЫХ ЗНАЧЕНИЙ ОПЕРАТОРА ИНТЕРПОЛИРОВАНИЯ ДЛЯ L-МАРКОВСКОГО ПРОЦЕССА С КВАЗИРАЦИОНАЛЬНОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТЬЮ

[1]Титов А. Н., [2]Фадеева Л. Ю. ORCID ID 0009-0005-5344-5227

[1]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет», Казань, Российская Федерация;

[2]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева – КАИ», Казань, Российская Федерация, e-mail: milafadeeva@yandex.ru

Разработана математическая модель оптимального оператора интерполяции L-марковского процесса, базирующаяся на спектральной теории случайных процессов, теории разностных уравнений и теории функций комплексного переменного. На основе теоремы Левинсона – Маккина – Питта обоснована L-марковость исследуемого процесса. Данное свойство обусловлено тем, что знаменатель спектральной плотности представляет собой целую функцию экспоненциального типа. Для численной реализации модели создано программное обеспечение, реализующее алгоритм разложения квазирациональных слагаемых спектральной характеристики интерполирования под знаком стохастического интеграла на простейшие дроби. Это позволило свести исходные интегралы к интегралам от исследуемого L-марковского процесса. Для верификации разработанного подхода на конкретной реализации процесса решена задача восстановления удаленного фрагмента данных внутри заданного интервала. По оставшимся экспериментальным данным построен аппроксимирующий тригонометрический полином, параметры которого интегрированы в алгоритм восстановления. Результаты численного моделирования продемонстрировали воспроизведение утерянных значений и их согласованность с исходными данными вне интервала пропуска. Установлено, что в отличие от классического марковского процесса, где число граничных узлов строго ограничено двумя, для исследуемого L-марковского процесса с квазирациональной спектральной плотностью оператор восстановления представляет собой линейную комбинацию его значений в восьми точках, предшествующих зоне пропуска и следующих за ней. Выявленный эффект обеспечивает детализированное восстановление данных, что делает полученные результаты применимыми в радиофизике, радиотехнике и смежных областях.

Ключевые слова: L-марковский процесс, оператор интерполяции, квазирациональная спектральная плотность, стохастический интеграл, тригонометрический полином, восстановление данных

MATHEMATICAL MODELING AND CALCULATION OF NUMERICAL VALUES OF THE INTERPOLATION OPERATOR FOR L-MARKOV PROCESS WITH QUASIRATIONAL SPECTRAL DENSITY

[1]Titov A. N., [2]Fadeeva L. Yu. ORCID ID 0009-0005-5344-5227

[1]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kazan National Research Technological University", Kazan, Russian Federation;

[2]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI", Kazan, Russian Federation, e-mail: milafadeeva@yandex.ru

A mathematical model of the optimal interpolation operator for an L-Markov process is developed based on the spectral theory of random processes, the theory of difference equations, and complex analysis. The L-Markov property of the process under study is justified using the Levinson–McKean–Pitt theorem. This property follows from the fact that the denominator of the spectral density is an entire function of exponential type. To implement the model numerically, software is developed to decompose the quasirational terms of the interpolation spectral characteristic within the stochastic integral into partial fractions. This allows the original integrals to be expressed as integrals involving the L-Markov process under study. The proposed approach is verified by reconstructing a deleted data segment within a specified interval for a particular realization of the process. An approximating trigonometric polynomial is fitted to the remaining experimental data, and its parameters are incorporated into the reconstruction algorithm. Numerical simulations demonstrate the recovery of the missing values and their consistency with the original data outside the missing interval. It is established that, unlike a classical Markov process, for which the number of boundary nodes is strictly limited to two, the reconstruction operator for the L-Markov process with a quasirational spectral density considered here is a linear combination of process values at eight points located before and after the missing interval. This feature enables detailed data reconstruction, making the results applicable to radiophysics, radio engineering, and related fields.

Keywords: L-Markov process, interpolation operator, quasirational spectral density, stochastic integral, trigonometric polynomial, data reconstruction

Введение

Интерполяция случайных процессов – один из важнейших аспектов обеспечения надежной и точной передачи информации. Развитие науки и техники, компьютерных технологий стимулирует современных ученых разрабатывать новые, более точные подходы к интерполированию случайных процессов [1–3]. Данная технология цифровой обработки сигналов широко применяется при разработке современных радиотехнических устройств [4; 5]. В области обработки цифровых изображений и графической информации интерполяция играет ключевую роль при восстановлении утерянных пикселей, устранении размытия и повышении разрешения видеосигнала. Применение этих методов позволяет формировать более реалистичные и точные визуальные модели объектов [6; 7]. Интерполяционные методы находят обширное применение в задачах радиофизики, например, для обработки сигналов радиолокаторов с синтезированной апертурой (SAR) [8]; для восстановления электромагнитных полей [9].

Впервые задачу интерполяции случайных процессов сформулировал А. Н. Колмогоров [10], который решил ее для произвольных стационарных последовательностей в случае, когда интервал интерполирования $0 < s < T$ состоит из единственной точки. Выделение класса случайных процессов с рациональной спектральной плотностью, для которого возможно построение явных формул интерполяции, связано с работами Дж. Дуба. Соответствующие аналитические выражения были предложены Н. Винером, а их строгое математическое обоснование представлено А. М. Ягломом [11]. В отличие от классических результатов для рациональных спектральных плотностей, в работе [12] авторами получены в явном виде интерполяционные формулы для процессов с квазирациональными спектральными плотностями и представлен пример численного расчета для L-марковского процесса с квазирациональной спектральной плотностью в интервале $1< \tau <2$.

Научная новизна данной работы заключается в разработке комплексного аналитико-численного подхода к синтезу вероятностной модели и расчету оператора интерполирования для L-марковского процесса с другим вариантом квазирациональной спектральной плотности, отличающимся от предыдущей работы авторов, на расширенном интервале, составляющем порядка 30 % выборки, с околонулевыми временными отсчетами. Новый результат, полученный в данной работе, является развитием предыдущего. Практическая реализация метода обеспечивается созданием виртуального прибора в среде LabVIEW для имитационного моделирования процесса и специализированного программного обеспечения на языке Python, реализующего сквозную векторизацию каскадных систем уравнений и автоматический анализ метрик качества модели. Устойчивость и высокая скорость вычислений достигаются за счет разложения подзнаковых квазирациональных слагаемых стохастического интеграла на простейшие дроби, проверки условий аналитичности, а также оптимизации сборки комплексного отклика через численные свертки тригонометрического полинома с ядрами Коши в точках спектральных полюсов.

Цель исследования – синтезирование вероятностной модели и расчет числовых значений оператора интерполирования для L-марковского процесса с квазирациональной спектральной плотностью для расширенного интервала интерполирования с околонулевыми временными отсчетами.

Материалы и методы исследования

Постановка задачи: Найти наилучшее линейное приближение $\xi(t;\tau)$ к случайной величине $\xi(t;\tau)$, $0 < \tau < T$, зная значения процесса $\xi(t)$ на двух полупрямых $s \le t$, $s \ge t + T$.

В основу построения спектральной характеристики интерполирования в настоящей работе положен метод А. М. Яглома [11, с. 36], определяющий достаточные условия того, что некоторая функция комплексного переменного $\Phi_{\tau,T}(\omega)$ является спектральной характеристикой интерполирования. Ключевыми из этих условий являются аналитичность функций $\Phi^{(1)}_{\tau,T}(\omega)$ и $\Phi^{(2)}_{\tau,T}(\omega)$, составляющих функции

$$\Phi_{\tau,T}(\omega) = \Phi^{(1)}_{\tau,T}(\omega) + e^{i\omega T}\Phi^{(2)}_{\tau,T}(\omega) \quad (1)$$

в нижней (H^-) и, соответственно, в верхней (H^+) полуплоскостях (условие А); их возрастание в этих полуплоскостях не быстрее, чем некоторая степень $|\omega|$ (условие Б) и аналитичность функции

$$\Psi_{\tau,T}(\omega) = \left[e^{i\omega T} - \Phi_{\tau,T}(\omega) \right] f(\omega) \quad (2)$$

во всей плоскости (условие В).

В работе [11] на основе сформулированных выше достаточных условий были получены явные формулы интерполяции для процессов с рациональной спектральной плотностью

$$f(\omega) = |A(\omega)|^2 \Big/ |G(\omega)|^2 . \quad (3)$$

В настоящей статье выведена формула оптимального оператора интерполяции для случайного процесса с квазирациональной спектральной плотностью вида

$$S(\omega) = 1\Big/\left|Q_0(\omega) + Q_1(\omega)e^{-i\omega g}\right|^2 = 1\Big/\left|\omega + i + (\omega + 2i)e^{-i\omega g}\right|^2 = 1\Big/\left|G(\omega)\right|^2, \qquad (4)$$

где $Q_0(\omega) = \omega + i$, $Q_1(\omega) = \omega + 2i$ – многочлены первой степени, $g > 0$ – действительное число. Исследуемый стационарный гауссовский процесс обладает спектральной плотностью, заданной выражением (4). Согласно теореме Левинсона – Маккина – Питта, случайный процесс с такой спектральной плотностью относится к классу L-марковских процессов. В работе [13] обосновано, что если $1 / f(\omega)$ – спектр однородного обобщенного поля $\{\xi^*, H^*\}$, то условие L-марковости поля $\{\xi, H\}$ равносильно представлению спектральной плотности $f(\omega)$ в виде:

$$f(\omega) = 1\Big/\sum_{0\le|k|\le m}\omega^k\int e^{i\langle t,\omega\rangle}\mu_k(dt),$$

где μ_k – конечные меры с носителями в $(L–L)$, $\omega^k = \omega_1^{k_1},...,\omega_n^{k_n}$. В частном случае классического марковского процесса $L = \{0\}$, а функция $f(\omega)$ является полиномом. Поскольку знаменатель $G(\omega)$ спектральной плотности (4) представляет собой целую функцию экспоненциального типа, исследуемый процесс гарантированно является L-марковским.

Результаты исследования и их обсуждение

Соотношения между T, g и τ существенно влияют на окончательную формулу спектральной характеристики интерполирования. В связи с этим целесообразно отдельно рассмотреть следующие случаи 1) $T = 2$; $0 < \tau < 1$ и 2) $T = 2$; $1 < \tau < 2$; для обоих вариантов $g = 1$.

Формулы спектральных характеристик экстраполирования и фильтрации, полученные авторами в работах [14; 15] для L-марковских процессов с квазирациональной спектральной плотностью, позволяют предположить, что в случае 1 ($T = 2$; $0 < \tau < 1$) спектральную характеристику интерполирования для процесса со спектральной плотностью (4) следует искать в виде

$$\Phi_{\tau,T}(\omega) = \frac{e^{i\omega\tau}\Gamma(\omega)}{M(\omega)} + \frac{\left|G(\omega)\right|^2\left[W(\omega) + e^{i\omega T}Z(\omega)\right]}{M(\omega)M_0(\omega)} \qquad (5)$$

где $M(\omega)$, $M_0(\omega)$ – неизвестные на данном этапе многочлены, а $W(\omega)$, $\Gamma(\omega)$ и $Z(\omega)$ – целые функции, рассчитываемые таким образом, чтобы для функций $\Phi_{\tau,T}(\omega)$ и $\Psi_{\tau,T}(\omega)$

$$\Psi_{\tau,T}(\omega) = \left\{\frac{e^{i\omega\tau}\left[M(\omega) - \Gamma(\omega)\right]}{M(\omega)} - \frac{\left|G(\omega)\right|^2\left[W(\omega) + e^{i\omega T}Z(\omega)\right]}{M(\omega)M_0(\omega)}\right\}\cdot S(\omega) \qquad (6)$$

выполнялись требования А), Б) и В).

Ключевым из этих требований будет условие В, согласно которому функция $\Psi_{\tau,T}(\omega)$ является целой. Этого можно добиться тогда, когда нули функции $M(\omega) – \Gamma(\omega)$ в формуле (6) будут совпадать с нулями квазиполинома $|G(\omega)|^2$, которых, как известно, бесконечное множество. Очевидно, что это возможно только в том случае, когда

$$M(\omega) - \Gamma(\omega) = \left|G(\omega)\right|^2\cdot\sum\nolimits_k D_k(\omega)e^{i\omega\alpha_k}. \qquad (7)$$

Учитывая требование Б) о возрастании $\Phi^{(1)}_{\tau,T}(\omega)$ и $\Phi^{(2)}_{\tau,T}(\omega)$ в H^- и, соответственно, H^+ не быстрее некоторой степени $|\omega|$, приходим к заключению, что числа α_k при всех целых k должны удовлетворять неравенствам

$$0 \le \tau + \alpha_k \le T. \qquad (8)$$

Для выполнения условия Б) на целые функции $W(\omega)$, $\Gamma(\omega)$ и $Z(\omega)$ из представления (5) спектральной характеристики $\Phi_{\tau,T}(\omega)$ достаточно принять следующие требования:

а) функция $\Gamma(\omega) = M(\omega) - \left|G(\omega)\right|^2\cdot\left[D_0(\omega) + D_1(\omega)e^{i\omega g} + D_2(\omega)e^{-i\omega g}\right]$ содержит только слагаемые с множителями $\exp(i\omega\alpha)$ при $\alpha \le -\tau$ или $\alpha \ge T - \tau$;

б) для целых функций $W(\omega)$ и $Z(\omega)$ имеют место представления: $W(\omega) = W_0(\omega) + W_1(\omega)e^{i\omega g}$; $Z(\omega) = Z_0(\omega) + Z_1(\omega)e^{-i\omega g}$, в которых многочлены $W_0(\omega)$, $W_1(\omega)$, $Z_0(\omega)$, $Z_1(\omega)$, $D_0(\omega)$, $D_1(\omega)$ и $D_2(\omega)$ должны удовлетворять системам линейных разностных уравнений

$$\begin{cases} V(\omega)D_0(\omega)+U(\omega)D_1(\omega)+L(\omega)D_2(\omega)=M(\omega) \\ L(\omega)D_0(\omega)+V(\omega)D_1(\omega)=0 \end{cases}, \tag{9}$$

$$\begin{cases} L(\omega)W_0(\omega)+V(\omega)W_1(\omega)=0 \\ V(\omega)W_0(\omega)+U(\omega)W_1(\omega)=C_1(\omega) \end{cases}, \tag{10}$$

$$\begin{cases} V(\omega)Z_0(\omega)+L(\omega)Z_1(\omega)=C_2(\omega) \\ U(\omega)Z_0(\omega)+V(\omega)Z_1(\omega)=0 \end{cases}. \tag{11}$$

В системах (9)–(11) приняты следующие обозначения:

$$\overline{Q}_0(\omega)Q_1(\omega)=U(\omega),\ Q_0(\omega)\overline{Q}_1(\omega)=L(\omega),\ |Q_0(\omega)|^2+|Q_1(\omega)|^2=V(\omega). \tag{12}$$

Решением системы (9) в классе многочленов являются полиномы:

$$D_0(\omega)=V(\omega);\ D_1(\omega)=-L(\omega);\ D_2(\omega)=U(\omega);\ M(\omega)=V^2(\omega). \tag{13}$$

Решением системы (10) являются рациональные дроби

$$W_0^*(\omega)=\frac{C_1(\omega)V(\omega)}{V^2(\omega)-L(\omega)U(\omega)};\ W_1^*(\omega)=\frac{-L(\omega)C_1(\omega)}{V^2(\omega)-L(\omega)U(\omega)}. \tag{14}$$

Решением системы (11) являются рациональные функции

$$Z_0^*(\omega)=\frac{C_2(\omega)V(\omega)}{V^2(\omega)-L(\omega)U(\omega)};\ \ Z_1^*(\omega)=\frac{-U(\omega)C_2(\omega)}{V^2(\omega)-L(\omega)U(\omega)}, \tag{15}$$

где $C_1(\omega)$, $C_2(\omega)$ –неизвестные на данном этапе многочлены.

Выбрав в качестве многочлена $M_0(\omega)$ в знаменателях выражений (5) и (6) функцию вида

$$M_0(\omega)=V^2(\omega)-L(\omega)U(\omega), \tag{16}$$

можно обеспечить совпадение общих знаменателей дробей (14) и (15) с $M_0(\omega)$. Тогда в качестве полиномиальных решений для функций $W_0(\omega)$, $W_1(\omega)$, $Z_0(\omega)$, $Z_1(\omega)$ можно принять следующие выражения:

$$W_0(\omega)=V(\omega)C_1(\omega),\ W_1(\omega)=-L(\omega)C_1(\omega), \tag{17}$$

$$Z_0(\omega)=V(\omega)C_2(\omega),\ Z_1(\omega)=-U(\omega)C_2(\omega). \tag{18}$$

Подстановка $\Gamma(\omega)=L^2(\omega)e^{2i\omega g}-U^2(\omega)e^{-2i\omega g}-2U(\omega)V(\omega)e^{-i\omega g}$ и многочленов (13), (17) и (18) в выражения (5) и (6) с учетом равенств (9)–(11) позволяет получить окончательные формулы для функций $\Phi_{\tau,T}(\omega)$ и $\Psi_{\tau,T}(\omega)$:

$$\Phi_{\tau,T}(\omega)=\frac{e^{i\omega\tau}\left[L^2(\omega)e^{2i\omega g}-U^2(\omega)e^{-2i\omega g}-2U(\omega)V(\omega)e^{-i\omega g}\right]}{V^2(\omega)}+$$

$$+\frac{U(\omega)V(\omega)C_1(\omega)e^{-i\omega g}-U^2(\omega)C_2(\omega)e^{i\omega(T-2g)}-L^2(\omega)C_1(\omega)e^{2i\omega g}}{V^2(\omega)\left[V^2(\omega)-L(\omega)U(\omega)\right]}+$$

$$+\frac{L(\omega)V(\omega)C_2(\omega)e^{i\omega(g+T)}+M_0(\omega)\left[C_1(\omega)+C_2(\omega)e^{i\omega T}\right]}{V^2(\omega)\left[V^2(\omega)-L(\omega)U(\omega)\right]}, \tag{19}$$

$$\Psi_{\tau,T}(\omega)=\frac{e^{i\omega\tau}\left[V(\omega)-L(\omega)e^{i\omega g}+U(\omega)e^{-i\omega g}\right]}{V^2(\omega)}-$$

$$-\frac{\left[C_1(\omega)V(\omega)-C_1(\omega)L(\omega)e^{i\omega g}+C_2(\omega)V(\omega)e^{i\omega T}-U(\omega)C_2(\omega)e^{i\omega(T-g)}\right]}{V^2(\omega)M_0(\omega)}. \tag{20}$$

Чтобы выделить функции $\Phi^{(1)}_{\tau,T}(\omega)$ и $\Phi^{(2)}_{\tau,T}(\omega)$ из функции $\Phi_{\tau,T}(\omega)$ для дальнейшего их исследования на аналитичность в нижней и, соответственно, верхней полуплоскостях, перепишем спектральную характеристику в виде

$$\Phi_{\tau,T}(\omega) = -\frac{2U}{V}e^{i\omega(\tau-g)} - \frac{U^2}{V^2}e^{i\omega(\tau-2g)} + \frac{UC_1e^{-i\omega g}}{VM_0} + \frac{C_1}{V^2} - \frac{U^2C_2e^{i\omega(T-2g)}}{V^2M_0} +$$

$$+e^{i\omega T}\left[\frac{L^2e^{i\omega(2g+\tau-T)}}{V^2} - \frac{L^2C_1e^{i\omega(2g-T)}}{V^2M_0} + \frac{C_2}{V^2} + \frac{LC_2e^{i\omega g}}{VM_0}\right] = \Phi^{(1)}_{\tau,T}(\omega) + e^{i\omega T}\Phi^{(2)}_{\tau,T}(\omega). \qquad (21)$$

Осталось удовлетворить требованию А) аналитичности функций $\Phi^{(1)}_{\tau,T}(\omega)$ в H^- и $\Phi^{(2)}_{\tau,T}(\omega)$ в H^+ и требованию В) целости функции $\Psi_{\tau,T}(\omega)$.

Из формул (20) и (21) следует, что знаменатели функций $\Phi_{\tau,T}(\omega)$ и $\Psi_{\tau,T}(\omega)$ имеют четыре корня, совпадающих с корнями функции $M_0 = V^2 - LU$, а также двукратные корни функции V^2:

$$\omega_1 = \sqrt{\left(-5+i\sqrt{3}\right)/2} \approx 0,27+1,604i \in H^+;\ \omega_2 = -\sqrt{\left(-5+i\sqrt{3}\right)/2} \approx -0,27-1,604i \in H^-;$$

$$\omega_3 = \sqrt{\left(-5-i\sqrt{3}\right)/2} \approx 0,27-1,604i \in H^-;\ \omega_4 = -\sqrt{\left(-5-i\sqrt{3}\right)/2} \approx -0,27+1,604i \in H^+;$$

$$\omega_{5,7} = i\sqrt{2,5} \approx 1,581i \text{ – двукратные корни } V^2 \text{ из } \in H^+;$$

$$\omega_{6,8} = -i\sqrt{2,5} \approx -1,581i \in H^- \text{ – двукратные корни } V^2.$$

Полученные восемь уравнений относительно восьми неизвестных коэффициентов многочленов третьей степени $C_1(\omega) = b_3\omega^3 + b_2\omega^2 + b_1\omega + b_0$ и $C_2(\omega) = d_3\omega^3 + d_2\omega^2 + d_1\omega + d_0$ представляют собой условия, обеспечивающие аналитичность функции $\Phi^{(1)}_{\tau,T}(\omega)$ в H^- (с 1-го по 4-е уравнение системы) и функции $\Phi^{(2)}_{\tau,T}(\omega)$ в H^+ (с 5-го по 8-е уравнение).

Полученная система линейных алгебраических уравнений порядка 8×8 относительно неизвестных коэффициентов b_0, b_1, b_2, b_3, d_0, d_1, d_2, d_3) имеет следующий вид:

$$V_2\sum_{r=0}^{3}b_r\omega_2^re^{-i\omega_2 g} - U_2\sum_{r=0}^{3}d_r\omega_2^re^{i\omega_2(T-2g)} = 0;\ V_3\sum_{r=0}^{3}b_r\omega_3^re^{-i\omega_3 g} - U_3\sum_{r=0}^{3}d_r\omega_3^re^{i\omega_3(T-2g)} = 0;$$

$$L_6\sum_{r=0}^{3}b_r\omega_6^r + U_6\sum_{r=0}^{3}d_r\omega_6^re^{i\omega_6(T-2g)} = L_6U_6^2e^{i\omega_6(\tau-2g)};$$

$$\left\{M_0(\omega)\left[-2UVe^{i\omega(\tau-g)} - U^2e^{i\omega(\tau-2g)} + C_1(\omega)\right] + UVC_1(\omega)e^{-i\omega g} - U^2C_2(\omega)e^{i\omega(T-2g)}\right\}'_{\omega=\omega_6} = 0;$$

$$-L_1\sum_{r=0}^{3}b_r\omega_1^re^{i\omega_1(2g-T)} + V_1\sum_{r=0}^{3}d_r\omega_1^re^{i\omega_1 g} = 0;\ -L_4\sum_{r=0}^{3}b_r\omega_4^re^{i\omega_4(2g-T)} + V_4\sum_{r=0}^{3}d_r\omega_4^re^{i\omega_4 g} = 0;$$

$$L_5\sum_{r=0}^{3}b_r\omega_5^re^{i\omega_5(2g-T)} + U_5\sum_{r=0}^{3}d_r\omega_5^r = -U_5L_5^2e^{i\omega_5(\tau+2g-T)};$$

$$\left\{M_0(\omega)\left[L^2e^{i\omega(2g+\tau-T)} + C_2(\omega)\right] - L^2C_1(\omega)e^{i\omega(2g-T)} + LVC_2(\omega)e^{i\omega g}\right\}'_{\omega=\omega_5} = 0. \qquad (22)$$

В системе приняты обозначения: $M_0 = V^2 - LU$, $L_k = L(\omega=\omega_k)$, $U_k = U(\omega=\omega_k)$, $V_k = V(\omega=\omega_k)$, $k=1,2,3,4,5,6$; $C_1(\omega) = b_3\omega^3 + b_2\omega^2 + b_1\omega + b_0$, $C_2(\omega) = d_3\omega^3 + d_2\omega^2 + d_1\omega + d_0$.

Структура системы (22) гарантирует, что ее определитель отличен от нуля, следовательно, система имеет единственное решение.

В результате решения системы линейных уравнений (22) определены коэффициенты b_k и d_k (k = 0, 1, 2, 3) многочленов $C_1(\omega)$ и $C_2(\omega)$.

Для завершения доказательства необходимо показать выполнение требования В) о целости функции $\Psi_{\tau,T}(\omega)$. Целость данной функции непосредственно вытекает из системы уравнений (22), обеспечивающей аналитичность функций $\Phi^{(1)}_{\tau,T}(\omega)$ в H^- и $\Phi^{(2)}_{\tau,T}(\omega)$ в H^+ рассматриваемой области. Действительно, если ν – корень многочлена $M_0(\omega)$, то числитель функции $\Psi_{\tau,T}(\omega)$ обращается в нуль в точке $\omega = \nu$ в силу одновременного выполнения 1-го и 5-го (либо 2-го и 6-го) уравнений системы (22).

Таким образом, все требования (А, Б, В) к спектральной характеристике выполнены, следовательно, функция (21) является искомой спектральной характеристикой интерполирования.

Следующим шагом является построение оператора интерполирования $\tilde{\xi}(t;T;\tau)$. Как известно [11], данный оператор задается спектральным представлением вида

$$\tilde{\xi}(t;T;\tau)=\mathrm{L}\{\xi(s),\ s\le t\ \cup\ s\ge t+T\}=\int_{-\infty}^{\infty}e^{i\omega t}\Phi_{\tau,T}(\omega)d\tilde{Z}(\omega), \tag{23}$$

где $\tilde{Z}(\omega)$ – случайная функция с некоррелированными приращениями, участвующая в спектральном представлении изучаемого случайного процесса

$$\xi(s)=\int_{-\infty}^{\infty}e^{i\omega t}d\tilde{Z}(\omega). \tag{24}$$

Подстановка формулы (21) в выражение (23) приводит к следующему соотношению:

$$\tilde{\xi}(t;T;\tau)=-\int_{-\infty}^{\infty}\frac{U^2C_2e^{i\omega(t+T-2g)}}{V^2M_0}d\tilde{Z}(\omega)-\int_{-\infty}^{\infty}\frac{L^2C_1e^{i\omega(t+2g)}}{V^2M_0}d\tilde{Z}(\omega)-\int_{-\infty}^{\infty}\frac{U^2e^{i\omega(\tau-2g+t)}}{V^2}d\tilde{Z}(\omega)+$$

$$+\int_{-\infty}^{\infty}\frac{C_1e^{i\omega t}}{V^2}d\tilde{Z}(\omega)+\int_{-\infty}^{\infty}\frac{C_2e^{i\omega(t+T)}}{V^2}d\tilde{Z}(\omega)+\int_{-\infty}^{\infty}\frac{L^2e^{i\omega(2g+\tau+t)}}{V^2}d\tilde{Z}(\omega)-\int_{-\infty}^{\infty}\frac{2Ue^{i\omega(\tau-g+t)}}{V}d\tilde{Z}(\omega)+$$

$$+\int_{-\infty}^{\infty}\frac{UC_1e^{i\omega(t-g)}}{VM_0}d\tilde{Z}(\omega)+\int_{-\infty}^{\infty}\frac{LC_2e^{i\omega(T+g+t)}}{VM_0}d\tilde{Z}(\omega)=\sum_{k=1}^{9}J_k. \tag{25}$$

Подынтегральные выражения в 1, 2 и 6-м интегралах являются неправильными рациональными дробями, в остальных шести – правильными. Выделив целую часть в интегралах J_1, J_2 и J_6, разложим все получившиеся правильные дроби в выражениях (25) на простейшие. Это необходимо для того, чтобы свести каждое слагаемое к интегралу от исследуемого процесса ξ(s).

Проиллюстрируем этот шаг на примере последнего интеграла из системы (25):

$$J_9=\int_{-\infty}^{\infty}\frac{L(\omega)C_2(\omega)e^{i\omega(T+g+t)}}{V(\omega)M_0(\omega)}d\tilde{Z}(\omega)=\frac{1}{6}\int_{-\infty}^{\infty}e^{i\omega(T+g+t)}\left[\frac{d_3\omega^5+\omega^4(d_2-id_3)+\omega^3(2d_3+d_1-id_2)}{\omega^6+(15\omega^4/2)+(39\omega^2/2)+(35/2)}+\right.$$

$$\left.+\frac{\omega^2(2d_2-id_1+d_0)+\omega(2d_1-id_0+2d_0)}{\omega^6+(15\omega^4/2)+(39\omega^2/2)+(35/2)}\right]d\tilde{Z}(\omega)=\frac{1}{6}\int_{-\infty}^{\infty}e^{i\omega(T+g+t)}\sum_{k=1}^{6}\frac{x_{9k}}{\omega-\omega_k}d\tilde{Z}(\omega). \tag{26}$$

Приведя дроби в подынтегральном выражении последнего интеграла к общему знаменателю и приравнивая коэффициенты при одинаковых степенях ω в числителях предпоследнего и последнего интегралов в формулы (26), получаем систему шести линейных уравнений относительно шести неизвестных x_{9k} (неопределенных коэффициентов), k = 1, 2, 3, 4, 5, 6:

$$\omega^5:\ \sum_{k=1}^{6}x_{9k}=d_3;$$

$$\omega^4:\ \sum_{k=1}^{4}-(\mu x_{9k})-(\mu_4+\varphi_1)x_{95}-(\mu_4+\varphi_3)x_{96}=d_2-id_3;$$

$$\omega^3:\ \sum_{k=1}^{4}\left(N_k+5/2\right)x_{9k}+AAx_{95}+ABx_{96}=2d_3+d_1-id_2;$$

$$\omega^2:-\sum_{k=1}^{4}\left(æ_k+5/2\,\mu_k\right)x_{9k}-ACx_{95}-ADx_{96}=2d_2-id_1+d_0;$$

$$\omega:\ 2{,}5\sum_{k=1}^{4}N_kx_{9k}+AFx_{95}+AGx_{96}=2d_1-id_0;$$

$$\text{Свободный член}:\ -2{,}5\sum_{k=1}^{4}æ_kx_{9k}-æ_4\varphi_2x_{95}-æ_4\varphi_4x_{96}=2d_0. \tag{27}$$

В системе (27) приняты следующие обозначения:

$$\mu_1=\omega_4+\omega_2+\omega_3;\ \mu_2=\omega_1+\omega_3+\omega_4;\ \mu_3=\omega_1+\omega_2+\omega_4;\ \mu_4=\omega_1+\omega_2+\omega_3;$$

$$N_1=\omega_2\omega_3-\omega_2\omega_4-\omega_3\omega_4;\ N_2=-\omega_4\omega_1-\omega_3\omega_4+\omega_1\omega_3;\ N_3=-\omega_1\omega_4-\omega_2\omega_4+\omega_1\omega_2;$$

$$N_4=-\omega_1\omega_3-\omega_2\omega_3+\omega_1\omega_2;\ æ_1=\omega_2\omega_3\omega_4;\ æ_2=\omega_1\omega_3\omega_4;\ æ_3=\omega_1\omega_2\omega_4;\ æ_4=\omega_1\omega_2\omega_3;$$

$\varphi_1 = \omega_4 + \omega_6$; $\varphi_2 = \omega_4\omega_6$; $\varphi_3 = \omega_4 + \omega_5$; $\varphi_4 = \omega_4\omega_5$; $AA = N_4 + \mu_4\varphi_1 + \varphi_2$; $AB = N_4 + \mu_4\varphi_3 + \varphi_4$;

$AC = æ_4 + N_4\varphi_1 + \mu_4\varphi_2$; $AD = æ_4 + N_4\varphi_3 + \mu_4\varphi_4$; $AG = æ_4\varphi_3 + N_4\varphi_4$; $AF = æ_4\varphi_1 + N_4\varphi_2$. (28)

Таким образом, интеграл J_9 принимает следующий вид:

$$J_9 = \frac{1}{6}\int_{-\infty}^{\infty}\sum_{k=1}^{6}\frac{x_{9k}e^{i\omega(T+g+t)}}{\omega-\omega_k}d\tilde{Z}(\omega) \quad (29)$$

Воспользуемся далее представлением

$$1/(\omega-\omega_k)^{\nu} = \int_0^{\infty}\frac{s^{\nu-1}i^{\nu}e^{-i\omega s}}{(\nu-1)!}e^{i\omega_k s}ds,\ \nu = 1,2,3\ldots \quad (30)$$

и выразим интеграл J_9 через случайный процесс $\xi(s)$, приняв в формуле (30) $\nu = 1$:

$$J_9 = \frac{1}{6}\int_{-\infty}^{\infty}e^{i\omega(T+g+t)}\sum_{k=1}^{6}x_{9k}\int_0^{\infty}ie^{-i\omega s}e^{i\omega_k s}ds\,d\tilde{Z}(\omega) = \frac{1}{6}\int_0^{\infty}\sum_{k=1}^{6}ix_{9k}e^{i\omega_k s}\left[\int_{-\infty}^{\infty}e^{i\omega(T+g+t-s)}d\tilde{Z}(\omega)\right]. \quad (31)$$

Согласно спектральному представлению (24) случайного процесса $\xi(u)$, выражение в квадратных скобках формулы (31) представляет собой значение процесса в точке $u = t + T + g - s$, потому интеграл J_9 можно записать в виде

$$J_9 = \frac{1}{6}\int_0^{\infty}i\sum_{k=1}^{6}x_{9k}e^{i\omega_k s}\xi(t+T+g-s)ds. \quad (32)$$

Аналогичные рассуждения позволяют получить соответствующие представления для остальных восьми интегралов из формулы (25). Объединение всех найденных выражений приводит к окончательному виду оператора интерполирования:

$$\tilde{\xi}(t;T;\tau) = -\frac{1}{4}\xi(z_3) + \frac{1}{4}\xi(z_6) - \xi(z_7) + \sum_{j=1;2;8;9}\sum_{r=1}^{6}i\alpha_{jr}\int_0^{\infty}e^{i\omega_k s}\xi(z_j - s)ds +$$

$$+\sum_{j=3}^{7}\sum_{r=5}^{6}i\Theta_{jr}\int_0^{\infty}e^{i\omega_k s}\xi(z_j - s)ds - \sum_{j=1}^{6}\sum_{r=5}^{6}\varepsilon_{jr}\int_0^{\infty}se^{i\omega_k s}\xi(z_j - s)ds \quad (33)$$

В формуле (33) приняты следующие обозначения:

$z_1 = t + T - 2g$; $z_2 = t + 2g$; $z_3 = t + \tau - 2g$; $z_4 = t$; $z_5 = T + t$; $z_6 = \tau + 2g + t$; $z_7 = t + \tau - g$;

$z_8 = t - g$; $\alpha_{1r} = -x_{1r}/12$; $\alpha_{2r} = -x_{2r}/12$; $\alpha_{8r} = x_{8r}/6$; $\alpha_{9r} = x_{9r}/6$; $r = 1;2;3;4;5;6$.

$\Theta_{35} = -x_{35}/4$; $\Theta_{36} = -x_{36}/4$; $\Theta_{7r} = -x_{7r}$; $\Theta_{jr} = x_{jr}/4$, $r = 5;6$, $j = 4;5;6$.

$\varepsilon_{3r} = -x_{3r}/4$; $\varepsilon_{jr} = x_{jr}/4$; $j = 4;5;6$, $r = 5;6$. (34)

Из формулы (33) следует, что оператор интерполирования исследуемого L-марковского процесса представляет собой сумму линейной комбинации значений процесса в точках $z_3 = t + \tau - 2g$; $z_6 = \tau + 2g + t$; $z_7 = t + \tau - g$ и интегралов от значений процесса в точках z_r ($r = 1, 2, \ldots, 8$).

Присутствие в финальном выражении интегралов от случайного процесса, аналитический вид которого неизвестен, препятствует непосредственному вычислению численных значений оператора $\tilde{\xi}(t;T;\tau)$. Тем не менее по известной спектральной плотности (4) можно получить графическое представление процесса.

Моделирование процесса осуществлялось с помощью виртуального прибора, разработанного в среде LabVIEW. Формирование цифрового массива данных исследуемого процесса производилось на основе заданной спектральной плотности (4) посредством обратного преобразования Фурье. Данная процедура концептуально эквивалентна получению экспериментальных данных с помощью измерительного комплекса, состоящего из анализатора спектра и осциллографа (например, на базе приборов R&S®FSU и R&S®RTO).

Для обеспечения строгой методологической корректности вычислительного эксперимента и полного исключения эффекта утечки данных процедура построения аппроксимационной модели была жестко фрагментирована. Все отсчеты процесса, попадающие во внутренний интервал моделируемого пропуска (0; 2), были предварительно удалены из исходного массива, переведены в разряд тестовых данных и использовались авторами строго на финальном этапе для независимой оценки метрик качества алгоритма.

Настройка структуры модели, включая расчет коэффициентов тригонометрического полинома A_k, B_k, а также минимизацию информационных критериев AIC/BIC для определения рационального числа гармоник, осуществлялась исключительно на основе доступной обучающей выборки, то есть вне интервала пропуска. На рис. 1 приведен график реализации процесса с искусственно удаленным фрагментом данных на интервале $0 < \tau < 2$.

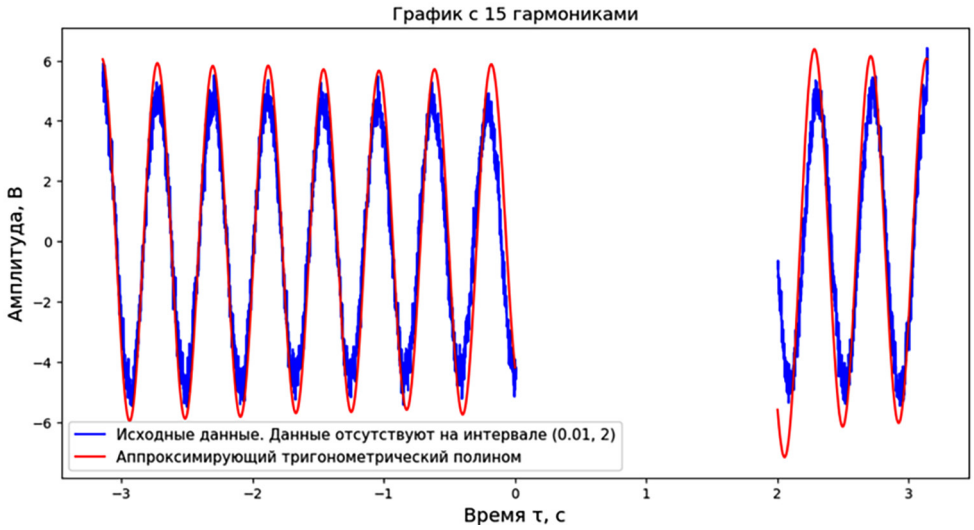


Рис. 1. Исследуемый процесс ξ(u) и аппроксимирующий его тригонометрический полином
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Из графика процесса $\xi(u)$ (рис. 1) видно, что он близок к линейной комбинации тригонометрических функций $\sin x$ и $\cos x$. В связи с этим целесообразно аппроксимировать $\xi(u)$ тригонометрической регрессией вида

$$\xi_{теоретич}(u) = \hat{\xi}(u) = A_0 + \sum_{k=1}^{N} \left(A_k \cos ku + B_k \sin ku \right), \quad (35)$$

где ее параметры A_0, A_k и B_k ($k = 1, 2, 3, \ldots, N$) определяются формулами

$$A_0 = \sum_{j=0}^{r-1} \xi(u_j)/r, \quad A_k = \frac{2}{r} \sum_{j=0}^{r-1} \xi(u_j) \cos(ku_j), \quad B_k = \frac{2}{r} \sum_{j=0}^{r-1} \xi(u_j) \sin(ku_j). \quad (36)$$

Пошаговое увеличение числа гармоник N в формуле (35) и последовательный расчет RMSE проводился по формуле

$$RMSE(N) = \sqrt{\sum_{j=0}^{r-1} \left[\xi_{ФАКТ}(u_j) - \hat{\xi}_{теор}(u_j) \right]^2 / r}. \quad (37)$$

Для определения оптимального числа гармоник N исследован характер изменения RMSE, AIC и BIC в диапазоне от 1 до 40. Все три метрики одновременно достигают минимума при $N = 15$ (рис. 2 и 3) (RMSE = 1,2966; AIC = 1935,8067; BIC = 2432,8173), что подтверждает оптимальность модели с точки зрения баланса точности и сложности. При $N > 15$ RMSE возрастает и стабилизируется в районе 1,58, а AIC и BIC монотонно увеличиваются.

Принципиальное отличие предложенного подхода от классического МНК заключается в способе расчета коэффициентов. Коэффициенты ряда вычисляются по прямым аналитическим формулам (36) как интегральные оценки на доступном множестве точек, а не через минимизацию суммы квадратов остатков. Коэффициенты $(N-1)$-го порядка вычисляются один раз и фиксируются; переход к порядку N происходит путем удлинения ряда без пересчета предшествующих членов. Поскольку коэффициенты определяются независимо, их усечение не эквивалентно приравниванию к нулю в рамках МНК, а представляет собой исключение слагаемых с уже фиксированными весами.

Вследствие этого кривая RMSE имеет принципиально иной характер. После исчерпания полезного сигнала добавление избыточных гармоник вносит шум, который фиксированная модель не может сгладить пересчетом параметров. Ошибка начинает возрастать, образуя четко выраженный минимум при $N = 15$, который служит объективным критерием останова. В отличие от МНК, где RMSE на обучающей выборке монотонно убывает и не имеет внутреннего минимума, предложенный подход позволяет использовать саму кривую RMSE как прямой индикатор оптимальности модели без привлечения штрафных критериев.

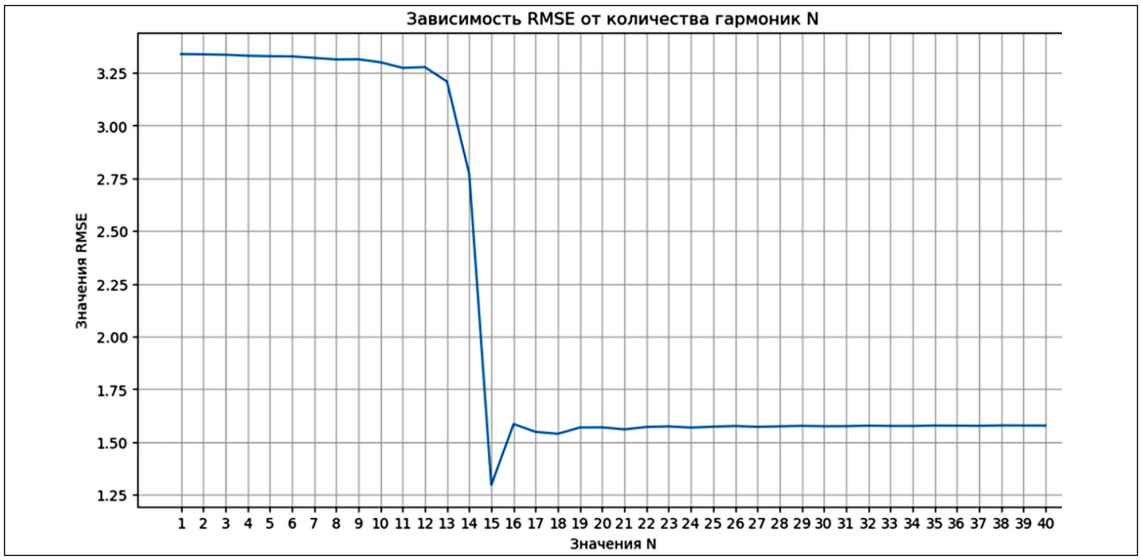


Рис. 2. Зависимость RMSE от количества гармоник
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

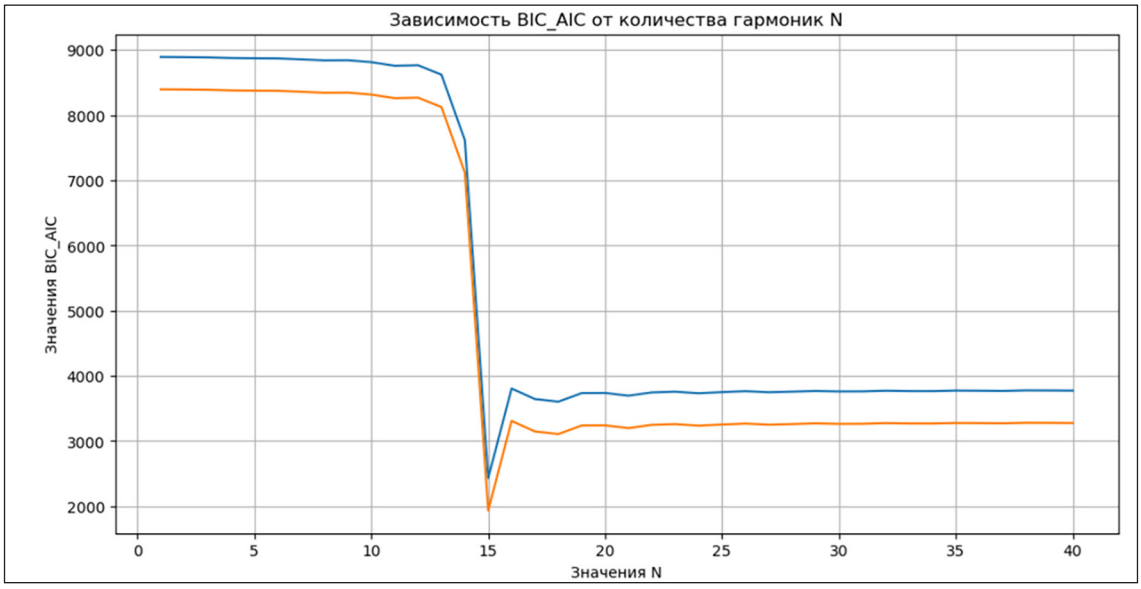


Рис. 3. График зависимости BIC_AIC от числа гармоник
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Следует подчеркнуть, что тригонометрическая аппроксимация по формулам (36) не является окончательным результатом восстановления. Она служит промежуточным приближением – аргументом в операторе интерполяции $\tilde{\xi}(t;T;\tau)$, который удовлетворяет граничным условиям на краях пропуска и корректирует искажения, вызванные неполнотой данных. Таким образом, погрешности прямых коэффициентов Фурье, связанные с применением ортогональных формул к неполной выборке, не переходят в финальный результат, что позволяет использовать простые и устойчивые формулы (36) в качестве входного приближения.

На основании вышеизложенного для всех последующих расчетов принято $N = 15$.

Аппроксимирующий тригонометрический полином при $N = 15$ гармоник использовался как базовый уровень (baseline) и промежуточный элемент численной схемы для вычисления значений в узлах оператора восстановления.

Подставим выражение (35) вместо $\xi(u)$ в формулу (33), предварительно сделав в интегралах очевидную замену: $u = z_j - s$.

Интегрирование произведений экспоненциальных и тригонометрических функций на интервале (0; ∞) позволяет получить окончательное выражение для оператора интерполирования:

$$\tilde{\xi}(t;T;\tau) = X + Y_1 + Y_2 + Y_3, \tag{38}$$

где

$$X = -\frac{1}{4}\xi(z_3) + \frac{1}{4}\xi(z_6) - \xi(z_7), \tag{39}$$

$$Y_1 = \sum_{j=1,2,8,9}\sum_{r=1}^{6} i\alpha_{jr}\left[-\frac{A_0}{i\omega_r} + \sum_{k=1}^{15} A_k \frac{k\sin kz_j - i\omega_r \cos kz_j}{k^2-\omega_r^2} + \sum_{k=1}^{15} B_k \frac{\left(-i\omega_r \sin kz_j - k\cos kz_j\right)}{k^2-\omega_r^2}\right] =$$

$$= \sum_{j=1,2,8,9}\sum_{r=1}^{6} i\alpha_{jr}\cdot\Omega_{jr}(\tilde{N}), \tag{40}$$

$$Y_2 = \sum_{j=3}^{7}\sum_{r=5}^{6} i\Theta_{jr}\cdot\Omega_{jr}(\tilde{N}), \tag{41}$$

где $\Omega_{jr}(\tilde{N}) = \Omega_{jr}(15)$ – выражение в квадратных скобках Y_1.

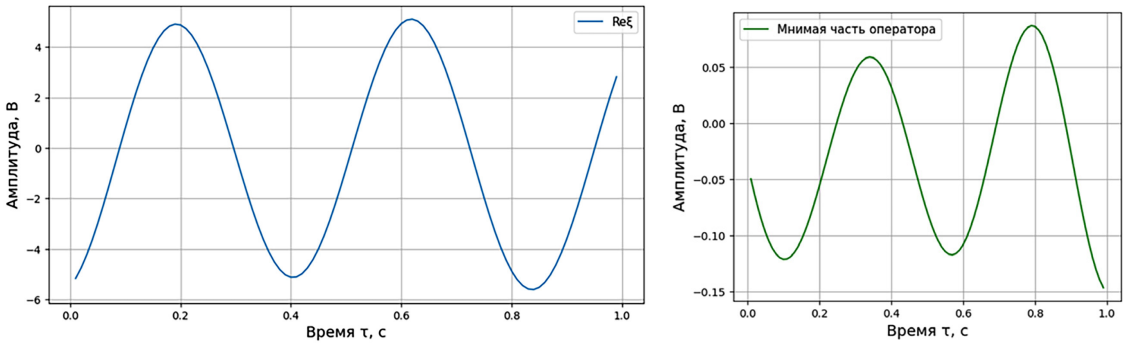
$$Y_3 = -\sum_{j=1}^{6}\sum_{r=5}^{6}\varepsilon_{jr}\left\{-\frac{A_0\left(-i\omega_r z_j - 1\right)}{\omega^2} + \sum_{k=1}^{15}\frac{A_k}{\left(k^2-\omega_r^2\right)^2}\cdot\right.$$

$$\cdot\left[\left(k^2-\omega_r^2\right)z_j\left(k\sin kz_j - i\omega_r\cos kz_j\right) + 2ki\omega_r\sin kz_j + \left(k^2+\omega_r^2\right)\cos kz_j\right] +$$

$$\left. + \sum_{k=1}^{15}\frac{B_k}{\left(k^2-\omega_r^2\right)^2}\left[\left(k^2-\omega_r^2\right)z_j\left(-i\omega_r\sin kz_j - k\cos kz_j\right) - 2ki\omega_r\cos kz_j + \left(k^2+\omega_r^2\right)\sin kz_j\right]\right\}. \tag{42}$$

В формулах (39)–(42) параметры z_j (j = 1, 2…, 9), α_{jr}, Θ_{jr} и ε_{jr} определяются выражениями (34).

В работе выполнено табулирование значений оператора интерполирования при T = 2 на интервале 0 < τ < 1 с шагом h_τ = 0,01. На основе полученных данных построены графики зависимости от параметра τ а) действительной и б) мнимой частей оператора интерполирования (рис. 4).



а) *б)*

Рис. 4. График зависимости а) действительных и б) мнимых частей интерполятора от параметра интерполирования τ
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Мнимая часть полученного результата определяет фазовые изменения процесса и используется при анализе качества его фильтрации [15].

Разработанная авторами в среде Python программа позволяет вычислять значения оператора интерполирования для любого заданного момента времени τ (в рассматриваемом случае из диапазона (0, 1)).

Например, при τ = 0,06 $\tilde{\xi}(t;T;\tau) = \tilde{\xi}(0,06;1;0,01) = -1,5782 - 0,1054i$.

Аналогично $\tilde{\xi}(t;T;\tau) = \tilde{\xi}(0,34;1;0,01) = -3,0499 + 0,0591i$;

$$\tilde{\xi}(t;T;\tau) = \tilde{\xi}(0,6;1;0,01) = 4,92 - 0,1085i.$$

Рассмотрим теперь случай $T = 2$, $1 < \tau < 2$.

Аналогичные рассуждения, что приводились при выводе формулы (21) для спектральной характеристики исследуемого случайного процесса при $T = 2$, $0 < \tau < 1$, привели к следующей формуле для спектральной характеристики $\Phi_{\tau,T}(\omega)$ при $1 < \tau < 2$:

$$\Phi_{\tau,T}(\omega) = \frac{U^2 e^{i\omega(\tau-2g)}}{V^2 - LU} + \frac{UC_1(\omega)e^{-i\omega g}}{V^2 - LU} + \frac{C_1(\omega)}{V} - \frac{U^2 C_2(\omega)e^{i\omega(T-2g)}}{V\left(V^2 - LU\right)} +$$

$$+e^{i\omega T}\left[\frac{-LVe^{i\omega(g+\tau-T)}}{V^2 - LU} + \frac{C_2(\omega)}{V} - \frac{L^2 C_1(\omega)e^{i\omega(2g-T)}}{V\left(V^2 - LU\right)} + \frac{LC_2(\omega)e^{i\omega g}}{V^2 - LU}\right] = \Phi^{(1)}_{\tau,T}(\omega) + e^{i\omega T}\Phi^{(2)}_{\tau,T}(\omega). \quad (43)$$

В формуле (43) $C_1(\omega) = b_2\omega^2 + b_1\omega + b_0$ и $C_2(\omega) = d_2\omega^2 + d_1\omega + d_0$ – многочлены второй степени с неизвестными коэффициентами b_k, d_k, $k = 0, 1, 2$.

Следует отметить, что знаменатель спектральной характеристики в этом случае отличается от знаменателя первого случая, когда $T = 2$, $0 < \tau < 1$.

Из представлений для $\Phi^{(1)}_{\tau,T}(\omega)$ и $\Phi^{(2)}_{\tau,T}(\omega)$ видим, что условие Б) выполнено, так как в первой из этих функций все слагаемые имеют множителями $\chi(\omega)e^{i\omega\alpha}$ при $\alpha < 0$, а во второй $\Phi^{(2)}_{\tau,T}(\omega)$ – множителями $\chi(\omega)e^{i\omega\alpha}$ при $\alpha > 0$, так как $1 < \tau < 2$.

Требования А) аналитичности функций $\Phi^{(1)}_{\tau,T}(\omega)$ в H^- и $\Phi^{(2)}_{\tau,T}(\omega)$ в H^+ будут соблюдены, если будут выполнены следующие условия:

$$-L_1 e^{ig\omega_1}\cdot\sum_{k=0}^{2} b_k\omega_1^k + V_1 e^{iT\omega_1}\cdot\sum_{k=0}^{2} d_k\omega_1^k = V_1^2 e^{i\tau\omega_1};$$

$$-L_4 e^{ig\omega_4}\cdot\sum_{k=0}^{2} b_k\omega_4^k + V_4 e^{iT\omega_4}\cdot\sum_{k=0}^{2} d_k\omega_4^k = V_4^2 e^{i\tau\omega_4};$$

$$L_5 e^{i(2g-T)\omega_5}\cdot\sum_{k=0}^{2} b_k\omega_5^k + U_5\cdot\sum_{k=0}^{2} d_k\omega_5^k = 0;$$

$$V_2 e^{ig\omega_2}\cdot\sum_{k=0}^{2} b_k\omega_2^k - U_2 e^{iT\omega_2}\cdot\sum_{k=0}^{2} d_k\omega_2^k = -U_2\cdot V_2 e^{i\tau\omega_2};$$

$$V_3 e^{ig\omega_3}\cdot\sum_{k=0}^{2} b_k\omega_3^k - U_3 e^{iT\omega_3}\cdot\sum_{k=0}^{2} d_k\omega_3^k = -U_3 V_3 e^{i\tau\omega_3};$$

$$L_6\cdot\sum_{k=0}^{2} b_k\omega_6^k + U_6 e^{i(T-2g)\omega_6}\cdot\sum_{k=0}^{2} d_k\omega_6^k = 0 \quad (44)$$

В формуле (44) $L_k = L(\omega = \omega_k)$, $U_k = U(\omega = \omega_k)$, $V_k = V(\omega = \omega_k)$, ω_k, k = 1, 2, 3, 4, 5, 6 – корни знаменателя спектральной характеристики $V\cdot(V^2 - LU)$.

Из системы (44) определяются неизвестные коэффициенты b_k и d_k ($k = 0, 1, 2$) многочленов $C_1(\omega)$ и $C_2(\omega)$.

Выполнение требования В) о целости функции

$$\Psi_{\tau,T}(\omega) = \frac{e^{i\omega\tau}V^2 + LC_1 e^{i\omega g} - VC_2 e^{i\omega T} + UC_2 e^{i\omega(T-g)}}{V\left(V^2 - LU\right)}$$

следует из условий (44) аналитичности функций $\Phi^{(1)}_{\tau,T}(\omega)$ и $\Phi^{(2)}_{\tau,T}(\omega)$. Докажем этот факт на примере корня $\omega_6 = -2,5i \in V$. В данной точке выполняется последнее равенство системы (44), которое совпадает с числителем функции $\Psi_{\tau,T}(\omega)$ после его умножения на $e^{-i\omega g}$. Первое и третье слагаемые числителя $\Psi_{\tau,T}(\omega)$ обращаются в нуль в этой точке, так как $V(-2,5i) = 0$. Таким образом, все требования А), Б) и В) к спектральной характеристике выполнены, следовательно, функция $\Phi_{\tau,T}(\omega)$, заданная формулой (43), является спектральной характеристикой L-марковского процесса со спектральной плотностью (4) при $T = 2$ и $1 < \tau < 2$.

Подставляя формулу (43) в спектральное представление интерполятора (23), получим

$$\tilde{\xi}(t;T;\tau) = \int_{-\infty}^{\infty}\frac{U^2 e^{i\omega(\tau+t-2g)}}{V^2 - LU}d\tilde{Z}(\omega) + \int_{-\infty}^{\infty}\frac{UC_1 e^{i\omega(t-g)}}{V^2 - LU}d\tilde{Z}(\omega) - \int_{-\infty}^{\infty}\frac{LVe^{i\omega(t+\tau+g)}}{V^2 - LU}d\tilde{Z}(\omega) + \int_{-\infty}^{\infty}\frac{LC_2 e^{i\omega(t+g+T)}}{V^2 - LU}d\tilde{Z}(\omega) -$$

$$-\int_{-\infty}^{\infty}\frac{U^2 C_2 e^{i\omega(t+T-2g)}}{V\left(V^2 - LU\right)}d\tilde{Z}(\omega) - \int_{-\infty}^{\infty}\frac{L^2 C_1 e^{i\omega(t+2g)}}{V\left(V^2 - LU\right)}d\tilde{Z}(\omega) + \int_{-\infty}^{\infty}\frac{C_1 e^{i\omega t}}{V}d\tilde{Z}(\omega) + \int_{-\infty}^{\infty}\frac{C_2 e^{i\omega(t+T)}}{V}d\tilde{Z}(\omega) = \sum_{j=1}^{8} J_j. \quad (45)$$

Разложим подынтегральные дроби во всех интегралах в (45) на простейшие дроби подобно тому, как это было сделано в случае $T = 2$ и $0 < \tau < 1$, и далее рассчитаем неопределенные коэффициенты x_{jk} (j – номер интеграла, k – номер неизвестного корня знаменателя) , $j = 1, 2…8$; $k = 1, 2…6$ – числители простейших дробей в случае первых четырех интегралов J_1, J_2 , J_3, и J_4 из четырех систем четырех уравнений с четырьмя неизвестными x_{jk} , где $j = 1, 2, 3, 4$; $k = 1, 2, 3, 4$.

$$\sum_{k=1}^{4} x_{jk} = \sigma_{j1}; \quad -\sum_{k=1}^{4} \mu_k x_{jk} = \sigma_{j2}; \quad \sum_{k=1}^{4} N_k x_{jk} = \sigma_{j3}; \quad -\sum_{k=1}^{4} æ_k x_{jk} = \sigma_{j4}. \qquad (46)$$

В случае интегралов J_5 и J_6 x_{jk} рассчитываются из двух следующих систем с шестью неизвестными x_{jk} , где $j = 5, 6$; $k = 1, 2, 3, 4, 5, 6$.

1) $\sum_{k=1}^{6} x_{jk} = \sigma_{j1}$;

2) $\sum_{k=1}^{4} \left(-\mu_k x_{jk}\right) - \left(\mu_4 + \varphi_1\right) x_{j5} - \left(\mu_4 + \varphi_3\right) x_{j6} = \sigma_{j2}$;

3) $\sum_{k=1}^{4} \left(N_k + 2{,}5\right) x_{jk} + \left(AA\right) x_{j5} + \left(AB\right) x_{j6} = \sigma_{j3}$;

4) $-\sum_{k=1}^{4} \left(æ_k + 2{,}5 \cdot \mu_k\right) x_{jk} - \left(AC\right) x_{j5} - \left(AD\right) x_{j6} = \sigma_{j4}$;

5) $\sum_{k=1}^{4} 2{,}5 N_k x_{jk} + \left(AF\right) x_{j5} + \left(AG\right) x_{j6} = \sigma_{j5}$;

6) $-2{,}5 \sum_{k=1}^{4} æ_k x_{jk} - æ_4 \varphi_2 x_{j5} - æ_4 \varphi_4 x_{j6} = \sigma_{j6}$

и, наконец, для интегралов J_7 и J_8 – из двух систем линейных уравнений с шестью неизвестными x_{jk}, где $j = 7, 8$ определяет номер интеграла, а $k = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ – номер неизвестного корня знаменателя.

$$\begin{cases} x_{75} + x_{76} = \sigma_{75} \\ -\omega_6 x_{75} - \omega_5 x_{76} = \sigma_{76} \end{cases}; \quad \begin{cases} x_{85} + x_{86} = \sigma_{85} \\ -\omega_6 x_{85} - \omega_5 x_{86} = \sigma_{86} \end{cases}.$$

Правые части σ_{jk} данных систем уравнений выражаются через коэффициенты b_k и d_k, $k = 0, 1, 2$ многочленов $C_1(\omega)$ и $C_2(\omega)$, определенных ранее из системы (44). Соответствующие расчетные соотношения, полученные методом неопределенных коэффициентов, имеют вид

$\sigma_{11} = 2i$; $\sigma_{12} = -2$; $\sigma_{13} = 4i$; $\sigma_{14} = -3$; $\sigma_{21} = b_1 + ib_2$; $\sigma_{22} = b_0 + ib_1 - 3b_2$; $\sigma_{23} = ib_0 + 2b_1$; $\sigma_{24} = 2b_0 - 7b_2$;
$\sigma_{31} = -2i$; $\sigma_{32} = -1$; $\sigma_{33} = -5i$; $\sigma_{34} = -4$; $\sigma_{41} = d_1 - id_2$; $\sigma_{42} = d_0 - id_1 - 3d_2$; $\sigma_{43} = -id_0 + 2d_1$; $\sigma_{44} = 2d_0 - 7d_2$;
$\sigma_{51} = d_1 + 2id_2$; $\sigma_{52} = d_0 + 2id_1 - 9d_2/2$; $\sigma_{53} = 2id_0 + 3d_1 + 4id_2$; $\sigma_{54} = 3d_0 + 4id_1 - 31d_2/2$; $\sigma_{55} = 4id_0 + 4d_1$;
$\sigma_{56} = -4d_0 - 35d_2/2$; $\sigma_{61} = b_1 - 2ib_2$; $\sigma_{62} = b_0 - 2ib_1 - 9b_2/2$; $\sigma_{63} = -2ib_0 + 3b_1 - 4ib_2$; $\sigma_{64} = 3b_0 - 4ib_1 - 31b_2/2$;
$\sigma_{65} = -4ib_0 + 4b_1$; $\sigma_{66} = 4b_0 - 35b_2/2$; $\sigma_{75} = b_1$; $\sigma_{76} = b_0 - 5b_2/2$; $\sigma_{85} = d_1$; $\sigma_{86} = d_0 - 5d_2/2$.

Параметры AA, AB, AC, AD, AF, AG, φ_1, φ_2, φ_3, φ_4, а также μ_k, N_k и $æ_k$ ($k = 1, 2, 3, 4$) определены выражениями (28), полученными при рассмотрении случая $T = 2$; $0 < \tau < 1$.

Приняв далее во всех восьми интегралах $1/\left(\omega - \omega_k\right) = \int_0^\infty ie^{i\omega_k s} \cdot e^{-i\omega s} ds$ и аппроксимируя стохастические интегралы от $\xi(u)$ тригонометрическим полиномом (35) с $\tilde{N} = 15$ гармониками, после их вычисления придем к окончательной формуле для оператора интерполирования при T = 2 и $1 < \tau < 2$: $\tilde{\xi}\left(t; T; \tau\right) = X + Y_1 + Y_2 + Y_3$, где $X = \sum_{j=1}^{8} \rho_j \xi\left(\nu_j\right)$;

$$Y_1 = \sum_{r=1}^{4} \sum_{j=1}^{4} i\gamma_{rj} \left[-\frac{A_0}{i\omega_r} + \sum_{k=1}^{15} A_k \frac{k \sin k\nu_r - i\omega_r \cos k\nu_r}{k^2 - \omega_r^2} + \sum_{k=1}^{15} B_k \frac{\left(-i\omega_r \sin k\nu_r - k \cos k\nu_r\right)}{k^2 - \omega_r^2} \right] =$$

$$= \sum_{r=1}^{4} \sum_{j=1}^{4} i\gamma_{rj} \cdot \Omega_{rj}\left(\tilde{N}\right),$$

где $\Omega_{rj}\left(\tilde{N}\right) = \Omega_{rj}\left(15\right)$ – выражение в квадратных скобках формулы для Y_1;

$$Y_2 = \sum_{r=5}^{6} \sum_{j=1}^{6} i\lambda_{rj} \cdot \Omega_{rj}\left(15\right); \; Y_3 = \sum_{r=7}^{8} \sum_{j=5}^{6} i\eta_{rj} \cdot \Omega_{rj}\left(15\right).$$

В этой формуле $\nu_1 = t + \tau - 2g$; $\nu_2 = t - g$; $\nu_3 = t + \tau + g$; $\nu_4 = t + g + T$; $\nu_5 = t + T - 2g$;

$$\nu_6 = t + 2g;\ \nu_7 = t;\ \nu_8 = t + T;\ \gamma_{1j} = x_{1j}/3;\ \gamma_{2j} = x_{2j}/3;\ \gamma_{3j} = x_{3j}/3;\ \gamma_{4j} = x_{4j}/3;\ j = 1,2,3,4;$$

$$\lambda_{5j} = -x_{5j}/6;\ \lambda_{6j} = -x_{6j}/6;\ j = 1,2,3,4,5,6;\ \eta_{7j} = x_{7j}/2;\ \eta_{8j} = x_{8j}/2;\ j = 5,6.$$

$$\rho_1 = 1/3;\ \rho_2 = b_2/3;\ \rho_3 = -2/3;\ \rho_4 = d_2/3;\ \rho_5 = -d_2/6;\ \rho_6 = -b_2/6;\ \rho_7 = b_2/2;\ \rho_8 = d_2/2.$$

В работе показано, что если для марковского процесса с рациональной спектральной плотностью вида $S_{рац}(\omega) = 1/|K(\omega)|^2$ (где $K(\omega)$ – многочлен) «оператор интерполирования зависит от значений процесса в концах интервала интерполирования, то есть в точках $s = t$ и $s = t + T$» [11], то для исследуемого L-марковского процесса с квазирациональной спектральной плотностью (4) ситуация меняется. При $T = 2$ оператор зависит от значений процесса в следующих точках:

в шести точках $z_1 = \nu_5 = t + T - 2g;\ z_2 = \nu_6 = t + 2g;\ z_3 = \nu_1 = t + \tau - 2g;\ z_4 = \nu_7 = t;$ $z_5 = \nu_8 = T + \tau;\ z_8 = \nu_2 = \tau + t - g$, общих для обоих диапазонов параметра τ;

в двух дополнительных точках $z_6 = \tau + 2g + t$ и $z_7 = t + \tau - g$ при $0 < \tau < 1$;

в двух дополнительных точках $\nu_3 = t + \tau + g$ и $\nu_4 = t + T + g$ при $1 < \tau < 2$.

С помощью разработанной авторами программы на языке Python выполнено табулирование значений оператора интерполирования при $T = 2$ на интервале $1 < \tau < 2$ с шагом $h_\tau = 0{,}01$. Это позволяет вычислять численные значения оператора для любого заданного момента времени из указанного диапазона. Например, при $\tau = 1{,}15$ значение оператора составляет $\tilde{\xi}(t;T;\tau) = \tilde{\xi}(1{,}15;2;0{,}01) = -0{,}1142 + 0{,}006i$; аналогично при $\tau = 1{,}28$ оно будет равно $\tilde{\xi}(t;T;\tau) = \tilde{\xi}(1{,}28;2;0{,}01) = -4{,}836 + 0{,}00585i$.

На заключительном графике (рис. 5) продемонстрирована эффективность полученных формул спектральных характеристик при $0 < \tau < 1$ и $1 < \tau < 2$, а также соответствующих им операторов интерполирования.

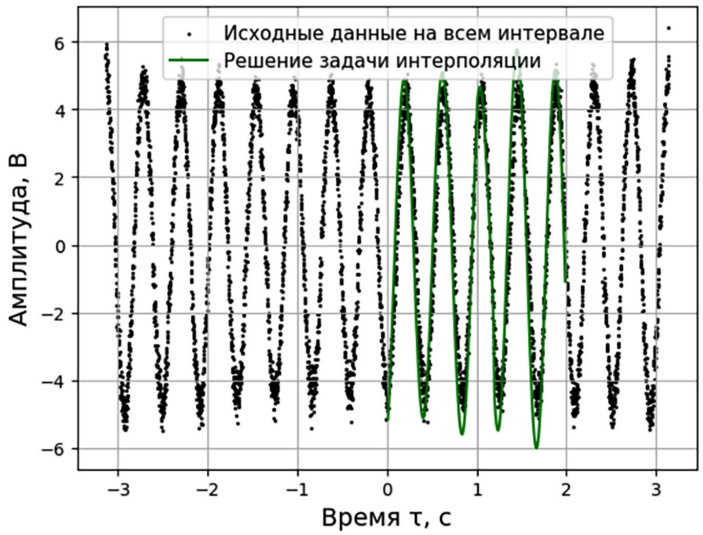


Рис. 5. Исходные, в том числе «скрытые», данные L-марковского процесса и решение задачи интерполирования
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Метрики оценки качества аппроксимационной модели

№	Метрика	Значение
1	MAE (Средняя абсолютная ошибка)	0,802
2	*RMSE* (Корень из средней квадратичной ошибки)	0,954
3	R^2 (Коэффициент детерминации)	0,908
4	*wMAPE* (Взвешенная относительная ошибка)	0,291

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Для независимой проверки точности восстановления данных на тестовом интервале $\tau \in (0;2)$ был рассчитан комплекс взаимодополняющих критериев. Выбранный пакет метрик позволяет всесторонне оценить величину погрешности, структуру ошибок и геометрическое соответствие моделируемой кривой исходному процессу. Результаты расчетов приведены в таблице.

Анализ результатов вычислений позволяет сделать следующие выводы:

– Разработанная модель обладает высокой объясняющей способностью: коэффициент детерминации $R^2 = 0{,}908$ подтверждает, что построенная модель успешно описывает 90,8 % дисперсии амплитуды исследуемого процесса на участке лакуны.

– Взвешенная относительная ошибка *wMAPE* составила 29,1%. Использование данной метрики взамен классической *MAPE* методологически обосновано знакопеременной природой стационарного гауссовского процесса. Для крупного моделируемого пропуска, составляющего 31,83 % от общей длины реализации (1591 отсчет из 4998), полученный уровень погрешности свидетельствует об устойчивости алгоритма к сингулярностям.

– Средняя абсолютная ошибка составляет $MAE = 0{,}802$. Соотношение $RMSE/MAE \approx 1{,}19$. Близость этого коэффициента к единице указывает на отсутствие на тестовом интервале локальных аномальных всплесков, паразитных осцилляций и краевых эффектов (явлений Рунге или Гиббса). Отклонения модели от истинных значений распределены гомогенно по всему скрытому фрагменту, что подтверждает гладкость и вычислительную устойчивость предложенной интерполяции. Поскольку исследуемый стационарный гауссовский процесс обладает свойством эргодичности, полученные на данной реализации оценки являются статистически устойчивыми и инвариантными относительно конкретной траектории.

Для проверки вычислительной стабильности аппроксимирующего оператора $\xi(\tau)$ и его инвариантности к локальным флуктуациям наблюдаемых данных проведены два численных эксперимента.

Эксперимент 1: устойчивость к выбору числа гармоник. Была выполнена серия численных экспериментов с варьированием числа гармоник N в диапазоне от 10 до 20 при фиксированном количестве наблюдаемых данных. Оптимальные аналитические показатели достигнуты при $N = 15$ ($R^2 = 0{,}908$, $RMSE = 0{,}954$, $MAE = 0{,}802$). В диапазоне $N \geq Nopt$ качество остается стабильным: $R^2 \in [0{,}773;0{,}908]$, а относительное приращение ошибки *RMSE* не превышает 14,07 %. При $N < Nopt$ наблюдается резкое снижение качества вплоть до отрицательных значений R^2, что объясняется недостаточностью количества гармоник для аппроксимации сигнала и автоматически исключается критерием минимума *RMSE* на наблюдаемых данных. Таким образом, устойчивость метода к переопределению модели количественно подтверждена тремя независимыми метриками и охарактеризована через *CV*(*RMSE*), а не через единичный показатель.

Эксперимент 2: инвариантность к локальным флуктуациям. Для исследования робастности алгоритма к 2 % наблюдаемых точек добавлялся импульсный шум амплитудой до 2σ, после чего коэффициенты тригонометрического полинома и оператор $\xi(\tau)$ пересчитывались полностью. Численный эксперимент повторялся 5 раз с генерацией различных реализаций шума с последующим усреднением результатов. Отклонение ξ_{noisy} от ξ_{clean} оценивалось по четырем показателям: $MAE = 0{,}037$, $RMSE = 0{,}046$, $\max|\Delta\xi| = 0{,}106$, средняя относительная погрешность равна 1,11 % при максимальной 3,18 %. Выявленная инвариантность объясняется тем, что коэффициенты тригонометрического полинома являются интегральными характеристиками сигнала: локальные выбросы усредняются при вычислении коэффициентов и не оказывают существенного влияния на результат интерполяции.

Использование нескольких независимых метрик (*MAE*, *RMSE*, $\max|\Delta\xi|$, относительная погрешность) исключает зависимость выводов от какой-либо одной характеристики. Полученные количественные результаты подтверждают как вычислительную устойчивость метода в окрестности $N = 15$, так и его инвариантность к локальным флуктуациям наблюдаемых данных.

Поскольку исследуемый стационарный гауссовский процесс однозначно задается спектральной плотностью (4) и моделируется программно с фиксированными параметрами, его различные реализации обладают идентичными эргодическими и спектральными свойствами при различии конкретных траекторий.

Таким образом, предложенная модель обеспечивает надежную аппроксимацию, адекватно описывает физическую природу процесса, устойчива к локальным флуктуациям и может быть использована для последующего анализа.

Выводы

В работе предложена и исследована вероятностная модель линейного интерполятора для L-марковского процесса с квазирациональной спектральной плотностью, обобщающей класс классических рациональных функций. В основе разработанного математического аппарата лежит метод спектральных представлений А. М. Яглома.

По результатам теоретических исследований и вычислительного эксперимен-

та сформулированы следующие ключевые выводы:

Разработана аналитическая модель оператора интерполяции L-марковского процесса, базирующаяся на спектральной теории случайных процессов, аппарате разностных уравнений и теории функций комплексного переменного. На основе теоремы Левинсона – Маккина – Питта доказана L-марковость исследуемого стационарного гауссовского процесса. Установлено его фундаментальное отличие от классического марковского процесса: если в традиционном случае число граничных точек строго ограничено двумя, то для исследуемого L-марковского процесса с квазирациональной спектральной плотностью их количество возрастает до восьми. Данный эффект обеспечивает более детализированное и точное восстановление пропущенных фрагментов.

Имитационное моделирование L-марковского процесса по заданной спектральной плотности реализовано в виде виртуального прибора в среде LabVIEW. Вычислительное ядро алгоритма интерполяции и аналитические процедуры реализованы в виде специализированного программного обеспечения на языке Python.

Разработанное программное обеспечение обеспечивает автоматическую проверку условий аналитичности спектральной характеристики, аппроксимацию процесса тригонометрическим полиномом и расчет комплекса метрик качества. За счет разложения квазирациональных слагаемых под знаком стохастического интеграла на простейшие дроби получен алгоритм вычисления числовых значений интерполятора. Данный подход обеспечил устойчивость расчетной схемы к возникновению вычислительных аномалий в области околонулевых временных отсчетов при расширении интервала пропуска.

Полученные результаты вносят существенный вклад в развитие спектральной теории фильтрации и интерполяции случайных сигналов. Разработанный метод и программный инструментарий могут быть непосредственно применены в радиофизике, радиотехнике и современных системах цифровой обработки сигналов для прецизионного восстановления фрагментированных временных рядов и совершенствования телекоммуникационного оборудования.

Список литературы

1. Докучаев Н. Г. Задачи фильтрации, прогноза и интерполяции для неограниченных сигналов в непрерывном времени // Проблемы передачи информации (РАН), 2026. Т. 62. № 1. С. 5–23. URL: https://rucont.ru/efd/958104 (дата обращения: 30.07.2026).

2. Сидоров И. Г., Левин В. И. Линейная минимаксная интерполяция стационарного случайного процесса с интервальными параметрами // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 1. С. 215–242. URL: http://sccs.intelgr.com/archive/2021-01/09-Sidorov.pdf (дата обращения: 30.07.2026). DOI: 10.24411/2410-9916-2021-10109.

3. Rafael Torres, Daniel Torres, Zandra Lizarazo, Theory of prediction, interpolation and filtering of α-stationary random signals // Signal Processing. 2018. Vol. 147. P. 46–53. DOI: 10.1016/j.sigpro.2018.01.020.

4. Буторин Е. Л., Винокуров А. Д., Куприянов Н. А., Ульянов Г. Н., Шаталов А. А., Шаталова В. А., Чеботарь К. И. Особенности создания и применения алгоритмов многомерной адаптивной фильтрации во временной и частотной областях. Ч. 2. Интерполяция // Наукоемкие технологии. 2024. Т. 25. № 3. С. 20–33. DOI: 10.18127/j19998465-202403-02.

5. Исаков В. Н., Тимошенко П. И. Локальная интерполяция и аппроксимация в задачах эвристического синтеза цифровых фильтров // Российский технологический журнал. 2018. Т. 6. № 4. С. 42–64. DOI: 10.32362/2500-316X-2018-6-4-42-64.

6. Суходолов Д. М., Крыловецкий А. А. Методы сверхразрешения в задачах анализа медицинских изображений // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2018. № 1. С. 126–132. DOI: 10.17308/sait.2018.1/1200.

7. Белов А. М., Денисова А. Ю. Спектральное и пространственное сверхразрешение при комплексировании данных ДЗЗ различных источников // Компьютерная оптика. 2018. Т. 42. № 5. С. 855–863. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-5-855-863.

8. Torres Y., Premaratne K., Amelung F., Wdowinski Sh. An Efficient Polyphase Filter-Based Resampling Method for Unifying the PRFs in SAR Data // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Oct. 2017. Vol. 5. Is. 10. P. 5741–5754. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/7967752/ (дата обращения: 31.07.2026). DOI: 10.1109/TGRS.2017.2713600.

9. Fuchs B., Le Coq L., Migliore M. D. On the Interpolation of Electromagnetic Near Field Without Prior Knowledge of the Radiating Source // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2017. Vol. 65. Is. 7. P. 3568–3574. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/7930477/ (дата обращения: 31.07.2026). DOI: 10.1109/TAP.2017.2705163.

10. Колмогоров А. Н. Интерполирование и экстраполирование стационарных случайных последовательностей // Изв. АН СССР. Сер. матем., 1941. Т. 5. Вып. 1. С. 3–14. URL: https://mathnet.ru/rus/im3775 (дата обращения: 31.07.2026).

11. Yaglom A. M. An Introduction to the Theory of Stationary Random Functions/ Revised English edition translated and edited by Richard A. Silverman. Mineola, New York, Martino Publishing, 2004. 235 p. [Электронный ресурс]. URL: https://books.google.ru/books?id=bnQKXWjGoSEC&printsec=frontcover&hl=ru#v=onepage&q&f=false (дата обращения: 31.07.2026).

12. Фадеева Л. Ю., Титов А. Н. Разработка стохастической модели оптимального оператора интерполяции для L-марковского процесса // Современные наукоемкие технологии. 2026. № 6. С. 187–196. URL: https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=40834 (дата обращения: 31.07.2026). DOI: 10.17513/snt.40834.

13. Молчан Г. М. L-марковские гауссовские поля // ДАН СССР, 1974. Т. 215. № 5. С. 1054–1057.

14. Фадеева Л. Ю., Титов А. Н. Разработка математической модели функционала – экстраполятора L-марковского фрактального процесса // Инженерный вестник Дона. 2026. № 2. С. 66–79. URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2026/10779 (дата обращения: 30.07.2026).

15. Фадеева Л. Ю. Явный вид оптимального оператора фильтрации с запаздыванием для L-марковского процесса // Инженерный вестник Дона. 2025. № 8. С. 968–980. URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2025/10312 (дата обращения: 30.07.2026).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 519.6:544.773.4:535.21
DOI

CC BY 4.0

АДАПТИВНАЯ СТРАТЕГИЯ ВЫЧИСЛЕНИЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОСАЖДЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ В ЖИДКОСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

[1]Ткаченко О. П. ORCID ID 0000-0003-1806-0274, [2]Крылов В. И., [3]Вихтенко Э. М. ORCID ID 0000-0002-7152-2311

[1]Вычислительный центр Дальневосточного отделения Российской академии наук, Хабаровск, Российская Федерация;
[2]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», Хабаровск, Российская Федерация;
[3]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тихоокеанский государственный университет имени М. П. Даниловского», Хабаровск, Российская Федерация, e-mail: 004184@togudv.ru

Осаждение наноразмерных частиц в жидкостях под действием лазерного излучения представляет значительный интерес для задач фотофореза, оптического манипулирования и технологий направленной доставки веществ. Однако при больших значениях безразмерного параметра скорости дрейфа численное моделирование процесса сталкивается с существенными вычислительными трудностями: потерей точности и переполнением разрядной сетки вследствие быстрого роста экспоненциальных слагаемых в аналитическом решении. Целью работы является разработка адаптивного алгоритма и программного комплекса в среде MATLAB для расчета пространственно-временного распределения концентрации частиц при значениях параметра скорости до $7 \cdot 10^4$. Математическая постановка задачи основана на одномерном уравнении непрерывности с краевыми условиями третьего рода, обладающем сингулярно возмущенным характером. В исследовании сопоставлены два подхода: использование аналитического выражения для точного решения, требующего высокоточного суммирования аналитического ряда, и численное решение методом прямых. Контроль сходимости вычислительного процесса осуществляется с использованием гибридной погрешности. Верификация при малых u подтвердила совпадение результатов с относительной погрешностью не выше 6 %. Для экстремальных режимов построены трехмерные графики функции распределения. Выявлено, что при $z = 0$ численная схема генерирует нефизические колебания вблизи $t = 0$, что связано с разрешением тонкого пограничного слоя и задает верхнюю границу применимости метода для переходного процесса. Разработанный инструмент позволяет проводить расчеты без привлечения библиотек длинной арифметики и может быть применен для интерпретации экспериментальных данных по лазерно-индуцированному осаждению коллоидных систем.

Ключевые слова: осаждение наночастиц, лазерное излучение, уравнение диффузии-дрейфа, численное моделирование, сингулярность, метод прямых, Maple, MATLAB

AN ADAPTIVE COMPUTATIONAL STRATEGY FOR MODELING NANOPARTICLE DEPOSITION IN A LIQUID UNDER LASER IRRADIATION

[1]Tkachenko O. P. ORCID ID 0000-0003-1806-0274, [2]Krylov V. I., [3]Vikhtenko E. M. ORCID ID 0000-0002-7152-2311

[1]Computing Center of Far East Branch Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russian Federation;
[2]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Far Eastern State Transport University", Khabarovsk, Russian Federation;
[3]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Pacific National University named after M. P. Danilovskiy", Khabarovsk, Russian Federation, e-mail: 004184@togudv.ru

The deposition of nanoscale particles in liquids under laser irradiation is of considerable interest for applications in photophoresis, optical manipulation, and targeted delivery of substances. However, at high values of the dimensionless drift velocity parameter u, numerical simulation of this process encounters significant computational difficulties, including loss of accuracy and floating-point overflow caused by the rapid growth of exponential terms in the analytical solution. The aim of this study is to develop an adaptive algorithm and a MATLAB-based software package for calculating the spatiotemporal distribution of particle concentration for drift velocity parameter values of up to $7 \cdot 10^4$. The mathematical formulation is based on a one-dimensional continuity equation with Robin (third-kind) boundary conditions, which is singularly perturbed. Two approaches are compared: an analytical approach based on the exact solution, which requires high-precision summation of an analytical series, and a numerical approach based on the method of lines. Convergence of the computational procedure is monitored using a hybrid error metric. Verification for small values of u confirmed agreement between the analytical and numerical results, with a relative error not exceeding 6 %. For the extreme regimes, three-dimensional plots of the distribution function were constructed. At $z = 0$, the numerical scheme was found to generate nonphysical oscillations near $t = 0$. These oscillations are associated with the insufficient resolution of a thin boundary layer and define the upper limit of applicability of the method to the transient process. The developed software enables computations without the use of arbitrary-precision arithmetic libraries and is suitable for interpreting experimental data on laser-induced deposition in colloidal systems.

Keywords: nanoparticle deposition, laser irradiation, drift–diffusion equation, numerical modeling, singular perturbation, method of lines, Maple, MATLAB

Введение

В настоящей работе рассматривается задача математического моделирования осаждения наноразмерных частиц в жидкости под действием лазерного излучения однородной интенсивности. Процесс описывается одномерным уравнением непрерывности с дрейфовым членом, отражающим систематическое смещение частиц под влиянием оптических сил.

В последние десятилетия интенсивно развиваются технологии, связанные с управлением распределением наночастиц и микроскопических объектов в прозрачных средах. Управляемое разделение частиц в наножидкостях находит применение в самых разных областях – от медицины [1] до космоса [2]. В обзоре [3] приведен сравнительный анализ современных методов, которые обеспечивают неразрушающее манипулирование частицами для аналитических и биотехнологических применений. Среди них – оптический пинцет [4], а также методы магнитной и термической сепарации [5; 6].

Одной из ключевых групп методов манипулирования частицами является использование оптических методов, среди которых выделяется лазерное облучение. Примером успешного внедрения метода являются работы по созданию оптических ловушек для эффективной сортировки и захвата частиц определенных размеров в зависимости от плотности мощности излучения [7; 8].

Точное прогнозирование пространственно-временной эволюции концентрации частиц в таких системах требует надежных вычислительных инструментов, способных работать в широком диапазоне безразмерных параметров, включая режимы с доминирующим дрейфом.

Рассматриваемая математическая начально-краевая задача имеет сингулярность решения, обусловленную малым параметром при старшей производной. Класс задач с сингулярностью исследуется в работах [9–11]. V. A. Rukavishnikov и E. I. Rukavishnikova для класса задач с вырождением на всей границе области получили оценки скорости сходимости, что непосредственно затрагивает рассматриваемую проблему [11].

Для преодоления возникающих вычислительных трудностей требуется создание специализированного инструмента, в связи с чем поставлена задача разработки адаптивного численного алгоритма и его реализации для моделирования кинетики фотостимулированного осаждения наночастиц, а также проведение вычислительных экспериментов для верификации метода и анализа его применимости.

Материалы и методы исследования

Рассмотрим задачу нахождения концентрации прозрачных наноразмерных частиц в кювете, заполненной прозрачной жидкостью, под действием лазерного излучения, создающего однородную и постоянную силу светового давления, действующего на наночастицы, находящиеся в этой жидкости (рис. 1). Предполагается, что в результате такого воздействия эффектами тепломассопереноса можно пренебречь по сравнению с давлением электромагнитного излучения на наночастицы.

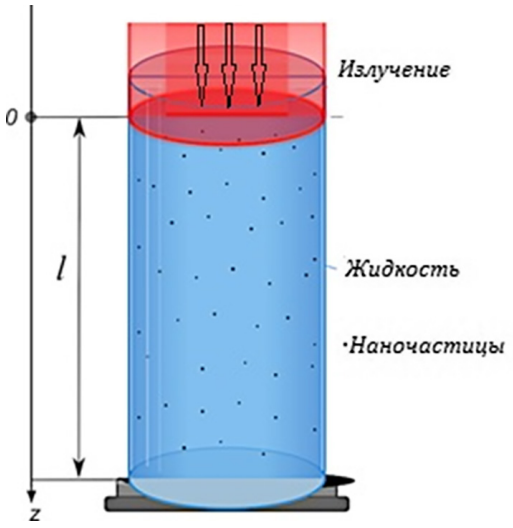


Рис. 1. Схема кюветы с жидкостью и падающим лазерным излучением. Примечание: составлен авторами на основе источника [12]

Физическая постановка предполагает одномерное распределение концентрации n наночастиц вдоль вертикальной оси кюветы, что позволяет свести процесс к математической модели, описываемой начально-краевой задачей для параболического уравнения непрерывности, являющегося следствием уравнения Эйштейна – Фоккера – Планка, сформулированной в [12; 13]:

$$\frac{\partial n}{\partial \bar{t}} = D\frac{\partial^2 n}{\partial \bar{z}^2} - v\frac{\partial n}{\partial \bar{z}},\ \bar{z} \in (0,l),\ \bar{t} > 0$$

с граничными условиями

$$vn - D\frac{\partial n}{\partial \bar{z}} = 0 \text{ при } \bar{z} = 0 \text{ или } \bar{z} = l,\ \bar{t} \geq 0$$

и начальным условием

$$n(\bar{z},0) = n_0,\ \bar{z} \in [0,l].$$

где n – концентрация наночастиц; $\bar{z}$ и $\bar{t}$ – пространственная координата вдоль оси ци-

линдра и время; D и v – коэффициент диффузии и скорость систематического смещения частиц под действием излучения соответственно; l – высота кюветы.

Введем безразмерные величины

$$z = \frac{\overline{z}}{l}, \quad t = \frac{D\overline{t}}{l^2}, \quad u = \frac{vl}{D}.$$

Неизвестной функцией является концентрация частиц $n(z,t)$. В новых переменных исходная задача [12] формулируется как начально-краевая задача для уравнения

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\partial^2 n}{\partial z^2} - u\frac{\partial n}{\partial z} \tag{1}$$

с краевыми условиями нулевого потока

$$un - \frac{\partial n}{\partial z} = 0 \text{, при } z = 0 \text{ или } z = 1$$

и начальным условием однородного распределения

$$n(z,0) = n_0 = \text{const}.$$

Точное аналитическое решение задачи (1) получено в [12; 13] и представлено в виде бесконечного сходящегося ряда

$$\frac{n(z,t)}{n_0} = u\left\{\frac{e^{uz}}{e^u - 1} + e^{0.5uz}\sum_{m=1}^{\infty}\frac{2(m\pi)^2\left[1-\left(-1\right)^m e^{-0,5u}\right]}{(m^2\pi^2 + u^2/4)^2}y_m(z)e^{-\left(m^2\pi^2+u^2/4\right)t}\right\}, \tag{2}$$

где $y_m(z) = u/(2m\pi)\cdot\sin(m\pi z) + \cos(m\pi z)$.

Для удобства дальнейшего анализа введем нормированную безразмерную функцию

$$F(z,t) = n(z,t)/n_0.$$

При малых значениях безразмерного параметра скорости дрейфа частиц ($u \le 10$) ряд (2) сходится быстро, и его численное суммирование не представляет вычислительных сложностей [14]. Однако практический интерес представляют режимы интенсивного осаждения под действием лазерного излучения, соответствующие $u > 100$. В этом случае в уравнении (1) при производной по времени и старшей производной по координате появляется малый параметр $1/u$, что придает задаче сингулярно возмущенный характер. Краевые задачи для уравнений сингулярного типа исследовались в [9], а начально-краевые задачи конвекции-диффузии – в [10].

Для расчета при больших значениях u (или, эквивалентно, малых $1/u$) в данной работе предложено два взаимодополняющих подхода:

1) аналитический подход: суммирование ряда (2) с использованием большого числа слагаемых (~10^5) и арифметики произвольной точности, реализуемой в системе компьютерной алгебры Maple. Заметим, что для $z = 1/2$ суммирование можно выполнить для «бесконечного» (infinity в Maple) числа слагаемых;

2) численный подход: численное решение начально-краевой задачи (1) методом прямых в среде численного анализа MATLAB.

В работах [14; 15] проанализировано качественное поведение решения (2) и выявлены основные вычислительные трудности при $u > 40$, обусловленные двумя факторами, а именно:

1) потерей значащих цифр при суммировании быстро убывающих или быстро растущих экспоненциальных слагаемых;

2) ограничением на максимальное представимое число в формате с плавающей запятой двойной точности (≈$1{,}8\cdot10^{308}$) [16].

Как показано в [14; 15], применение специализированных алгоритмов позволяет преодолевать эти ограничения и проводить расчеты, например, для $u = 2000$, а при $z = 1/2$ для $u = 70300$, однако получаемые значения функции $F(z,t)$ остаются доступными лишь для фиксированных координат z, что затрудняет построение полных пространственно-временных зависимостей.

В настоящей работе разработан адаптивный алгоритм для MATLAB, который автоматически выбирает стратегию вычисления в зависимости от величины параме-

тра u. Данный подход позволяет строить трехмерные графики функции $F(z,t)$ в широком диапазоне параметров. При проведении исследований использована версия MATLAB R2021a.

Для численного решения начально-краевой задачи (1) реализована вычислительная процедура, в которой используется встроенная функция pdepe(). Формат вызова функции pdepe() следующий:

pdepe(0, @pdefun, @icfun, @bcfun, zspan, tspan),

где zspan и tspan задают пространственно-временную сетку, а указатели @pdefun, @ icfun, @bcfun ссылаются на функции, описывающие соответственно дифференциальное уравнение (1), начальное и краевые условия. После получения решения от pdepe() проводится его постобработка и визуализация результатов вычислений.

Суть метода прямых в pdepe заключается в том, что непрерывное пространство по z дискретизируется, производные по пространству заменяются разностными схемами, благодаря чему исходное уравнение с частными производными превращается в систему обыкновенных дифференциальных уравнений относительно времени t для каждого узла сетки. Для ее решения вызывается решатель ode15s. В проведенных расчетах использованы следующие параметры для построения пространственной и временной сеток:

– пространственная сетка zspan по безразмерному параметру z ∈ [0;1]:

$$\omega_z = \left\{ z_i = ih_z,\ i = 0 \ldots N_z,\ h_z = 1/N_z \right\},$$

где N_z = 1800;

– сетка по времени tspan строится в интервале от 0 до t_{end}:

$$\omega_t = \left\{ t_j = jh_t,\ j = 0 \ldots N_t,\ h_t = t_{end}/N_t \right\},$$

где N_t = 18000.

Заметим, что решатель ode15s является адаптивным, то есть может изменять шаг по времени для обеспечения устойчивости в заданных пределах.

Вычисления проведены с заданными по умолчанию параметрами options для решателя pdepe, в том числе использованы следующие значения для допусков: RelTol = 10^{-3}, AbsTol = 10^{-6}.

Для проверки численного метода проведено сравнение с известными значениями аналитического решения при u = 17,2. Также в работе представлены результаты расчетов для практически значимых значений параметра u = 8770 и u = 70300, соответствующих условиям реального эксперимента. Заметим, что значение безразмерного параметра u = 17,2 относится к области малых скоростей дрейфа наночастиц, а u = 8770 и u = 70300 являются высокими и даже экстремальными величинами. Для таких скоростей дрейфа характерно быстрое затухание решения, то есть при времени $t \to t_{end}$ функция $F(z,t)$ экспоненциально убывает к нулю.

Время расчета t_{end} определяется моментом выхода решения на стационарный режим:

$$t_{end} = \begin{cases} 0,08, & u = 17,2; \\ 6,5 \times 10^{-5}, & u = 8770; \\ 7,5 \times 10^{-6}, & u = 70300. \end{cases}$$

Далее обозначено: F_{mat} – численное решение; F_{ser} – аналитическое решение (2), методы вычисления которого изложены в [14; 15].

Сравнение решений F_{mat} и F_{ser} проводится на отрезке $z \in [0;8/9]$. Численное решение F_{mat} получено для всей области определения $z \in [0;1]$; однако верификация численного метода выполнялась в указанной подобласти, где эталонный ряд (2) вычисляется прямым суммированием при $N = 10^5$. Верхняя граница по координате выбрана как z = 8/9, так как при экстремальных значениях параметра дрейфа точное аналитическое решение вблизи границы z = 1 становится сингулярным для фиксированного числа слагаемых ряда из-за катастрофической потери значащих цифр при суммировании экспонент. Ограничение подобластью позволяет вычислить значение ряда (2) прямым суммированием без привлечения процедур экстраполяции.

Для оценки точности численного решения использовались три величины:

1) разность решений $F_{mat} - F_{ser}$;

2) относительная погрешность, вычисляемая в каждом узле сетки традиционным способом:

$$\delta_s = \frac{\left| F_{mat} - F_{ser} \right|}{\left| F_{ser} \right|}; \qquad (3)$$

3) гибридная погрешность, которая отличается от (3) наличием регуляризатора в знаменателе.

Выбор метода вычисления погрешности зависел от поведения решения на заданных интервалах. При u = 17,2 функция $F(z,t)$ не стремится экспоненциально к нулю, поэтому может быть использована формула (3).

Для режимов с высокими значениями параметра дрейфа формула (3) неприме-

ма из-за деления на близкие к нулю значения функции $F(z,t)$. В этом случае используется формула вычисления гибридной погрешности, аналогичная применяемой для контроля шага в схемах Рунге – Кутты [17]:

$$\delta(t) = \frac{\left|F_{\text{mat}}(t) - F_{\text{ser}}(t)\right|}{\left|F_{\text{ser}}(t)\right| + C}, \qquad (4)$$

добавка C в знаменатель реализует стандартный для решателей ОДУ [18] смешанный допуск (аналог RelTol + AbsTol), предотвращающий нефизический рост погрешности вблизи нулей функции. Теоретическое обоснование подобных оценок для разностных схем приведено в [19, с. 367–379, 392–400].

Чтобы обеспечить воспроизводимость расчетов и математическую строгость оценок, параметры регуляризации определяются априори на основе свойств эталонного аналитического ряда (2). Величина параметра C вычисляется по формуле

$$C = F_{max}\varepsilon.$$

Характерный масштаб решения F_{max} определяется как супремум модуля нормированной концентрации по области, выбранной для сравнения F_{mat} и F_{ser}:

$$F_{max} = \max_{z\in[0;8/9],\,t\in[0;t_{end}]} \left|F(z,t;u)\right|$$

при фиксированном u. В начальный момент времени $t = 0$ согласно постановке задачи концентрация однородна: $F(z,0) = 1$ для всех $z \in [0;1]$. Поскольку физический процесс описывает направленное осаждение частиц под действием дрейфа, функция $F(z,t)$ монотонно убывает во времени в любой точке внутри рассматриваемой области. Следовательно, глобальный максимум достигается при $t = 0$, что дает строгое равенство $F_{max} = 1{,}0$. Следовательно,

$$C = 1{,}0 \cdot \varepsilon = \varepsilon.$$

Параметр ε в формуле (4) представляет собой не инструмент настройки алгоритма, а априорную оценку относительной вычислительной погрешности самого эталонного решения (аналитического ряда), возникающую при его усечении до N слагаемых.

Сформулируем правило выбора ε. Для заданных параметров u и сетки $\omega_z \times \omega_t$ проводится тестовая серия вычислений ряда (2). Выбирается базовое число слагаемых N. Для каждого узла сетки рассчитывается разность между частичной суммой при N и $2N$ слагаемых. Максимальное относительное расхождение по всей области принимается за порог неопределенности эталона:

$$\varepsilon(u) = \frac{1}{F_{\max}} \max_{z\in[0;8/9],\,t\in[0;t_{end}]} \left|F^{(2\mathrm{N})} - F^{(\mathrm{N})}\right|,$$

где $F^{(N)}$ – частичная сумма ряда (2) из N слагаемых.

Данная процедура выполняется однократно до начала сравнения с численным методом MATLAB. Для $N = 10^5$ получено $\varepsilon = 0{,}051$ при $u = 8770$ и $\varepsilon = 0{,}31$ при $u = 70300$.

Добавка C предотвращает деление на близкие к нулю значения функции $F(z,t)$ на поздних этапах процесса, когда концентрация становится экспоненциально малой. Величина C интерпретируется как «уровень шума» или фундаментальная точность эталона. Если фактическая разница между численным и аналитическим решением оказывается меньше ε, это означает, что численный метод достиг предела различимости относительно выбранного аналитического решения, а не просто приблизился к нему. Выбор конкретного $N = 10^5$ обусловлен балансом между машинным временем расчета суммы ряда и насыщением кривой $\varepsilon(N)$ – дальнейшее увеличение числа слагаемых сверх этого порога не приводит к существенному снижению ε в формате двойной точности.

Агрегация погрешности по всему расчетному интервалу выполняется путем поиска максимума погрешности

$$\delta_{\max} = \max_t \left|\delta(t)\right|,$$

что отражает наихудший сценарий расхождения алгоритмов.

Результаты исследования и их обсуждение

Для верификации предложенного численного метода выполнены расчеты функции $F(z,t)$ при значении параметра дрейфа $u = 17{,}2$. Укажем физические параметры безразмерности. Значение параметра дрейфа $u = 17{,}2$ найдено из параметров, приведенных в [20]: $l = 0{,}03$ м, $D = 1{,}27\cdot10^{-12}$ м^2/с, $v = 7{,}28\cdot10^{-10}$ м/с. Конечное время $t_{end} = 0{,}08$ соответствует физическому времени $t_ф \approx 5{,}67\cdot10^7$ с.

На рис. 2 приведено сравнение результатов, полученных двумя независимыми способами: суммированием аналитического ряда (2) в Maple и прямым численным решением задачи (1) в MATLAB. Сравнение выполнено для трех характерных координат: $z = 0$, $z = 1/2$ и $z = 8/9$.

При $u = 17{,}2$ на интервале безразмерного времени $0 \le t \le 0{,}08$ максимальная относительная погрешность не превысила 6 %, что подтверждает адекватность численной схемы.

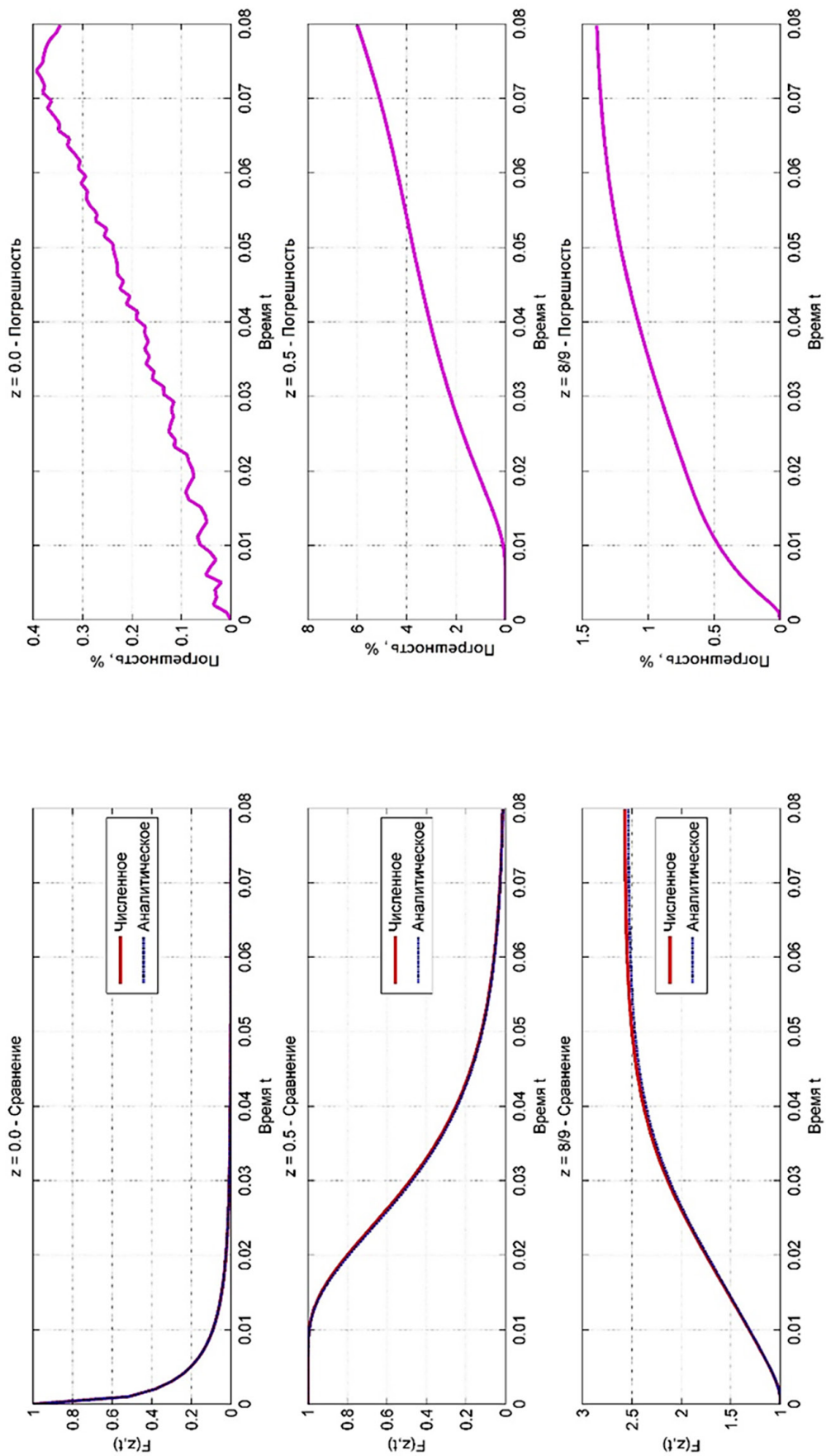


Рис. 2. Сравнение численного и аналитического решений при u = 17,2
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

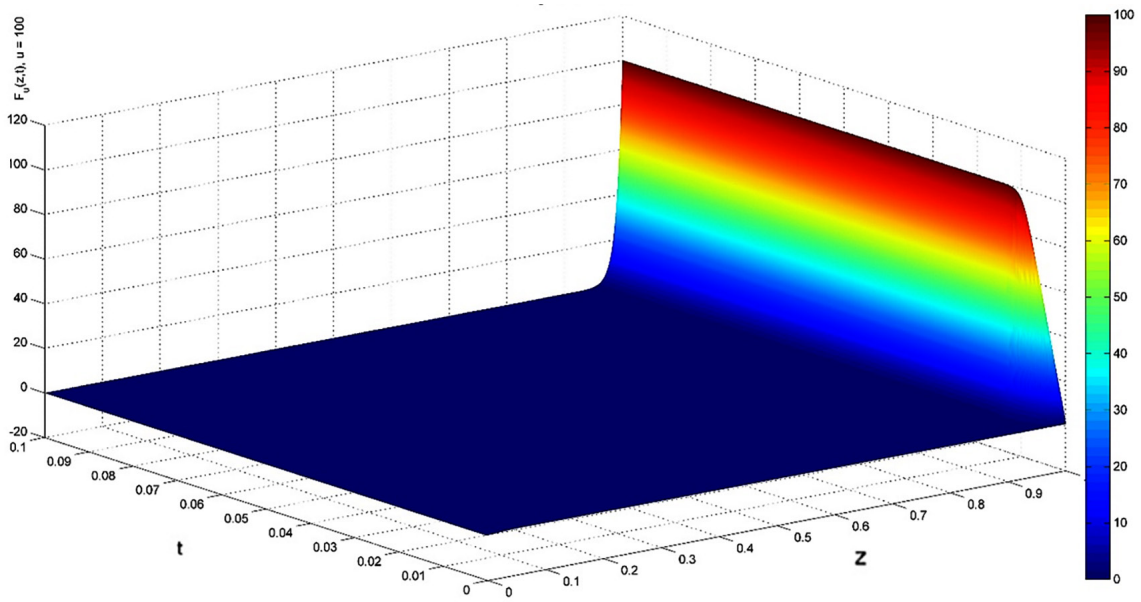


Рис. 3. Трехмерный график численного решения при u = 100
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Благодаря усовершенствованному алгоритму, адаптированному к сингулярно возмущенной структуре уравнения (1), удалось получить полные трехмерные графики функции $F(z,t)$ в широком диапазоне параметров. Ранее построение таких графиков по аналитическому ряду (2) было возможно лишь для фиксированных значений координаты z из-за вычислительных ограничений [14]. На рис. 3 представлен пример трехмерного распределения концентрации при $u = 100$, полученный численным методом.

Параллельно разработан модифицированный алгоритм суммирования ряда (2), позволяющий строить 3D-графики вплоть до $u = 500$. В ходе расчетов установлено, что при $u \geq 83$ в окрестности точки ($z = 1$, $t = 0$) функция $F(z,t)$ проявляет вычислительную особенность, связанную с потерей точности при суммировании быстро меняющихся экспоненциальных слагаемых для малых времен. Для устранения этого эффекта алгоритм дополнен процедурой сглаживания, основанной на асимптотическом разложении функции F при $t \to 0$ [13; 15].

Сопоставление численного решения с аналитическим рядом (2) для режимов $u = 8770$ и $u = 70300$ выполнено при параметрах регуляризации $C = 0{,}051$ и $C = 0{,}31$, определенных в разделе «Материалы и методы исследования». При этих фиксированных C вычислена гибридная погрешность $\delta(t)$ по формуле (4) на всем интервале $t \in [0;t_{end}]$. Ее максимум

$$\delta_{max} = \max_{t\in[0;t_{end}]} \left|\delta(t)\right|,$$

достигается вблизи t_{end} и составляет:

$u = 8770$: $\delta_{max} = 0{,}0503$

на интервале $t \in [5{,}5\cdot10^{-5}; 6{,}5\cdot10^{-5}]$;

$u = 70300$: $\delta_{max} = 0{,}3022$

на интервале $t \in [6{,}0\cdot10^{-6}; 7{,}5\cdot10^{-6}]$.

В обоих режимах $\delta_{max} < C$, то есть фактическая погрешность не превышает порога регуляризации. Близость δ_{max} к C означает, что расхождение численного и аналитического решений находится на уровне собственной погрешности эталонного ряда (2) и не может быть измерена точнее в рамках выбранного N. Таким образом, численный метод согласован с эталоном в пределах его точности. При $u = 70300$ и $z = 1/2$, начиная с $t = t_0 = 7{,}213\cdot10^{-6}$, функция принимает малые значения $|F| < C$, регуляризатор C ограничивает знаменатель формулы (4) и предотвращает нефизический рост $\delta(t)$.

Приведем параметры безразмерности. Значение параметра дрейфа $u = 8770$ найдено из параметров, указанных в [20]: $l = 0{,}03$ м, $D = 4{,}5\cdot10^{-13}$ м^2/с, $v = 1{,}31\cdot10^{-7}$ м/с. Конечное время $t_{end} = 6{,}5\cdot10^{-5}$ соответствует физическому времени $t_{ф} \approx 1{,}3\cdot10^{5}$ с.

Параметр $u = 70300$ выбран авторами для проверки численного метода в экстремальном режиме.

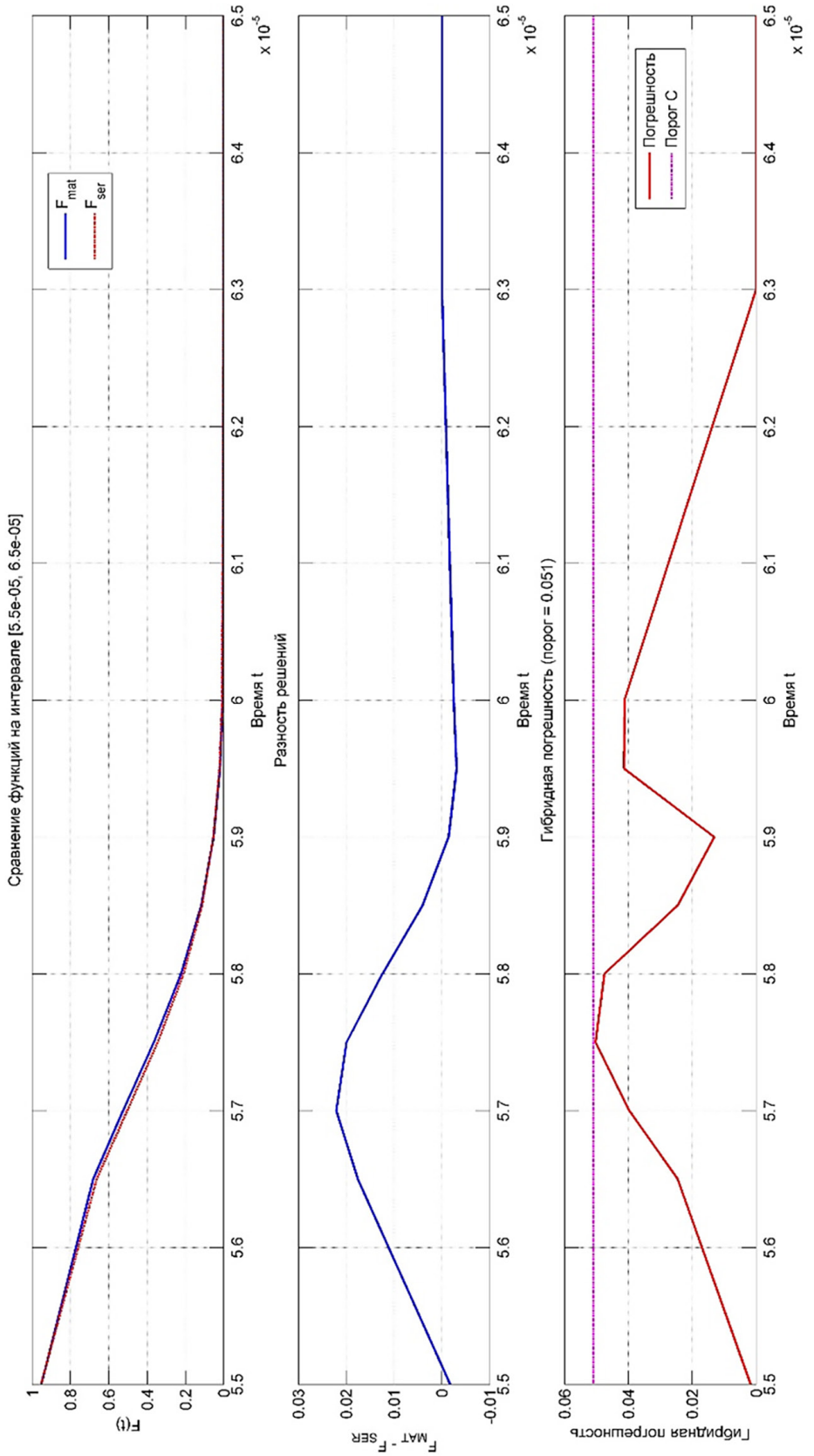


Рис. 4. Сравнение численного и аналитического решений уравнения (1) для режима сильного дрейфа (u = 8770) в точке наблюдения z = 1/2. Параметры расчета: пространственная сетка $N_z = 1800$, временная сетка $N_t = 18000$. Допуски встроенного решателя MATLAB pdepe: RelTol=10^{-3}, AbsTol=10^{-6}. Безразмерные переменные (z,t,F). Порог гибридной погрешности C = 0,051 обозначен горизонтальной линией. Панели: (а) графики функции F(z,t); (б) разность решений $F_{mat} - F_{ser}$; (в) гибридная погрешность δ(t)

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

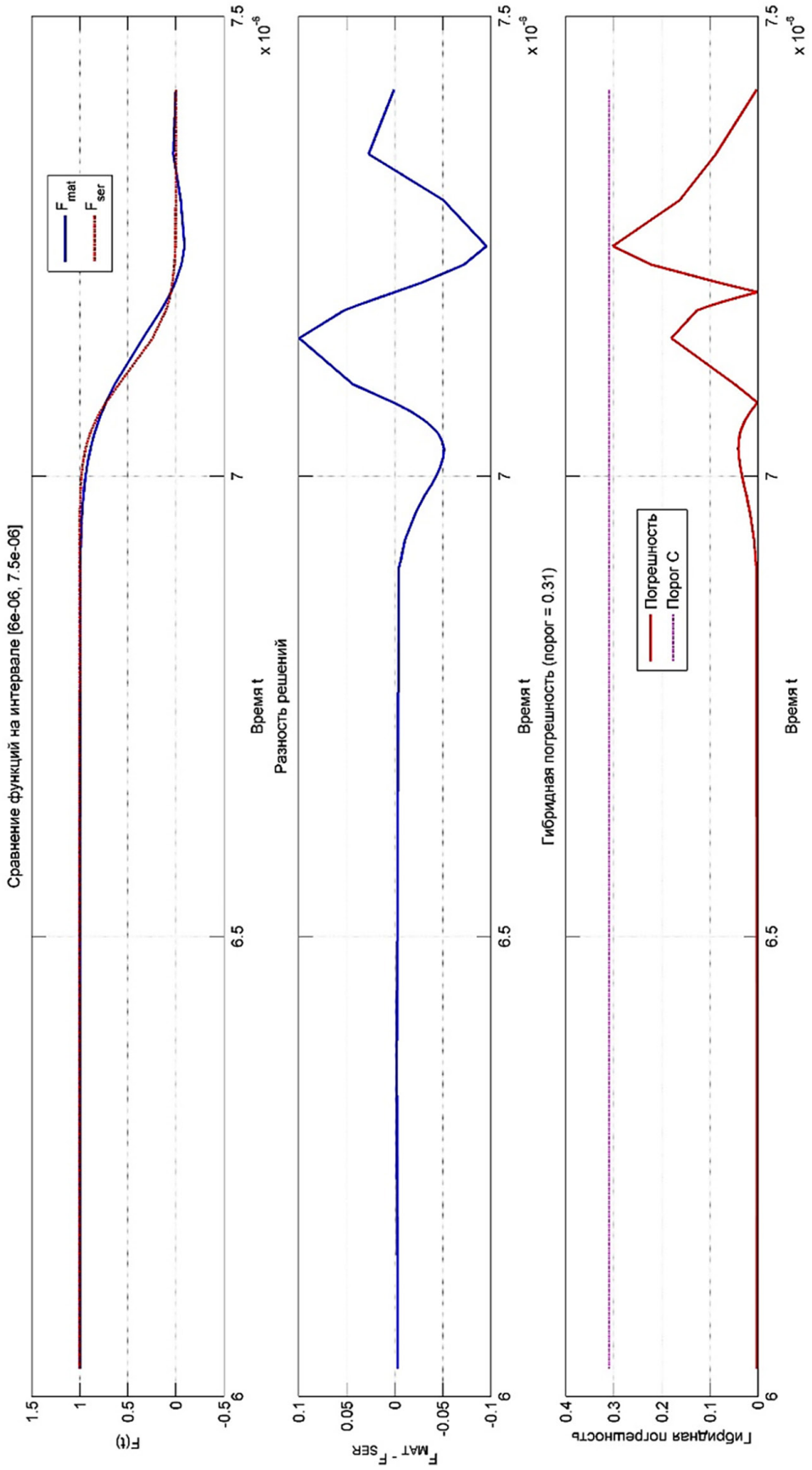


Рис. 5. Сравнение численного и аналитического решений уравнения (1) для экстремального значения (u = 70300) в точке наблюдения z = 1/2. Параметры расчета: пространственная сетка $N_z = 1800$, временная сетка $N_t = 18000$. Допуски встроенного решателя MATLAB pdepe: RelTol=10^{-3}, AbsTol=10^{-6}. Безразмерные переменные (z,t,F). Порог гибридной погрешности C = 0,31 обозначен горизонтальной линией. Панели: (а) графики функции F(z,t); (б) разность решений $F_{mat} - F_{ser}$; (в) гибридная погрешность δ(t)

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Результаты вычислений приведены на рис. 4 и 5 для $z = 1/2$. Представлены результаты, полученные для малых значений времени t: рис. 4 для $t \in [5{,}5\cdot10^{-5}; 6{,}5\cdot10^{-5}]$; рис. 5 для $t \in [6{,}0\cdot10^{-6}; 7{,}5\cdot10^{-6}]$.

В численном эксперименте достигнуто хорошее согласование результатов для функции $F(z,t)$, полученных как по аналитическому ряду (2), так и при прямом численном решении начально-краевой задачи (1). Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что предложенный адаптивный алгоритм позволяет находить достоверные результаты для больших значений параметра дрейфа u без применения методов «длинной арифметики» [21], что сокращает вычислительные затраты.

Для больших значений параметра дрейфа ($u = 8770$, $u = 70300$) качественный вид трехмерных графиков функции $F(z,t)$ соответствует асимптотике точного решения и физическому смыслу задачи. Количественный анализ показал, что при $z = 0$ численное решение демонстрирует нефизические колебания в окрестности $t = 0$, что связано с ограниченной разрешающей способностью сетки в пограничном слое. При $z = 1/2$ и $z = 8/9$ решение ведет себя корректно в соответствии с физической картиной процесса.

При $u = 70300$ численное решение остается достоверным до момента окончания переходного процесса: $t \approx 7{,}2\cdot10^{-6}$ при $z = 1/2$ и $t \approx 1{,}26\cdot10^{-5}$ при $z = 8/9$. Отметим, что для координаты $z = 8/9$ расчетный интервал времени был умышленно расширен за пределы базового $t \approx 7{,}5\cdot10^{-6}$, так как стабилизация процесса в этой зоне наступает позже. При этом, в силу накопления машинных погрешностей округления при суммировании аналитического ряда в данной области, верификация решения при $t > 7{,}5\cdot10^{-6}$ осуществлялась на основе встроенных механизмов контроля устойчивости, адаптивного выбора шага интегрирования и оценки сходимости среды MATLAB (компоненты пакета pdepe), которые подтвердили корректность и вычислительную стабильность получаемых численных результатов вплоть до достижения стационарного режима.

За пределами указанных временных интервалов начинают проявляться численные колебания, не имеющие физического обоснования. Следовательно, при экстремально больших u численное решение целесообразно использовать преимущественно для исследования начальной стадии перехода от начального распределения к стационарному профилю концентрации. Границы применимости данного подхода детально обсуждаются в [14].

Выводы

В настоящей работе решена задача математического моделирования осаждения наноразмерных частиц в жидкости под действием лазерного излучения. На основе проведенного анализа сформулированы следующие основные результаты:

1. Разработан адаптивный численный алгоритм и реализована программа в среде MATLAB для решения одномерной начально-краевой задачи уравнения диффузии с дрейфовым членом и краевыми условиями третьего рода. Алгоритм автоматически выбирает стратегию вычисления в зависимости от величины безразмерного параметра скорости дрейфа u, что обеспечивает устойчивость расчетов в широком диапазоне параметров.

2. Проведена верификация численного метода: при $u = 17{,}2$ получено совпадение с аналитическим решением, представленным в виде бесконечного ряда (2), с относительной погрешностью не более 6 %. Это подтверждает корректность реализации численной схемы и адекватность выбранной пространственно-временной дискретизации.

3. Выполнен анализ погрешностей и разработан алгоритм сглаживания вычислительной особенности функции $F(z,t)$ в окрестности точки (z=1, t=0) при суммировании конечного числа слагаемых ряда (2).

4. Проведены вычислительные эксперименты для больших значений параметра дрейфа ($u = 8770$ и $u = 70300$), соответствующих условиям реального эксперимента. Показано, что прямое численное решение в MATLAB корректно описывает переходный процесс формирования стационарного профиля концентрации. Однако при $z = 0$ и малых t наблюдаются нефизические колебания решения, обусловленные ограниченной разрешающей способностью сетки в пограничном слое. Это определяет границы применимости метода: решение достоверно в интервале $0 < t \lesssim t_{trans}(z,u)$, где t_{trans} – характерное время перехода.

Использование адаптивной стратегии позволило отказаться от ресурсоемких библиотек произвольной точности. Работа вносит вклад в развитие вычислительных методов моделирования оптически управляемых коллоидных систем и создает методическую базу для дальнейшего исследования процессов переноса в дисперсных средах под действием внешних полей. Полученные результаты могут быть использованы в учебном процессе при изучении численных методов решения сингулярно возмущенных задач диффузии-дрейфа.

Список литературы

1. Mayorova O. A., Gusliakova O. I., Prikhozhdenko E. S., Verkhovskii R. A., Bratashov D. N. Magnetic Platelets as a Platform for Drug Delivery and Cell Trapping // Pharmaceutics. 2023. Vol. 15. Is. 1. P. 214. URL: https://www.mdpi.com/1999-4923/15/1/214 (дата обращения: 18.08.2026). DOI: 10.3390/pharmaceutics15010214.

2. Magazzù A., Bronte Ciriza D., Musolino A., Saidi A., Polimeno P., Donato M. G., Foti A., Gucciardi P. G., Iatì M. A., Saija R., Perchiazzi N., Rotundi A., Folco L., Maragò O. M. Investigation of dust grains by optical tweezers for space applications // The Astrophysical Journal. 2023. Vol. 942(1). P. 11. URL: https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/ac9a45/pdf (дата обращения: 18.08.2026). DOI: 10.3847/1538-4357/ac9a45.

3. Евстрапов А. А. Физические методы управления движением и разделением микрочастиц в жидких средах. I. Диэлектрофорез, фотофорез, оптофорез, оптический пинцет // Научное приборостроение. 2005. Т. 15. № 1. С. 3–20. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=9126979 (дата обращения: 18.08.2026). EDN: HRSWMN.

4. Yang Y., Ren Y. X., Chen M., Arita Y., Rosales-Guzmán C. Optical trapping with structured light: A review // Advanced Photonics. 2021. Vol. 3 (3). P. 034001. URL: https://www.spiedigitallibrary.org/journals/advanced-photonics/volume-3/issue-03/034001/Optical-trapping-with-structured-light-a-review/10.1117/1.AP.3.3.034001.full (дата обращения: 18.08.2026). DOI: 10.1117/1.AP.3.3.034001. EDN: CYSAON.

5. Cui Jie, Su Jun-Jie, Wang Jun, Xia Guo-Dong, Li Zhi-Gang. Thermophoretic force on nanoparticles in free molecule regime // Acta Physica Sinica. 2021. Vol. 70 (5). 055101. URL: https://wulixb.iphy.ac.cn/en/article/doi/10.7498/aps.70.20201629 (дата обращения: 18.08.2026).

6. Филинкова М. С., Бахтеева Ю. А., Медведева И. В., Бызов И. В., Минин А. С., Курмачев И. А. Агрегатообразование и магнитная сепарация микрочастиц полиэтилена из водных растворов // Коллоидный журнал. 2024. Т. 86. № 6. С. 824–837. URL: https://colljour.phyche.ac.ru/media/documents/14_агрегатообразование_и_магнитная_сепарация.pdf (дата обращения: 18.08.2026). DOI: 10.31857/S0023291224060146. EDN: VKJPFH.

7. Li B.-W., Zhong M.-C., Ji F. Laser Induced Aggregation of Light Absorbing Particles by Marangoni Convection // Applied Sciences. 2020. Vol. 10. Is. 21. P. 7795. URL: https://www.mdpi.com/2076-3417/10/21/7795 (дата обращения: 18.08.2026). DOI: 10.3390/app10217795.

8. Иванов В. И., Пячин С. А. Сепарация частиц в полидисперсной наносуспензии в поле лазерного излучения // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2021. № 13. С. 146–155. URL: https://physchemaspects.ru/archives/2021/fh2021-doi-10-26456-pcascnn-2021-13-146.pdf (дата обращения: 18.08.2026). DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.146. EDN: PNAQSG.

9. Shishkin G. I., Shishkina L. P. Difference Schemes on Uniform Grids for an Initial-Boundary Value Problem for a Singularly Perturbed Parabolic Convection-Diffusion Equation // Computational Methods in Applied Mathematics. 2020. Vol. 20. Is. 4. P. 709–715. URL: https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.1515/cmam-2019-0023/html (дата обращения: 18.08.2026). DOI: 10.1515/cmam-2019-0023. EDN: XZQKHT.

10. Шишкин Г. И., Шишкина Л. П. Разностная схема метода декомпозиции начально-краевой задачи для сингулярно возмущенного уравнения переноса // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2022. Т. 62. № 7. С. 1224–1232. URL: https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=zvmmf&paperid=11430&option_lang=rus (дата обращения: 18.08.2026). DOI: 10.31857/S0044466922070080. EDN: MDPIAI.

11. Rukavishnikov V. A., Rukavishnikova E. I. Error Estimate FEM for the Nikol'skij – Lizorkin Problem with Degeneracy // Journal of Computational and Applied Mathematics. 2022. Vol. 403. P. 113841. URL: https://dl.acm.org/doi/10.1016/j.cam.2021.113841 (дата обращения: 18.08.2026). DOI: 10.1016/j.cam.2021.113841. EDN: FDLIXT.

12. Крылов В. И., Рухадзе А. А. Об одном частном решении уравнения диффузии // Инженерная физика. 2016. № 7. С. 7–10. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=26678248 (дата обращения: 18.08.2026). EDN: WLUUQP.

13. Krylov V. I., Rukhadze A. A., Nefedov V. I. On a partial solution of the diffusion equation // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. 2017. Vol. 44. Is. 2. P. 36–39. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=29482797 (дата обращения: 18.08.2026). DOI: 10.3103/S1068335617020038. EDN: YVEMBH.

14. Вихтенко Э. М., Крылов В. И. Некоторые особенности результатов компьютерных вычислений при нахождении частного решения третьей краевой задачи уравнения диффузии // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2025. № 2. С. 87–98. URL: https://togudv.ru/vestnik/pub/articles/2871/ (дата обращения: 18.08.2026). DOI: 10.38161/1996-3440-2025-2-87-98. EDN: ULOJPA.

15. Крылов В. И., Вихтенко Э. М. Развитие методов вычисления концентрации наночастиц в прозрачных жидкостях под действием лазерного излучения // Инженерный вестник Дона. 2026. № 1 (133). URL: https://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2026/10671 (дата обращения: 18.08.2026). EDN: MTFMLQ.

16. MATLAB Help Center. [Электронный ресурс]. URL: https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/realmax.html (дата обращения: 18.08.2026).

17. Shampine L. F., Reichelt M. W. The MATLAB ODE Suite // SIAM Journal on Scientific Computing. 1997. Vol. 18. Is. 1. P. 1–22. URL: https://epubs.siam.org/doi/10.1137/S1064827594276424 (дата обращения: 18.08.2026). DOI: 10.1137/S1064827594276424.

18. SciPy Documentation: `scipy.integrate.solve_ivp` – Solve an initial value problem for a system of ODEs. [Электронный ресурс]. URL: https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.integrate.solve_ivp.html (дата обращения: 18.08.2026).

19. Бахвалов Н. С., Жидков Н. П., Кобельков Г. М. Численные методы. 4-е изд. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 636 с.

20. Касьянов И. А., Петкевич В. М., Пячин С. А. Влияние лазерного облучения на седиментацию частиц в жидких средах // Физика: фундаментальные и прикладные исследования, образование: материалы XXI региональной научной конференции (г. Благовещенск, 25–28 сентября 2023 г.). Благовещенск: Амурский государственный университет, 2023. С. 168–172. [Электронный ресурс]. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_54936843_68271157.pdf (дата обращения: 18.08.2026). DOI: 10.22250/9785934934195_168. EDN: QFKJJQ.

21. Bailey D. H., Borwein J. M. High-Precision Arithmetic in Mathematical Physics // Mathematics. 2015. Vol. 3 (2). P. 337–367. URL: https://www.mdpi.com/2227-7390/3/2/337 (дата обращения: 18.08.2026). DOI: 10.3390/math3020337.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Работа Ткаченко О. П. выполнена по государственному заданию Министерства науки и высшего образования РФ для Хабаровского федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук. Работа Вихтенко Э. М. выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках программы развития регионального научно-образовательного математического центра «Дальневосточный центр математических исследований» (дополнительное соглашение от 20.02.2026 № 075-02-2026-1336).

Financing: The work by Tkachenko O. P. was carried out under the state assignment of the Ministry of Education and Science of Russia for the Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. The work by Vikhtenko E. M. was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the development program of the regional scientific and educational mathematical center «Far Eastern Center for Mathematical Research» (Supplementary Agreement dated February 20, 2026, No. 075-02-2026-1336).

УДК 519.6
DOI

CC BY 4.0

ЭКСПРЕСС-ДИАГНОСТИКА МАКСИМАЛЬНО НАБЛЮДАЕМОЙ ЧАСТОТЫ СИГНАЛА В СТОХАСТИЧЕСКОМ КАНАЛЕ СВЯЗИ

Чудаев С. О., Артола А. О., Афанасьев Н. Т., Лукьянцев Д. С.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет», Иркутск, Российская Федерация, e-mail: spacemaklay@gmail.com

Целью исследования является разработка прямого оперативного метода диагностики ожидаемой максимально наблюдаемой частоты сигнала в стохастическом ионосферном канале связи. Рассмотрен эффект прохождения сигнала на частотах выше классической максимально применимой частоты за счет рефракционного рассеяния на случайных неоднородностях диэлектрической проницаемости канала. На основе интегрального представления волнового поля и теории возмущений получены аналитические соотношения, связывающие максимально наблюдаемые частоты основного и реперного сигналов. Для описания вероятностных свойств канала используется модель квазиоднородного случайного поля неоднородностей, согласованная с медленными вариациями регулярной структуры диэлектрической проницаемости. Детерминированная составляющая среды задается непрерывной дифференцируемой функцией координат. Допускается использование моделей дискретных профилей диэлектрической проницаемости канала путем их бикубической сплайн-интерполяции. Предложена численная схема реализации полученных аналитических соотношений. Приведены инженерные формулы для оперативного расчета максимально наблюдаемой частоты декаметрового сигнала на трассе наклонного зондирования ионосферы по данным измерений максимально наблюдаемой частоты сигнала реперного источника. В качестве примера для демонстрации возможностей предложенного математического аппарата выполнены численные оценки максимально наблюдаемых частот декаметровых сигналов на нескольких односкачковых трассах, когда приемные пункты основных и реперного сигналов находятся в окрестности границ зон молчания источников.

Ключевые слова: лучевой метод, моделирование, канал связи, декаметровые радиосигналы, случайные среды

RAPID DIAGNOSTICS OF THE MAXIMUM-OBSERVABLE FREQUENCY OF THE SIGNAL IN A STOCHASTIC COMMUNICATION CHANNEL

Chudaev S. O., Artola A. O., Afanasev N. T., Lukyantsev D. S.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Irkutsk State University", Irkutsk, Russian Federation, e-mail: spacemaklay@gmail.com

This study aims to develop a direct and rapid method for estimating the expected maximum observed frequency (MOF) of a signal in a stochastic ionospheric communication channel. Signal propagation at frequencies above the conventional maximum usable frequency (MUF), enabled by refractive scattering from random fluctuations in the channel's dielectric permittivity, is considered. An integral representation of the wave field and perturbation theory are used to derive analytical relationships between the MOFs of the primary and reference signals. The probabilistic properties of the channel are described using a quasi-homogeneous random-field model of irregularities consistent with slow variations in the regular dielectric-permittivity structure. The deterministic component of the medium is represented by a continuously differentiable function of spatial coordinates. Discrete dielectric-permittivity profiles may also be used after bicubic spline interpolation. A numerical scheme for implementing the derived analytical relationships is proposed. Engineering formulas are obtained for rapidly estimating the MOF of a decametric signal along an oblique ionospheric sounding path from measurements of the MOF of a reference signal. To demonstrate the capabilities of the proposed mathematical framework, numerical estimates of the MOFs of decametric signals are calculated for several single-hop paths whose primary and reference receiving sites are located near the boundaries of the corresponding skip zones.

Keywords: ray method, modeling, communication channel, decameter signals, random media

Введение

При передаче декаметровых сигналов в ионосферном канале связи переход на более высокие рабочие частоты представляет значительный интерес для решения ряда прикладных задач [1, с. 520]. Выбор частотной полосы в целях организации уверенной связи между корреспондентами во многом определяется состоянием ионосферы, которое можно рассчитать с помощью различного рода теоретических прогностических моделей. В то же время быстрая случайная изменчивость ионосферы остается за пределами возможностей теоретических моделей, что приводит к снижению потенциальных возможностей канала связи и, как следствие, к потере точности и надежности передачи информации. В этих условиях актуальной является задача оперативной краткосрочной оценки частотной полосы декаметрового диапазона для передачи сигналов на заданных трассах [2; 3]. Обычно

более качественный прогноз рабочих частот ионосферной радиосвязи обеспечивается за счет привлечения различных методов зондирования: вертикального, наклонного, возвратно-наклонного и др. Путем решения обратной задачи по данным зондирования корректируют прогностическую модель, а затем исправленную версию модели используют для расчета возможных рабочих частот в канале связи [4–6].

Наряду с традиционным прогнозом существует подход, основанный на прямой диагностике ионосферного радиоканала, когда характеристики принятого сигнала на реперной трассе непосредственно пересчитываются в ожидаемые характеристики основного сигнала на заданной наклонной трассе. В этом направлении получены важные результаты для прогнозирования максимально применимых частот (*МПЧ*) на односкачковых трассах в случае регулярной ионосферы [7]. Надежность прямой диагностики радиоканала зависит от полноты и точности аналитических соотношений, связывающих характеристики реперного и основного сигналов. Поэтому важен вывод таких соотношений с учетом тонкой стохастической структуры ионосферы.

Ранее авторами работ [8; 9] был предложен метод прямой диагностики ожидаемых статистических характеристик декаметрового сигнала на односкачковой ионосферной трассе. Получены алгебраические уравнения, связывающие дисперсии доплеровского смещения частоты, направления прихода, групповой и фазовой задержек основного и реперного сигналов. Коэффициенты этих уравнений, являющиеся решениями краевых стохастических задач с условиями Дирихле для основного и реперного источников, определяются путем численного интегрирования системы линейных дифференциальных уравнений первого порядка с начальными условиями Коши. Для описания случайных неоднородностей канала использовалась модель корреляционной функции, учитывающей пространственную динамику регулярной составляющей диэлектрической проницаемости. Предложенный метод прямой диагностики позволил проводить оперативную оценку возможных флуктуаций траекторных характеристик сигнала в стохастическом ионосферном канале в условиях отражения. Для практической реализации метода диагностики характеристик сигналов необходимо иметь модель диэлектрической проницаемости регулярного канала. Поставленные численные эксперименты показали эффективность используемого математического аппарата для оценки ожидаемых вторых статистических моментов доплеровского смещения частоты, направления прихода, фазовой и групповой задержек декаметрового сигнала на односкачковых трассах в условиях, когда наземные пункты приема реперного и основного сигналов находятся в областях регулярности волнового поля. Между тем хорошо известно, что при наклонном распространении декаметровых радиоволн в структуре поля возможно образование каустических особенностей (волновых катастроф [10]). В частности, такая особенность возникает на рабочих частотах, близких к *МПЧ* трассы. В этих условиях рефракционное рассеяние радиоволн на случайных неоднородностях диэлектрической проницаемости может обеспечить прохождение сигнала на превышающих классическую *МПЧ* частотах. Поэтому учет влияния неоднородностей случайного типа, которые практически всегда присутствуют на пути распространения радиоволн, важен при выводе соотношений, связывающих максимально наблюдаемые частоты (*МНЧ*) реперной и основной трассы.

Цель исследования – разработка прямого оперативного метода диагностики ожидаемой максимально наблюдаемой частоты сигнала в стохастическом ионосферном канале связи.

Материалы и методы исследования

В основу метода диагностики *МНЧ* наклонной радиотрассы положен экспериментально наблюдаемый эффект прохождения декаметрового сигнала на частотах выше классической *МПЧ* за счет рефракционного рассеяния на случайных неоднородностях диэлектрической проницаемости канала. Для расчета рассеяния радиоволн в окрестности *МПЧ* трассы в работе использовано интегральное представление волнового поля в форме лучевого интерференционного интеграла [11]. Флуктуации фазы парциальных составляющих интеграла определяются в приближении метода малых возмущений [12]. Для диагностики *МНЧ* на заданной трассе по данным измерений флуктуаций *МНЧ* на реперной трассе использована асимптотика интерференционного интеграла в окрестности пространственной каустики. Случайная изменчивость диэлектрической проницаемости ионосферы определена моделью корреляционного эллипсоида неоднородностей, связанного с динамикой детерминированной составляющей среды. Модель регулярной ионосферы задается непрерывной дифференцируемой функцией координат. Схема реализации полученных аналитиче-

ских соотношений сведена к стандартному численному решению обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка с начальными условиями Коши.

Результаты исследования и их обсуждение

Как известно [1, с. 160], при организации стабильной связи на декаметровой радиотрассе основное внимание уделяется прогнозу стандартной *МПЧ*, как некоторому пределу, выше которого, во избежание пробоя ионосферы, нельзя поднимать рабочую частоту. Между тем *МПЧ* радиотрассы является расчетным параметром и полностью зависит от степени сложности математических моделей ионосферы, которые не могут в полной мере дать описание сложной пространственно-временной структуры среды. В этих условиях для расширения частотного диапазона радиопередающих устройств значительный интерес представляет *МНЧ* ионосферной трассы, учитывающая воздействие неоднородностей электронной плотности и нестандартные пути распространения, роль которых при постоянно растущих излучаемых мощностях и чувствительности приемников в последнее время заметно возросла [13; 14].

Ключевым вопросом для реализации прямой диагностики *МНЧ* в стохастическом канале связи является выбор реперного источника. Пункт излучения на реперной трассе должен находиться на некотором расстоянии от пункта приема основного сигнала, а пункт приема встречного реперного сигнала должен совпадать с пунктом излучения основного сигнала. Реперной можно считать трассу, условно проходящую в той же области ионосферы, где и главная трасса. Данные измерений структуры декаметровых сигналов на односкачковых трассах в окрестности границы зоны молчания [1, с. 108] показывают, что средняя интенсивность волнового поля экспоненциально убывает в область каустической тени. Для оценки ослабления интенсивности поля в глубокой зоне тени реперного источника используем асимптотику лучевого интерференционного интеграла [11]:

$$\delta_X \approx \exp\left\{-\frac{(x-X)^2}{2\sigma_X^2}\right\}, \qquad (1)$$

где X – дальность границы зоны тени реперного источника, σ_X^2 – дисперсия дальности распространения луча, испытавшего рефракцию на случайных неоднородностях канала.

Проводя в (1) разложение в окрестности *МПЧ* в детерминированной ионосфере, имеем

$$\delta_X \approx \exp\left\{-\frac{(f-f_X)^2}{2\sigma_X^2}\left(\frac{dX}{df}\right)^2\right\}, \qquad (2)$$

где f – рабочая частота, f_X – *МПЧ*, рассчитанная для детерминированной модели ионосферы, $X(f)$ – зависимость дальности зоны молчания от частоты в фоновой среде.

Флуктуацию дальности определим в приближении метода возмущений [12, с. 5]:

$$\delta x = \delta z(X)\, tg\, \beta_X, \qquad (3)$$

где β_X – вертикальный угол прихода луча на дальность X в регулярных условиях; $\sigma_Z(X)$ – флуктуация высоты прихода возмущенного луча в точке X.

Решая методом возмущений траекторную задачу с начальными условиями Коши, для флуктуации высоты прихода возмущенного луча на дальность X нетрудно получить

$$\delta z(X) = \frac{1}{2}\int_0^X \frac{\partial z_0(x)}{\partial \beta_X}\left\{ctg\beta_0(x)\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0}\right) - \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0}\right)\right\}dx, \qquad (4)$$

где ε_0 – функция диэлектрической проницаемости фоновой ионосферы, ε_1 – характеризует случайные неоднородности среды; z_0, β_0 – текущие координата и угол рефракции луча в фоновой среде. Необходимо заметить, что вблизи каустики условия применимости метода возмущений для расчета флуктуаций траекторных характеристик сигнала при постановке начальной задачи Коши не требуют дополнительных ограничений и остаются прежними, что и вдали от каустики: $\varepsilon_1 \ll \varepsilon_0$, $\delta_x \ll X$ [12].

Подставляя (4) в формулу (3) и составляя статистический момент, для дисперсии дальности распространения луча, вышедшего из реперного источника, имеем

$$\sigma_X^2 = \frac{1}{4} tg^2 \beta_X \int_0^X \int_0^X \frac{\partial z_0(x_1)}{\partial \beta_X}\frac{\partial z_0(x_2)}{\partial \beta_X}\left\{\varepsilon_0\left[z_0(x_1)\right]\varepsilon_0\left[z_0(x_2)\right]\right\}^{-1} \times$$

$$\times\left\{ctg\beta_0(x_1)ctg\beta_0(x_2)\frac{\partial^2 N}{\partial x_1\partial x_2}-ctg\beta_0(x_1)\frac{\partial^2 N}{\partial x_1\partial z_2}-ctg\beta_0(x_2)\frac{\partial^2 N}{\partial z_1\partial x_2}+\frac{\partial^2 N}{\partial z_1\partial z_2}\right\}dx_1dx_2. \quad (5)$$

где N – функция корреляции неоднородностей диэлектрической проницаемости ионосферы. Далее рассмотрим квазиоднородное случайное поле неоднородностей. В этом случае для функции корреляции имеем:

$$N=N_1\left(\frac{x_1+x_2}{2},\frac{z_1+z_2}{2}\right)N_0(x_1-x_2,z_1-z_2).$$

Считая характерный масштаб изменения функции N_0 малым, по сравнению с масштабом изменения функции N_1 и шириной регулярного канала, интеграл (5) можно вычислить асимптотически. В частности, для гауссова вида однородной части функции корреляции имеем

$$\sigma_X^2=\frac{\sqrt{\pi}\rho\mu}{2\sin^2\beta_X\cos^2\beta_X}\int_0^X\left(1-\varepsilon_0(x,z_0)\right)^2\left(\frac{\partial z_0}{\partial\beta_X}(x)\right)^2\sin^3\beta_0(x)dx, \quad (6)$$

где μ и ρ – соответственно интенсивность и обратный пространственный масштаб случайных неоднородностей ионосферного канала.

Введем обозначение

$$\sigma_X^2=\mu\rho\int_0^X\left(1-\varepsilon_{0X}\right)^2F_X(x)dx, \quad (7)$$

где $F_X=\frac{\sqrt{\pi}}{2\sin^2\beta_X\cos^2\beta_X}\left(\frac{\partial z_0}{\partial\beta_X}(x)\right)^2\sin^3\beta_0(x)$.

Логарифмируя (2), имеем

$$\ln\delta_X=-\frac{\left(f-f_X\right)^2}{2\sigma_X^2}\left(\frac{dX}{df}\right)^2. \quad (8)$$

Откуда

$$\sigma_X^2\approx-\frac{\left(f-f_X\right)^2}{2\ln\delta_X}\left(\frac{dX}{df}\right)^2. \quad (9)$$

Положим далее $\delta_X\approx\exp(-\alpha)$, где параметр α характеризует «наблюдаемость» реперного сигнала. Рассмотрим случай α = 1, что соответствует ослаблению интенсивности рассеянного сигнала на частотах выше *МПЧ* на 4,34 дБ и потере мощности 63,2 %. Этот универсальный энергетический порог является некоторой начальной границей, часто используемой в задачах радиофизики для обнаружения сигналов в условиях сильной помеховой обстановки. Он успешно применяется для измерений различных типов сигналов, в том числе для связных и радарных. Выше указанного порога сигнал обычно уверенно выделяется путем соответствующей статистической обработки. В противоположном случае, когда энергия сигнала ниже заданного порога, начинают проявляться сильные эффекты воздействия тепловых шумов приемника. Измерения характеристик сигнала в таких условиях удается проводить только с использованием специальных методов, в частности путем когерентного накопления или помехоустойчивого кодирования.

Из формулы (7) с учетом (8) следует

$$\mu\rho=\frac{-\frac{\left(f-f_X\right)^2}{2\ln\delta_X}\left(\frac{dX}{df}\right)^2}{\int_0^X\left(1-\varepsilon_{0X}\right)^2F_X(x)dx}\approx\frac{\frac{\left(\Delta f_X\right)^2}{2}\left(\frac{dX}{df}\right)^2}{\int_0^X\left(1-\varepsilon_{0X}\right)^2F_X(x)dx}, \quad (10)$$

где $(\Delta f_X)^2=(МНЧ_X-f_X)^2$ – квадрат разности *МНЧ* и *МПЧ* на реперной трассе.

На основной трассе протяженностью M имеем

$$\delta_M \approx \exp\left\{-\frac{\left(f-f_M\right)^2}{2\sigma_M^2}\left(\frac{dM}{df}\right)^2\right\} = \exp\left\{-\frac{\left(\Delta f_M\right)^2}{2\sigma_M^2}\left(\frac{dM}{df}\right)^2\right\}, \tag{11}$$

$$\ln\delta_M \approx -\frac{\left(\Delta f_M\right)^2}{2\sigma_M^2}\left(\frac{dM}{df}\right)^2. \tag{12}$$

где $(\Delta f_M)^2 = (МНЧ_M - f_M)^2$ – квадрат разности *МНЧ* и *МПЧ* на основной трассе,

$$\sigma_M^2 = \mu\rho\int_0^M \left(1-\varepsilon_{0M}\right)^2 F_M(x)dx, \tag{13}$$

$$F_M = \frac{\sqrt{\pi}}{2\sin^2\beta_M\cos^2\beta_M}\left(\frac{\partial z_0}{\partial\beta_M}\right)^2 \sin^3\beta_0.$$

Необходимо заметить, что в формуле (13) параметры μ и ρ, характеризующие однородную часть корреляционной функции неоднородностей среды, взяты те же самые, что и в (7). В то же время неоднородная часть корреляционной функции квазиоднородного случайного поля неоднородностей $N_1 = (1 - \varepsilon_{0M})^2$ согласована с изменениями регулярного профиля диэлектрической проницаемости ионосферы. В итоге воздействие неоднородностей среды на ослабление сигнала в зонах молчания основной и реперной трасс существенно различаются. Полагая, как и выше, $\delta_M \approx \exp(-1)$ и учитывая (10), (12), (13), имеем

$$\Delta f_M = \sqrt{\frac{2\sigma_M^2}{\left(\frac{dM}{df}\right)^2}} = \sqrt{\frac{\left(\Delta f_X\right)^2\left(\frac{dX}{df}\right)^2\int_0^M\left(1-\varepsilon_{0M}\right)^2F_M(x)dx}{\left(\frac{dM}{df}\right)^2\int_0^X\left(1-\varepsilon_{0X}\right)^2F_X(x)dx}} \approx \sqrt{\left(\Delta f_X\right)^2\frac{\left(\Delta x_X\right)^2\int_0^M\left(1-\varepsilon_{0M}\right)^2F_M(x)dx}{\left(\Delta x_{\dot{I}}\right)^2\int_0^X\left(1-\varepsilon_{0X}\right)^2F_X(x)dx}} =$$

$$= \Delta f_X\frac{\Delta x_X}{\Delta x_{\dot{I}}}\sqrt{\frac{\int_0^M\left(1-\varepsilon_{0M}\right)^2F_M(x)dx}{\int_0^X\left(1-\varepsilon_{0X}\right)^2F_X(x)dx}} \approx \Delta f_X\sqrt{\frac{\int_0^M\left(1-\varepsilon_{0M}\right)^2F_M(x)dx}{\int_0^X\left(1-\varepsilon_{0X}\right)^2F_X(x)dx}}. \tag{14}$$

В формуле (14) для производных dX / df, dM / df введено приближение: $\Delta x_X / \Delta f$, $\Delta x_M / \Delta f$. Здесь Δx_X, Δx_M – вариации дальностей регулярных зон молчания реперного и основного источников, вызванные приращениями рабочих частот Δf. Полагается, что в окрестности реперной трассы вариации размеров зон молчания на разных частотах одного порядка ($\Delta x_X \approx \Delta x_M$).

Таким образом, $\Delta f_M = \gamma\Delta f_X$, где $\gamma = \sqrt{\frac{\int_0^M\left(1-\varepsilon_{0M}\right)^2F_M(x)dx}{\int_0^X\left(1-\varepsilon_{0X}\right)^2F_X(x)dx}} = \sqrt{\frac{J_{\dot{I}}}{J_X}}$. (15)

С учетом обозначений (7), (13) имеем

$$J_{\dot{I}} = \int_0^M\left(1-\varepsilon_{0M}\right)^2F_M(x)dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2\sin^2\beta_M\cos^2\beta_M}\int_0^M\left(1-\varepsilon_{0M}\right)^2\left(\frac{\partial z_0}{\partial\beta_M}\right)^2\sin^3\beta_0\ dx, \tag{16}$$

$$J_X = \int_0^X \left(1-\varepsilon_{0X}\right)^2 F_X(x)dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2\sin^2\beta_X\cos^2\beta_X}\int_0^X \left(1-\varepsilon_{0X}\right)^2\left(\frac{\partial z_0}{\partial\beta_X}\right)^2 \sin^3\beta_0\, dx. \quad (17)$$

Для оперативности расчетов J_M, J_X интегралы (16), (17) можно свести к дифференциальным уравнениям первого порядка и решать их совместно с системой лучевых уравнений, дополненной уравнениями для определения производных от траектории по начальному углу излучения, как это сделано в работе [8]. Необходимо заметить, что в формулах (16), (17) для описания детерминированной составляющей среды можно использовать не только непрерывные дифференцируемые функции координат, но и применять модели дискретных профилей диэлектрической проницаемости канала путем их бикубической сплайн-интерполяции, что позволяет построить непрерывную поверхность с гладкими первыми и вторыми производными, необходимую при расчетах.

Для практики полезны инженерные оперативные оценки ожидаемой максимально наблюдаемой частоты декаметрового сигнала по данным измерений максимально наблюдаемой частоты сигнала реперного источника. Оценим коэффициент γ (15) для простейших ионосферных условий. Используя теорему Брейта – Тьюва [15, с. 315] и учитывая симметрию траектории относительно точки отражения, введем приближение:

$$\frac{dz_0}{dx} = ctg\beta_0, \quad z_0 \approx x\ ctg\beta_X, \quad \frac{\partial z_0}{\partial\beta_X} = -\frac{x}{\sin^2\beta_X}.$$

В этом случае интегрирование в (16), (17) будем проводить до середины трассы (с учетом множителя 2):

$$J_M = \frac{\sqrt{\pi}}{\sin^2\beta_M\cos^2\beta_M}\int_0^{M/2}\left(1-\varepsilon_{0M}\right)^2\left(\frac{\partial z_0}{\partial\beta_M}\right)^2 \sin^3\beta_0\ dx \approx \frac{\sqrt{\pi}\ M^3}{24\cos^2\beta_M}\left(1-\frac{f_{krM}^2}{f_M^2}\right)^2 \sin^{-3}\beta_M, \quad (18)$$

$$J_X = \frac{\sqrt{\pi}}{\sin^2\beta_X\cos^2\beta_X}\int_0^{X/2}\left(1-\varepsilon_{0X}\right)^2\left(\frac{\partial z_0}{\partial\beta_X}\right)^2 \sin^3\beta_0\ dx \approx \frac{\sqrt{\pi}\ X^3}{24\cos^2\beta_X}\left(1-\frac{f_{krX}^2}{f_X^2}\right)^2 \sin^{-3}\beta_X, \quad (19)$$

где f_{krM}, f_{krX} – критические частоты ионосферного слоя F_2 на основной и реперной трассах. Тогда

$$\gamma = \sqrt{\frac{\frac{\sqrt{\pi}\ M^3}{24\cos^2\beta_M}\left(1-\frac{f_{krM}^2}{f_M^2}\right)^2 \sin^{-3}\beta_M}{\frac{\sqrt{\pi}\ X^3}{24\cos^2\beta_X}\left(1-\frac{f_{krX}^2}{f_X^2}\right)^2 \sin^{-3}\beta_X}} \approx \sqrt{\frac{M^3\cos^2\beta_X\sin^{-3}\beta_M\left(1-\frac{f_{krM}^2}{f_M^2}\right)^2}{X^3\cos^2\beta_M\sin^{-3}\beta_X\left(1-\frac{f_{krX}^2}{f_X^2}\right)^2}}, \quad (20)$$

$$\Delta f_M = \Delta f_X \sqrt{\frac{M^3\cos^2\beta_X\sin^{-3}\beta_M\left(1-\frac{f_{krM}^2}{f_M^2}\right)^2}{X^3\cos^2\beta_M\sin^{-3}\beta_X\left(1-\frac{f_{krX}^2}{f_X^2}\right)^2}}. \quad (21)$$

Представляется важным сопоставить результаты расчетов $МНЧ_M$ на основе (21) с экспериментальными данными, известными из литературы. В работе [16] приведены измеренные коэффициенты пространственной корреляции *МНЧ* моды 1F2 по данным наклонного зондирования в Евроазиатском регионе. Полученные высокие значения коэффициента корреляции *МНЧ* на разнесенных трассах ($\eta \approx 0.8 \div 0.95$) в спокойных геофизических условиях ($K_p \approx 1 \div 3$) указывают на потенциальную возможность прямой диагностики *МНЧ* на соседних трассах. С этой целью было выполнено

сравнение рассчитанных значений $МНЧ_M$ с данными измерений [16] *МНЧ* 3 сентября 2017 г. на нескольких односкачковых трассах (табл. 1–4). Для более точного приближения к условиям экспериментов в качестве f_M и f_X в формуле (21) использовались *МПЧ*, рассчитанные в [16] с помощью адаптированной по данным наклонного зондирования справочной модели IRI-2007. При непосредственном расчете $МНЧ_M$ с помощью (21) также необходимы данные о критической частоте слоя F2 и углах падения радиоволн на ионосферу. В работе [17] показано, что по сравнению с влиянием вариаций высоты максимума ионосферной ионизации и полутолщины слоя F2 на *МПЧ* радиотрассы, влияние изменчивости критической частоты основного ионосферного слоя наиболее значительно. Поэтому для определения f_{krM} и f_{krX} в средних точках трасс использовался закон секанса [15, с. 313]. В частности:

$$f_M = f_{krM} \sec\beta_M ,$$

где $\sec\beta_M = \sqrt{1+\left(\frac{M}{2z_m}\right)^2}$, z_m – высота максимума ионизации слоя.

Для рассмотренных условий дневного эксперимента в заданном географическом регионе z_m полагалось ≈ 250 км. Сравнение результатов измерений и расчетов было проведено в период с 10–16 UT с интервалом 30 мин, когда наблюдались наибольшие отличия измеренных *МНЧ* и рассчитанных в адаптированной модели ионосферы IRI-2007 значений f_M (рис. 9, 12 из работы [16]). Очевидно, что эти отличия связаны с неполнотой описания используемой адаптированной моделью реальной случайно-неоднородной ионосферы. В табл. 1, 2 соответственно представлены результаты расчетов $МНЧ_М$ и данные измерений *МНЧ* на трассе № 1 Соданкюля – Васильсурск (M = 1236 км) и на трассе № 2 НИС Горьковская – Васильсурск (M = 1500 км). Здесь же приведены результаты расчетов f_M с использованием адаптированной модели ионосферы [16]. В табл. 3 представлены данные измерений *МНЧ* и расчетов f_X (рис. 8 из [16]) на реперной трассе № 3 Ловозеро – Васильсурск (X = 1767 км).

Как следует из табл. 1, 2, рассчитанные на основе (21) $МНЧ_M$ находятся в соответствии с данными измерений [16] в рассматриваемом временном интервале.

Таблица 1

Временные зависимости *МНЧ* и *МПЧ* на трассе № 1 Соданкюля – Васильсурск

Время, *Т*, мин	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
$МНЧ_М$, *МГц*	13,2	13,5	14,0	13,2	13,2	13,3	13,0	13,1	13,2	12,4	12,5	12,0
МНЧ, *МГц*	13,1	13,5	14,3	13,3	13,3	13,6	12,9	13,0	13,3	12,7	12,8	12,2
f_M, *МГц*	13,0	13,6	13,0	13,1	13,0	12,9	12,8	12,9	12,4	12,0	11,5	11,7

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 2

Временные зависимости *МНЧ* и *МПЧ* на трассе № 2 Горьковская – Васильсурск

Время, *Т,* мин	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
$МНЧ_М$, *МГц*	10,3	10,8	10,2	11,5	10,6	10,5	10,7	9,70	9,90	9,80	9,50	9,40
МНЧ, *МГц*	10,6	11,0	10,1	11,1	10,9	10,7	10,8	9,90	10,1	9,70	9,60	9,50
f_M, *МГц*	10,1	10,6	10,0	10,3	10,3	10,3	10,2	10,0	9,80	9,60	9,30	9,30

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 3

Временной ход *МНЧ* и *МПЧ* на реперной трассе № 3 Ловозеро – Васильсурск

Время, *Т*, мин	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
МНЧ, *МГц*	12,3	12,6	12,6	13,0	12,5	12,9	12,5	11,6	11,7	11,9	11,5	10,8
F_X, *МГц*	12,2	12,5	12,1	12,2	12,1	12,1	12,0	11,8	11,6	11,4	10,9	10,5

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 4

Влияние неопределенности в задании высоты максимума ионизации слоя F2 на точность расчета $МНЧ_{М}$ на трассе № 1 Соданкюля – Васильсурск

Время, *T*, мин	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
МНЧ, *МГц*	13,1	13,5	14,3	13,3	13,3	13,6	12,9	13,0	13,3	12,7	12,8	12,2
$МНЧ_{М}$, *МГц* z_m = 230 км	13,0	13,6	14,0	13,4	13,1	13,3	13,0	12,8	12,4	12,2	11,9	11,8
$МНЧ_{М}$, *МГц* z_m = 245 км	13,1	13,6	14,1	13,4	13,2	13,4	13,0	12,9	12,7	12,3	11,8	11,7
$МНЧ_{М}$, *МГц* z_m = 270 км	13,2	13,6	14,3	13,4	13,3	13,5	12,9	12,9	12,8	12,4	12,0	11,9

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Средняя ошибка определения измеренных *МНЧ* в период с 10–16 UT для трассы Соданкюля – Васильсурск с использованием формулы (21) составляет ~1,27%. При этом среднее превышение *МНЧ* над f_M составляет ~4 %. Для трассы НИС Горьковская – Васильсурск средняя ошибка расчета *МНЧ* на основе (21) составляет ~1,83 %. Превышение среднего значения *МНЧ* над f_M на данной трассе составляет ~3,44 %. На реперной трассе Ловозеро – Васильсурск эффект превышения среднего *МНЧ* над f_X составляет ~3,25 %.

Для оценки доверительных интервалов расчетов, связанных с неточностью задания высоты максимума ионизации, были рассчитаны $МНЧ_{М}$ для трех значений z_m = 230, 245 и 270 км. В качестве примера в табл. 4 приведены данные расчетов $МНЧ_{М}$ на основе (21) на трассе № 1 Соданкюля – Васильсурск. Из табл. 4 видно, что неопределенность в задании высоты максимума ионизации слоя F2 в окрестности $z_m = 250 \pm 20$ км существенно не влияет на соответствие данных измерений *МНЧ* и расчетов $МНЧ_{М}$ на выбранной трассе.

Заключение

Разработан метод прямой диагностики ожидаемой *МНЧ* декаметрового сигнала в стохастическом ионосферном канале связи по данным измерений *МНЧ* на односкачковой реперной трассе. В основу метода положен эффект прохождения сигнала на частотах выше классической максимально применимой частоты вследствие рефракционного рассеяния на случайных неоднородностях диэлектрической проницаемости канала. Для описания вероятностных свойств канала использована модель квазиоднородного случайного поля неоднородностей, согласованная с медленными вариациями регулярной структуры диэлектрической проницаемости. Предложена численная схема реализации полученных соотношений. Получены инженерные формулы для оперативной оценки ожидаемой *МНЧ* декаметрового сигнала по данным измерений *МНЧ* сигнала реперного источника.

Список литературы

1. Чернов Ю. А. Специальные вопросы распространения радиоволн в сетях связи и радиовещания. М.: Техносфера, 2019. 688 с. ISBN 978-5-94836-503-9.

2. Ильин Н. В., Бубнова Т. В., Грозов В. П., Пензин М. С., Пономарчук С. Н. Оперативный прогноз МПЧ радиотрасс по текущим данным наклонного зондирования ионосферы непрерывным ЛЧМ-сигналом // Солнечно-земная физика. 2018. Т. 4. № 3. С. 103–113. DOI: 10.12737/szf-43201811.

3. Барабашов Б. Г., Анишин М. М., Лаврентьев О. А., Радио Л. П. Оценка эффективности использования ионосферной модели IRI для оперативного прогноза МПЧ // Техника радиосвязи. 2019. Вып. 3 (42). С. 15–21. DOI: 10.33286/2075-8693-2019-42-15-21.

4. Анишин М. М., Радио Л. П., Вяткина С. А., Соловьев А. А. Точность оперативного прогноза МПЧ при адаптации модели ионосферы IRI по нескольким параметрам // Техника радиосвязи. 2024. Вып. 2 (61). С. 25–35. URL: https://oniip.ru/nauka/tekhnika_radiosvyazi/arkhiv-sbornikov.php (дата обращения: 12.09.2026).

5. Пономарчук С. Н., Грозов В. П. Автоматическая интерпретация ионограмм наклонного зондирования на основе гибридных алгоритмов // Солнечно-земная физика. 2024. Т. 10. № 2. С. 109–118. DOI: 10.12737/szf-102202410.

6. Смирнов В. М., Смирнова Е. В., Тынянкин С. И. Прогнозирование коротковолновой радиосвязи по данным навигационных систем ГЛОНАСС/GPS // Радиотехника и электроника. 2019. Т. 64. № 9. С. 881–886. DOI: 10.1134/S0033849419080151.

7. Куркин В. И., Носов В. Е., Пономарчук С. Н., Савков С. С., Чистякова Л. В. Метод оперативной диагностики КВ радиоканала // Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. 1993. Вып. 100. С. 168–188. URL: http://irbis.iszf.irk.ru/cgi/cgiirbis_64.exe?LNG=&C21COM=F&I21DBN=ISZF1&P21DBN=ISZF1 (дата обращения: 12.09.2026).

8. Афанасьев Н. Т., Чудаев С. О. Диагностика стохастического ионосферного канала в декаметровом диапазоне радиоволн // Солнечно-земная физика. 2020. Т. 6. № 4. С. 77–85. DOI: 10.12737/szf-64202010.

9. Ким Д. Б., Афанасьев Н. Т., Танаев А. Б., Чудаев С. О. Экспресс-диагностика характеристик сигнала в условиях неопределенности параметров канала связи // Современные наукоемкие технологии. 2023. № 8. С. 33–38. DOI: 10.17513/snt.39727.

10. Бова Ю. И., Крюковский А. С., Лукин Д. С. Математическое моделирование влияния ионосферы Земли на структуру радиоволн в окрестности каустики // Труды Во-

енно-космической академии имени А. Ф. Можайского. 2020. № S674. С. 18–22. EDN: JXHKTX.

11. Afanasev N. T., Zheonykh A. A., Ivelskaya M. K., Sazhin V. I., Tinin M. V., Unuchkov V. E. Diagnosing the effective parameters of the ionospheric fine structure from statistical characteristics of radio waves in the vicinity of a regular caustic // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2001. Vol. 63. Is. 18. P. 1967–1972. DOI: 10.1016/S1364-6826(01)00072-4.

12. Агеева А. Т., Афанасьев Н. Т., Ким Д., Багинов А. В., Чудаев С. О. Траекторная задача в стохастическом информационном канале. Saarbrucken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2020. 132 с. ISBN-13‍978-6202522120.

13. Вертоградов Г. Г., Вертоградов В. Г. Оценка погрешности прогнозирования максимально наблюдаемой частоты в условиях минимальной солнечной активности // Техника радиосвязи. 2020. Вып. 4 (47). С. 32–44. DOI: 10.33286/2075-8693-2020-47-32-44.

14. Киселев А. М. Статистическая модель поведения максимально применимой частоты и ее использование для прогнозирования // Техника радиосвязи. 2017. Вып. 4. С. 35–48. URL: https://oniip.ru/nauka/tekhnika_radiosvyazi/arkhiv-sbornikov.php (дата обращения: 12.09.2026).

15. Яковлев О. И., Якубов В. П., Урядов В. П., Павельев А. Г. Распространение радиоволн. М.: ЛЕНАНД, 2009. 491 с. ISBN 978-5-9710-0183-6.

16. Урядов В. П., Выборнов Ф. И., Першин А. В. Экстраполяция максимальной применимой частоты путем адаптации ионосферной модели IRI-2007 по данным наклонного зондирования в евроазиатском регионе // Известия вузов. Радиофизика. 2018. Т. 61. № 12. С. 975–990.

17. Барабашов Б. Г., Анишин М. М., Рычагова М. С. Об оперативном прогнозе *МПЧ* ВЧ радиотрасс // Техника радиосвязи. 2016. Вып. 2. С. 16–26. URL: https://oniip.ru/nauka/tekhnika_radiosvyazi/arkhiv-sbornikov.php (дата обращения: 12.09.2026).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки Российской Федерации (тема госзадания FZZE-2026-0006).

Financing: The work was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (projects FZZE-2026-0006).

СТАТЬИ

УДК 376.37
DOI

CC BY 4.0

РОДИТЕЛЬСКИЙ КЛУБ КАК ФОРМА ПСИХОЛОГО-ПЕДАГОГИЧЕСКОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ СЕМЕЙ, ИМЕЮЩИХ ДЕТЕЙ С ТЯЖЕЛЫМИ НАРУШЕНИЯМИ РЕЧИ

Алпатова О. Б. ORCID ID 0009-0001-5483-8744, Кулешова Э. В.

Негосударственное образовательное частное учреждение высшего образования «Московский институт психоанализа», Москва, Российская Федерация,
e-mail: alpatovs@list.ru

В статье рассматривается родительский клуб как эффективная форма психолого-педагогического сопровождения семей, воспитывающих детей с тяжелыми нарушениями речи. Представлены организационно-педагогические условия работы родительского клуба «Домашний логопед», направленные на объединение усилий специалистов и родителей для преодоления речевого дефицита и гармонизацию детско-родительских отношений. Конкретизированы критерии, обеспечивающие перенос логопедических приемов в домашнюю среду. Дополнительно апробирована система оценки эффективности работы клуба, которая включает в себя не только показатели уровня родительской удовлетворенности, но и измеряемые показатели психолого-педагогической компетентности, семейного климата, уровня тревожности, вовлеченности и качества детско-родительского взаимодействия. После реализации программы была выявлена положительная динамика уровня тревожности у родителей, повышение их психолого-педагогической компетентности и качественное изменение характера общения с детьми. Формат клубной работы способствует не только просвещению, но и укреплению родительской уверенности. Ключевое преимущество такого подхода состоит в систематическом общении со специалистами, что позволяет обсуждать трудности воспитания и получать рекомендации, доступные для применения в домашних условиях. Клуб «Домашний логопед» реализуется в форме просветительской деятельности, осуществляемой вне рамок образовательных программ, и не является основной, адаптированной или дополнительной образовательной программой. Данную программу можно использовать как основу для планирования работы родительского клуба, подготовки памяток, консультаций и мониторинга результатов.

Ключевые слова: тяжелые нарушения речи, дети с тяжелым нарушением речи, родительский клуб, психолого-педагогическое сопровождение, родительская компетентность, семейно-центрированный подход, детско-родительское взаимодействие

PARENT CLUB AS A FORM OF PSYCHOLOGICAL AND PEDAGOGICAL SUPPORT FOR FAMILIES RAISING CHILDREN WITH SEVERE SPEECH DISORDERS

Alpatova O. B. ORCID ID 0009-0001-5483-8744, Kuleshova E. V.

Non-Governmental Educational Private Institution of Higher Education "Moscow Institute of Psychoanalysis", Moscow, Russian Federation,
e-mail: alpatovs@list.ru

The article considers the parent club as an effective form of psychological and pedagogical support for families raising children with severe speech impairments. The organizational and pedagogical conditions of the parent club "Home speech therapist" are presented, aimed at combining the efforts of specialists and parents to overcome speech deficits and harmonize child-parent relations. Criteria are specified to ensure the transfer of speech therapy techniques to the home environment. In addition, a system for assessing the effectiveness of the club has been tested, which includes not only indicators of the level of parental satisfaction, but also measured indicators of psychological and pedagogical competence, family climate, level of anxiety, involvement and quality of child-parent interaction. After the implementation of the program, a positive dynamics of the level of anxiety in parents was revealed, an increase in their psychological and pedagogical competence and a qualitative change in the nature of communication with children. The format of club work contributes not only to education, but also to strengthening parental confidence. The key advantage of this approach is in systematic communication with specialists, which allows you to discuss the difficulties of upbringing and receive recommendations available for use at home. The Home Speech Therapist Club is implemented in the form of educational activities carried out outside the framework of educational programs, and is not a basic, adapted or additional educational program. This program can be used as a basis for planning the work of the parent club, preparing memos, consultations and monitoring the results.

Keywords: severe speech disorders, children with severe speech disorders, parent club, family-centered approach, psychological and pedagogical support, parental competence, child-parent interaction

Введение

Современные подходы к организации образовательного процесса направлены на создание условий для полноценного развития детей с ограниченными возможностями здоровья и на поддержку их семей. Для детей с тяжелыми нарушениями речи (далее – ТНР) особенно важна согласованность действий педагога-психолога, учителя-логопеда, учителя-дефектолога и родителей, так как результат коррекционно-развивающей работы зависит во многом от ре-

гулярного речевого общения и закрепления сформированных навыков в повседневной жизни ребенка.

В нормативно-методическом контексте ТНР рассматриваются как неоднородная группа стойких нарушений речевой системы, при которых ребенок испытывает выраженные трудности в овладении средствами речевого общения. В практической работе к группе обучающихся с тяжелыми нарушениями речи (ТНР) относят детей с различными нарушениями речи – в том числе с нарушениями речевого развития, моторной алалией, дизартрией, ринолалией и другими – при условии, что их особые образовательные потребности требуют создания специальных условий и освоения адаптированной образовательной программы дошкольного образования. Заключение ПМПК фиксирует не медицинский диагноз, а особые образовательные потребности ребенка и рекомендуемые условия психолого-педагогического сопровождения [1].

Семья является ближайшей развивающей средой ребенка. Поэтому психолого-педагогическое сопровождение семьи должно включать не только информирование родителей, но и формирование у них практических навыков речевого взаимодействия, снижение тревожности, поддержку уверенности и создание устойчивого сотрудничества со специалистами. Отечественные публикации подчеркивают, что работа с семьями детей с ТНР должна строиться на доверии, понятных домашних рекомендациях и включенности родителей в коррекционный процесс [2, 3].

Международные исследования семейно-центрированного подхода показывают, что участие родителей в программах обучения и сопровождения связано с положительными изменениями в родительской уверенности, качестве взаимодействия и речевом развитии детей [4, 5]. Систематический обзор исследований подтверждает эффективность языковых стратегий, реализуемых родителями, а такие программы дают положительные эффекты для экспрессивной речи и словаря ребенка [6, 7].

Вместе с тем в практике дошкольных организаций и частных логопедических центров родители часто получают фрагментарные рекомендации: отдельные упражнения, памятки или устные советы после занятий. Этого недостаточно для устойчивого переноса коррекционных приемов в домашнюю среду. Возникает противоречие между необходимостью системной семейно-центрированной работы и ограниченным количеством организационных моделей, которые могли бы одновременно обеспечивать просвещение родителей, практически тренировать навыки, давать эмоциональную поддержку и оценку достигнутых результатов.

Цель исследования – выявить возможности родительского клуба «Домашний логопед» как формы психолого-педагогического сопровождения семей, воспитывающих детей с ТНР, и получить предварительные данные о динамике психолого-педагогической компетентности родителей, тревожности и детско-родительского взаимодействия.

Научная новизна исследования состоит в том, что были разработаны организационно-педагогические условия работы родительского клуба, направленные на регулярность, доступность, психологическую безопасность и практическую направленность участия родителей. Уточнены критерии, которые обеспечивают, на наш взгляд, перенос логопедических приемов в домашнюю среду: междисциплинарное сопровождение, единый речевой режим, индивидуализация домашних заданий, регулярная обратная связь и психологическая поддержка родителей. Разработана система эффективности работы клуба, которая включает в себя измеряемые показатели психолого-педагогической компетентности, семейного климата, тревожности, вовлеченности и качества детско-родительского взаимодействия.

Практическая значимость исследования состоит в том, что представленная программа из 14 встреч может использоваться как готовая основа для работы в рамках взаимодействия с родителями, подготовки памяток, организации консультаций и мониторинга результатов. Программа клуба «Домашний логопед» по своей сути относится к просветительской деятельности в сфере образования, так как ее цель – повышение педагогической компетентности родителей. Диагностический блок может быть использован специалистами для оценки динамики родительской компетентности и качества семейного взаимодействия по результатам коррекционно-просветительской работы.

Материалы и методы исследования

Исследование проводилось на базе частного логопедического сада г. Долгопрудного Московской области. Занятия проводились дважды в месяц; продолжительность каждой встречи составляла 60–90 мин. Всего было организовано и проведено 14 встреч.

Выборка включала 20 родителей детей дошкольного возраста с ТНР. Возраст детей от 4 лет 2 месяцев до 6 лет 7 месяцев, средний возраст – 5 лет 4 месяца (табл. 1).

Таблица 1

Характеристика выборки исследования

Характеристика	Описание
Количество участников	20 родителей и 20 детей дошкольного возраста с ТНР
Возраст детей	4 года 2 месяца – 6 лет 7 месяцев; М = 5,4 года
Основание включения	Заключение ПМПК: ребенок с ОВЗ, ТНР; рекомендована АОП ДО для детей с ТНР
Основные речевые заключения	ОНР II уровня – 5; ОНР III уровня – 8; моторная алалия с ОНР – 4; дизартрия – 3
Критерии включения	Возраст 4–7 лет; заключение ПМПК или специалиста о ТНР; сохранный физический слух; отсутствие первичного интеллектуального нарушения; согласие родителей; посещение не менее 70 % встреч
Критерии исключения	Наличие выраженного нарушения слуха, первичной интеллектуальной недостаточности или тяжелого соматического состояния, препятствующего участию; отсутствие повторной диагностики

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 2

Организационно-педагогические условия реализации родительского клуба

Организационно-педагогические условия	Содержание условия
Организационные	Занятия 2 раза в месяц; стабильное расписание; длительность 60–90 мин; предварительное информирование родителей о теме встречи; возможность индивидуальной консультации после группового блока
Кадровые	Участие учителя-логопеда, педагога-психолога, учителя-дефектолога и координатора клуба; согласование рекомендаций между специалистами; единая терминология в общении с родителями
Диагностические	Первичная диагностика запросов семьи; анализ заключений ПМПК и специалистов; выделение индивидуальных трудностей ребенка; повторная диагностика после программы
Содержательно-методические	Каждая встреча включала мини-лекцию, демонстрацию приема, практикум, обсуждение трудностей, домашнее задание и памятку. Домашние задания были доступными и выполнялись в повседневных семейных ситуациях
Коммуникативные	Создание доверительной атмосферы, отказ от оценочных суждений, поддержка родительской инициативы, обсуждение реальных случаев без публичного сравнения детей
Средовые	Использование помещения для групповой работы с возможностью демонстрации артикуляционных, дыхательных и игровых упражнений; наличие зеркал, карточек, игрушек, наглядных схем, чек-листов
Информационные	Раздаточные материалы: памятки по речевому дыханию, артикуляционной гимнастике, развитию словаря, фонематического слуха, альтернативной коммуникации; краткие алгоритмы домашних занятий
Этические	Добровольное участие; информированное согласие; обезличивание диагностических данных; обсуждение достижений ребенка только с согласия родителей
Преемственность	Связь клубных встреч с индивидуальным коррекционным маршрутом ребенка; обратная связь по домашней практике; корректировка рекомендаций по результатам наблюдений родителей

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Дети прошли ПМПК и имели заключения об обучении по адаптированной образовательной программе дошкольного образования для обучающихся с ТНР, им также были рекомендованы регулярные занятия с учителем-логопедом.

Методологическую основу исследования составили положения семейно-центрированного подхода, где семья рассматривается как активный участник коррекционно-развивающего процесса. При составлении плана работы клуба учитывались данные

исследований обучения родителей при речевых нарушениях, которые подчеркивают важность систематического освоения родителями коммуникативных стратегий, моделирования речи, расширения словаря, совместного чтения и поддерживающего взаимодействия [8–10].

Методы исследования: теоретический анализ научной и методической литературы, анкетирование родителей, психодиагностическое обследование; наблюдение за детско-родительским общением; анализ домашних заданий и обратной связи; статистическая обработка результатов. Этапы исследования: констатирующий, формирующий и контрольный.

Были разработаны организационно-педагогические условия, направленные на доступность, регулярность, практическую направленность и психологическую безопасность участия родителей. Они составляли необходимую часть организации работы клуба, потому что иначе клубная работа сводится к отдельным лекциям и не обеспечивает устойчивого изменения родительского поведения (табл. 2).

Содержание программы родительского клуба

Программа клуба состояла из 14 тематических встреч. Они были выстроены в определенной последовательности, от знакомства и диагностики запросов родителей к освоению конкретных приемов, вопросов эмоциональной поддержки, взаимодействия со специалистами и подведения итогов (табл. 3).

Для оценки психолого-педагогической компетентности родителей использовалась авторская анкета «Психолого-педагогическая компетентность родителей детей с ТНР».

Таблица 3

Тематический план клуба «Домашний логопед»

№	Тема встречи	Содержание
1	«Мы вместе: знакомство и планы»	Знакомство участников, обсуждение ожиданий, выявление запросов семьи, обзор коррекционного маршрута ребенка
2	«Что мешает говорить?»	Причины и виды ТНР: ОНР, алалия, дизартрия, ринолалия; роль ранней диагностики и системной коррекции
3	«Дышим правильно – говорим красиво»	Речевое дыхание, диафрагмальное дыхание, игровые дыхательные упражнения для дома
4	«Волшебные пальчики»	Связь мелкой моторики и речи, пальчиковые игры, изготовление простых развивающих пособий
5	«Артикуляционная гимнастика»	Безопасное выполнение артикуляционных упражнений, игровые приемы, частота и длительность занятий
6	«Слушаем и различаем»	Развитие фонематического слуха, игры на различение звуков, слогов и слов
7	«От слова к фразе»	Расширение пассивного и активного словаря, стимуляция фразовой речи в быту
8	«Если ребенок не говорит»	Жесты, пиктограммы, карточки PECS, альтернативные способы коммуникации
9	«Внимание и память помогают речи»	Игры на развитие слухового внимания, памяти и произвольной регуляции
10	«Игры для речи»	Подбор речевых игр, совместное чтение, организация игрового взаимодействия дома
11	«Эмоциональная поддержка родителей»	Тревожность, усталость, способы самопомощи, поддерживающий стиль общения с ребенком
12	«Готовим руку к письму»	Графомоторные навыки, профилактика трудностей письма, подготовка рабочего места
13	«Взаимодействие со специалистами»	Как задавать вопросы учителю-логопеду, фиксировать домашние трудности, соблюдать единый речевой режим
14	«Итоги и дальнейший маршрут»	Обсуждение достижений, повторная диагностика, индивидуальные рекомендации на следующий период

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Диагностический инструментарий

Анкета состоит из 24 вопросов, сформированных в 4 блока по 6 вопросов. Первый блок проверяет понимание родителями особенностей ТНР; второй блок – знание домашних упражнений; третий блок – умение организовать речевое общение с ребенком в быту; четвертый блок – готовность взаимодействовать со специалистами и соблюдать коррекционный маршрут. Каждый вопрос оценивается по шкале от 0 до 3 баллов: 0 – не знаю/не применяю; 1 – знаю частично, применяю редко; 2 – понимаю и применяю с подсказкой специалиста; 3 – понимаю и применяю самостоятельно. Максимальный балл – 72. Интерпретация: 0–24 балла – низкий уровень; 25–48 баллов – средний; 49–72 балла – высокий. Пример интерпретации: родитель, набравший 42 балла, имеет средний уровень компетентности и нуждается в закреплении практических способов домашней речевой поддержки; результат 56 баллов говорит о сформированном понимании ключевых приемов и способности применять их в бытовых ситуациях.

Для оценки родительского отношения использовался опросник родительского отношения А. Я. Варги и В. В. Столина. Методика позволяет анализировать такие шкалы, как принятие – отвержение, кооперация, симбиоз, авторитарная гиперсоциализация и отношение к ребенку как к «маленькому неудачнику» [11; 12]. В настоящем исследовании особое внимание уделялось шкалам «кооперация», «принятие – отвержение» и «авторитарная гиперсоциализация», поскольку они отражают эмоциональный тон взаимодействия и готовность родителя к сотрудничеству с ребенком.

Для оценки тревожности применялась шкала родительской тревожности, адаптированная на основе подходов А. М. Прихожан к диагностике тревожности [13]. Оценивались переживания родителя, связанные с речевым развитием ребенка, страхом неуспеха, зависимостью от оценки специалистов и напряжением при выполнении домашних заданий. Результаты рассматривались в трех уровнях: низкий, умеренный и высокий.

Семейный климат оценивался по Шкале семейного окружения (ШСО) в адаптации С. Ю. Куприянова при расчете интегрального показателя через усреднение/суммирование отдельных субшкал (сплоченность, экспрессивность, конфликтность).

Детско-родительское взаимодействие оценивалось с помощью карты наблюдения «Конструктивность детско-родительского взаимодействия» (КДРВ), разработанной для данного исследования. Наблюдение проводилось во время совместного игрового или речевого задания продолжительностью 10–15 мин. Карта включает восемь показателей: эмоциональная включенность родителя, доброжелательность обратной связи, терпимость к ошибкам ребенка, использование расширяющих реплик; отсутствие давления, совместное внимание, завершение задания без конфликта, позитивное подкрепление. Каждый показатель оценивался от 0 до 3 баллов. Максимальный балл – 24. Интерпретация: 0–8 баллов – низкая конструктивность; 9–17 баллов – средняя; 18–24 – высокая. Дополнительно анализировались качественные показатели: комментарии родителей, примеры трудностей, с которыми сталкивались дома, и наблюдения специалистов. Эффективность программы оценивалась не по одному показателю, а по совокупности критериев (табл. 4).

Таблица 4

Критерии оценки эффективности программы

Критерий	Показатели оценки
Психолого-педагогическая компетентность	Рост общего балла по ППК-Р-ТНР; переход с низкого на средний или со среднего на высокий уровень; способность объяснить цель домашнего упражнения и выполнить его без постоянной подсказки специалиста
Эмоциональное состояние родителя	Снижение уровня родительской тревожности; уменьшение высказываний о беспомощности и страхе ошибки; повышение уверенности в домашнем взаимодействии
Семейный климат	Улучшение показателей принятия, кооперации и эмоциональной поддержки; снижение конфликтности при выполнении домашних заданий
Детско-родительское взаимодействие	Рост балла по карте КДРВ; увеличение числа позитивных контактов, расширяющих реплик и ситуаций совместного внимания
Вовлеченность родителей	Посещение не менее 70 % занятий; выполнение домашних заданий; участие в обсуждениях; обращение за консультацией при возникновении трудностей
Удовлетворенность программой	Положительная обратная связь родителей; оценка полезности встреч не ниже 4 баллов по 5-балльной шкале; готовность продолжать участие

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 5

Количественная динамика показателей до и после программы

Показатель	До программы, M ± SD	После программы, M ± SD	Динамика	Критерий Вилкоксона	Размер эффекта
Психолого-педагогическая компетентность, баллы ППК-Р-ТНР	37,8 ± 8,2	55,1 ± 7,4	+17,3	Z = -3,71; p < 0,001	r = 0,83
Родительская тревожность, баллы	62,4 ± 9,5	46,8 ± 8,7	-15,6	Z = -3,54; p < 0,001	r = 0,79
Конструктивность детско-родительского взаимодействия, баллы КДРВ	17,2 ± 4,1	20,1 ± 3,9	+6,4	Z = -3,20; p = 0,001	r = 0,72
Семейный климат, интегральный показатель	39,6 ± 6,8	47,2 ± 6,4	+7,6	Z = -2,98; p = 0,003	r = 0,67

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Количественные данные обрабатывались с использованием описательной статистики: рассчитывались среднее значение (M), стандартное отклонение (SD), абсолютная и относительная динамика показателей до и после программы. В связи с небольшим объемом выборки (n = 20) и порядковым характером части шкал для сравнения связанных измерений применялся критерий Вилкоксона. Уровень статистической значимости принимался равным $p < 0,05$. Размер эффекта рассчитывался по формуле $r = |Z| / \sqrt{N}$, где N – число парных наблюдений. При интерпретации использовались общепринятые ориентиры: малый эффект – около 0,10, средний – около 0,30, большой – 0,50 и выше [14, 15].

Результаты исследования и их обсуждение

После реализации программы была проведена повторная диагностика. Динамика показателей представлена в табл. 5.

Рост среднего балла по анкете ППК-Р-ТНР свидетельствует о том, что родители стали лучше понимать структуру речевого дефекта, назначение домашних упражнений и способы речевой стимуляции в бытовых ситуациях. Наиболее выраженная динамика отмечалась по блокам «организация речевого общения в быту» и «взаимодействие со специалистами». Родители чаще описывали конкретные действия: «дать время на ответ», «расширить фразу ребенка», «поддержать жестом или картинкой», «не требовать повторения много раз подряд».

Снижение тревожности проявлялось не только в количественных показателях, но и в содержании обратной связи. Родители реже формулировали запрос в логике «что делать, если ничего не помогает» и чаще задавали вопросы о последовательности домашних шагов. Это позволяет рассматривать клуб не только как просветительскую, но и как поддерживающую форму работы.

Положительная динамика по карте КДРВ отражала рост конструктивности детско-родительского взаимодействия. В ходе итоговых наблюдений родители чаще использовали эмоциональное подкрепление, поддерживали инициативу ребенка, снижали темп предъявления заданий и реже переходили к директивным указаниям. Эти изменения важны, поскольку ребенок с ТНР нуждается в более длительном времени на обработку речевой инструкции и ответ.

Полученные результаты согласуются с данными исследований, показывающих, что родительское обучение может повышать качество коммуникативного поведения взрослых и положительно влиять на речевые результаты ребенка [16, 17]. При этом результаты настоящего исследования не позволяют говорить о доказанной эффективности программы в строгом экспериментальном смысле. Корректнее рассматривать их как предварительные данные о положительной динамике, требующие проверки на большей выборке и с контрольной группой.

Заключение

По итогам исследования получены предварительные данные о положительной динамике по всем основным показателям. Наиболее выраженные изменения отмечены в родительской компетентности и снижении тревожности. Вместе с тем полученные данные не следует интерпретировать как окончательное доказательство эффективности программы. Перспективы дальнейшей работы связаны с расширением выборки, включением контрольной группы, отслеживанием отсроченных результатов и уточнением влияния родительского клуба на речевые показатели детей с различными вариантами ТНР.

Список литературы

1. Приказ Министерства просвещения Российской Федерации от 24 ноября 2022 г. № 1022 «Об утверждении федеральной адаптированной образовательной программы дошкольного образования для обучающихся с ограниченными возможностями здоровья». [Электронный ресурс]. URL: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/406149049/ (дата обращения: 09.07.2026).

2. Приходько О. Г., Югова О. В. Полифункциональное психолого-педагогическое сопровождение семьи ребенка раннего возраста с нарушениями развития // Известия Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена. 2022. № 204. С. 140–149. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49027382 (дата обращения: 09.07.2026).

3. Волковская Е. А. Сопровождение семей с детьми дошкольного возраста с тяжелыми нарушениями речи посредством реализации коррекционно-развивающей программы детско-родительского клуба «Развиваемся вместе» // Проблемы педагогики. 2020. № 3 (72). С. 48–49. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/soprovozhdenie-semey-s-detmi-doshkolnogo-vozrasta-s-tyazhelymi-narusheniyami-rechi-posredstvom-realizatsii-korrektsionno (дата обращения: 09.07.2026).

4. Britto P. R., Lye S. J., Proulx K., Yousafzai A. K., Matthews S. G., Vaivada T., Perez-Escamilla R., Rao N., Ip P., Fernald L. C. H., MacMillan H., Hanson M., Wachs T. D., Yao H., Yoshikawa H., Cerezo A., Leckman J. F., Bhutta Z. A. Nurturing care: promoting early childhood development // The Lancet. 2017. Vol. 389. Is. 10064. P. 91–102. DOI: 10.1016/S0140-6736(16)31390-3.

5. Dunst C. J., Trivette C. M., Hamby D. W. Meta-analysis of family-centered helpgiving practices research // Mental Retardation and Developmental Disabilities Research Reviews. 2007. Vol. 13. Is. 4. P. 370–378. DOI: 10.1002/mrdd.20176.

6. Fan Q., Yu X., Cheng W., Su L., Zhang Y., Liu Q., Wu Z. The effectiveness of therapist-led family-centered language intervention for children with language delay // Translational Pediatrics. 2024. Vol. 13. Is. 10. P. 1720–1736. DOI: 10.21037/tp-24-225.

7. Heidlage J. K., Cunningham J. E., Kaiser A. P., Trivette C. M., Barton E. E., Frey J. R., Roberts M. Y. The effects of parent-implemented language interventions on child linguistic outcomes: a meta-analysis // Early Childhood Research Quarterly. 2020. Vol. 50. P. 6–23. DOI: 10.1016/j.ecresq.2018.12.006.

8. Zuccarini M., Suttora C., Bello A., Aceti A., Corvaglia L., Caselli M. C., Guarini A., Sansavini A. A parent-implemented language intervention for late talkers: an exploratory study on low-risk preterm and full-term children // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2020. Vol. 17. Is. 23. Art. 9123. DOI: 10.3390/ijerph17239123.

9. Suttora C., Zuccarini M., Aceti A., Corvaglia L., Guarini A., Sansavini A. The effects of a parent-implemented language intervention on late-talkers' expressive skills: the mediational role of parental speech contingency and dialogic reading abilities // Frontiers in Psychology. 2021. Vol. 12. Art. 723366. DOI: 10.3389/fpsyg.2021.723366.

10. Movahedazarhouligh S. Parent-implemented interventions and family-centered service delivery approaches in early intervention and early childhood special education // Early Child Development and Care. 2021. Vol. 191. Is. 1. P. 1–12. DOI: 10.1080/03004430.2019.1603148.

11. Галасюк И. Н., Митина О. В. Модификация Опросника родительского отношения (А. Я. Варги, В. В. Столина) для семьи, воспитывающей особого ребенка // Клиническая и специальная психология. 2017. Т. 6. № 2. С. 109–129. DOI: 10.17759/cpse.2017060209.

12. Варга А. Я. Тест-опросник родительского отношения // Практикум по психодиагностике. Психодиагностические материалы / под ред. А. Я. Варги, В. В. Столина. М.: МГУ, 1988. 128 с.

13. Прихожан А. М. Психология тревожности: дошкольный и школьный возраст. СПб.: Питер, 2009. 192 с. [Электронный ресурс]. URL: https://www.litres.ru/book/anna-prihozhan/psihologiya-trevozhnosti-doshkolnyy-i-shkolnyy-vozrast-3935305 (дата обращения: 09.07.2026).

14. Казьмин А. М., Бенграф Т. С., Попова А. В., Прочухаева М. М., Громова Ю. А., Шалупина Т. В., Архипов И. И. Результативность и качество ранней помощи детям и их семьям в системе социальной защиты населения города Москвы: мнение родителей // Клиническая и специальная психология. 2025. Т. 14. № 2. С. 143–163. DOI: 10.17759/cpse.2025140209.

15. Field A. Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics. 5th ed. London: SAGE Publications, 2018. 1104 p. [Электронный ресурс]. URL: https://books.google.ru/books?id=Nf3TEAAAQBAJ&hl=en (дата обращения: 09.07.2026).

16. Эйдемиллер Э. Г., Юстицкис В. В. Психология и психотерапия семьи. 4-е изд. СПб.: Питер, 2008. 672 с. [Электронный ресурс]. URL: https://www.litres.ru/book/v-ustickis/psihologiya-i-psihoterapiya-semi-181642 (дата обращения: 23.09.2026).

17. Подколзина Л. Г., Перепелкина В. А. Психолого-педагогическая поддержка и социальная реабилитация семей с детьми с ограниченными возможностями здоровья средствами родительского клуба // Научное мнение. 2026. № 1–2. С. 82–91. DOI: 10.25807/22224378_2026_1-2_82.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 378.1
DOI

CC BY 4.0

КОМПЬЮТЕРНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ЯЗЫКОВОЙ КОМПЕТЕНЦИИ СТУДЕНТОВ В ЦИФРОВОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ: МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИ ОПОСРЕДОВАННОЙ ВАЛИДНОСТИ

Андреева Е. А. ORCID ID 0000-0002-8418-952X,
Корнева И. Г. ORCID ID 0000-0002-8579-1491,
Усманов Т. Р. ORCID ID 0000-0002-7836-7756

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет», Казань, Российская Федерация, e-mail: favouriteworkk@mail.ru

Статья рассматривает проблему компьютерного оценивания языковой компетенции студентов вузов в условиях цифровой трансформации высшего образования и распространения инструментов искусственного интеллекта. Актуальность исследования связана с тем, что цифровая среда влияет не только на администрирование теста, но и на измеряемый языковой конструкт, процессы выполнения заданий, интерпретацию результатов и доказательства валидности. Цель статьи состоит в разработке модели компьютерного оценивания языковой компетенции как технологически опосредованной системы педагогических измерений. Исследование выполнено в формате аналитического обзора работ по языковому тестированию, психометрии, аргументно-ориентированной валидизации, цифровой педагогике, автоматизированному оцениванию, академической честности и справедливости оценивания. В отличие от систематического обзора, статья не претендует на исчерпывающую фиксацию корпуса публикаций, а направлена на теоретический синтез разрозненных исследовательских линий. В результате предложена модель технологически опосредованной валидности, включающая конструктивный, технологический, оценочный и этико-валидизационный блоки. Показано, что валидность компьютерного языкового оценивания должна подтверждаться не только качеством заданий и надежностью шкал, но и доказательствами, связанными с интерфейсом, пользовательским взаимодействием, цифровой доступностью, данными логов (log-data), автоматизированным скорингом, академической честностью, правилами использования генеративного искусственного интеллекта и справедливостью решений в сфере образования. Сделан вывод о необходимости гибридной модели оценивания языковой компетенции, в которой алгоритмы поддерживают экспертное суждение, но не заменяют его в высокозначимых образовательных решениях.

Ключевые слова: языковая компетенция, измерение, компьютерное оценивание, тестирование, валидность, валидизация, высшее образование

COMPUTER-BASED ASSESSMENT OF STUDENTS' LANGUAGE PROFICIENCY IN A DIGITAL EDUCATIONAL ENVIRONMENT: A MODEL OF TECHNOLOGY-MEDIATED VALIDITY

Andreeva E. A. ORCID ID 0000-0002-8418-952X,
Korneeva I. G. ORCID ID 0000-0002-8579-1491,
Usmanov T. R. ORCID ID 0000-0002-7836-7756

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Kazan (Volga Region) Federal University", Kazan, Russian Federation, e-mail: favouriteworkk@mail.ru

The article examines computer-based assessment of university students' language competence in the context of the digital transformation of higher education and the increasing use of artificial intelligence tools. The relevance of the study is determined by the fact that the digital educational environment affects not only test administration but also the language construct being measured, test-taking processes, score interpretation, and the validity evidence supporting assessment use. The purpose of the article is to develop a model of computer-based language assessment as a technology-mediated system of educational measurement. The study is conducted as a conceptual analytical review of research on language assessment, psychometrics, argument-based validation, digital pedagogy, automated assessment, academic integrity, and assessment fairness. Unlike a systematic review, the article does not claim to provide an exhaustive account of all publications; it aims to synthesize theoretically several research strands that are often treated separately. As a result, the article proposes a model of technology-mediated validity consisting of four interrelated domains: construct, technological, scoring, and ethical-validation domains. The analysis suggests that the validity of computer-based language assessment should be supported not only by task quality and rating-scale reliability but also by evidence concerning interface design, user interaction, digital accessibility, log data, automated scoring, academic integrity, policies for the use of generative artificial intelligence, and the fairness of educational decisions. The article concludes that a hybrid assessment model is needed: algorithms may support expert judgment, but they should not replace it in high-stakes educational decisions.

Keywords: language competence, assessment, computer-based assessment, testing, validity, validation, higher education

Введение

Применение цифровых технологий в сфере образования имеет ключевое значение, поскольку оно позволило вывести образовательный процесс на новый уровень развития, характеризующийся эффективностью, возможностью встраивания в учебный процесс различных электронных ресурсов, построением индивидуальных образовательных линий [1; 2].

Цифровая трансформация высшего образования в разных странах мира изменила не только организацию учебного процесса, но и подходы к оцениванию образовательных результатов. За последние два десятилетия компьютерное тестирование стало одной из наиболее распространенных форм контроля языковой подготовки студентов благодаря стандартизации процедур, оперативной обработке результатов, использованию мультимодальных заданий и возможности фиксировать данные о процессе выполнения теста.

Проблема компьютерного тестирования привлекает внимание как отечественных, так и зарубежных ученых. Исследователи обращают внимание на преимущества компьютерного тестирования с целью оценки языковой компетенции студентов, так как исключается человеческий фактор, проверяется большой объем знаний студента за короткое время [3–6]; компьютерное тестирование характеризуется надежностью [7, с. 48]. Авторы научных работ отмечают, что «необходимо акцентировать внимание на социально-культурной контекстуализации алгоритмов машинного обучения… для повышения эффективности и точности алгоритмов, особенно в мультикультурном образовательном пространстве» [8, с. 256].

Исследования показывают, что переход к цифровому формату затрагивает не только организацию экзамена, но и особенности выполнения заданий, влияя на интерпретацию получаемых результатов [9–11].

На начальном этапе развития компьютерного языкового тестирования основное внимание уделялось сопоставимости бумажного и цифрового форматов, надежности измерений и организационной эффективности электронных платформ. Однако последующие исследования продемонстрировали, что подобная трактовка является недостаточной. Пользовательский интерфейс, способы навигации, особенности представления информации и характер взаимодействия с цифровой средой способны изменять стратегии выполнения заданий, распределение внимания, процессы планирования и редактирования письменного ответа, а также восприятие справедливости самой процедуры оценивания [12–14].

Особенно актуальна данная проблема для оценивания языковой компетенции студентов университетов. Академическая коммуникация происходит в электронной образовательной среде, поэтому языковая компетенция становится способностью эффективно решать коммуникативные и познавательные задачи [15; 16].

В зарубежной литературе достаточно изучены вопросы, касающиеся университетского языкового тестирования, такие как автоматизированное оценивание, академическая честность, справедливость оценочных процедур, однако нет целостной системы аргументации валидности. Это связано с отсутствием интегративного подхода [17; 18].

Цель исследования – разработка модели компьютерного оценивания языковой компетенции студентов вузов. Научная новизна работы состоит в теоретическом обосновании модели технологически опосредованной валидности, объединяющей конструктивный, технологический, оценочный и этико-валидизационный компоненты в единую систему доказательств. При данном подходе цифровая среда рассматривается не как внешнее средство организации тестирования, а как неотъемлемая часть измерительной архитектуры. Она влияет на интерпретацию результатов и обоснованность их использования.

Материалы и методы исследования

Статья выполнена в формате концептуально-аналитического обзора литературы. Цель обзора состоит не в статистическом обобщении эмпирических эффектов, а в выявлении концептуальных связей между исследовательскими линиями, которые в публикациях часто рассматриваются раздельно. Концептуально-аналитический обзор дает возможность определить взаимосвязи между различными научными направлениями и создать целостную теоретическую модель.

Поиск материала осуществлялся в ходе исследования научных статей в сфере цифровизации высшего образования, лингвистики, педагогических измерений, языкового тестирования, изучения иностранных языков с помощью компьютерных технологий, искусственного интеллекта в образовании.

В основе анализа лежат работы по вопросам валидности компьютерного языкового оценивания. При отборе литературы внимание уделялось публикациям, рассматривающим компьютерное тестирование

по иностранному языку, аргументно-ориентированную валидизацию, автоматизированное оценивание письменной и устной речи.

Кроме того, изучались работы, связанные с влиянием интерфейсов и эффектов формата (mode effects), цифровой грамотностью обучающихся, анализом log-data, академической честностью, цифровым прокторингом, проблемами справедливости (fairness), цифровой доступности (accessibility), а также применением генеративного искусственного интеллекта в языковом оценивании.

На первом этапе анализа источники группировались по тематике (трансформация языкового конструкта; аргументно-ориентированная валидизация; автоматизированное оценивание; академическая честность; справедливость и доступность). Далее выявлялись различные точки зрения на роль алгоритмов и границ языкового конструкта. На третьем этапе были выделены четыре блока технологически опосредованной валидности: конструктивный, технологический, оценочный и этико-валидизационный. Итогом данного этапа стала разработка модели технологически опосредованной валидности, объединяющей основные компоненты компьютерного языкового оценивания в единую систему.

Результаты исследования и их обсуждение

Тестовое задание как измерительный инструмент должно отвечать определенным требованиям качества. Оно должно отличаться дифференцирующей способностью, эффективностью, валидностью и надежностью. Валидность трактуется как пригодность тестовых заданий для той цели, ради которой проводилось тестирование, определение соответствия требованиям правилу тестовых заданий. Валидность теста является одним из критериев, позволяющих оценить пригодность тестового задания для оценки знаний. При составлении тестовых заданий важно учитывать содержательную и функциональную валидность, когда задание должно соответствовать требованиям по дисциплине [19, с. 120–121].

Анализ научно-исследовательских работ показал, что не всегда автоматизированный скоринг, справедливость и последствия использования результатов рассматриваются как элементы единой валидизационной архитектуры [10; 14; 20]. В статьях по искусственному интеллекту недостаточно полно освещены работы по правилам использования искусственного интеллекта и правам участников оценивания [21; 22]. Проблема заключается в отсутствии интегративной модели компьютерного оценивания.

В современном обществе язык рассматривается в свете деятельностной модели языковой компетенции. В структуру языковой компетенции вошли плюрилингвальная и плюрикультурная компетенции и различные формы онлайн-взаимодействия [15]. Так, в ходе компьютерного тестирования оценивается способность эффективно использовать язык для коммуникации в цифровой образовательной среде.

Для университетского образования подобное расширение конструкта имеет принципиальное значение. Академическая деятельность студентов включает поиск, анализ и критическую интерпретацию информации, работу с цифровыми источниками, подготовку письменных текстов различных жанров, совместное создание документов и участие в сетевой коммуникации. Тем самым академическая языковая компетенция не сводится к совокупности отдельных языковых навыков. Она отражает способность использовать язык как инструмент познавательной и профессионально ориентированной деятельности в условиях современной образовательной среды. Как отмечают Е. А. Карабутова, Ю. А. Прокопенко, И. Б. Акиншина, «формирование языковой компетенции в свете коммуникативного подхода… предполагает формирование пользователя языка, способного успешно реализовать межкультурное, социальное и профессиональное общение…» [23, с. 53].

При таком понимании валидность проявляет себя не как характеристика теста, а как обоснованность интерпретации результатов и корректность их последующего использования [17]. При компьютерном тестировании на результат влияет как содержание заданий, так и процедуры оценивания, алгоритмы обработки данных. Все эти компоненты входят в структуру системы валидности.

Исследователи подчеркивают, что аргументация валидности должна включать надежность экспертного и автоматизированного оценивания, справедливость процедур, цифровую доступность и обоснованность последующих решений в сфере образования [18; 24; 25].

Особый интерес представляют современные отечественные разработки в сфере тестирования по иностранному языку. В исследовании «Разработка и перспективы развития национальной интеллектуальной системы тестирования общеязыковых компетенций (ИСТОК) на базе нейросетевых решений» Е. М. Базанова и др. пишут об особенностях отечественной интеллекту-

альной системы тестирования. Тестирование охватывает полный цикл, включающий оценку всех видов речевых навыков: чтение, аудирование, письмо, говорение. Данная система является первой в России интеллектуальной системой тестирования, основанной на новейших разработках и инструментах, с помощью которых создаются модели машинного обучения с возможностью переобучения [26, с. 155]. Данная система имеет ряд отличительных особенностей, таких как: 1) она основана на базе нейросетевых решений, где индивидуальная траектория определяется лингвистическими и экстралингвистическими факторами; 2) валидатор теста отслеживает речевые ошибки, характерные для определенного уровня владения языком, кроме того, для теста был разработан классификатор ошибок [26, с. 155].

Авторы отмечают, что это первая отечественная система, способная охватить и проанализировать все речевые навыки для корректного определения уровня владения иностранным языком по принятой международной шкале [26, с. 156].

Международная практика демонстрирует несколько различных моделей технологизации языкового оценивания. В экзаменах типа TOEFL iBT цифровая инфраструктура сочетается с гибридным скорингом, где автоматизированные процедуры поддерживают работу сертифицированных экспертов при оценивании письма и устной речи. В исследованиях IELTS сопоставляются бумажный и компьютерный режимы языкового тестирования [12].

Развитие автоматизированных систем оценивания стало одним из наиболее значимых направлений трансформации образовательных измерений. Современные системы анализируют письменную и устную речь, применяют сложные модели машинного обучения при интерпретации результатов.

Так, например, валидность системы автоматического оценивания эссе (Automated Essay Scoring (AES)) и автоматического распознавания речи (Automatic Speech Recognition (ASR)) дискутируется учеными. Данные системы дают оценку очень близкую к экспертным решениям, однако алгоритм может основывать результат на иных характеристиках речевой продукции [20; 27].

Таким образом, при аргументации валидности важно понимать, как функционируют алгоритмы и иметь возможность провести проверку. При таком подходе валидизация затрагивает не только качество заданий в тесте, но и всю технологическую инфраструктуру.

Искусственный интеллект становится новым элементом образовательной среды. С одной стороны, он создает возможности оценивания, а с другой стороны, валидность компьютерного тестирования может снижаться.

На наш взгляд, оптимальной является гибридная модель оценивания, в которой автоматизированные алгоритмы выполняют все технические процедуры (обработка данных, анализ речевой продукции и т. д.), а итоговое решение принимает эксперт.

Предложенная в исследовании модель технологически опосредованной валидности (таблица) развивает современные представления о компьютерном языковом оценивании, объединяя несколько исследовательских направлений, которые до настоящего времени преимущественно рассматривались изолированно.

Модель технологически опосредованной валидности состоит из четырех блоков: конструктивного, технологического, оценочного и этико-валидизационного.

Конструктивный блок проверяет соответствие заданий заявленной академической языковой компетенции, включая медиацию и цифровое взаимодействие. К доказательствам относятся: анализ конструкта, экспертная проверка заданий, сопоставление с дескрипторами Общеевропейских компетенций владения иностранным языком (CEFR) и локальными целями курса. Ключевой риск заключается в подмене академической языковой компетенции набором дискретных грамматико-лексических показателей.

В технологическом блоке проверяется влияние интерфейса, навигации, формата ввода, доступности и пользовательского опыта. Доказательством является юзабилити-анализ (Usability-analyses), анализ эффектов режима (mode effects), данные логов (log-data), подгрупповая проверка цифровых барьеров. Ключевой риск содержится в конструкто-нерелевантной вариативности, вызванной платформой, устройством или цифровой грамотностью.

Оценочный блок предназначен для проверки надежности экспертного и автоматизированного скоринга, устойчивости автоматического распознавания речи / автоматического оценивания эссе / большой языковой модели (ASR/AES/LLM). В данном блоке тип доказательств представлен согласованностью экспертов, концепцией согласия между человеком и машиной (human-machine agreement), анализом признаков модели, проверкой дрейфа и пограничных случаев. Основной риск определяется тем фактом, что алгоритм оценивает статистически удобные признаки, не совпадающие с языковым конструктом.

Архитектура модели технологически опосредованной валидности

Блок модели	Что проверяется	Тип доказательств	Ключевой риск
Конструктивный	Соответствие заданий заявленной академической языковой компетенции, включая медиацию и цифровое взаимодействие	Анализ конструкта, экспертная проверка заданий, сопоставление с дескрипторами Общеевропейских компетенций владения иностранным языком (CEFR) и локальными целями курса	Подмена академической языковой компетенции набором дискретных грамматико-лексических показателей
Технологический	Влияние интерфейса, навигации, формата ввода, доступности и пользовательского опыта	Юзабилити-анализ (Usability-analyses), анализ эффектов режима (mode effects), данные логов (log-data), подгрупповая проверка цифровых барьеров	Конструкто-нерелевантная вариативность, вызванная платформой, устройством или цифровой грамотностью
Оценочный	Надежность экспертного и автоматизированного скоринга, устойчивость автоматического распознавания речи/ автоматического оценивания эссе/ большой языковой модели (ASR/ AES/LLM)	Согласованность экспертов, концепция согласия между человеком и машиной (human-machine agreement), анализ признаков модели, проверка дрейфа и пограничных случаев	Алгоритм оценивает статистически удобные признаки, не совпадающие с языковым конструктом
Этико-валидизационный	Справедливость, академическая честность, прокторинг, правила использования ИИ, последствия решений	Анализ справедливости (Fairness analysis), дифференцированное функционирование заданий (DIF), проверка доступности интерфейсов (accessibility review), аудит прокторинга, регламенты генеративного искусственного интеллекта, анализ последствий	Несправедливые или непрозрачные решения при формально надежном тесте

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования

В этико-валидизационном блоке происходит проверка справедливости, академической честности, прокторинга, правил использования ИИ, последствий решений. К доказательствам относится анализ справедливости (Fairness analysis), дифференцированное функционирование заданий (DIF), проверка доступности интерфейсов (accessibility review), аудит прокторинга, регламенты генеративного искусственного интеллекта, анализ последствий. Ключевой риск содержится в возможности принятия несправедливых или непрозрачных решений при формально надежном тесте.

Особенность модели заключается в изменении представления о роли цифровой образовательной среды в системе образовательных измерений. В представленной модели цифровая среда является самостоятельным компонентом для определения валидности теста. Кроме того, предложенная рамка определяет место автоматизированного оценивания в системе образования. При этом учитывается двойственная природа интеллектуальных технологий, которая заключается в том, что, с одной стороны, алгоритмы создают новые возможности для образовательных измерений, с другой стороны, появляются новые риски в процессе интерпретации результатов. Модель предусматривает распределение функций: обработка данных производится автоматизированными системами, а экспертная оценка и формирование результатов тестирования – человеком. При таком подходе максимально сохраняются требования к валидности тестирования и объективности итоговых результатов.

Теоретическая значимость предложенной модели заключается в том, что в ней комплексно рассматриваются все аспекты (конструктивный, технологический, оценочный и этико-валидизационный). Практическая ценность определяется тем, что модель может быть полезна при создании компьютерных тестов, разработке алгоритмов применения искусственного интеллекта в образовательной деятельности.

Заключение

Развитие цифровых технологий становится важным фактором, который влияет не только на процедуру тестирования по иностранному языку с целью оценки уровня языковой компетенции, но и на методологию его организации. Цифровая образовательная среда создает определенные условия для проявления языковой компетенции, а также для формирования достоверных итоговых результатов в образовательной среде.

Перспективы дальнейших исследований связаны с операционализацией компонентов технологически опосредованной валидности, разработкой соответствующих измерительных индикаторов и эмпирической проверкой предложенной модели в различных языковых, образовательных и институциональных контекстах.

Список литературы

1. Евдокимова В. Е., Кириллова О. А. Возможности образовательных платформ для организации учебного процесса // Современные наукоемкие технологии. 2022. № 9. С. 120–125. URL: https://top-technologies.ru/article/view?id=39319 (дата обращения: 13.07.2026). DOI: 10.17513/snt.39319.

2. Смирнова А. А. Образовательные онлайн-платформы как явление современного мирового образования: к определению понятия // Искусственные общества. 2019. Т. 14. № 1. URL: https://artsoc.jes.su/s207751800005274-0-1/ (дата обращения: 13.08.2026). DOI: 10.18254/S207751800005274-0.

3. Ромазанова О. В., Богачева Н. В. Достоинства и недостатки компьютерного тестирования // Казанский вестник молодых ученых. 2018. Т. 2. № 5 (8). С. 49–51. URL: https://kpfu.ru/portal/docs/F_1742544848/12.Romazanova_.Bogacheva.pdf (дата обращения: 20.07.2026).

4. Доржиева Э. А. Тестирование как форма контроля при обучении иностранному языку // Перспективы науки. 2022. № 5 (152). С. 141–143. URL: https://moofrnk.com/assets/files/journals/science-prospects/152/science-prospect-5(152)-main.pdf (дата обращения: 11.08.2026).

5. Лопатинская В. В., Корольков В. А. Применение тестов с заданиями закрытой формы в обучении иностранному языку: минимизация эффекта угадывания // Мир науки. Педагогика и психология. 2023. Т. 11. № 1. URL: https://mir-nauki.com/PDF/41PDMN123.pdf (дата обращения: 20.07.2026). DOI: 10.15862/41PDMN123.

6. Сидакова Н. В. Особенности компьютерного тестирования и динамика качества обученности иностранным языкам // АНИ: педагогика и психология. 2017. Т. 6. № 2 (19). С. 140–143. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-kompyuternogo-testirovaniya-i-dinamika-kachestva-obuchennosti-inostrannym-yazykam (дата обращения: 14.07.2026).

7. Зиньковская А. В., Андресян И. Ф. Особенности компьютерного тестирования как вида контроля качества знаний при обучении иностранному языку // Балтийский гуманитарный журнал. 2019. Т. 8. № 2 (27). С. 47–49. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38498814 (дата обращения: 20.07.2026). DOI: 10.26140/bgz3-2019-0802-0058.

8. Башеров О. И., Коробова Е. В., Кардович И. К., Маршал Н. С. Сравнительный анализ традиционных и инновационных методов оценки языковой компетенции студентов в вузах Российской Федерации // Управление образованием: теория и практика. 2023. Т. 13. № 10–2. С. 251–260. URL: https://www.emreview.ru/index.php/emr/article/view/1127?articlesBySameAuthorPage=5 (дата обращения: 14.07.2026). DOI: 10.25726/e6316-5903-9510-v.

9. Douglas D., Hegelheimer V. Assessing language using computer technology // Annual Review of Applied Linguistics. 2007. Vol. 27. P. 115–132. URL: https://www.cambridge.org/core/journals/annual-review-of-applied-linguistics/article/abs/assessing-language-using-computer-technology/A37C2CB1ACAE895840E2D54EDC8013DA (дата обращения: 28.05.2026). DOI: 10.1017/S0267190508070062.

10. Ockey G. J. Developments and challenges in the use of computer-based testing for assessing second language ability // The Modern Language Journal. 2009. Vol. 93 (s1). P. 836–847. URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1540-4781.2009.00976.x (дата обращения: 13.06.2026). DOI: 10.1111/j.1540-4781.2009.00976.x.

11. Suraworachet W., Zhou Q., Cukurova M. Impact of combining human and analytics feedback on students' engagement with, and performance in, reflective writing tasks // Int J Educ Technol High Educ. 2023. Vol. 20. Is. 1. URL: https://link.springer.com/article/10.1186/s41239-022-00368-0 (дата обращения: 13.06.2026). DOI: 10.1186/s41239-022-00368-0.

12. Chan S., Bax S., Weir C. J. Researching the comparability of paper-based and computer-based delivery in a high-stakes writing test. Assessing Writing, 2018. Vol. 36. P. 32–48. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1075293518300370 (дата обращения: 13.06.2026). DOI: 10.1016/j.asw.2018.03.008.

13. Fulcher G. Interface design in computer-based language testing // Language Testing. 2003. Vol. 20. Is. 4. P. 384–408. URL: https://scholar.google.co.th/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=saDvhzEAAAAJ&citation_for_view=saDvhzEAAAAJ:Tyk-4Ss8FVUC (дата обращения: 18.06.2026). DOI: 10.1191/0265532203lt265oa.

14. O'Sullivan B. Reflections on the application and validation of technology in language testing // Language Assessment Quarterly. 2023. Vol. 20. Is. 4–5. P. 501–511. URL: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15434303.2023.2291486 (дата обращения: 17.06.2026). DOI: 10.1080/15434303.2023.2291486.

15. Council of Europe. Common European Framework of Reference for Languages: Learning, teaching, assessment – Companion volume. Council of Europe Publishing. 2020. 278 p. URL: https://rm.coe.int/common-european-framework-of-reference-for-languages-learning-teaching/16809ea0d4 (дата обращения: 13.06.2026). ISBN 978-92-871-8621-8.

16. Черкашина Е. Л., Жамалетдинов Р. И. Автоматизированный анализ речи с применением методов машинного обучения для оценки языковых компетенций в экзамене по русскому языку как иностранному // Информатика и образование. 2025. № 40 (1). С. 82–94. DOI: 10.32517/0234-0453-2025-40-1-82-94.

17. Knoch U., Chapelle C. A. Validation of rating processes within an argument-based framework // Language Testing. 2018. Vol. 35. Is. 4. P. 477–499. URL: https://www.researchgate.net/publication/317361069_Validation_of_rating_processes_within_an_argument-based_framework (дата обращения: 28.06.2026). DOI: 10.1177/0265532217710049.

18. Xi X. How do we go about investigating test fairness? // Language Testing. 2010. Vol. 27. Is. 2. P. 147–170. URL: https://www.researchgate.net/publication/249870194_How_do_we_go_about_investigating_test_fairness. (дата обращения: 28.06.2026). DOI: 10.1177/0265532209349465.

19. Алексеенко С. Н., Гайворонская Т. В., Дробот Н. Н. Тестовые задания как составляющий компонент контроля знаний и обучения студентов медицинского вуза // Современные наукоемкие технологии. 2021. № 6–1. С. 118–123. URL: https://top-technologies.ru/article/view?id=38708 (дата обращения: 19.08.2026). DOI: https://doi.org/10.17513/snt.38708.

20. Xi X. Advancing language assessment with AI and ML – Leaning into AI is inevitable, but can theory keep up? // Language Assessment Quarterly. 2023. Vol. 20. Is. 4–5. P. 357–376. URL: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15434303.2023.2291488 (дата обращения: 25.06.2026). DOI: 10.1080/15434303.2023.2291488.

21. Chuang P.-L., Yan X. Language assessment in the era of generative artificial intelligence: Opportunities, challenges, and future directions // System. 2025. Vol. 134. Art. 103846. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0346251X25002568?via%3Dihub (дата обращения: 13.06.2026). DOI: 10.1016/j.system.2025.103846.

22. O'Grady S., Gokturk N., Rossi O. Artificial intelligence in language assessment research: A scoping review // Research Synthesis in Applied Linguistics. Advance online publication.2026. Vol. 2. Is. 1. P. 103–139. URL: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/29984475.2026.2633389#d1e458 (дата обращения: 17.06.2026). DOI: 10.1080/29984475.2026.2633389.

23. Карабутова Е. А., Прокопенко Ю. А., Акиншина И. Б. Формирование языковой компетенции студентов вуза в свете коммуникативного подхода для реализации социального и профессионального межкультурного взаимодействия // Концепт. 2021. № 1 (январь). С. 45–55. URL: https://e-koncept.ru/2021/211003.htm (дата обращения: 15.08.2026). DOI: 10.24412/2304-120X-2021-11003.

24. Цифровые технологии в образовании, науке, территориальном развитии: опыт Франции и России: коллективная монография / под ред. Пономаренко Е. В., Курбатов О., Шкваря Л. В., Рузина Е. И. М.: Научная библиотека, 2019. 200 с. ISBN 978-5-6042212-8-0.

25. Самерханова Э. К., Круподерова Е. П., Панова И. В. Цифровые ресурсы для организации образовательного процесса и оценки достижений обучающихся в дистанционном формате: обзор цифровых ресурсов для дистанционного образования. Н. Новгород: Мининский университет, 2020. 50 с. ISBN 978-5-85219-694-1.

26. Базанова Е. М., Горизонтова А. В., Грибова Н. Н., Чикаке Т. М., Самосюк А. В. Разработка и перспективы развития национальной интеллектуальной системы тестирования общеязыковых компетенций (ИСТОК) на базе нейросетевых решений // Высшее образование в России. 2023. Т. 32. № 8–9. С. 147–166. URL: https://vovr.elpub.ru/jour/article/view/4550 (дата обращения: 15.08.2026). DOI: 10.31992/0869-3617-2023-32-8-9-147-166.

27. Chapelle C. A., Voss E. 20 years of technology and language assessment in Language Learning & Technology // Language Learning & Technology. 2016. Vol. 20. Is. 2. P. 116–128. URL: https://www.researchgate.net/publication/304045717_20_years_of_technology_and_language_assessment_in_language_learning_technology (дата обращения: 17.06.2026). DOI: 10.64152/10125/44464.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 37.032:004.8
DOI

CC BY 4.0

ДИАГНОСТИКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕНЕРАТИВНОГО ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ШКОЛЕ: КРИТЕРИИ, МАТРИЦА СОПРЯЖЕНИЯ С ФЕДЕРАЛЬНЫМ ГОСУДАРСТВЕННЫМ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫМ СТАНДАРТОМ И УРОВНЕВАЯ ШКАЛА

Вишленкова С. Г. ORCID ID 0000-0001-9747-9844

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Мордовский государственный педагогический университет имени М. Е. Евсевьева», Саранск, Российская Федерация, e-mail: svetlana.vishlenkova@yandex.ru

Стремительное внедрение генеративного искусственного интеллекта в школьное образование актуализирует проблему разработки объективных критериев оценки его дидактической эффективности. Существующие подходы к оцениванию носят преимущественно техноцентричный характер и не учитывают требования Федерального государственного образовательного стандарта, что создаёт разрыв между потенциалом технологии и возможностями педагогической системы измерить эффекты её применения. Целью исследования является теоретическое обоснование, разработка и эмпирическая проверка диагностического комплекса, который включает систему критериев эффективности использования ГИИ, матрицу сопряжения этих критериев с требованиями Федерального государственного образовательного стандарта основного общего и среднего общего образования, а также шкалу уровней эффективности учебного взаимодействия учителя и обучающихся. Эмпирическую базу составили данные экспертной оценки разработанного инструментария 32 специалистами (учителя-предметники, методисты, исследователи в области цифровой дидактики). Использованы методы теоретического анализа, проектирования, экспертного оценивания, пилотной апробации, а также методы математической статистики. В результате исследования был разработан диагностический комплекс, включающий: систему из 12 критериев оценки эффективности применения генеративного искусственного интеллекта, объединенных в 4 группы; матрицу сопряжения критериев с требованиями Федерального государственного образовательного стандарта основного общего и среднего общего образования; уровневую шкалу интегральной эффективности. Эмпирическая проверка подтвердила высокие психометрические характеристики комплекса: внутреннюю согласованность (α-Кронбаха = 0,87), конструктную валидность (факторный анализ, 74,6% объяснённой дисперсии) и критериальную валидность (корреляция с независимыми экспертными оценками $r = 0,85$; $p < 0,01$). В заключение отмечается, что разработанный диагностический инструментарий является надёжным и валидным средством оценки эффективности применения генеративного искусственного интеллекта в учебном взаимодействии. Инструментарий может быть использован в общеобразовательных организациях для мониторинга качества образования, диагностики сформированности 4К-компетенций, оценки готовности педагогов и обоснования управленческих решений.

Ключевые слова: генеративный искусственный интеллект, эффективность учебного взаимодействия, критерии оценки, диагностический инструментарий, Федеральный государственный образовательный стандарт, основное общее образование, среднее общее образование

ASSESSMENT OF THE EFFECTIVENESS OF GENERATIVE ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN SCHOOLS: CRITERIA, A CROSSWALK MATRIX WITH THE FEDERAL STATE EDUCATIONAL STANDARD AND A LEVEL SCALE

Vishlenkova S. G. ORCID ID 0000-0001-9747-9844

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Mordovian State Pedagogical University named after M. E. Evseviev", Saransk, Russian Federation, e-mail: svetlana.vishlenkova@yandex.ru

The rapid adoption of generative artificial intelligence in school education highlights the problem of developing objective criteria for assessing its didactic effectiveness. The existing approaches to assessment are predominantly technology-centric and do not take into account the requirements of the Federal State Educational Standard, which creates a gap between the potential of the technology and the ability of the pedagogical system to measure the effects of its application. The aim of the study is to provide a theoretical justification, develop and empirically test a diagnostic complex that includes a system of criteria for assessing the effectiveness of using generative artificial intelligence, a matrix linking these criteria to the requirements of the Federal State Educational Standard for basic general and secondary general education, as well as a scale of levels of effectiveness of the educational interaction between the teacher and the students. The empirical basis consists of data from an expert assessment of the developed tools by 32 specialists (subject teachers, methodologists, researchers in the field of digital didactics). Methods of theoretical analysis, design, expert assessment, and pilot testing were used, as well as methods of mathematical statistics. As a result of the study, a diagnostic complex was developed, which includes: a system of 12 criteria for assessing the effectiveness of using generative artificial intelligence, grouped into 4 categories; a matrix linking the criteria to the requirements of the Federal State Educational Standard for basic general and secondary general education; and a level scale of integral effectiveness. Empirical testing confirmed the high psychometric characteristics of the complex: internal consistency (Cronbach's α = 0,87), construct validity (factor analysis, 74,6% of the explained variance), and criterion validity (correlation with independent expert assessments, $r = 0,85$; $p < 0,01$). In conclusion, it is noted that the developed diagnostic toolkit is a reliable and valid means of assessing the effectiveness of using generative artificial intelligence in educational interaction. The toolkit can be used in general education organizations to monitor the quality of education, diagnose the development of 4K competencies, assess teachers' readiness, and justify management decisions.

Keywords: generative artificial intelligence, effectiveness of educational interaction, evaluation criteria, diagnostic tools, Federal State Educational Standard, basic general education, secondary general education

Введение

В современных условиях цифровизации всех сфер жизни происходят значительные изменения, включая и систему образования. Осуществляется масштабный переход от использования ставших уже традиционными информационно-коммуникационных технологий к технологиям генеративного искусственного интеллекта. Генеративный искусственный интеллект (ГИИ) представляет собой направление искусственного интеллекта (ИИ), ориентированное на создание нового цифрового контента различных модальностей: текстовой, графической, аудиовизуальной, программно-кодовой. Основу ГИИ составляют генеративные модели, синтезирующие результаты на базе выявленных закономерностей обучающих данных, что отличает их от поисковых или классифицирующих алгоритмов. Внедрение ГИИ модифицирует классическую двухсубъектную модель педагогического процесса «педагог – обучающийся», трансформируя её в триаду «обучающийся – искусственный интеллект – педагог». В данной конфигурации ГИИ перестает быть факультативным инструментом и закрепляется в качестве неотъемлемого элемента цифрового образовательного пространства [1].

Стремительное внедрение технологий ГИИ в образовательную среду обусловлено такими дидактическими возможностями, как способность разрабатывать персонализированные траектории обучения, имитировать речевую и мыслительную деятельность для решения учебных, коммуникативных и профессиональных задач, автоматизировать контроль усвоения обучающимися учебного материала, возможность предоставлять им обратную связь и анализировать процесс обучения [2, с. 158].

Однако наряду с преимуществами внедрение ГИИ в образовательный процесс может вызывать ряд серьезных трудностей и проблем. По мнению Н. А. Староверовой, «автоматизация процессов обучения может привести к снижению роли учителя и отдалению студентов от реального общения как между собой, так и в связке с преподавателем» [3]. Более того, неконтролируемое и избыточное применение ИИ снижает самостоятельность, креативность обучающихся, их способность к критическому анализу информации [4]. Педагоги же сталкиваются с ростом профессионального выгорания, обусловленного необходимостью постоянного контроля результатов, сгенерированных ИИ, а также с усложнением процедуры проверки академической честности из-за трудностей в различении самостоятельной работы и задач, решенных с помощью алгоритмов.

В результате возникает научное противоречие между стремительным внедрением в образовательную среду ГИИ, обладающего высоким дидактическим потенциалом, и отсутствием четких критериев, показателей и методик для оценки результативности его использования.

Обзор современной научной литературы свидетельствует о растущем интересе исследователей к проблемам интеграции ГИИ в сферу образования. Широкий спектр теоретических и прикладных вопросов, рассматриваемых как отечественными, так и зарубежными авторами, позволяет выделить несколько ключевых направлений исследований.

Первое направление охватывает исследования, посвященные анализу дидактического потенциала, рисков и общей специфике интеграции ГИИ в систему высшего образования. Так, в работе Е. А. Поспеловой, Е. Н. Горлачевой и П. Л. Отоцкого представлена оценка отношения студентов к персонализированному образованию с использованием ИИ [5]. В исследовании А. С. Зуфаровой наряду с преимуществами выделяются риски интеграции ИИ в современное образование: конфиденциальность данных, равноправие доступа, ошибки алгоритма ИИ, предвзятость и дискриминация при оценивании алгоритма ИИ, соблюдение этических принципов [6]. В работе О. П. Михайловой, А. А. Хафизовой, Н. П. Назаровой, Ф. Л. Ередеевой, М. Е. Набокиной исследуются вопросы подготовки будущих учителей и развития их цифровой гибкости [7]. Авторы доказывают необходимость модернизации учебных планов педвузов через моделирование педагогических ситуаций средствами ИИ. В исследовании Ё. Вальтера рассматривается специфика трансформации образовательного процесса под влиянием ИИ. Автор выделяет три ключевых навыка, необходимых для эффективного и ответственного использования технологий ИИ: ИИ-грамотность, промпт-инжиниринг и критическое мышление [8].

Ко второму направлению относятся работы, посвященные исследованию психологических, антропологических и мировоззренческих рисков взаимодействия обучающихся с ГИИ [9; 10]. При этом Э. В. Чекмарев и К. В. Переверзев предупреждают о рисках деформации мировоззрения обучающихся под влиянием глобальных ИИ-платформ, транслирующих чуждые культурные коды, и доказывают необходимость создания суверенных образовательных ИИ-систем [11].

Третье направление объединяет исследования, посвящённые методическим аспектам интеграции ГИИ в образовательный процесс. Конкретные приемы и методики включения инструментов ГИИ в практику преподавания отдельных учебных дисциплин детально описаны в работах Е. А. Левиной и С. Г. Вишленковой [12], Т. Ю. Храмовой [13], И. Н. Беляевой, Е. А. Селютиной, Т. А. Цецориной [14].

Четвёртое направление исследований, наиболее близкое к предмету настоящего исследования, фокусируется на школьном сегменте образования. Так, в работе И. Н. Шегай обобщён практический опыт повышения эффективности уроков, автоматизации рутинных проверок и снижения нагрузки на учителей средней школы за счет внедрения технологий ИИ, при этом автор фиксирует рост творческой активности педагогов и удовлетворенности обучающихся [15]. Вопросы ранней профориентации школьников через олимпиады и конкурсы по ИИ, способствующие развитию алгоритмического мышления, рассматривают В. С. Запалацкая и Д. А. Куликов [16].

В контексте настоящего исследования интерес представляет рубрика Edu-GenAI, разработанная зарубежными исследователями Т. Чернером, М. Доннелли для оценки образовательной ценности больших языковых моделей и генераторов медиаконтента на основе ИИ. Данный оценочный инструмент включает пять доменов: инструментальную, техническую, гедонистическую, пользовательскую и благотворную ценность [17].

Таким образом, проведенный обзор научных исследований позволяет констатировать, что существующие подходы к оценке ГИИ в образовании носят преимущественно техноцентричный характер и ориентированы на высшее образование. В связи с этим приоритетной научно-практической задачей становится создание критериев оценки результативности внедрения ГИИ с учетом требований Федерального государственного образовательного стандарта основного общего и среднего общего образования и особенностей российской школьной системы.

Целью настоящего исследования является теоретическое обоснование, разработка и эмпирическая проверка диагностического комплекса, который включает систему критериев эффективности использования ГИИ, матрицу сопряжения этих критериев с требованиями Федерального государственного образовательного стандарта основного общего и среднего общего образования, а также шкалу уровней эффективности учебного взаимодействия учителя и обучающихся.

Материалы и методы исследования

Методологическую основу исследования составили подходы: системно-деятельностный, выступающий концептуальной базой Федерального государственного образовательного стандарта (далее – ФГОС); компетентностный, ориентированный на оценку не только предметных знаний, но и личностных и метапредметных результатов; критериально ориентированный, задающий логику разработки измерительных инструментов для педагогического оценивания.

Эмпирическую базу составили данные экспертной оценки разработанного диагностического комплекса, включающего систему критериев, матрицу сопряжения критериев с нормативными требованиями и уровневую шкалу интегральной эффективности применения ГИИ в учебном взаимодействии. Экспертизу осуществляли 32 специалиста: учителя-предметники (n=14) из общеобразовательных школ г. Саранска Республики Мордовия, методисты (n=8), а также исследователи в области цифровой дидактики (n=10) Мордовского государственного педагогического университета имени М. Е. Евсевьева. Апробация диагностического комплекса в рамках пилотного исследования проводилась на базе пяти общеобразовательных школ г. Саранска в течение трех недель (апрель 2026 г.).

В исследовании применялись следующие методы: анализ и обобщение научной литературы по проблеме исследования; контент-анализ требований нормативно-правовых документов в сфере образования; проектирование; экспертное оценивание; пилотная апробация инструментария на базе общеобразовательных организаций; методы математической статистики: коэффициент альфа Кронбаха, факторный анализ (метод главных компонент с вращением варимакс), коэффициент корреляции Пирсона.

Результаты исследования и их обсуждение

Исследование проводилось в три этапа: аналитический, проектировочный, экспертный. На аналитическом этапе был проведён обзор научной литературы, позволивший обосновать цель и стратегию исследования. Кроме того, осуществлен контент-анализ ФГОС основного общего и среднего общего образования [18; 19], Федеральной образовательной программы основного общего и среднего общего образования в части предметных, личностных и метапредметных результатов [20; 21], а также профессионального стандарта педагога [22], в результате чего выделены требования, релевантные оценке эффективности применения ГИИ.

На этапе проектирования по итогам теоретико-аналитической работы была разработана система критериев оценки эффективности применения ГИИ в учебном взаимодействии учителя и обучающихся. Предложенная система включает четыре группы критериев, каждая из которых операционализирована через совокупность показателей и соответствующих им методов измерения (табл. 1).

Таблица 1

Система критериев оценки эффективности применения ГИИ в учебном взаимодействии учителя и обучающихся

Критерий	Показатели	Методы оценки
Группа 1. Образовательные достижения обучающихся		
Критерий 1.1. Предметные результаты (уровень освоения обучающимися знаний, умений и навыков по конкретному учебному предмету)	1) полнота и глубина усвоения содержания учебного предмета; 2) способность применять знания по изучаемому предмету в новой ситуации; 3) качество выполнения учебных заданий (доля правильно выполненных заданий, средний балл); 4) динамика учебных достижений (сравнение результатов контрольных срезов до и после внедрения ГИИ)	Анализ результатов контрольных и проверочных работ, тестирования, проектной деятельности
Критерий 1.2. Метапредметные результаты (уровень сформированности универсальных учебных действий (УУД), включающих регулятивные, познавательные и коммуникативные УУД)	1) способность самостоятельно ставить учебные цели и планировать их достижение с использованием ГИИ в качестве персонального тьютора (регулятивные УУД); 2) умение осуществлять поиск, анализ, структурирование и критическую оценку информации с применением ГИИ-инструментов (познавательные УУД); 3) способность аргументированно выражать свою позицию и взаимодействовать с другими участниками образовательного процесса, в том числе в ситуациях, где ГИИ выступает фасилитатором или независимым экспертом в дискуссии (коммуникативные УУД)	Наблюдение, анализ продуктов учебной деятельности, самооценка и взаимооценка обучающихся
Критерий 1.3. Личностные результаты (изменения в мотивационно-ценностной сфере обучающихся)	1) уровень учебной мотивации и познавательного интереса; 2) сформированность учебной самостоятельности и ответственности; 3) развитие рефлексивной позиции (способность оценивать собственные достижения и трудности) при использовании ГИИ	Опросные методы, методики диагностики мотивации, анализ продуктов рефлексивной деятельности
Группа 2. Сформированность 4К-компетенций		
Критерий 2.1. Критическое мышление и решение проблем (способность анализировать проблемные ситуации, критически оценивать информацию, предлагать, обосновывать и реализовывать альтернативные решения)	1) способность выявлять противоречия и формулировать проблемный вопрос для решения с помощью ГИИ; 2) владение навыками критической оценки достоверности, полноты и логической состоятельности информации, полученной из ГИИ, включая верификацию источников данных; 3) умение генерировать и сопоставлять альтернативные варианты решения проблемы, предложенные ГИИ, с аргументированным выбором оптимального; 4) способность осуществлять декомпозицию сложной задачи на последовательные подзадачи с использованием инструментов ГИИ и оценивать обоснованность итогового решения	Анализ проектных и кейсовых заданий, оценка качества промптов и логики рассуждений, экспертная оценка аргументации и обоснованности выводов
Критерий 2.2. Креативность (способность генерировать новые идеи, находить нестандартные решения и создавать оригинальные продукты)	1) количество и разнообразие идей, генерируемых обучающимися при использовании ГИИ; 2) оригинальность и новизна создаваемых учебных продуктов; 3) способность комбинировать и модифицировать информацию, полученную от ГИИ, для создания нового контента	Анализ проектов, творческих работ, использование методов экспертной оценки

Окончание табл. 1

Критерий	Показатели	Методы оценки
Критерий 2.3. Коммуникация и кооперация (способность к аргументированному обмену информацией с учетом аудитории, распределению ролей и координации действий в команде, в том числе с использованием ГИИ, для достижения общего результата)	1) умение формулировать точные промпты, распределять роли и задачи между участниками, планировать и декомпозировать работу с использованием ГИИ; 2) способность интерпретировать и адаптировать сгенерированный ГИИ контент для устных и письменных выступлений перед разной аудиторией, интегрировать его в коллективное обсуждение; 3) умение аргументированно представлять и защищать результаты работы с ГИИ, вести конструктивный диалог, формулировать контраргументы, обсуждать разногласия и принимать коллективные решения, в том числе с учетом альтернатив, предложенных ГИИ; 4) способность координировать действия, согласовывать промежуточные результаты, корректировать план работы на основе обратной связи от ГИИ, оказывать взаимопомощь и осуществлять рефлексию процесса и результатов деятельности с использованием ГИИ-инструментов	Анализ презентаций, докладов, рефератов, групповых проектов, оценка эффективности и вариативности промптов, аргументации, анализ логов взаимодействия в цифровых средах
Группа 3. Изменения в педагогической деятельности учителя		
Критерий 3.1. Оптимизация педагогического труда (снижение временных и трудозатрат на выполнение рутинных педагогических операций)	1) сокращение времени на подготовку к учебным занятиям (разработку заданий, создание дидактических материалов, проверку работ); 2) увеличение времени на индивидуальную работу с обучающимися; 3) автоматизация рутинных оценочных процедур	Хронометраж, самоотчеты учителя, анализ распределения рабочего времени
Критерий 3.2. Обогащение методического инструментария (расширение спектра методов и приемов обучения за счет использования ГИИ)	1) количество и разнообразие типов заданий, разработанных с использованием ГИИ; 2) использование ГИИ для создания адаптивных и персонализированных учебных материалов; 3) применение ГИИ для организации формирующего оценивания и предоставления обратной связи обучающимся	Анализ методических разработок учителя, наблюдение, самоотчеты
Критерий 3.3. Профессиональное развитие педагога (повышение уровня цифровой грамотности, методической готовности к использованию ГИИ)	1) уровень владения навыками промпт-инжиниринга и взаимодействия с ГИИ; 2) способность критически оценивать результаты работы ГИИ и адаптировать их для образовательных целей; 3) участие в профессиональных сообществах и мероприятиях по теме использования ГИИ в образовании	Анализ методических разработок учителя, опросы, интервью, самоотчеты
Группа 4. Удовлетворенность участников образовательного процесса		
Критерий 4.1. Удовлетворенность обучающихся (субъективная оценка обучающимися опыта взаимодействия с ГИИ в учебном процессе)	1) уровень комфорта и психологической безопасности при использовании ГИИ; 2) восприятие полезности и доступности ГИИ для решения учебных задач; 3) готовность продолжать использовать ГИИ в учебной деятельности; 4) восприятие влияния ГИИ на результаты обучения	Анкетирование, опросы, интервью
Критерий 4.2. Удовлетворенность педагогов (субъективная оценка опыта применения ГИИ в профессиональной деятельности)	1) удовлетворенность качеством и полезностью материалов, генерируемых ГИИ; 2) оценка влияния ГИИ на эффективность педагогической деятельности; 3) уровень доверия к результатам работы ГИИ; 4) готовность рекомендовать ГИИ коллегам	Анкетирование, опросы, интервью
Критерий 4.3. Этические аспекты использования ГИИ (соблюдение этических норм и принципов при использовании ГИИ в образовании)	1) осведомленность обучающихся и педагогов о правилах использования ГИИ (цитирование, проверка достоверности, защита персональных данных); 2) соблюдение академической честности (недопустимость полного копирования текстов, сгенерированных ГИИ, без критической переработки); 3) отношение участников к этическим аспектам применения ГИИ	Анкетирование, анализ учебных работ, наблюдение

Примечание: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Для обеспечения валидности и практической применимости разработанных критериев в условиях общеобразовательных организаций необходима их содержательная корреляция с действующей нормативно-правовой базой. В рамках исследования спроектирована матрица сопряжения критериев оценки эффективности применения ГИИ с группами образовательных результатов, закреплёнными во ФГОС основного общего и среднего общего образования (табл. 2).

Показатели и критерии оценки матрицы полностью отвечают требованиям ФГОС к результатам освоения образовательных программ. Планируемые результаты ФГОС напрямую отражены в предметных и метапредметных показателях (критерии 1.1 и 1.2), тогда как личностные результаты (критерий 1.3) коррелируют с ключевыми качествами личности, такими как способность к самоопределению, формирование жизненных смыслов и морально-этические установки.

Таблица 2

Матрица сопряжения критериев эффективности ГИИ и требований ФГОС

Группы результатов по ФГОС	Конкретные требования ФГОС (ООО / СОО)	Критерии эффективности применения ГИИ	Показатели (индикаторы) эффективности
Предметные результаты	Освоение обучающимися научных понятий, методов и теорий; умение применять знания в познавательной и практической деятельности; формирование научного типа мышления	Критерий 1.1.	Овладение научными понятиями, методами и теориями; способность реконструировать и объяснять изученные концепты с использованием аналогий, примеров и объяснений (в том числе генерируемых совместно с ГИИ); умение использовать изученный материал для решения практических, познавательных и междисциплинарных задач, в том числе в контексте, не совпадающем с учебным примером; качество выполнения учебных заданий; динамика учебных достижений
Метапредметные результаты (познавательные УУД)	Овладение навыками познавательной рефлексии; выявление дефицита информации; работа с противоречивыми данными; критическое оценивание информации; решение проблем	Критерий 1.2. Критерий 2.1. Критерий 2.2. Критерий 2.3.	Умение выявлять «галлюцинации» и логические ошибки в ответах ГИИ; способность формулировать перекрёстные проверочные запросы (промпты); количество и разнообразие идей, созданных с помощью ГИИ; оригинальность учебных продуктов, созданных в соавторстве с ГИИ; умение разбивать сложную задачу на подзадачи для последовательного решения с ГИИ; вариативность подходов к решению проблемы
Метапредметные результаты (регулятивные УУД)	Самостоятельное определение целей; планирование деятельности; самоконтроль и коррекция; принятие решений в изменяющихся условиях; оценка результата	Критерий 1.2. Критерий 2.1. Критерий 2.2. Критерий 2.3.	Способность к целеполаганию и планированию учебной, творческой и проблемно-поисковой деятельности с использованием ГИИ; умение осуществлять самоконтроль, самооценку результатов, коррекцию действий на основе обратной связи от ГИИ; умение самостоятельно определять критерии проверки достоверности информации, планировать последовательность шагов по верификации данных, корректировать стратегию поиска и оценки информации; способность самостоятельно планировать этапы творческой работы, оценивать качество и оригинальность продукта, осуществлять рефлексию творческого процесса; умение определять цели и критерии успешности решения проблемы, осуществлять контроль и оценку эффективности выбранной стратегии и при необходимости корректировать план действий с использованием обратной связи от ГИИ

Окончание табл. 2

Группы результатов по ФГОС	Конкретные требования ФГОС (ООО / СОО)	Критерии эффективности применения ГИИ	Показатели (индикаторы) эффективности
Метапредметные результаты (коммуникативные УУД)	Развитие навыков сотрудничества; участие в совместной деятельности; ведение развёрнутого диалога; умение аргументировать и отстаивать свою позицию	Критерий 1.2. Критерий 2.1. Критерий 2.2. Критерий 2.3.	Умение участвовать в коллективном обсуждении, обосновывать позицию, учитывать контраргументы и приходить к совместному выводу; готовность вести диалог с ГИИ как с оппонентом или экспертом; умение презентовать идеи и обосновывать выбор ГИИ-инструментов; способность интегрировать идеи участников (в том числе из ГИИ) и корректировать решения на основе критики; умение организовывать совместную работу, участвовать в дискуссиях и учитывать мнения других; способность использовать ГИИ для модерации обсуждения (уточняющие запросы, разрешение разногласий, поиск консенсуса)
Личностные результаты	Готовность к саморазвитию и самообразованию; формирование цифровой культуры; ценность научного познания; мотивация к обучению; осознанный выбор будущей профессии; развитие творческих способностей; этическое поведение	Критерий 1.3. Критерий 2.1. Критерий 2.2. Критерий 2.3.	Уровень учебной мотивации и познавательного интереса; сформированность учебной самостоятельности и ответственности; развитие рефлексивной позиции (способность оценивать собственные достижения и трудности); оригинальность и новизна создаваемых продуктов (в том числе с использованием ГИИ); способность комбинировать и модифицировать информацию из разных источников, включая ответы ГИИ
Условия реализации ООП (кадровые условия)	Владение цифровыми компетенциями; способность к непрерывному профессиональному развитию в цифровой среде; готовность к использованию современных технологий в образовательном процессе	Критерий 3.1. Критерий 3.2. Критерий 3.3.	Сокращение временных затрат на подготовку к учебным занятиям (разработку дидактических материалов, создание заданий, проверку работ) за счёт автоматизации рутинных операций с использованием ГИИ; увеличение доли рабочего времени для индивидуальной работы с обучающимися; автоматизация оценочных процедур с применением ГИИ-инструментов при сохранении педагогического контроля за качеством оценки; увеличение количества и разнообразия типов учебных заданий, разработанных с применением ГИИ, и их интеграция в различные этапы урока; использование ГИИ для создания адаптивных и персонализированных учебных материалов; владение навыками промпт-инжиниринга и эффективного взаимодействия с ГИИ; способность критически оценивать результаты работы ГИИ и дорабатывать их для использования в учебном процессе; участие в профессиональных сообществах, курсах повышения квалификации, мастер-классах и других мероприятиях, посвящённых интеграции ГИИ в образование, и внедрение полученного опыта в собственную педагогическую практику

Примечание: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 3

Уровневая шкала интегральной эффективности применения ГИИ в учебном взаимодействии

№	Уровень	Баллы	Характеристика
IV	Высокая эффективность	46–60	ГИИ встроен во все этапы учебного процесса как неотъемлемый элемент. Наблюдается устойчивый положительный рост предметных и метапредметных результатов, развиты 4К-компетенции. Учитель активно использует ИИ для обогащения методического арсенала и оптимизации труда, высокая удовлетворённость всех участников. Этические нормы учитываются и активно обсуждаются с обучающимися
III	Достаточная эффективность	31–45	ГИИ используется системно, но преимущественно для типовых задач (составление планов, подбор примеров). Отмечается положительная динамика по большинству показателей, однако есть отдельные дефициты (например, в развитии навыков критического мышления или автономии обучающихся). Учитель осваивает промпт-инжиниринг, но не всегда критически оценивает результаты ГИИ. Этические нормы учитываются
II	Базовая (начальная) эффективность	16–30	ГИИ применяется фрагментарно, в основном для генерации материалов или проверки типовых заданий. Метапредметные и личностные результаты развиты слабо, 4К-компетенции формируются эпизодически. Удовлетворённость учителя средняя, есть опасения «замещения» ГИИ. Этические аспекты не регламентированы
I	Низкая эффективность	0–15	ГИИ используется эпизодически, преимущественно для генерации иллюстраций или ответов «без проверки». Отсутствует системная оценка результатов; критическое мышление и креативность не развиваются. Учитель сохраняет традиционную роль; удовлетворенность низкая или ситуативная. Этические риски игнорируются

Примечание: составлено автором на основе полученных данных в ходе исследования.

4К-компетенции интегрированы в группу метапредметных результатов: когнитивных (в том числе логических), регулятивных и коммуникативных универсальных учебных действий. Изменения в педагогической деятельности (группа 3) соответствуют положениям профессионального стандарта педагога и установленным квалификационным характеристикам. В представленной матрице отсутствуют отдельные строки для оценки удовлетворенности обучающихся и учителей (группа 4), так как данные показатели не входят в перечень обязательных требований ФГОС. Вместе с тем они могут рассматриваться как дополнительные диагностические индикаторы при оценке эффективности внедрения ГИИ, например в рамках мониторинга психолого-педагогических условий реализации образовательной программы.

На основе предложенных критериев разработана уровневая шкала, позволяющая оценить интегральную эффективность использования ГИИ в образовательном процессе (табл. 3).

На экспертном этапе для подтверждения качества разработанного диагностического комплекса была проведена экспертиза с последующей процедурой статистической проверки полученных данных, включающей оценку содержательной валидности, внутренней согласованности, конструктной и критериальной валидности.

На начальном этапе проверки осуществлялась экспертная оценка содержательной валидности разработанного диагностического комплекса. В экспертизе приняли участие 32 специалиста: школьные учителя-предметники (n=14), методисты (n=8) и исследователи в области цифровой дидактики (n=10). Эксперты оценивали каждый из 12 критериев по шкале от 0 до 5 баллов, где 0 – показатель не проявляется/отсутствует; 1 – единичные проявления, несистемные; 2 – фрагментарные, нерегулярные; 3 – системные, но с заметными дефицитами; 4 – системные с незначительными недочётами; 5 – полное соответствие всем описанным показателям. Первичный суммарный балл рассчитывался как простая сумма баллов по всем 12 критериям (максимум 60 баллов) по формуле:

$$I = \sum_{i=1}^{12} bi,$$

где bi – оценка по искомому критерию.

Данный показатель использовался на этапе оценки содержательной валидности и при первичной обработке экспертных данных.

Для количественной оценки содержательной валидности был рассчитан коэффициент содержательной валидности (*CVR*) по формуле Lawshe:

$$CVR = \frac{ne - N/2}{N/2},$$

где *ne* – число экспертов, оценивших критерий как «соответствующий всем описанным показателям», *N* – общее число экспертов.

На основе анализа результатов экспертной оценки и расчета *CVR* были установлены следующие весовые коэффициенты для критериев: группа 1 – 0,35 (является приоритетной в ФГОС, отражает прямое влияние ГИИ на результаты обучения); группа 2 – 0,30 (ключевой метапредметный результат XXI века, но уступает по значимости предметным результатам в контексте текущего ФГОС); группа 3 – 0,20 (важный, но опосредованный показатель, поскольку эффективность учителя влияет на учеников, но не прямо на итоговые достижения обучающихся); группа 4 – 0,15 (субъективный показатель, дополняет объективные данные, но не может быть определяющим). Итоговое распределение весов (сумма = 1,00) отражает приоритет объективных, нормативно закреплённых и прямо измеримых критериев над субъективными и опосредованными, что повышает валидность и надёжность итоговой оценки эффективности ГИИ.

Переход от первичных баллов к взвешенным осуществлялся следующим образом. Поскольку каждая группа включает ровно три критерия, оцениваемых по шкале 0–5, максимальный первичный балл по любой группе составляет 15 баллов (3 × 5). Для приведения первичной суммы баллов группы к её взвешенному максимуму использовался коэффициент пересчёта *kg*, рассчитываемый как:

$$kg = \frac{wg \times 60}{15} = wg \times 4,$$

где *wg* – весовой коэффициент группы, 60 – максимальный суммарный балл, 15 – максимальный первичный балл группы.

Соответственно:

группа 1: $k1 = 0,35 \times 4 = 1,4$; взвешенный максимум = 15 × 1,4 = 21 балл;

группа 2: $k2 = 0,30 \times 4 = 1,2$; взвешенный максимум = 15 × 1,2 = 18 баллов;

группа 3: $k3 = 0,20 \times 4 = 0,8$; взвешенный максимум = 15 × 0,8 = 12 баллов;

группа 4: $k4 = 0,15 \times 4 = 0,6$; взвешенный максимум = 15 × 0,6 = 9 баллов.

Таким образом, итоговый взвешенный интегральный балл респондента рассчитывается по формуле:

$$I = \sum_{g=1}^{4} kg \times Sg = 1,4 \times S1 + 1,2 \times S2 + 0,8 \times S3 + 0,6 \times S4,$$

где *Sg* – первичная сумма баллов по трём критериям соответствующей группы (0–15). Максимальное значение итогового взвешенного интегрального балла сохранено на уровне 60 (21 + 18 + 12 + 9). Именно этот показатель использовался в дальнейшем для определения уровня эффективности и проверки критериальной валидности.

На следующем этапе исследования с целью проверки практической применимости разработанного диагностического инструментария, сбора первичных эмпирических данных для последующего статистического анализа, а также выявления методических и организационных трудностей была проведена апробация диагностического комплекса на базе пяти общеобразовательных школ г. Саранска. Пилотное исследование продолжительностью три недели (апрель 2026 г.) охватило по два класса в каждой школе. Общая выборка составила 250 обучающихся и 75 педагогов (не менее 50 обучающихся и 15 педагогов от каждой школы).

Сбор данных осуществляется по всем 12 критериям с применением предусмотренных методов оценки: анализ контрольных и проверочных работ (критерий 1.1); наблюдение и анализ продуктов учебной деятельности (критерий 1.2); опросные методы и методики диагностики мотивации (критерий 1.3); анализ проектных и кейсовых заданий (критерий 2.1); анализ презентаций, докладов, групповых проектов (критерии 2.2, 2.3); хронометраж и самоотчёты учителей (критерии 3.1–3.3); анкетирование и интервью (критерии 4.1–4.3). В ходе апробации фиксировались временные затраты на проведение диагностических процедур, степень сложности интерпретации отдельных показателей, технические и организационные проблемы. Полученные данные послужили основанием для корректировки процедуры сбора данных и уточнения инструктивно-методических материалов для педагогов и обучающихся, что позволи-

ло повысить стандартизированность и воспроизводимость диагностических замеров на последующих этапах исследования.

Следующий этап экспертной работы был направлен на проверку внутренней согласованности, конструктной и критериальной валидности разработанного инструментария.

Внутренняя согласованность элементов системы критериев оценивалась с помощью коэффициента альфа Кронбаха. Значения коэффициента для четырёх групп критериев находились в диапазоне 0,66–0,74 (для группы 1 – 0,72; для группы 2 – 0,74; для группы 3 – 0,68; для группы 4 – 0,66). Общее значение коэффициента альфа Кронбаха по всем 12 критериям достигло 0,87. Полученные показатели свидетельствуют о приемлемой внутренней согласованности выделенных групп критериев и согласованности всей системы критериев. Вместе с тем эти результаты позволяют судить именно о внутренней согласованности инструмента и не исчерпывают всех аспектов его надёжности.

Для оценки конструктной валидности системы критериев был использован факторный анализ методом главных компонент с вращением варимакс. В результате было выделено четыре фактора, объясняющие в совокупности 74,6% дисперсии, что подтверждает достаточную полноту факторной структуры. Собственные значения всех факторов > 1, что согласуется с критерием Кайзера и обосновывает выделение именно четырёх факторов. Сумма собственных значений составляет 8,9520, что при 12 переменных соответствует 74,6% объяснённой дисперсии (8,9520 / 12 × 100 = 74,6%) (табл. 4).

После вращения варимакс проведён анализ факторных нагрузок: критерий считался значимо связанным с фактором при нагрузке ≥ 0,40. Все четыре фактора имеют не менее двух значимых нагрузок; значения значимых нагрузок находятся в диапазоне от 0,73 до 0,89. Это указывает на высокую взаимосвязь соответствующих групп критериев в восприятии экспертов и позволяет рассматривать их в рамках общей системы оценки (табл. 5).

Выявленная факторная структура интерпретирована следующим образом:

фактор 1 – объединяет критерии 1.1–1.3 (образовательные результаты), назван «Образовательные достижения обучающихся»;

фактор 2 – включает критерии 2.1–2.3 (компетенции 4К), назван «Сформированность 4К-компетенций»;

фактор 3 – соответствует критериям 3.1–3.3 (профессиональная деятельность), назван «Изменения в педагогической деятельности учителя»;

фактор 4 – объединяет критерии 4.1–4.3 (удовлетворённость и этические аспекты), назван «Удовлетворенность участников образовательного процесса».

Таблица 4

Собственные значения и вклад факторов в объяснённую дисперсию

Фактор	Собственное значение	Доля объясненной дисперсии, %	Накопленная доля, %
Фактор 1	1,6428	13,69	13,69
Фактор 2	3,0756	25,63	39,32
Фактор 3	2,0796	17,33	56,65
Фактор 4	2,1540	17,95	74,60
Итого	8,9520	74,60	–

Примечание: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 5

Таблица факторных нагрузок после вращения варимакс

Факторы	Критерии											
	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3	4.1	4.2	4.3
Фактор 1	0,89	0,83	0,76	0,15	0,10	0,12	0,08	0,11	0,09	0,10	0,07	0,12
Фактор 2	0,12	0,18	0,20	0,85	0,88	0,86	0,14	0,16	0,13	0,17	0,15	0,19
Фактор 3	0,08	0,10	0,15	0,12	0,14	0,16	0,79	0,74	0,76	0,26	0,25	0,28
Фактор 4	0,15	0,12	0,18	0,20	0,22	0,19	0,21	0,24	0,23	0,81	0,77	0,73

Примечание: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 6

Уровневая шкала интегральной эффективности применения ГИИ в учебном взаимодействии после апробации

№	Уровень	Баллы (% от максимума 60)	Характеристика	Управленческие решения
IV	Высокая эффективность	50–60 (83,3–100%)	ГИИ встроен во все этапы учебного процесса как неотъемлемый элемент. Наблюдается устойчивый положительный рост предметных и метапредметных результатов, развиты 4К-компетенции. Учитель активно использует ИИ для обогащения методического арсенала и оптимизации труда, высокая удовлетворённость всех участников. Этические нормы учитываются и активно обсуждаются с обучающимися	Диссеминация успешных педагогических практик, развитие института наставничества и презентация эффективных моделей применения ГИИ в рамках конкурсов профессионального мастерства
III	Достаточная эффективность	36–49 (60–81,7%)	ГИИ используется системно, но преимущественно для типовых задач (составление планов, подбор примеров). Отмечается положительная динамика по большинству показателей, однако есть отдельные дефициты (например, в развитии навыков критического мышления или автономии обучающихся). Учитель осваивает промпт-инжиниринг, но не всегда критически оценивает результаты ГИИ. Этические нормы учитываются	Проведение адресного мониторинга по критериям, продемонстрировавшим минимальные значения интегрального балла, и организация обучающих семинаров и мастер-классов по устранению выявленных дефицитов
II	Базовая (начальная) эффективность	21–35 (35–58,3%)	ГИИ применяется фрагментарно, в основном для генерации материалов или проверки типовых заданий. Метапредметные и личностные результаты развиты слабо, 4К-компетенции формируются эпизодически. Удовлетворённость учителя средняя, есть опасения «замещения» ГИИ. Этические аспекты не регламентированы	Разработка программы методического сопровождения педагогических работников и включение обязательного модуля по освоению ГИИ в систему повышения квалификации для педагогов и в учебно-воспитательный процесс для обучающихся
I	Низкая эффективность	0–20 (0–33,3%)	ГИИ используется эпизодически, преимущественно для генерации иллюстраций или ответов «без проверки». Отсутствует системная оценка результатов; критическое мышление и креативность не развиваются. Учитель сохраняет традиционную роль; удовлетворенность низкая или ситуативная. Этические риски игнорируются	Разработка и внедрение программы повышения квалификации по функциональной грамотности в области применения ГИИ, запуск пилотного проекта с чёткими измеримыми целями и привлечение внешних независимых экспертов

Примечание: составлено автором на основе полученных данных в ходе исследования.

Полученные эмпирические данные позволяют заключить, что установленная факторная структура полностью соответствует теоретической модели, положенной в основу разработанной системы критериев.

На данном этапе экспертного исследования также осуществлялось установление границ уровней эффективности (высокий, достаточный, базовый, низкий) на основе эмпирических данных. С этой целью для респондентов пилотной выборки (n = 100) производился сбор итоговых взвешенных интегральных баллов в соответствии с установленными весовыми коэффициентами (максимально возможное значение – 60 баллов). Для каждого респондента вычислялся итоговый балл, после чего определялся процент от максимума по формуле:

$$P = \frac{I}{60} \times 100\%,$$

где I – интегральный балл респондента.

Границы уровней задавались следующим образом: низкий уровень – 0–15 баллов (0–25%); базовый – 16–30 баллов (26,7–50%); достаточный – 31–45 баллов (51,7–75%); высокий – 46–60 баллов (76,7–100%). Для валидизации полученных границ 10 независимых экспертов классифицировали все 100 случаев из пилотной выборки по четырём уровням эффективности, не имея доступа к количественным баллам участников. Полученное экспертное распределение сопоставлялось с заданным процентным значением от максимума; при расхождении более чем на 10% границы уровней корректировались с применением метода Дельфи. По итогам данной процедуры в уровневой шкале интегральной эффективности применения ГИИ в учебном взаимодействии были уточнены границы уровней и сформулированы рекомендации для принятия управленческих и педагогических решений (табл. 6).

На заключительном этапе экспертного исследования проводилась проверка критериальной валидности разработанного диагностического комплекса. С этой целью применялся метод корреляции Пирсона, в рамках которого сопоставлялись две переменные: Y – итоговый взвешенный интегральный балл, рассчитанный по системе критериев с учетом весовых коэффициентов (максимум 60 баллов), и X – среднее арифметическое независимых экспертных оценок индивидуального профиля респондента.

В исследовании приняли участие 100 респондентов (пилотная выборка). Для каждого участника был рассчитан интегральный балл на основе собранных данных. Параллельно 10 независимых экспертов провели слепую оценку анонимизированных индивидуальных профилей этих же 100 респондентов по разработанной системе критериев с учетом весовых коэффициентов: группа 1 – 21 балл; группа 2 – 18 баллов; группа 3 – 12 баллов; группа 4 – 9 баллов, после чего рассчитывался суммарный интегральный балл и определялся соответствующий уровень по шкале интегральной эффективности. Эксперты не имели доступа к расчетным баллам и оценивали профили исключительно на основе представленной информации. Для каждого респондента рассчитывалось среднее арифметическое оценок всех 10 экспертов, что формировало переменную X.

Коэффициент корреляции Пирсона составил $r = 0,85$, что по шкале Чеддока указывает на высокую положительную связь между интегральным баллом и независимой экспертной оценкой. Полученное значение коэффициента корреляции является статистически значимым ($p < 0,01$), что свидетельствует о наличии статистически подтвержденной взаимосвязи между исследуемыми показателями. Более того, при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $n - 2 = 98$ критическое значение составляет $t_{кр} = 1,98$. Поскольку $t_{расч} > t_{кр}$ ($15,92 > 1,98$), нулевая гипотеза об отсутствии статистически значимой взаимосвязи отвергается.

Таким образом, полученные результаты подтверждают критериальную валидность итогового взвешенного интегрального балла, рассчитываемого по разработанной системе критериев. Поскольку этот балл аккумулирует оценки по всем 12 критериям и всем четырём группам, это служит основанием для вывода о валидности всего диагностического инструментария.

Выводы

В ходе исследования достигнуты следующие научные результаты.

1. Разработана система из 12 критериев оценки эффективности применения ГИИ, объединенных в 4 группы: «Образовательные достижения обучающихся», «Сформированность 4К-компетенций», «Изменения в педагогической деятельности учителя», «Удовлетворенность участников образовательного процесса». Система операционализирована через совокупность количественных и качественных показателей и соответствующих им методов измерения.

2. Спроектирована матрица сопряжения критериев эффективности ГИИ и требований ФГОС основного общего и среднего общего образования. Показатели и критерии оценки матрицы полностью отвечают требованиям ФГОС к результатам освоения образовательных программ.

3. Предложена уровневая шкала (низкая эффективность – базовая эффективность – достаточная эффективность – высокая эффективность), позволяющая оценить интегральную эффективность использования ГИИ в образовательном процессе.

4. Эмпирически подтверждены психометрические характеристики разработанного диагностического инструментария: внутренняя согласованность (α-Кронбаха = 0,87), конструктная валидность (факторный анализ, 74,6% объяснённой дисперсии), критериальная валидность (корреляция с независимыми экспертными оценками $r = 0,85$; $p < 0,01$). Эти результаты свидетельствуют о надёжности и валидности инструмента как средства оценки эффективности приме-

нения ГИИ, однако характеризуют, прежде всего, качество диагностического комплекса, а не образовательную эффективность самой технологии.

Практическая значимость исследования состоит в возможности использования диагностических инструментов в общеобразовательных учреждениях для мониторинга качества образования, отслеживания развития компетенций обучающихся, оценки профессиональной готовности учителей к работе с генеративным ИИ и обоснования управленческих решений.

Основным ограничением данного исследования является отсутствие педагогического эксперимента. Проведённая эмпирическая проверка носила характер предварительной апробации диагностического инструмента и подтвердила его надёжность и валидность, но не позволила зафиксировать образовательные эффекты применения ГИИ. В связи с этим выводы об эффективности ГИИ как средства обучения в данной работе не формулируются. Перспективными направлениями дальнейших исследований являются экспериментальная проверка диагностического инструментария, его адаптация к возрастным особенностям обучающихся и специфике конкретного учебного предмета, а также создание автоматизированных средств сбора и анализа данных о взаимодействии обучающихся и учителей с ГИИ.

Список литературы

1. Сысоев П. В. Принципы обучения иностранному языку на основе технологий искусственного интеллекта // Иностранные языки в школе. 2024. № 3. С. 8–19. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=65364548 (дата обращения: 14.05.2026). EDN: HORGDD.

2. Вишленкова С. Г. Технология ChatGPT-4o как средство формирования лингвистической компетенции будущих учителей иностранного языка // Современные наукоемкие технологии. 2025. № 5. С. 156–164. URL: https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=40404 (дата обращения: 16.07.2026). DOI: 10.17513/snt.40404. EDN: DUXDMH.

3. Староверова Н. А. Этические проблемы применения технологий искусственного интеллекта в образовательном процессе // Современные наукоемкие технологии. 2024. № 9. С. 145–150. URL: https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=40163 (дата обращения: 14.05.2026). DOI: 10.17513/snt.40163.

4. Ярцева Е. Я. Интеграция искусственного интеллекта в образование // Проблемы современного педагогического образования. 2024. № 85-2. С. 398–401. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/integratsiya-iskusstvennogo-intellekta-v-obrazovanie (дата обращения: 27.01.2026). EDN: HIHQVY.

5. Поспелова Е. А., Горлачева Е. Н., Отоцкий П. Л. Применение генеративного искусственного интеллекта в персонализации образования: восприятие студентами гуманитарных и технических специальностей // Интеграция образования. 2025. Т. 29. № 4(121). С. 734–752. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-generativnogo-iskusstvennogo-intellekta-v-personalizatsii-obrazovaniya-vospriyatie-studentami-gumanitarnyh-i (дата обращения: 17.05.2026). DOI: 10.15507/1991-9468.029.202504.734-752. EDN: JJHRLH.

6. Зуфарова А. С. Интеграция искусственного интеллекта в современное образование: преимущества и вызовы // ЦИТИСЭ. 2025. № 1(43). С. 652–659. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82281067 (дата обращения: 17.05.2026). EDN: VMFTAA.

7. Михайлова О. П., Хафизова А. А., Назарова Н. П., Ередеева Ф. Л., Набокина М. Е. Интеграция искусственного интеллекта в подготовку педагогических кадров: вызовы и перспективы цифровой трансформации образования // Вестник педагогических наук. 2025. № 4. С. 374–380. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82270043 (дата обращения: 17.05.2026). EDN: JYTCYM.

8. Walter Y. Embracing the future of Artificial Intelligence in the classroom: the relevance of AI literacy, prompt engineering, and critical thinking in modern education // International Journal of Educational Technology in Higher Education. 2024. Vol. 21. Art. 15. P. 1–29. URL: https://link.springer.com/article/10.1186/s41239-024-00448-3 (дата обращения: 28.05.2026). DOI: 10.1186/s41239-024-00448-3.

9. Chai C. S., Chiu T. K. F., Wang X., Jiang F., Lin X.-F. Modeling Chinese Secondary School Students' Behavioral Intentions to Learn Artificial Intelligence with the Theory of Planned Behavior and Self-Determination Theory // Sustainability. 2023. Vol. 15(1). Art. 605. URL: https://www.mdpi.com/2071-1050/15/1/605 (дата обращения: 28.05.2026). DOI: 10.3390/su15010605.

10. Feng S., Carolus A. Artificial intelligence literacy at school: A systematic review with a focus on psychological foundations // Computers and Education: Artificial Intelligence. 2026. Vol. 10. Art. 100551. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666920X26000123 (дата обращения: 28.05.2026). DOI: 10.1016/j.caeai.2026.100551.

11. Чекмарев Э. В., Переверзев К. В. Формирование мировоззрения обучающихся в условиях интеграции искусственного интеллекта в образование // Российское право онлайн. 2026. № 1. С. 79–89. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=89334784 (дата обращения: 14.06.2026). DOI: 10.17803/2542-2472.2026.37.1.079-089. EDN: MCWKSD.

12. Левина Е. А., Вишленкова С. Г. Интеграция диалогового ассистента GigaChat в процесс обучения иностранному языку будущих педагогов // Современные наукоемкие технологии. 2026. № 2. С. 189–197. URL: https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=40689 (дата обращения: 22.06.2026). DOI: 10.17513/snt.40689. EDN: LLAKNL.

13. Храмова Т. Ю. Кейс-технология как инструмент интеграции искусственного интеллекта в иноязычное образование // Казанская наука. 2026. № 2. С. 146–148. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=89316410 (дата обращения: 22.06.2026). EDN: IYMSAO.

14. Беляева И. Н., Селютина Е. А., Цецорина Т. А. Разработка систем упражнений по математике с помощью генеративного искусственного интеллекта // Современные наукоемкие технологии. 2026. № 3. С. 107–113. URL: https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=40711 (дата обращения: 22.06.2026). DOI: 10.17513/snt.40711. EDN: BWDZTF.

15. Шегай И. Н. Интеграция искусственного интеллекта в школьное образование: новый уровень эффективности // Информатика в школе. 2026. Т. 25. № 1. С. 45–53. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=89264714 (дата обращения: 22.06.2026). DOI: 10.32517/2221-1993-2026-25-1-45-53. EDN: VWNMXJ.

16. Запалацкая В. С., Куликов Д. А. Особенности интеграции элементов искусственного интеллекта в школьное образование через олимпиады и конкурсы // Московский педагогический журнал. 2026. № 1. С. 6–18. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=89321914 (дата обращения: 11.07.2026). DOI: 10.18384/2949-4974-2026-1-6-18. EDN: XPAJUQ.

17. Cherner T., Donnelly M. Introducing the Edu-GenAI Rubric: A Theory-Informed Tool for Assessing the Educational Value of Large Language Models and AI Media Generators // Education Sciences. 2026. Vol. 16. Is. 5. Art. 706. URL: https://www.mdpi.com/2227-7102/16/5/706 (дата обращения: 16.06.2026). DOI: 10.3390/educsci16050706.

18. Федеральный государственный образовательный стандарт основного общего образования: утвержден Приказом Министерства просвещения Российской Федерации от 31 мая 2021 г. № 287 (ред. от 18.06.2025); зарегистрирован Министерством юстиции РФ 5 июля 2021 г., рег. № 64101 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: https://docs.cntd.ru/document/607175848 (дата обращения: 10.06.2026).

19. Федеральный государственный образовательный стандарт среднего общего образования: утвержден Приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 17 мая 2012 г. № 413 (ред. от 12.02.2025); зарегистрирован Министерством юстиции РФ 7 июня 2012 г., рег. № 24480 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: https://docs.cntd.ru/document/902350579 (дата обращения: 10.06.2026).

20. Федеральная образовательная программа основного общего образования: утверждена Приказом Министерства просвещения Российской Федерации от 18 мая 2023 г. № 370 (ред. от 10.11.2025); зарегистрирован Министерством юстиции РФ 12 июля 2023 г., рег. № 74223 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: https://docs.cntd.ru/document/1301798826?ysclid=mudu83p7vy536640394 (дата обращения: 10.06.2026).

21. Федеральная образовательная программа среднего общего образования: утверждена Приказом Министерства просвещения Российской Федерации от 18 мая 2023 г. № 371 (ред. от 10.11.2025); зарегистрирован Министерством юстиции РФ 12 июля 2023 г., рег. № 74228 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: URL: https://docs.cntd.ru/document/1301798825?ysclid=muds40uhcl745374207 (дата обращения: 10.06.2026).

22. Профессиональный стандарт «Педагог (педагогическая деятельность в сфере дошкольного, начального общего, основного общего, среднего общего образования) (воспитатель, учитель)»: утвержден Приказом Министерства труда Российской Федерации от 18 октября 2013 г. № 544н (ред. от 05.08.2016); зарегистрирован Министерством юстиции РФ 6 декабря 2013 г., рег. № 30550 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: URL: https://docs.cntd.ru/document/499053710?ysclid=muds6h2txs870353980 (дата обращения: 10.06.2026).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Финансирование осуществлялось: в рамках выполнения государственного задания Минпросвещения России по теме: «Разработка функциональной педагогической модели применения генеративного искусственного интеллекта в учебном взаимодействии учителя и обучающихся» (дополнительное соглашение № 073-03-2026-049/2 от 21.02.2026 г.).

Financing: The financing was carried out: as part of the implementation of the state assignment of the Ministry of Education of Russia on the topic: “Development of a functional pedagogical model for the application of generative artificial intelligence in educational interactions between teachers and students” (supplementary agreement No. 073-03-2026-049/2 dated February 21, 2026).

УДК 378.146
DOI

CC BY 4.0

БИНАРНАЯ СИСТЕМА ОЦЕНИВАНИЯ В МАГИСТРАТУРЕ: НАУЧНЫЙ СТЕНДАП КАК ИНСТРУМЕНТ

[1]Войтик Н. В. ORCID ID 0000-0003-3428-1843,
[2]Полетаева О. Б. ORCID ID 0000-0002-4925-1420,
[1]Абсалямова Р. А. ORCID ID 0000-0003-2703-3921,
[1]Муравьева М. В. ORCID ID 0000-0002-7184-7255

[1]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский государственный университет», Тюмень, Российская Федерация;
[2]Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», Институт лингвистического и педагогического образования, Москва, Зеленоград, Российская Федерация, e-mail: n.v.vojtik@utmn.ru

Система оценивания в высшем образовании продолжает использовать преимущественно традиционные способы аттестации, что приводит к проблемам субъективности и недостаточной объективности, особенно при оценке устной иноязычной речи студентов-магистрантов неязыковых направлений. Цель исследования – обосновать научный стендап как аттрактивную форму устного выступления, основанную на принципе дуализма (соучастия) студента, и предложить его в качестве инструмента бинарной системы оценивания. В ходе исследования применялись теоретические методы (анализ и обобщение научной литературы, моделирование) и эмпирические (анкетирование студентов и преподавателей двух вузов с использованием авторских опросников). В результате проведенного исследования установлено, что академическая среда неоднородно относится к совместному оцениванию: большинство преподавателей готовы допустить магистрантов к процессу оценивания, однако значительная часть студентов сомневаются в собственной компетентности для оценки одногруппников и опасаются предвзятости. Сравнение мнений преподавателей и студентов выявило существенный разрыв в оценке готовности к сооцениванию: преподаватели в большей степени доверяют студентам, чем студенты сами себе. Сделан вывод, что научный стендап эффективно интегрируется в бинарную систему оценивания, способствует формированию культуры сооценивания, обеспечивает более объективную обратную связь и выступает действенным инструментом саморазвития магистрантов. Рекомендуется дальнейшее внедрение данного формата в образовательную практику.

Ключевые слова: бинарная система оценивания, принцип дуализма, коллективная оценка, культура оценивания, критерии оценивания, устное выступление, научный стендап, академическая среда

BINARY ASSESSMENT IN MASTER'S PROGRAMMES: SCIENTIFIC STAND-UP AS A TOOL

[1]Voytik N. V. ORCID ID 0000-0003-3428-1843,
[2]Poletaeva O. B ORCID ID 0000-0002-4925-1420,
[1]Absalyamova R. A. ORCID ID 0000-0003-2703-3921,
[1]Muraveva M. V. ORCID ID 0000-0002-7184-7255

[1]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Tyumen State University", Tyumen, Russian Federation;
[2]Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "National Research University "Moscow Institute of Electronic Technology", Moscow, Zelenograd, Russian Federation, e-mail: n.v.vojtik@utmn.ru

The higher education assessment system continues to rely primarily on traditional assessment methods, which leads to problems of subjectivity and insufficient objectivity, particularly when assessing oral foreign language performance of master's students in non-linguistic majors. The aim of the study is to substantiate scientific stand-up as an attractive form of oral presentation based on the principle of dualism (participation) of the student, and to propose it as a tool of the binary assessment system. The research employed theoretical methods (analysis and synthesis of scientific literature, modeling) and empirical methods (questionnaire surveys of students and teachers from two universities using author-designed questionnaires). The findings revealed that the academic environment has a heterogeneous attitude towards collaborative assessment: the majority of teachers are willing to admit master's students to the assessment process, while a significant proportion of students doubt their own competence to evaluate their peers and fear bias. A comparison of teachers' and students' opinions revealed a significant gap in readiness for co-assessment: teachers trust students more than students trust themselves. It is concluded that scientific stand-up integrates effectively into the binary assessment system, contributes to the formation of a culture of co-assessment, provides more objective feedback, and serves as an effective tool for master's students' self-development. Further implementation of this format into educational practice is recommended.

Keywords: binary assessment system, dualism principle, collaborative assessment, assessment culture, assessment criteria, oral presentation, scientific stand-up, academic environment

Введение

Система оценивания в высшем образовании, несмотря на ряд реформ, продолжает использовать преимущественно традиционные способы аттестации и контроля результатов обучения, что приводит к сохраняющимся проблемам, например, в виде субъективного отношения преподавателя к студенту, что обуславливает необходимость поиска новых актуальных современных форм оценивания. Данный вопрос является наиболее уязвимым в подготовке специалистов неязыкового профиля уровня магистратуры и требует оперативной методической «доработки», считают исследователи [1–3]. Пятибалльная оценочная шкала считается «мало точным и неповоротливым инструментом» [4, 5], а существующая система обратной связи недостаточно четкая, чрезмерно индивидуализирована и мешает адекватно измерить степень сформированности коммуникативной компетенции студентов-магистрантов, особенно в рамках устной иноязычной деятельности. Другая проблема заключается в том, что изменился сам студент, его отношение к учебному процессу, форматы коммуникаций, интересы, отношение к результату – оценке. Важно понимать, насколько вовлечен студент в учебный процесс, интересно ли ему оценивание своих знаний и хотел бы он принимать участие в оценивании других студентов. Заинтересованность студента в учебном процессе зависит от многих факторов, в том числе от личности самого студента, преподавателей, качества содержания образовательной программы и др. Многие студенты максимально вовлечены в учебный процесс, проявляют высокий интерес к оцениванию своих знаний, магистранты традиционно более ответственные и целеустремленные; другие могут не проявлять интерес вообще в результате неудачного опыта в прошлом или других причин. Формат научного стендапа – это такой вид публичного выступления, где можно оценить содержание, логику изложения, языковые навыки, креативность, контакт с аудиторией; он включает все необходимые для оценивания компоненты и при этом помогает вовлечь студентов в процесс оценивания, применив бинарный подход в магистратуре.

Научный стендап (англ. Science Slam) – это интеллектуальный и оригинальный формат устного выступления, сообщения, речевого высказывания – монолога молодых исследователей, предлагается и в академической среде как Science Slam. Актуализируя приоритет проектной деятельности в своих работах, исследователи [6, 7] проанализировали проведение и роль научных стендапов Science Slam и Science Battle. Участник (слэмер) понятным языком рассказывает об открытиях, которые изменят жизнь, в легкой и увлекательной форме рассказывает о своих научных разработках, технических достижениях или научных открытиях современности. Е. Е. Васильева [8] подчеркивает в своей работе, что «слэмер должен обозначить проблемное поле, озвучить цель и задачи исследования, а также заявить гипотезу исследования. Далее кратко (максимум за десять минут) и креативно представить результаты своего исследования и/или проект решения данной проблемы». Исследователи [9, 10] рассмотрели в своих исследованиях stand-up comedy в контексте речи и выделили условия ее успешного воспроизведения для достижения прагматического коммуникативного эффекта. Выступление-стендап представляет собой запланированный монолог, состоящий из необходимых тематических единиц, которые производят заданный коммуникативный эффект и прагматически воздействуют на реципиента; соответствует концепции бинарной системы оценивания: студенты могут сами проявить инициативу в выборе тем; несмотря на «развлекательный характер данного формата, в основу материалов для выступления закладываются научно-исследовательские знания» [8].

Цель исследования – обосновать бинарную систему оценивания устных выступлений магистрантов и предложить научный стендап как инструмент сооценивания в рамках этой системы; в качестве задачи предполагается рассмотреть возможность использования научного стендапа в магистратуре и эмпирически оценить готовность академической среды (преподавателей и магистрантов) к сооцениванию устных выступлений.

Материалы и методы исследования

В соответствии с исследовательской целью применялись теоретические методы (анализ и обобщение научной литературы по проблемам оценивания в высшем образовании, бинарного подхода и форматов устных выступлений; моделирование для бинарной системы оценивания) и эмпирические методы (анкетирование студентов и преподавателей с использованием авторских опросников). Исследование проводилось на базе Тюменского государственного университета и Национального исследовательского университета «Московский институт электронной техники». В опросе приняли участие 127 респондентов (сту-

денты и преподаватели). Обработка данных включала количественный и качественный анализ ответов. Разный уровень компетенций, знаний и навыков студентов-магистрантов может стать проблемой объективного оценивания устного выступления одногруппника. Для решения этой проблемы проводился предварительный инструктаж студентов-магистрантов по оценке устных выступлений.

Результаты исследования и их обсуждение

Проведенное исследование подтвердило, что академическая среда по-разному относится к процессу совместного оценивания устного выступления студентов магистрантов. Это зависит от многих факторов, включая специфику учебного заведения, преподавателей, студентов и организации самого процесса оценивания. Так, 24% опрошенных преподавателей сомневаются в целесообразности допуска студентов к процессу оценивания устных выступлений, считая, что у студентов-магистрантов недостаточно знаний, умений, компетенций, чтобы оценивать своих одногруппников. Они могут лучше понимать, какие навыки и знания должны быть продемонстрированы в выступлении и как их оценить. *Во-первых*, преподаватели априори обладают большим опытом и квалификацией в оценивании устных выступлений, чем студенты. *Во-вторых*, преподаватели могут стремиться к объективности в оценивании, избегая влияния личных предпочтений или предубеждений, в отличие от студентов. *В-третьих*, преподаватели могут считать, что студенты не могут обеспечить достаточную конфиденциальность при оценивании, что может привести к конфликтам или недовольству. *Наконец*, преподаватели могут считать, что участие студентов в процессе оценивания может занять дополнительное время, которое можно было бы использовать для других учебных задач. Если преподаватели решают не допускать студентов в процесс оценивания, они должны объяснить свои причины и предложить альтернативные способы оценки выступлений студентов.

Как показывает опрос магистрантов, отвечая на вопрос «Хотели бы Вы принимать участие в процессе оценивания устного сообщения (доклад, презентация и т. п.) своих одногруппников?», студенты в основном (57 %) положительно относятся к соучастию в процессе оценивания «отличный формат объективного оценивания», «коллективная оценка способствует более объективной оценке, так как участвуют несколько человек, что снижает вероятность предвзятости или субъективности» (цитаты из комментариев студентов после опроса). Респонденты считают, что это будет интересный опыт, который поможет лучше разобраться в достоинствах и ошибках своего выступления, полезный инструмент не только для преподавателя, но и для студента, он позволит получить разностороннюю обратную связь. Указанная рефлексия является для них важной с точки зрения мотивации дальнейшего языкового самообразования и дает чувство удовлетворенности от проделанной работы.

Тем не менее в анкете в строке «Рефлексия» (ответы в свободной форме) студенты высказали опасения об активном участии в оценивании, говоря о том, что «оно может быть предвзято», «я отношусь к этому не очень хорошо, так как бывают случаи, что большинство студентов могут просто занизить своему одногруппнику оценку из-за личной неприязни», «лучше преподавателям самим оценивать устные сообщения, так как студенты могут или прослушать, или завысить, или занизить оценки» (цитаты из комментариев студентов после опроса).

Неожиданно то, что студенты продемонстрировали некоторую ментальную обструкцию (отрицание) подобного формата оценивания. Такое негативное отношение студентов к взаимооцениванию может быть вызвано несколькими факторами. *Во-первых*, студенты могут испытывать страх перед оценкой своих одногруппников, так как они могут чувствовать себя неуверенно и не быть готовыми к такой оценке, что может привести к снижению качества их выступлений, так как они могут бояться высказывать свои мысли и идеи. *Во-вторых*, студенты могут испытывать недоверие к своим одногруппникам, считая их оценки субъективными и не отражающими реальный уровень знаний и навыков выступающего. *Более того*, студенты могут испытывать недовольство и конфликтность, если их оценки не совпадают с оценками преподавателя, что вызывает негативные эмоции, происходит ухудшение отношений между студентами. Возможно, студенты могут посчитать, что взаимооценивание отвлекает их и не позволяет им сосредоточиться на своих собственных выступлениях. Считаем, что, если студенты испытывают негативное отношение к взаимооцениванию, преподаватели должны объяснить им его преимущества и предложить альтернативные способы оценки выступлений студентов.

Таблица 1

Сводные результаты опросов преподавателей и студентов

Преподаватели					Магистранты				
Вопрос	Кол-во	%	Кол-во	%	Вопрос	Кол-во	%	Кол-во	%
	да		нет			да		нет	
Считаете ли Вы, что у студентов-магистрантов достаточно знаний, умений, компетенций, чтобы оценивать своих одногруппников?	16	76	5	24	Считаете ли Вы, что у Вас достаточно знаний, умений, компетенций, чтобы оценивать своих одногруппников?	50	47	56	53
Согласны ли Вы «допустить» студентов-магистрантов в процесс оценивания?	17	81	4	19	Как вы считаете, будут ли преподаватели согласны допустить студентов в процесс оценивания?	85	80	21	20
Готовы ли Вы учитывать (=суммировать) оценку студентов-магистрантов при выставлении итоговой оценки за устное сообщение (доклад, презентация и т. п.)?	19	90	2	10	Хотели бы Вы принимать участие в процессе оценивания устного сообщения (доклад, презентация и т. п.) своих одногруппников?	60	57	46	57
Считаете ли Вы, что студенты-магистранты будут объективны в процессе оценивания своих одногруппников?	13	62	8	38	Сможете ли Вы поставить низкую оценку своему одногруппнику?	55	53	51	47
Знаком ли Вам формат «научный стендап»?	11	52	10	48	Знаком ли Вам формат устного выступления «научный стендап»?	43	41	63	59

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

По результатам анкетирования (табл. 1) видно, что преподаватели верят в достаточное количество знаний, умений, компетенций магистрантов, чтобы они могли оценивать своих одногруппников: 76 % (преподаватели) против 47 % (студенты). «Такая система мотивирует студентов принимать участие в процессе защиты устных докладов, повышает уровень эмпатии, уровень осознанности и уважения друг к другу», – уточняли преподаватели в комментариях к опросу. Также было выражено мнение, что критерии оценивания должны быть напечатаны вместе со списком выступающего, важно, чтобы были даны определения, расшифровка этих критериев для лучшего понимания того, что студенты оценивают. Студенты выразили опасение об осознанности одногруппников, отсутствии педагогического опыта оценивания по данной дисциплине, возможной трате времени, если будут расхождения в оценке преподавателя и студента. Некоторые студенты однозначно высказались о том, что лучше самим преподавателям оценивать устные сообщения, так как они компетентны, являются профессионалами, есть подобный опыт и разработаны критерии, а одногруппники могут занизить оценку из-за личной неприязни, предвзятости или не смогут адекватно оценить, так как не обладают достаточным уровнем иностранного языка. Часть студентов хотят полностью полагаться на преподавателя: считаем, что для того, чтобы изменить подобную пассивную позицию, необходимо «пропагандировать» самостоятельность суждений, мотивировать к независимости оценок.

Совместное оценивание академической устной речи имеет следующие преимущества: разнообразие мнений, объективность, обратная связь, взаимообучение и повышение ответственности. Сравнительный анализ мнений разных людей с разными уровнями знаний и опытом добавляет новые взгляды и идеи. Студенты могут оценивать однокурсников по определенным критериям, чтобы снизить субъективность оценки. Оценка и комментарии однокурсников являются ценным источником обратной связи и помогают развивать навыки речи. Студенты могут учиться друг у друга, наблюдая за успешными участниками и их техниками. Однако следует учесть, что оценивание академической устной речи студентом не может полностью заменить оценку пре-

подавателя. Преподаватель по-прежнему должен играть важную роль в процессе оценки и быть тем, кто обеспечивает стандарты оценки и контроль качества. Это означает, что преподаватель должен присутствовать во время оценки и вносить свой вклад, а также обнаруживать потенциальные ошибки и недочеты. Далее подключается критериальная шкала, разработанная студентами: она должна «весить» столько же баллов, что и шкала преподавателя, но, безусловно, быть наполненной другим содержанием – тем, что сами студенты считают наиболее важным при их оценке. Оценивание как обучающая стратегия, ее функция заключается в осуществлении обратной связи между обучающимися и педагогами.

Такой синтетический формат, как научный стендап, соединяющий научность и юмор, очень привлекателен для студентов именно уровня магистратуры, поскольку они уже обладают достаточным запасом профессиональных знаний и при этом могут использовать свои языковые навыки.

Коллективное оценивание, гибкое и диверсифицированное, гармонично вписывается в бинарную систему оценивания. Следует учесть, что термины «оценивание» и «оценка» используются как синонимы; так, М. А. Пинская [11], анализируя зарубежный опыт оценивания, уточняет разницу между ними. Оценивание (англ. assessment) предполагает сбор на основе различных оценочных техник и предоставление участникам образовательного процесса информации о том, как развивается курс, как происходит его усвоение обучающимся. Оценка (англ. evaluation) заключается в интерпретации этой информации.

Для достижения запланированных образовательных результатов необходимо актуализировать устное выступление студентов в контексте профессиональной тематики в формате, который предполагает «наличие разнообразных притягательных сфер жизнедеятельности студентов в вузовской системе, который способствует более полной их самореализации и психологическому благополучию» [12].

Исследователи [13, 14] писали о бинарном подходе к оптимизации процесса контроля и диагностики в высшей школе. М. И. Махмутов [15] предлагал бинарные методы обучения, чтобы вовлечь студентов в процесс обучения. Обоснованность использования бинарного подхода объяснялась необходимостью стимулировать и формировать мотивацию интереса у преподавателей и студентов к процессу и результатам контроля и самоконтроля, диагностики и самодиагностики: эта цель актуальна и сегодня. К. В. Лосев [16] анализирует бинарные методы обучения как еще одну возможность коммуникативного взаимодействия между студентами и преподавателями в обучении. В своей работе Н. В. Телегина [17] дала определение бинарного подхода: «это целостный подход к совершенствованию преподавания и учения, оптимизации целей, критериев, диагностического инструментария, технологии оптимизации процесса оценки качества обучения, оптимизации диагностики (самодиагностики), контроля (самоконтроля) планируемых и достигнутых результатов обучения».

Практика педагогической и научной деятельности авторов подтверждает необходимость корректировки стратегий обучения и выработки бинарной системы оценивания компетенций владения иностранным языком. Бинарная или дуальная система оценивания с ее множественностью (двухэлементная, двухкомпонентная), с разделением на «подмножества» (преподаватель и студент: 1+1), имеющие минимальные (знания и навыки студента) и максимальные (профкомпетенции преподавателя), а иногда и противоположные полярные значения (разное оценивание), позволяет в итоге получить адекватную оценку.

Мы руководствуемся собственным определением: *бинарная система оценивания (БСО),* основанная на принципе дуализма, – это модель целостного подхода, который рассматривает процесс оценивания, имеет определенную структуру и принципы функционирования в решении педагогических проблем. Содержание модели бинарной системы включает *Преподавателя* как главного основного профессионального асессора, обладающего компетентностью, как языковой, так и коммуникативной, для объективного оценивания, и *Студента* как соучастника, партнера, обладающего навыками и умениями определенного уровня, еще не компетентностью. БСО имеет критериальный набор – инструмент оценивания, который четко определяется заранее перед выступлением, то есть имеет содержание, показатели и шкалу оценивания. Она включает шесть критериев: научное содержание, структура и логика, языковая компетенция, аргументация, аттрактивность и креативность, контакт с аудиторией. Важно, что преподаватели и студенты имеют одинаковые количественно-балльные показатели, но критерии оценивания разные по формулировке: для преподавателя критерии сформулированы в академических терминах, для студента – в упрощенных, понятных формулировках, при этом смысл критериев остается одинаковым (табл. 2, 3).

Таблица 2

Оценочный лист для научного стендапа (для заполнения преподавателем)

Критерий	Макс	Преподаватель 1	Преподаватель 2	…	Средний балл
1. Научное содержание	10				
2. Структура и логика	10				
3. Языковая компетенция	10				
4. Аргументация	10				
5. Аттрактивность и креативность	5				
6. Контакт с аудиторией	5				

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 3

Оценочный лист для научного стендапа (для заполнения студентами)

Критерий	Макс	Студент 1	Студент 2	…	Средний балл
1. Глубина раскрытия темы, опора на источники, корректность терминов, соответствие проблеме	10				
2. Введение, цель, гипотеза, выводы; логические переходы; последовательность	10				
3. Грамматика, лексика, произношение, беглость речи	10				
4. Примеры, данные, критичность мышления, ответы на вопросы	10				
5. Нестандартные примеры, метафоры, визуальные приемы, юмор, легкость подачи	5				
6. Визуальный контакт, вовлеченность, интерактив, реакция зала	5				

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Авторы согласны с мнением Н. Н. Кирилловой [18] в том, что «обучающимся в этом случае надо всегда быть готовыми к тому, что оценивание устного выступления такими же студентами (одногруппниками), рефлексивная самооценка и оценка преподавателя осуществляется по одним и тем же критериям» или по разным (критерии, разработанные самими студентами), то есть оценивание реализуется в трех измерениях: оценка преподавателями курса, самооценивание и взаимооценивание. Оценки преподавателей и студентов могут не совпадать, более того, такая система и не предполагает единообразия оценивания, так как базируется на принципе дуализма, бинарности подходов. Представляется важным подобрать адекватные форматы для научной деятельности магистрантов, под которые подходит бинарная система оценивания с ее коллективной дуальной оценкой. Так, исследования [19] описывают опыт креативной письменной практики, включающей творческую работу над рассказами в жанре drabble. Драбблы представляют собой короткие миниатюры с определенной структурой, что позволяет студентам развивать свои навыки в творческом писательстве научного характера. Другие примеры успешной проектной деятельности: проект научно-академический коворкинг (ТГУ), дискуссионный студенческий клуб Publik Administration in a Comparative Perspective: Diskussion Club [20] на факультете управления и политики МГИМО МИД России, конкурс стартап-проектов на английском языке (РЭУ им. Г. В. Плеханова). Воронежский государственный университет проводит конкурс видеороликов на английском языке iTravel. Russia: Volunteers Across Regions and Cultures.

Предположительно, бинарная система оценивания, при разработке которой авторы придерживались именно принципа дуализма, не имеет широкого применения в педагогической практике или используется ограниченно. Но она предоставляет возможность студенту осуществлять оце-

нивание, при этом не отрицая главную роль преподавателя, ответственного за итоговую оценку, поэтому учитывается важность сооценивания, что способствует личностному, профессиональному росту и саморазвитию.

Ряд ученых подтверждает идею о сооценивании, говоря, что «...ключевые принципы совместного обучения в высшем образовании включают положительную взаимозависимость, т. е. члены группы должны сотрудничать для выполнения задач, иметь взаимную выгоду и общие цели, и индивидуальную ответственность...» [21]. Индивидуальные и командные виды работ в процессе оценивания, особенно при такой аттрактивной форме, как стендап, являются предпосылкой для саморазвития, о чем свидетельствуют мнения [22]: «...выполнение подобных работ требует от студентов и преподавателей увеличения степени адаптации и гибкости к постоянно меняющейся реальности... способствуют сочетанию индивидуальной работы с межличностным взаимодействием и командной работой, последняя из которых является одной из общих компетенций, которые студенты должны развивать».

Научный стендап как формат, основанный на принципе дуализма, интегрирует элементы креативности и научности, что делает процесс обучения более привлекательным и интересным для студентов. Участие в таком формате позволяет студентам не только продемонстрировать свои знания, но и развивать навыки публичного выступления, креативного мышления и взаимодействия с аудиторией. Более того, этот подход способствует формированию у студентов чувства ответственности за свои выступления и за оценки, которые они выставляют своим одногруппникам. Эту идею также развивают исследователи, занимающиеся совместным обучением: «... три различных результата совместной работы: сотрудничество, самопознание и положительные эмоции» [23].

Заключение

Эмпирические данные, представленные в данной статье, подтверждают обоснованность корректировки стратегий оценки обучения и разработки бинарной системы оценивания компетенций владения устным иноязычным высказыванием в магистратуре. Данное исследование анализирует возможности альтернативных подходов к оценке, учитывающих интересы и потребности, как студентов, так и преподавателей. Однако для успешной реализации научного стендапа в образовательных учреждениях важно обеспечить готовность преподавателей к использованию данного формата, а также разработать четкие критерии оценивания, которые будут понятны как студентам, так и преподавателям, что позволит минимизировать субъективизм в оценивании и повысить объективность результатов. Научный стендап может стать важным элементом в процессе модернизации образовательного процесса и способствовать формированию культуры сооценивания, отвечающей современным требованиям и интересам студентов в рамках бинарной системы.

Список литературы

1. Тлепцеришева С. А., Брыкина А. А. Проблемы и перспективы трансформации высшего и общего образования в России // Государственное и муниципальное управление. Ученые записки. 2025. № 4. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-i-perspektivy-transformatsii-vysshego-i-obschego-obrazovaniya-v-rossii (дата обращения: 02.10.2026). EDN: LCERNN.

2. Мамонтова Н. Ю. Педагогические условия формирования универсальной коммуникативной компетенции студентов нелингвистических вузов при обучении иностранным языкам по ФГОС 3++ // Вестник Кемеровского государственного университета культуры и искусств. 2020. № 51. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/pedagogicheskie-usloviya-formirovaniya-universalnoy-kommunikativnoy-kompetentsii-studentov-nelingvisticheskih-vuzov-pri-obuchenii (дата обращения: 08.09.2026). EDN: NAGLYW.

3. Чернявская Н., Мыркалыков Б. Использование стандартной шкалы распределения результатов обучения для оценки успешности студентов // Образование и право. 2022. № 3. С. 252–261. DOI: 10.24412/2076-1503-2022-3-252-261.

4. Бойко Т. В. Проблемы системы оценивания учебной деятельности студентов в условиях конкретного вуза. В кн.: Управление образованием / Науч. ред.: Н. А. Заиченко. СПб.: Отдел оперативной полиграфии НИУ ВШЭ – Санкт-Петербург, 2012. С. 72-74. ISBN 978-5-906156-10-5.

5. Оськин С.В. Методические рекомендации по процедуре оценивания знаний, умений, навыков и опыта деятельности, на этапах формирования компетенций: учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. Краснодар: Крон, 2016. 53 с. EDN: WGSEVN.

6. Шокурова Е. Е., Бирзуль А. Н., Питиляк Д. А. Репортерский интернет-стендап как средство обучения студентов // Социально-педагогические технологии в социализации будущего профессионала: материалы II Всероссийской научно-практической конференции / Под ред. Ю. А. Тюриной. Хабаровск: Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 2019. С. 54–61. EDN: ZBNHBB.

7. Зуев С. В., Арнакова Е. Ф. Научный «стендап» как средство развития коммуникативных навыков молодых ученых // Вопросы педагогики. 2022. № 6–1. С. 117–120. EDN: YSHRVP.

8. Васильева Е. Е. Роль научного стендапа в исследовательской деятельности учащейся молодежи // Вестник Санкт-Петербургского государственного института культуры. 2019. № 4 (41). С. 23–27. DOI: 10.30725/2619-0303-2019-4-23-27.

9. Иванова С. А., Вельдина Н. Г. Особенности формирования прагматического потенциала выступлений в жанре «Стендап-комедия» (на материале английского языка) // Филологические науки. Вопросы теории и практики. 2020. № 3. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-formirovani-

ya-pragmaticheskogo-potentsiala-vystupleniy-v-zhanre-stendap-komediya-na-materiale-angliyskogo-yazyka (дата обращения: 26.06.2024). DOI: 10.30853/filnauki.2020.3.30.

10. Явиц И. И. Просодические особенности жанра стендап // Вестник Московского государственного лингвистического университета. Гуманитарные науки. 2016. № 20 (759). С. 155–165. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/prosodicheskie-osobennosti-zhanra-stendap (дата обращения: 08.09.2026).

11. Пинская М. А. Формирующее оценивание: оценивание в классе: учеб. пособие. М.: Логос, 2010. 264 с. ISBN 978-5-98704-569-5.

12. Шутенко Е. Н., Шутенко А. И., Сидорчук К. В. Аттрактивные сферы самореализации студентов в вузовском обучении как составляющие пространства их психологического здоровья // PEM: Psychology. Educology. Medicine. 2019. № 4. С. 79–108. № 4. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/attraktivnye-sfery-samorealizatsii-studentov-v-vuzovskom-obuchenii-kak-sostavlyayuschie-prostranstva-ih-psihologicheskogo-zdorovya (дата обращения: 08.09.2026). EDN: YSXQGD.

13. Колеченко А. К. Энциклопедия педагогических технологий: пособие для преподавателей. СПб.: КАРО, 2024. 368 с. ISBN 978-5-9925-0049-3. Электронный ресурс цифровой образовательной среды СПО PROFобразование. URL: https://profspo.ru/books/134416 (дата обращения: 02.10.2026).

14. Демушкин Д. И. Анализ эффективности цифровой трансформации университетов: формирование совокупности показателей и методический подход к оценке // Вестник Академии знаний. 2026. № 2 (73). С. 823-834. EDN: WIYJNJ.

15. Махмутов М. И., Ибрагимов Г. И., Чошанов М. А. Педагогические технологии развития мышления учащихся. Казань: ТГЖИ, 1993. 88 с.

16. Лосев К. В. Бинарные методы в структуре обучения и развития студентов высшей школы // Вестник Ленинградского государственного университета им. А. С. Пушкина. 2016. № 2. С. 33–46. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/binarnye-metody-v-strukture-obucheniya-i-razvitiya-studentov-vysshey-shkoly (дата обращения: 08.09.2026). EDN: XDXABT.

17. Телегина Н. В. Бинарный подход к оптимизации контрольно-диагностических функций в обучении студентов «Общей педагогике» // Образование и саморазвитие. 2013. № 3 (37). С. 22-27. EDN: RCOMYZ.

18. Кириллова Н. Н. К вопросу о критериях оценки устного публичного выступления в рамках учебной ситуации // Вестник НГТУ им. Р. Е. Алексеева. Серия: Управление в социальных системах. Коммуникативные технологии. 2016. № 1. С. 17–24. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-o-kriteriyah-otsenki-ustnogo-publichnogo-vystupleniya-v-ramkah-uchebnoy-situatsii (дата обращения: 08.09.2026). EDN: YHCLFF.

19. Чиркова Е. И. Драббл как инструмент развития творческих способностей студентов на занятиях по английскому языку // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 5 (119). URL: https://research-journal.org/archive/5-119-2022-may/drabbl-kak-instrument-razvitiya-tvorcheskix-sposobnostej-studentov-na-zanyatiyax-po-anglijskomu-yazyku (дата обращения: 14.10.2026). DOI: 10.23670/IRJ.2022.119.5.096.

20. Яровова Т. В. Научно-исследовательская деятельность студентов как основа развития творческого потенциала // Педагогическое образование и наука. 2018. № 6. С. 57–60. EDN: FQXQCI.

21. Mogelvang A., Vandvik V., Ellingsen S., Strømme C. B., Cotner S. Cooperative learning goes online: teaching and learning intervention in a digital environment impacts psychosocial outcomes in biology students // International Journal of Educational Research. 2023. DOI: 10.1016/j.ijer.2022.102114.

22. López-Mondéjar L., Tomás Pastor L. Development of Socio-emotional Skills through Cooperative Learning in a University Environment // Procedia – Social and Behavioral Sciences. 2017. DOI: 10.1016/j.sbspro.2017.02.086.

23. Peterson A. Asynchrony and promotive interaction in online cooperative learning // International Journal of Educational Research Open. 2023. DOI: 10.1016/j.ijedro.2023.100300.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 378.147:811.111:004.8
DOI

CC BY 4.0

РАЗВИТИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ КОМПЕТЕНТНОСТИ У СТУДЕНТОВ ИНЖЕНЕРНОГО ВУЗА В ПРОЦЕССЕ ОБУЧЕНИЯ АНГЛИЙСКОМУ ЯЗЫКУ: ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И ПОТЕНЦИАЛ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Газизулина Л. Р.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет», Казань, Российская Федерация, e-mail: gazizulina78@mail.ru

Статья посвящена вопросам развития информационной компетентности у студентов и аспирантов инженерного вуза в процессе изучения английского языка, а также роли технологий искусственного интеллекта в этом процессе. Цель статьи – описать педагогические методы, инструменты и подходы к формированию информационной компетентности студентов инженерных специальностей в ходе иноязычной подготовки. Материалом исследования являются научные публикации по вопросам, связанным с развитием информационной компетентности, а также данные, полученные автором в ходе педагогической работы. В качестве эмпирических данных представлен качественный анализ результатов учебной деятельности студентов, а также динамика академической успеваемости. Методы исследования: анализ научных и методических разработок по теме исследования, наблюдение и экспериментальный опыт, описание, обобщение. Описан опыт интеграции технологий искусственного интеллекта в учебный процесс как средства повышения его эффективности. Приведены примеры конкретных заданий, нацеленных на развитие информационной компетентности студентов, обобщен методический опыт. Рассмотрены подходы к оценке сформированности информационной компетентности, проанализированы критерии и уровни, предложенные в исследованиях других авторов. Результаты исследования показали, что комплексное применение описанных методов и интеграция технологий искусственного интеллекта способствуют формированию информационной компетентности, что подтверждается ростом успеваемости и улучшением качества работы студентов. Перспективой дальнейшего исследования определена разработка более четких критериев оценки динамики развития информационной компетентности.

Ключевые слова: информационная компетентность, иноязычная подготовка, технологии искусственного интеллекта, оценка сформированности информационной компетентности

DEVELOPMENT OF INFORMATION COMPETENCE IN STUDENTS OF ENGINEERING UNIVERSITIES IN THE PROCESS OF TEACHING ENGLISH: PEDAGOGICAL METHODS AND POTENTIAL OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Gazizulina L. R.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kazan National Research Technological University", Kazan, Russian Federation, e-mail: gazizulina78@mail.ru

This article explores the development of information competence among undergraduate and graduate students of an engineering university while learning English, as well as the role of artificial intelligence technologies in this process. The article aims to describe pedagogical methods, tools, and approaches to developing the information competence of engineering students during foreign language training. The research materials include scientific publications on issues related to the development of information competence, as well as data obtained by the author during her teaching work. The empirical data includes a qualitative analysis of students' academic performance, as well as the dynamics of their academic performance. The research methods include analysis of scientific and methodological developments on the research topic, observation and experimental experience, description and generalization. The article describes the experience of integrating artificial intelligence technologies into the educational process as a tool for improving its effectiveness. Examples of specific tasks aimed at developing students' information competence are provided, and methodological experience is summarized. Approaches to assessing the development of information competence are considered, and the criteria and levels proposed in the studies of other authors are analyzed. The study's results showed that the comprehensive application of the described methods and the integration of artificial intelligence technologies contribute to the development of information competence, as evidenced by increased academic performance and improved student work quality. Further research is aimed at developing more precise criteria for assessing the dynamics of information competence development.

Keywords: information competence, foreign language training, artificial intelligence technologies, information competence assessment

Введение

В настоящее время инженерный сектор стремительно развивается, требуя от специалистов не только глубоких профессиональных знаний, но и умения эффективно находить и правильно применять информацию из разных источников. В связи с этим одной из приоритетных задач инженерной

педагогики становится развитие информационной компетентности у студентов инженерных специальностей. В педагогической литературе принято различать информационную компетенцию и информационную компетентность. О. В. Ситосанова и В. Д. Лагерев определяют информационную компетенцию как комплекс знаний и умений работать с информацией на основе новых информационных технологий для решения задач, а информационную компетентность – как способность находить, оценивать и использовать информацию, необходимую для принятия решений. По мнению авторов, информационная компетентность является одним из обязательных условий адаптации и самореализации с современном обществе [1]. К развитию информационной компетентности относится и информационная культура, аспекты ее формирования, а также критерии и показатели ее сформированности. Так В. Д. Павлидис и др. определяют информационную культуру как интегрированное качество личности, отражающее интерес к личностному развитию, готовность к информационной деятельности, развитию мышления, способность анализировать и систематизировать полученную информацию [2]. Одним из аспектов формирования информационной компетентности являются навыки оперативного поиска информации. Развитие навыков оперативного поиска информации рассматривается как этап формирования информационной компетентности. Под навыками оперативного поиска информации понимаются доведенные до автоматизма умения искать, анализировать, оценивать, организовывать, интерпретировать и использовать информацию из разных источников [3]. Таким образом, информационная компетентность – реализованная способность человека осознанно работать с информацией: находить нужные данные, отбирать их, оценивать и применять для решения задач. Информационная компетентность – это комплексное явление, развитие которого происходит поэтапно в процессе обучения.

Английский язык в настоящее время выступает не только как язык межкультурной коммуникации в области науки и техники, но и как ключ к массиву научных публикаций, стандартов, патентов, технической документации. Для реализации международного и междисциплинарного сотрудничества студентам необходимо развивать не только иноязычную компетенцию, но и умения квалифицированно работать с профессионально значимой англоязычной информацией. Сегодня технологии искусственного интеллекта (ИИ) интегрируются в процессы развития иноязычной и информационной компетентности, повышают мотивацию студентов, развивают речевые навыки и обеспечивают персонализацию обучения [4]. Таким образом, данная работа направлена на раскрытие возможностей интеграции педагогических методов, технологий ИИ и иноязычного обучения для формирования у студентов инженерных вузов информационной компетентности, соответствующей требованиям современного информационно-технического мира. Актуальность исследования обусловлена необходимостью развития информационной компетентности у студентов инженерного вуза, что, в свою очередь, связано с требованиями рынка труда, необходимостью непрерывного обучения, сложностью профессиональных задач, повсеместным внедрением информационных технологий. Научная новизна исследования состоит в эмпирической верификации комплексного подхода к развитию информационной компетентности средствами дисциплины «Иностранный язык», использованием ИИ как компонента методической системы и заданий, способствующих формированию компетентности.

Цель исследования – изучить современные методы формирования и оценки информационной компетентности студентов и аспирантов инженерных специальностей в процессе изучения английского языка.

Материалы и методы исследования

Данная статья представляет собой продолжение исследования, описанного автором в работе «Проблемы и подходы к развитию навыков оперативного поиска информации в инженерных вузах в рамках иноязычной подготовки» [3]. Материалами исследования послужили публикации по вопросам, связанным с формированием информационной компетентности, а также эмпирические данные, полученные автором в ходе практической работы со студентами и аспирантами ФГБОУ ВО КНИТУ в рамках дисциплины «Иностранный язык» за три года. Описаны виды заданий, в ходе которых развивается не только иноязычная, но и информационная компетентность. Исследование проводилось с применением заданий, нацеленных на развитие информационной компетентности и интегрированных в учебный процесс на протяжении трех учебных лет. Для оценки эффективности развития информационной компетентности использовалась балльно-рейтинговая система, позволяющая точно распределять баллы за выполненные задания. Главным же инструментом для определения динамики является промежуточная и итоговая академическая успеваемость по предмету.

Результаты исследования и их обсуждение

Развитие информационной компетентности у студентов инженерных направлений в процессе обучения английскому языку требует применения определенных педагогических методов и подходов. Одним из применяемых методов является внедрение междисциплинарных проектных заданий. В ходе выполнения таких заданий студенты и аспиранты обращаются к разным источникам информации, задействуют техническую литературу на английском языке и создают собственный продукт. Так, студентами ФГБОУ ВО КНИТУ в рамках учебной деятельности был создан чат-бот для развития навыков говорения на английском языке [5]. Идея чат-бота заключается в том, чтобы помочь пользователю развивать навыки говорения на английском языке, правильно излагать свои мысли, формулировать развернутые предложения. Чат-бот предлагает пользователям записать свою самопрезентацию на 4–5 мин на английском языке в голосовом сообщении и разбирает ее по основным критериям: содержание, логика и структура, лексика и грамматика. Представленная экспериментальная разработка демонстрирует возможности адаптации технологий на основе ИИ для изучения иностранного языка [5]. Описанный опыт КНИТУ демонстрирует возможность использования междисциплинарных связей и интегрирование возможностей ИИ в такие проекты, которые успешно развивают информационную компетентность.

Участие студентов в международных научно-практических конференциях с докладами и опубликованием статей в сборниках материалов конференций является полезным опытом научно-исследовательской работы не только по направлению своей подготовки, но и в смежных областях. Так, студенты КНИТУ, обучающиеся по направлению «Информационные системы и технологии», сообщают о важности английского языка для их будущей профессиональной деятельности и с интересом изучают вопросы языкознания и переводоведения. Результатом являются ежегодные публикации в материалах конференций. Участие в конференциях и выступления с докладами и презентациями на английском языке способствуют развитию иноязычной коммуникативной компетентности в рамках научно-исследовательской работы [6].

Использование метода перевернутого класса (flipped classroom) предполагает самостоятельную подготовку студентов к занятиям с использованием учебных текстов, видеолекций и упражнений, подразумевающих поиск, отбор и систематизацию информации. На занятиях студенты и аспиранты представляют собранный материал, обсуждают тему, участвуют в дискуссиях. Метод перевернутого класса дает возможность студентам готовиться к аудиторным занятиям с большой степенью самостоятельности и творческой свободы, а преподавателю – задать вектор для информационного поиска [7]. Также эффективны мультимедийные ресурсы: видеоуроки, подкасты, вебинары, интерактивные симуляторы. Они расширяют возможности восприятия информации, делают обучение более интересным и доступным. На занятиях в КНИТУ активно используются возможности виртуальной среды обучения MOODLE, включающие возможность тестирования и оценки студентов, самостоятельную подготовку к занятиям, возможность загружать выполненные задания в разных форматах, а также просматривать презентации, обучающие видеоролики и видеолекции [8].

Для формирования навыков поиска, анализа и интерпретации англоязычной технической информации важно включать в учебный процесс практические упражнения: чтение и перевод технических и научных статей; анализ структуры и ключевых терминов научных публикаций; ответы на вопросы и дискуссии по содержанию прочитанного. Использование заданий на составление рефератов и аннотаций по прочитанным материалам развивает критическое мышление и способность формулировать свое мнение на английском языке. Независимо от формы проведения занятий развитие информационной компетентности студентов инженерных направлений требует комплексного подхода. Такой подход должен сочетать языковые задачи с реальными профессиональными действиями, направленными на поиск, оценку, анализ и переработку информации. Примером служит процесс в виде поэтапной работы с иноязычными источниками:

1 этап: Поиск и первичная оценка. Студентам дается задание по поиску материалов в академических базах данных по инженерным темам, связанным с направлением подготовки (Engineering control systems, Energy-intensive materials). Материалы и поисковые запросы должны быть на английском языке, выбор ключевых слов и фильтров (год и тип публикации, область науки) объяснены.

2 этап: Критическая оценка и выбор данных. На этом этапе студенты анализируют и критически оценивают тип публикации (обзорная статья, экспериментальная статья, технический отчет), проверяют аффилиации авторов, цитируемость. Практическим заданием может быть составление

списка литературы по теме (задание особенно актуально для аспирантов).

3 этап: Структурирование и представление информации. Итогом работы становится составление вторичного текста на английском языке – аннотация или реферативный обзор двух-трех статей, презентация с выводами.

Представленное выше задание построено как педагогическое практико-ориентированное наблюдение с элементами кейс-анализа. Определение типа публикации, проверка аффилиаций, составление списка литературы предполагают владение специальной профессиональной лексикой и применение информационно-поисковых навыков. Поводом для ретракции могут послужить неверное определение типа публикации, использование только аннотации без чтения всей статьи, смешивание первичных и вторичных данных, подбор источников под гипотезу, плохая работа с метаданными и фильтрами поиска. Практическая реализация этих действий в рамках учебных заданий показывает, что английский язык становится средством развития информационной компетентности, а не изолированным компонентом учебного плана.

Такой подход позволяет учитывать разный уровень владения иностранным языком и уровень профессиональной подготовки студентов. Для студентов бакалавриата акцент делается на базовые навыки: работа с заголовками, составление поисковых запросов, использование речевых клише и шаблонов для реферирования и аннотирования. Для аспирантов предлагаются более сложные задачи: анализ методологии исследования, сравнение данных из разных источников, составление отзыва на статью.

Одним из наиболее популярных видов работ в настоящее время является подготовка презентаций, в том числе с использованием ИИ. Подготовка презентаций и выступление с ними перед аудиторией эффективно развивает навыки работы с информацией у студентов, а также навыки говорения на иностранном языке. Изучение навыка самопрезентации является важным аспектом демонстрации себя как целостной и зрелой личности [9]. Однако подготовка презентаций с использованием ИИ может иметь ряд недостатков. Основным недостатком, обнаруженным в ходе практической работы, является бездумное и бесконтрольное использование студентами инструментов на основе ИИ. Неправильное составление запросов к генеративной модели приводит к тому, что ИИ генерирует готовую презентацию без учета языкового уровня студентов. Еще одним существенным недостатком презентаций, сгенерированных ИИ, являются фактологические ошибки. Студенты с еще несформированной информационной компетентностью не всегда могут адекватно оценить корректность информации, полученной от ИИ. Отсутствие критического отношения к продукту, сгенерированному нейросетью, и отсутствие последующей редактуры существенно снижают учебную эффективность задания.

Все описанные выше трудности, с которыми сталкиваются студенты при работе с ИИ, зафиксированы в педагогической практике. На занятиях по английскому языку студентам часто даются задания на подготовку короткого устного высказывания по заданной теме. Текст высказывания готовят с использованием ИИ, при этом зачастую выявляются ошибки, связанные со структурой и содержанием текста. Оценивание задания происходит по стандартным критериям, включая полноту и детальность рассказа, соответствие заданию, организацию высказывания, языковое оформление, произношение и интонацию.

Одним из сравнительно новых видов работ на занятиях по английскому языку является перевод научных статей с использованием ИИ. Опыт применения онлайн-ресурсов, описанный преподавателями КНИТУ, показал, что ни один из них не может быть использован без предварительной редактуры русского текста при переводе с русского на английский язык, а перевод, сделанный с помощью ИИ, требует проверки и консультации с другими источниками [10]. Таким образом, перед преподавателями стоит задача научить студентов критически оценивать и редактировать продукты работы ИИ.

Возможностям и ограничениям, связанным с применением ИИ в учебном процессе, посвящено немало работ. Так, Б. В. Пеньков и др. изучают дидактические преимущества и ограничения в предоставлении образовательных ресурсов (текстовых, аудиовизуальных и интерактивных материалов) с использованием ИИ, выявляют и систематизируют барьеры, связанные с внедрением ИИ-технологий, а также предлагают новые векторы для формирования иноязычной коммуникативной компетенции [11]. Несмотря на ограничения, современные технологии дают массу возможностей для преподавателей создавать индивидуализированные задания, учебные тексты с учетом языкового и когнитивного уровня студентов, повышая гибкость и адаптивность [12]. Так, на занятиях в КНИТУ студентам даются задания на составление текстов или презентаций с возможностью пользоваться интернет-источниками и ИИ. Сформированные тексты анализируются на занятиях с точки

зрения достоверности фактов, структуры, содержания и языкового оформления.

Итак, все описанные выше виды работы в рамках дисциплины «Иностранный язык» являются результатом реальной педагогической практики. Балльно-рейтинговая система оценки и распределение баллов за конкретные виды работы дают возможность индивидуализировать процесс оценивания. Эффективность работы подтверждается ростом текущей и итоговой академической успеваемости студентов в среднем на 10 %. Подсчет динамики текущей успеваемости проводился путем сравнения среднего балла студентов по текущим заданиям, оцениваемым по 10-балльной шкале, на начальном и последующем этапах обучения (в начале и в конце семестра). Повышение успеваемости на 10 % было получено путем деления разницы между текущим и исходным средним баллом на исходный средний балл и умножения результата на 100. Исходный средний балл составлял, например, 6,3, итоговый – например, 6,9. Динамика успеваемости остается наиболее доступным инструментом количественной оценки эффективности педагогических методов, однако она не исчерпывает всего многообразия результатов.

Одной из актуальных проблем, связанных с развитием информационной компетентности, остается оценка ее сформированности; требуется разработка соответствующих критериев и методик оценивания. Для определения сформированности информационной компетентности следует учитывать следующие факторы: качество поиска (релевантность и авторитетность источников информации); глубина анализа (способность вычленить ключевую, значимую информацию); языковое оформление (корректное использование терминов, стиля, грамматических конструкций); этика (корректное цитирование, отсутствие плагиата). Н. В. Аргунова и др. сформулировали три уровня сформированности информационной компетентности в соответствии с выбранными критериями (умение проводить информационный поиск, оценка информационных ресурсов, умение работать с информацией) при обучении старшеклассников математике [13]. По мнению авторов, отработка критериального аппарата является важным шагом для преподавателей и обучающихся, так как позволяет более точно определять цели и измерять результаты сформированности информационной компетентности [13].

А. А. Пономарев и Я. В. Якушин выделили три уровня сформированности информационной компетентности (низкий, средний, высокий) по следующим компонентам: когнитивный, деятельностный, личностный. Авторы считают, что оценку сформированности следует проводить с помощью ролевых и деловых игр, разбора педагогических ситуаций, решения кейс-заданий, выполнения проектных заданий, формирования портфолио и др. Также авторы указывают фонд оценочных средств как актуальный измерительный инструмент для различных видов контроля: текущего и рубежного, а также для промежуточной и итоговой аттестации [14]. Как видим, в КНИТУ используются схожие формы контроля, которые могут служить и для определения сформированности информационной компетентности.

Очевидно, что не все задания одинаково хорошо проверяют сформированность информационной компетентности. Так, задания открытого типа, требующие от студентов деятельности по поиску информации, решению задачи и оформлению результатов ее решения, более полно отражают реальный уровень студентов, в отличие от заданий с вопросами закрытого типа, тестов с вариантами выбора [15]. Т. Г. Киселева предлагает следующие критерии сформированности информационной компетентности: уровень действия (форма выполнения действия); полнота действия (развернутость); разумность (ориентация на условия); сознательность; обобщенность (возможности переноса действия в другие предметные сферы); критичность; освоенность (временные характеристики и переход от одной формы действия к другой) [15].

Таким образом, оценка сформированности информационной компетентности и динамики ее развития – это актуальный вопрос, требующий дальнейшего изучения и разработки. На сегодняшний день балльно-рейтинговая система оценивания выполненных заданий, фонд оценочных средств, а также отслеживание динамики промежуточной и итоговой успеваемости по дисциплине остаются наиболее приемлемыми инструментами для контроля за развитием информационной компетентности в практике автора. Практика демонстрирует рост текущей успеваемости студентов в среднем на 10 %. Отслеживание индивидуальной динамики и рост текущей успеваемости видятся наиболее информативными инструментами, так как на итоговую успеваемость влияет множество разнообразных факторов. Однако балльно-рейтинговая оценка в ее традиционном виде не ориентирована на оценку конкретно выделенной компетентности. Балльно-рейтинговая система фиксирует преимущественно формальные показатели выполнения заданий и не показывает в полной мере глубину анализа, уровень развития критического мышления, верификацию данных, перенос навыков в но-

вые контексты. В связи с этим разработку комплекса критериев для оценки сформированности информационной компетентности можно рассматривать как перспективу дальнейшего исследования.

Заключение

Представленное исследование является методическим обобщением опыта по формированию информационной компетентности у студентов и аспирантов инженерного вуза. Было показано, что развитие информационной компетентности происходит комплексно, при этом большой вклад вносят содержание, методы и приемы, реализуемые в рамках дисциплины «Иностранный язык». Представленный в статье педагогический опыт является фактической реализацией описанных методов и приемов, а примеры из исследований других авторов подтверждают целесообразность их применения.

К заданиям, имеющим особую значимость для развития информационной компетентности, относятся задания открытого типа, в которых студенты должны осуществлять поиск, отбор, анализ информации, определять способ ее оформления и передачи. Описан результат применения междисциплинарных проектных заданий, а также опыт участия студентов в научно-исследовательской деятельности, в ходе которой студенты и аспиранты готовят доклады и презентации на иностранном языке.

Использование современных информационных технологий – важнейший инструмент в обучении и развитии. Применение ИИ для генерирования, перевода, создания и редактирования текстов, проверки заданий студентов и подготовки индивидуализированных занятий является актуальным педагогическим средством, что показывает практика и отзывы студентов.

Оценка сформированности информационной компетентности осуществляется комплексно. Несмотря на то, что стандартными инструментами оценки остаются балльно-рейтинговая система, фонд оценочных средств и динамика промежуточной и итоговой успеваемости по дисциплине, целесообразно дополнить систему оценивания качественными характеристиками. Перспектива дальнейшего исследования видится в разработке более четких критериев для текущей и итоговой оценки сформированности информационной компетентности.

Список литературы

1. Ситосанова О. В., Лагерев В. Д. Понятие «информационная компетентность» // Вестник Ангарского государственного технического университета. 2022. № 16. С. 258–260. DOI: 10.36629/2686-777X-2022-1-16-258-260.

2. Павлидис В. Д., Сулейменова Р. Д., Чкалова М. В., Федоров Ю. И. Некоторые критерии и уровневые показатели формирования информационной культуры будущих инженеров // Наукосфера. 2021. № 5–2. С. 36–41. EDN: DDMEYJ.

3. Газизулина Л. Р. Проблемы и подходы к развитию навыков оперативного поиска информации в инженерных вузах в рамках иноязычной подготовки // Современные наукоемкие технологии. 2025. № 10. С. 149–153. DOI: 10.17513/snt.40540.

4. Исаханова Е. Д. Сервисы на базе искусственного интеллекта как средства формирования иноязычной коммуникативной компетенции при обучении иностранному языку (английский язык) // Филологический аспект. 2025. № S1 (30). С. 16–23. EDN: VITVFE.

5. Газизулина Л. Р., Хамдеев Б. Р. Применение Telegram-бота для развития навыков говорения на английском языке // Глобальный научный потенциал. 2025. № 2 (167). С. 98–101. EDN: EDMKAD.

6. Астафьева А. Е., Валеева Р. С. Развитие иноязычной коммуникативной компетенции студентов при участии в НИРС // Глобальный научный потенциал. 2023. № 8 (149). С. 116–118. EDN: QGZQGI.

7. Косинцева Т. Д., Яцевич О. Е., Юдашкина В. В. Опыт применения «перевернутого обучения» / «flipped learning» на занятиях по иностранному языку в неязыковом вузе // Вестник Сургутского государственного педагогического университета. 2022. № 1 (76). С. 42–49. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/opyt-primeneniya-perevernutogo-obucheniya-flipped-learning-na-zanyatiyah-po-inostrannomu-yazyku-v-neyazykovom-vuze (дата обращения: 30.06.2026).

8. Вяткина И. В. Дистанционное обучение в системе подготовки иностранных студентов // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2021. Т. 1. С. 226–228. EDN: GRHGVO.

9. Прозорова М. Н., Прозорова Т. Н. Навык самопрезентации как фактор формирования профессиональной самооценки обучающихся // Современные наукоемкие технологии. 2025. № 1. С. 147–151. DOI: 10.17513/snt.40290. EDN: OXTFWA.

10. Валеева Э. Э., Гилязова Д. Р., Семушина Е. Ю. Искусственный интеллект как средство перевода технических текстов // Глобальный научный потенциал. 2025. Т. 1. № 12 (177). С. 175–178. EDN: YFXQMY.

11. Пеньков Б. В., Агафонова Л. И., Виноградова Е. В., Голякова О. А. Интеграция ИИ в образовательный процесс: когнитивные и лингводидактические аспекты преподавания английского языка // Известия Волгоградского государственного педагогического университета. 2025. № 4 (197). С. 113–124. EDN: WVTHIQ.

12. Газизулина Л. Р. Учебные тексты, сгенерированные нейросетью: отбор, анализ, использование // Глобальный научный потенциал. 2023. № 11 (152). С. 314–317. EDN: STQVSB.

13. Аргунова Н. В., Попова А. М., Белолюбская М. В., Алексеева В. В. Формирование информационной компетентности обучающихся в курсе внеурочной деятельности по математике в 10 классе // Современные наукоемкие технологии. 2025. № 1. С. 93–97. DOI: 10.17513/snt.40282.

14. Пономарев А. А., Якушин А. В. Оценка сформированности компетентности студентов педагогического вуза в области информационно-коммуникационных технологий // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 6. URL: https://science-education.ru/article/view?id=23075 (дата обращения: 06.10.2026). EDN: VJPVAN.

15. Киселева Т. Г. Оценка информационной компетентности учащихся // Ярославский педагогический вестник. 2011. Т. 2. № 3. С. 65–67. EDN: PIVSED.

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest.

Финансирование: Автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 37.02:372.862:004.42
DOI

CC BY 4.0

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ИГР В КАЧЕСТВЕ МЕТОДИЧЕСКОГО СРЕДСТВА ОБУЧЕНИЯ ПРОГРАММИРОВАНИЮ

Гибадуллин А. А. ORCID ID 0000-0003-2545-9355

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижневартовский государственный университет», Нижневартовск, Российская Федерация, e-mail: artur32pmi@yandex.ru

Актуальность исследования обусловлена необходимостью совершенствования методических систем на уровне профильного и профессионального обучения программированию. При переходе к изучению динамических структур данных и объектно-ориентированного проектирования обучающиеся часто сталкиваются с когнитивным барьером, вызванным абстрактностью учебного материала. Целью статьи является теоретическое и практическое обоснование, а также методическое описание процесса использования интеллектуальных дидактических игр в качестве средства обучения школьников и студентов разработке компьютерных программ. Методологическую основу работы составили системно-деятельностный и контекстный подходы, а в качестве ведущих эмпирических методов использовались педагогическое проектирование и наблюдение. В статье представлена классификация образовательных сред по уровням сложности их использования обучающимися, описаны объектные структуры классов и логика разработки игровых программ. Результаты исследования зафиксировали качественное изменение характера когнитивной деятельности и статистически достоверное повышение уровня алгоритмической компетентности старшеклассников и студентов 1–2-х курсов. Установлено, что архитектурные ограничения сред вынуждают обучающихся переходить от фрагментарного написания кода к более строгому проектированию программных продуктов. Сделан вывод, что разработка и интеграция в процесс обучения интеллектуальных игр позволяет сформировать дидактические связи между абстрактным синтаксисом программного кода и визуально-образным мышлением обучающихся.

Ключевые слова: школа, вуз, обучение программированию, алгоритмическая компетентность, методика преподавания, проектирование игр

DESIGNING AND IMPLEMENTING INTELLECTUAL GAMES AS A METHODOLOGICAL TOOL FOR TEACHING PROGRAMMING

Gibadullin A. A. ORCID ID 0000-0003-2545-9355

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Nizhnevartovsk State University", Nizhnevartovsk, Russian Federation, e-mail: artur32pmi@yandex.ru

The relevance of this study stems from the need to improve methodological systems for specialized and professional programming education. When transitioning to the study of dynamic data structures and object-oriented design, students often encounter a cognitive barrier caused by the abstract nature of the educational material. The aim of the article is to provide a theoretical and practical justification, as well as a methodological description of the process of using intellectual didactic games as a means of teaching schoolchildren and university students to develop computer programs. The methodological basis of the work consists of system-activity and contextual approaches, and pedagogical design and observation were used as the leading empirical methods. The article presents a classification of educational environments based on the levels of complexity of their use by students, describes the object structures of classes, and outlines the logic of developing game programs. The research results recorded a qualitative change in the nature of cognitive activity and a statistically significant increase in the level of algorithmic competence among high school students and first- and second-year university students. It has been established that the architectural limitations of the environments force students to move from fragmentary code writing to more rigorous design of software products. It is concluded that the development and integration of intellectual games into the learning process makes it possible to form didactic connections between the abstract syntax of program code and the visually-imaginative thinking of students.

Keywords: school, university, programming education, algorithmic competence, teaching methodology, game design

Введение

Современное развитие информационного общества и цифровой экономики предъявляет повышенные требования к качеству подготовки выпускников образовательных учреждений в области информационных технологий. В связи с этим актуальность исследования обусловлена необходимостью совершенствования методических систем обучения программированию школьников и студентов. Существующий консервативный подход в значительной степени базируется на фронтальном разборе синтаксических конструкций языков и решении абстрактно-математических упражнений из сборников [1]. Не имея опоры на на-

глядный опыт, старшеклассники и студенты демонстрируют фрагментарное написание кода: они заучивают синтаксические шаблоны, но не осознают внутреннюю логику функционирования системы. Подобная рутинная деятельность ведет к снижению внутренней учебно-познавательной мотивации и формализации знаний [2].

Вопросы теории и методики обучения информатике и развития алгоритмического мышления подробно рассмотрены в работах С. А. Бешенкова и И. В. Роберт [3; 4]. Фундаментальный вклад в развитие линии алгоритмизации в цифровой среде внесли исследования М. П. Лапчика и соавт. [5; 6]. Игровые технологии в образовательном пространстве подробно рассматривались в труде А. С. Аникиной [7]. Историко-педагогический анализ эволюции игровых элементов в ИТ-образовании позволяет выделить несколько ключевых этапов: от простейших детерминированных исполнителей одной команды 1970–1980-х гг. («Робот», «Чертежник») и концепции Edutainment 1990-х гг. до блочно-визуальных сред Scratch 2010-х гг. [8].

На современном этапе (с 2020-х гг.) игра в обучении программированию превращается в открытые программируемые миры и турнирные движки. Вместе с тем потенциал интеллектуальных игр используется фрагментарно и преимущественно во внеурочной деятельности. До сих пор отсутствует единая теоретически обоснованная методическая база, определяющая принципы и закономерности использования проектирования и разработки интеллектуальных компьютерных игр как сквозного средства обучения программированию в инвариантной и вариативной частях курса информатики в старшей школе и вузе [9].

Цель исследования – теоретическое и практическое обоснование, а также методическое описание процесса использования интеллектуальных дидактических игр в качестве средства разработки при обучении школьников 10–11-х классов и студентов 1–2-х курсов программированию и объектно-ориентированному проектированию.

Интеллектуальная компьютерная игра представляет собой программно реализованную интеллектуальную игру, функционирующую в цифровой среде, в которой логика взаимодействия игровых сущностей и оценка финальных состояний управляются математическими моделями и алгоритмами. В общем случае под интеллектуальной игрой подразумевается вид целенаправленной деятельности, основанный на раскрытии и активизации когнитивного потенциала личности посредством следования строго детерминированным правилам в условиях поиска оптимальных логических решений.

Алгоритмическая компетентность означает интегративное личностное качество обучающегося, выражающееся в его готовности и способности эффективно решать комплексные задачи системного анализа, декомпозиции предметной области, проектирования, создания кода и рефлексивной отладки программного обеспечения.

Материалы и методы исследования

Теоретико-методологический базис проектирования и реализации интеллектуальных компьютерных игр обучающимися сформирован за счет интеграции ведущих психолого-педагогических концепций. Методологическую основу работы составили системно-деятельностный и контекстный подходы, а в качестве ведущих эмпирических методов использовались педагогическое проектирование и наблюдение. Системно-деятельностный подход (Л. С. Выготский, А. Н. Леонтьев, П. Я. Гальперин) предполагает, что подлинное усвоение сложных знаний происходит в процессе активной, самостоятельной и целенаправленной деятельности самого обучающегося. Когда ученик сам выступает в роли разработчика игры, он конструирует цифровую реальность и проверяет свои гипотезы на практике [10]. Контекстный подход (А. А. Вербицкий) предполагает организацию учебного процесса таким образом, чтобы в нем моделировалось предметное содержание будущей профессиональной деятельности программиста [11; 12]. Для старшеклассника или студента младших курсов разработка интеллектуальной игры выступает формой квазипрофессиональной пробы, где требования к качеству алгоритмов диктуются объективной жизнеспособностью создаваемого игрового мира [13; 14].

В рамках эмпирического этапа исследования метод педагогического проектирования применялся для создания учебно-методического комплекса и учебных программных каркасов. Метод педагогического наблюдения использовался для непрерывной фиксации когнитивных стратегий учащихся, выявления типичных затруднений и отслеживания динамики преодоления барьера абстракции в ходе самостоятельного кодинга игровых систем.

Разработанная методика рассчитана на 72 академических часа аудиторных и самостоятельных занятий и реализуется как инвариантный модуль углубленного курса информатики в 10–11-х классах или дисциплин «Программирование», «Практикум по программированию», «Объектно-ори-

ентированное программирование» на 1–2-х курсах вузов.

Обучение строится блоками, сочетающими лекционный разбор механизмов проектирования, практическую работу и сессии взаимного тестирования игровых программ. Для реализации методики требуется стандартный компьютерный класс, развернутая интегрированная среда разработки (например, JetBrains IntelliJ IDEA или Microsoft Visual Studio Community Edition), а также кроссплатформенная библиотека для визуализации простейшей графики (например, Raylib или SFML). Специализированное учебное наполнение включает разработанные автором шаблоны проектов.

Управление когнитивной нагрузкой учащихся осуществляется на основе трехуровневой типологии игровых систем, каждая из которых подкреплена практикой:

1. Уровень алгоритмических пазлов и лабиринтов (Базовый уровень, 18 ч). Целевой проект: «Блуждающий робот». Задача учащегося – спроектировать логику поиска пути агентом в двумерном динамическом лабиринте. Отрабатываются линейные структуры, циклы со сложными условиями, обработка исключений при столкновении с границами.

2. Уровень настольно-логических и позиционных игр (Профильный уровень, 24 ч). Целевой проект: «Пятнашки 4х4». Обучающиеся разрабатывают структуру хранения игрового поля на базе двумерных массивов и реализуют алгоритм перемещения свободных костей с обязательной проверкой математической разрешимости генерируемой позиции.

3. Уровень стратегических систем и симуляторов (Продвинутый уровень, 30 ч). Целевой проект: «Шахматный эндшпиль: Король и пешка». Полноценное объектно-ориентированное проектирование. Учащиеся создают абстрактные классы GamePiece, реализуют наследование для конкретных фигур, логику валидации ходов внутри методов классов и строят алгоритм минимаксного перебора с альфа-бета отсечением.

Результаты исследования и их обсуждение

Старший школьный возраст (ранняя юность, 15–17 лет) и этап адаптации студентов 1–2-х курсов характеризуются ведущей ролью учебно-профессиональной деятельности. В этот период завершается формирование понятийного и абстрактно-логического мышления. Однако процесс изучения программирования предъявляет специфические требования к когнитивной сфере. Традиционная текстовая форма предъявления кода не обладает наглядностью. Для успешной отладки программы ученик должен удерживать во внутренней памяти модель выполнения алгоритма. Объектные сущности (классы, инкапсуляция) воспринимаются как избыточные конструкции.

Процесс разработки интеллектуальной компьютерной игры обеспечивает опредмечивание абстракций: абстрактный класс материализуется в коде учащегося в виде понятного наглядного шаблона игрового элемента (например, шахматной фигуры или ячейки головоломки), его свойства становятся атрибутами (координаты поля, статус, цвет), а функции преобразуются в методы (валидация хода, перемещение). Это позволяет активизировать наглядно-образное мышление старшеклассников и студентов [15].

Дидактическое преимущество предлагаемой методики заключается во внедрении архитектурных ограничений учебной геймифицированной среды. В традиционном обучении учащийся имеет полную свободу, что часто приводит к созданию хаотичного кода. Игровая среда устроена иначе: она ставит обучающегося в рамки правил проектирования [16].

Логика создания игры обучающимися разделяется на четыре последовательных этапа:

1. Этап концептуального моделирования (анализ). Обучающиеся выполняют декомпозицию правил игры, выделяют сущности, фиксируют их свойства. Результатом становится наглядная графическая схема взаимодействия компонентов.

2. Этап модульного проектирования (проектирование структуры). На основе схемы определяются интерфейсы, через которые модуль оценки ходов будет считывать текущую матрицу игрового поля и генерировать дерево возможных ответов противника.

3. Этап реализации (кодинг). Осуществляется написание кода строго внутри выделенных модулей ответственности. Нарушение правил блокируется самой средой.

4. Этап верификации и рефлексии (отладка). Обучающийся получает визуально-процессуальную обратную связь. Ошибка в алгоритме перебора или структурах данных отображается наглядно на экране (например, шахматный бот делает недопустимый ход или зависает из-за некорректной рекурсии). Это превращает абстрактный поиск синтаксических ошибок в увлекательный процесс логической отладки.

Для экспериментальной верификации разработанной методической системы было проведено контролируемое опытно-экспериментальное исследование. Общая

репрезентативная выборка участников составила N = 120 чел. Были сформированы две независимые группы. Контрольная группа (КГ, n1 = 60 чел.): обучение программированию и структурам данных велось по традиционной академической методике. Учащиеся выполняли стандартные репродуктивные лабораторные работы из сборников задач. Экспериментальная группа (ЭГ, n2 = 60 чел.): обучение строилось на основе разработанной методики, где сквозным заданием выступало поэтапное проектирование и создание интеллектуальных компьютерных игр самими учащимися.

На констатирующем этапе эксперимента группы имели равные стартовые показатели, значимых различий в уровне подготовки выявлено не было ($p > 0,05$). Итоговый контроль проводился в форме слепого тестирования на автоматической платформе, решения задач и защиты командного игрового проекта.

Разбиение обучающихся по трем базовым уровням (высокий, средний, низкий) осуществлялось на основе совокупной балльной оценки за итоговые испытания (тесты и защиту проекта) по 100-балльной авторской шкале. Высокий уровень (85–100 баллов) демонстрирует глубокое понимание алгоритмов перебора, уверенно владеет принципами программирования, самостоятельно проектирует модульную архитектуру программ и устраняет логические ошибки. На среднем уровне (60–84 балла) обучающийся владеет синтаксисом выбранного языка программирования и базовыми алгоритмами структур данных, однако допускает незначительные архитектурные просчеты или ошибки при оптимизации кода. Обучающийся на низком уровне (40–59 баллов) освоил базовые синтаксические конструкции, но испытывает серьезные затруднения при самостоятельном проектировании взаимосвязей классов и алгоритмической декомпозиции игровых правил. Обучающиеся с академической задолженностью (набравшие менее 40 баллов) к моменту проведения финального среза отсутствовали.

Результаты распределения учащихся по уровням сформированности алгоритмической компетентности представлены в таблице.

Для подтверждения достоверности зафиксированных различий и проверки научной гипотезы был применен метод непараметрической статистики, а именно критерий Хи-квадрат (χ^2) Пирсона для качественных признаков в таблицах сопряженности.

Сформулируем статистические гипотезы:

H0 (нулевая гипотеза): различия между экспериментальной и контрольной группами в уровнях сформированности компетентности случайны. Самостоятельная разработка интеллектуальных игр не оказывает статистически значимого влияния на результаты обучения программированию.

H1 (альтернативная гипотеза): различия между группами статистически значимы. Повышение уровня компетентности в ЭГ обусловлено применением разработанной методики игрового проектирования.

Теоретические (ожидаемые) частоты (E) для каждой ячейки таблицы вычислялись по формуле

$$E = (\text{Сумма строки} \times \text{Сумма столбца}) / N.$$

Расчет эмпирического значения критерия ($\chi^2_{эмп}$) производился по стандартной формуле Пирсона:

$$\chi^2_{эмп} = \sum ((O - E)^2 / E),$$

где O – наблюдаемые (экспериментальные) частоты из таблицы.

Вычислим компоненты χ^2 для каждой ячейки таблицы сопряженности и суммируем полученные слагаемые для определения итогового эмпирического значения:

$$\chi^2_{эмп} = 3,615 + 3,615 + 1,476 + 1,476 + 2,778 + 2,778 = 15,738.$$

Определим число степеней свободы (df) при количестве строк R = 3 и столбцов C = 2:

$$df = (R - 1) \times (C - 1) = (3 - 1) \times (2 - 1) = 2.$$

Распределение учащихся по уровням компетентности

Уровень сформированности компетентности	Экспериментальная группа (ЭГ)	Контрольная группа (КГ)
Высокий уровень	41 (68,3 %)	20 (33,3 %)
Средний уровень	15 (25,0 %)	26 (43,3 %)
Низкий уровень	4 (6,7 %)	14 (23,3 %)
Сумма столбца (объем выборки)	n2 = 60	n1 = 60

Примечание: составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования.

Табличные критические значения распределения Хи-квадрат для двух степеней свободы (df = 2) составляют:

При уровне значимости α = 0,05:

$$\chi^2_{кр} = 5,99.$$

При уровне значимости α = 0,01:

$$\chi^2_{кр} = 9,21.$$

Сопоставление результатов показывает, что эмпирическое значение критерия значительно превышает критический порог даже на уровне значимости 1 %:

$$\chi^2_{эмп} > \chi^2_{кр} (15,74 > 9,21).$$

Таким образом, нулевая гипотеза H0 уверенно отклоняется. Принимается альтернативная гипотеза H1.

Заключение

Результаты исследования зафиксировали изменение характера когнитивной деятельности и статистически достоверное повышение уровня алгоритмической компетентности обучающихся. Самостоятельное моделирование правил и механик интеллектуальных компьютерных игр позволило опредметить сложные абстракции. Изменилось отношение к ошибкам: поиск причин некорректного поведения созданных игровых моделей приобрел исследовательский характер, активизируя механизмы рефлексии. В ходе анализа структуры созданных учащимися игровых программ было установлено, что архитектурные ограничения сред вынуждают обучающихся переходить от фрагментарного написания кода к более строгому проектированию.

Перспективы развития и тиражирования авторского методического средства

Разработанное методическое средство обладает потенциалом к тиражированию. В качестве долгосрочной перспективы развития автор предлагает создание системы автоматической проверки студенческих игровых проектов по аналогии с тестирующими системами олимпиадного программирования. Расширение содержательной части методики предполагает внедрение в практику задач сетевого взаимодействия (разработка многопользовательских интеллектуальных игр) и интеграцию нейронных сетей для изучения студентами алгоритмов машинного обучения на базе спроектированных компьютерных игр.

Проведенное исследование теоретически обосновывает и практически подтверждает ценность интеграции игровых систем в процесс обучения школьников и студентов программированию. Сделан вывод, что разработка интеллектуальных игр позволяет сформировать дидактическую связь между абстрактным синтаксисом программного кода и визуально-образным мышлением обучающихся.

За счет архитектурных ограничений и предоставления четких рамок модулей, процесс самостоятельного создания и программирования интеллектуальных компьютерных игр (лабиринтов, головоломок, классических настольных стратегий), обучающиеся успешно преодолевают барьер абстрактности учебного материала. Результаты проведенного педагогического эксперимента и их статистическая верификация с помощью критерия Хи-квадрат Пирсона подтверждают результаты предлагаемой методической системы.

Список литературы

1. Зуфарова А. С., Суходуб Р. А. Методика обучения программированию учащихся: проблемы и решения // Управление образованием: теория и практика. 2022. № 4 (50). С. 166–174. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49320434 (дата обращения: 06.08.2026). DOI: 10.25726/j1495-0128-8440-f.

2. Кузенкова Г. В., Штанюк А. А., Шагбазян Д. В. Обучение программированию в средней и высшей школе: проблемы и пути решения // Современные проблемы науки и образования. 2021. № 1. URL: https://science-education.ru/article/view?id=30514 (дата обращения: 13.10.2026). DOI: 10.17513/spno.30514.

3. Бешенков С. А., Шутикова М. И., Миндзаева Э. В., Аринушкина А. А. Общеобразовательные курсы информатики и технологии в контексте вызовов цифрового социума // Вестник Московского университета. Серия 20: Педагогическое образование. 2023. Т. 21. № 1. С. 95–105. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50762220 (дата обращения: 06.08.2026). DOI: 10.51314/2073-2635-2023-1-95-105.

4. Роберт И. В. Стратегические направления развития информатизации отечественного образования в условиях цифровой трансформации // Человеческий капитал. 2021. № S5–3 (149). С. 16–40. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46165150 (дата обращения: 06.08.2026).

5. Лапчик М. П., Рагулина М. И., Удалов С. Р. Формирование готовности к технологическому творчеству как основа современной подготовки учителя технологии // Наука о человеке: гуманитарные исследования. 2021. Т. 15. № 2. С. 145–153. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46435126 (дата обращения: 06.08.2026). DOI: 10.17238/issn1998-5320.2021.15.2.18.

6. Лапчик М. П., Рагулина М. И. Организация лабораторного практикума по методике обучения информатике в цифровой образовательной среде // Теоретический и практический потенциал современной науки: Сборник научных статей. Т. Ч. Х. М.: Перо, 2021. С. 44–47. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47133474 (дата обращения: 06.08.2026).

7. Аникина А. С. Интеллектуальная игра: воспитывающий и дидактический аспекты реализации в образовательной деятельности // Инновационная научная современная академическая исследовательская траектория (ИНСАЙТ). 2023. № 2 (14). С. 45–61. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53766596 (дата обращения: 06.08.2026). DOI: 10.17853/2686-8970-2023-2-45-61.

8. Герасимова Е. К., Гавриловская Н. В., Соболева Е. В., Суворова Т. Н. Исследование условий включения элементов

геймификации в изучение основ алгоритмизации и программирования для повышения качества образовательных результатов обучающихся // Перспективы науки и образования. 2021. № 4 (52). С. 461–477. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46673418 (дата обращения: 06.08.2026). DOI: 10.32744/pse.2021.4.31.

9. Данильчук Е. В., Куликова Н. Ю., Журавлева А. И. Создание онлайн-курса «Разработка компьютерных игр» для обучения основам алгоритмизации и программирования будущих учителей информатики // Известия Волгоградского государственного педагогического университета. 2024. № 10 (193). С. 122–132. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=75171936 (дата обращения: 06.08.2026).

10. Гусева Е. Н. Профессиональная подготовка бакалавров «Педагогического образования» в области программирования (профили «Информатика и экономика») // Современное профессиональное образование. 2026. № 3. С. 466–468. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=89301963 (дата обращения: 06.08.2026).

11. Асташова Н. А., Бондырева С. К., Алейникова А. О. Контекстное обучение – технология профессионального образования XXI века // Гуманитарные науки и образование. 2021. Т. 12. № 4 (48). С. 12–23. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47573679 (дата обращения: 06.08.2026). DOI: 10.51609/2079-3499_2021_12_04_12.

12. Вешняков Г. П. Развитие профессиональной самостоятельности будущих педагогов средствами контекстного обучения // Векторы психолого-педагогических исследований. 2026. № 1 (10). С. 94–105. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=89149795 (дата обращения: 06.08.2026).

13. Гибадуллин А. А. Теоретические и практические результаты применения разработки интеллектуальных игр в обучении программированию // Вестник педагогических наук. 2025. № 1. С. 53–57. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=80440821 (дата обращения: 06.08.2026). DOI: 10.62257/2687-1661-2025-1-53-57.

14. Гибадуллин А. А. Разработка, моделирование и анализ интеллектуальных компьютерных игр в образовании // Современный ученый. 2024. № 6. С. 232–237. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=72856902 (дата обращения: 06.08.2026). DOI: 10.58224/2541-8459-2024-6-232-237.

15. Гибадуллин А. А. Разработка интеллектуальной компьютерной игры как проектный метод обучения информатике // Международный научно-исследовательский журнал. 2024. № 8 (146). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=68887264 (дата обращения: 06.08.2026). DOI: 10.60797/IRJ.2024.146.1.

16. Голяев С. С., Голяева Н. В. Формирование творческих способностей обучающихся при изучении языков программирования // Цифровые образовательные технологии: методология и практика: Монография. Саранск: Мордовский государственный педагогический университет им. М. Е. Евсевьева, 2024. С. 24–38. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=67141756 (дата обращения: 06.08.2026).

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest.

Финансирование: Автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 378.147:378.6
DOI

CC BY 4.0

ПЕДАГОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ГОТОВНОСТИ БУДУЩИХ ИНЖЕНЕРОВ-ЭНЕРГЕТИКОВ К ПРИНЯТИЮ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Зокирова Э. Р.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», Казань, Российская Федерация, e-mail: mirag_mg@list.ru

Инженеру-энергетику приходится принимать решения при неполной и меняющейся исходной информации, тогда как учебные задачи обычно содержат полный и неизменный набор данных. Цель исследования – разработать и экспериментально оценить педагогическую модель формирования готовности будущих инженеров-энергетиков к принятию профессиональных решений в условиях неопределенности. Модель строится на профессионально ориентированных ситуациях, исходные данные которых меняются по ходу решения, компьютерном моделировании режимов, коллективном обсуждении и рефлексивном анализе. В эксперименте продолжительностью 16 недель по дисциплине «Режимы работы электрических станций и подстанций» участвовали 120 студентов третьего курса: 58 в контрольной и 62 в экспериментальной группе. Готовность оценивалась по диагностической карте из пяти компонентов (от 0 до 100 баллов), дополнительно фиксировались время принятия решения, число альтернатив и критических ошибок. При сопоставимом исходном уровне средний прирост составил 6,28 балла в контрольной и 20,27 балла в экспериментальной группе (g Хеджеса для итоговых баллов равно 1,69); студенты экспериментальной группы принимали решение в среднем на 8,2 минуты быстрее и допускали меньше критических ошибок. Реализация модели сопровождалась более выраженным ростом готовности, однако исследование ограничено одним вузом и одним семестром, а компоненты готовности отдельно не сравнивались.

Ключевые слова: инженерное образование, электроэнергетика, профессиональные решения, неопределенность, готовность к профессиональной деятельности, компьютерное моделирование, рефлексия, профессионально ориентированные ситуации

PEDAGOGICAL MODEL FOR DEVELOPING FUTURE POWER ENGINEERS' READINESS TO MAKE PROFESSIONAL DECISIONS UNDER UNCERTAINTY

Zokirova E. R.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kazan State Power Engineering University", Kazan, Russian Federation, e-mail: mirag_mg@list.ru

A power engineer has to make decisions when the initial information is incomplete and changing, whereas educational tasks usually contain a complete and fixed set of data. The aim of the study is to develop and experimentally evaluate a pedagogical model for developing future power engineers' readiness to make professional decisions under uncertainty. The model is based on professionally oriented situations whose initial data change during the solution, computer simulation of operating modes, group discussion and reflective analysis. The 16-week experiment within the course "Operating Modes of Power Plants and Substations" involved 120 third-year students: 58 in the control group and 62 in the experimental group. Readiness was assessed with a diagnostic map covering five components (from 0 to 100 points); decision time and the numbers of alternatives and critical errors were recorded additionally. With a comparable initial level, the mean gain was 6.28 points in the control group and 20.27 points in the experimental group (Hedges' g for final scores was 1.69); students of the experimental group made decisions 8.2 minutes faster on average and made fewer critical errors. Implementation of the model was accompanied by a more pronounced growth of readiness; however, the study is limited to one university and one semester, and the readiness components were not compared separately.

Keywords: engineering education, electric power industry, professional decisions, uncertainty, readiness for professional activity, computer simulation, reflection, professionally oriented situations

Введение

Электроэнергетика относится к отраслям, где ошибочное решение обходится особенно дорого: от действий персонала зависят надежность энергоснабжения, сохранность оборудования и безопасность людей. Профессиональный стандарт для работников оперативно-технологического управления тепловыми электростанциями относит к трудовым функциям организацию ведения заданного режима работы оборудования, оперативные действия по ликвидации технологических нарушений и аварий, а также их профилактику; среди необходимых уме-

ний в нем названо умение прогнозировать возможное развитие аварии и последствия предпринимаемых действий[1].

Наиболее трудны для персонала нештатные ситуации. А. А. Башлыков и А. П. Еремеев, разрабатывающие интеллектуальные системы поддержки принятия решений для объектов энергетики, связывают их назначение прежде всего с поддержкой управляющих решений оперативного персонала в нештатных ситуациях и относят их к системам реального времени [1]. Сведения о развитии событий поступают постепенно, состояние оборудования может измениться уже после первых действий, а времени на размышление остается немного.

Меняется и само понимание инженерной деятельности. В. С. Шейнбаум и В. С. Никольский рассматривают ее как систему, не тождественную деятельности отдельных инженеров, и приходят к выводу, что «инженерное мышление дополняется опережающим и ответственным мышлением» [2, с. 9]. В трехуровневой модели инженерного мышления, предложенной Л. М. Андрюхиной, Б. Н. Гузановым и С. В. Анаховым, помимо технологического уровня, выделены регулятивно-целевой и ценностно-смысловой [3]. Подготовка инженера, следовательно, не может сводиться к освоению расчетных процедур.

Отсюда вытекают требования к организации обучения. В. Г. Мартынов и В. С. Шейнбаум описывают инженерную деятельность как открытую динамическую систему и называют необходимыми новые формы учебного процесса, в том числе проектные методы обучения, тренажеры и игровые формы [4]. Сущность проблемного метода В. В. Карпов видит в том, чтобы студенты, опираясь на полученные знания, самостоятельно решали различные профессиональные ситуации [5]. Тем не менее в расчетных курсах по-прежнему распространены задания с полным и однозначно заданным набором исходных данных: студент получает условие, выбирает один вариант, сдает ответ, и на этом работа заканчивается. Ситуации, в которых условия меняются после первоначального выбора, такая схема не воспроизводит.

Приблизить учебную задачу к производственной помогает моделирование. А. В. Новиков, А. И. Злобин и Е. Н. Хорошинина, обсуждая подготовку специалистов-электроэнергетиков к оперативным переключениям, предлагают дополнять компьютерные методы обучения практикой на физической модели оборудования, которая воссоздает обстановку реального производства и заставляет осознать серьезность возможных ошибок [6]. Виртуальная среда дает возможность выполнять операционные задачи на реалистичных моделях подстанции без угрозы для людей и оборудования; иммерсивный тренажер такого рода, ориентированный на безопасность работ, был хорошо принят техническим персоналом энергокомпании [7].

Не менее важен рефлексивный анализ. Э. Г. Крылов и Е. П. Пономаренко связывают рефлексию с анализом ситуации, осмыслением собственных действий и их последствий [8]. Применительно к инженерной задаче это означает, что студент оценивает обоснованность выбранного варианта, выявляет риски и определяет, что следует изменить при поступлении новых данных.

Ключевым понятием исследования выступает готовность к принятию профессиональных решений. В психолого-педагогических работах готовность к деятельности описывается через взаимосвязанные структурные компоненты; Т. Б. Крюкова, сопоставляя такие модели применительно к электроэнергетической отрасли, рассматривает психологическую готовность как интегральное состояние, отражающее соответствие характеристик человека требованиям деятельности [9]. С опорой на эту традицию готовность к принятию профессиональных решений определена здесь как интегративная характеристика будущего инженера-энергетика, позволяющая ему идентифицировать профессиональную проблему, анализировать имеющиеся и недостающие сведения, прогнозировать последствия, выбирать и обосновывать рациональный вариант действий, а также оценивать и корректировать собственное решение. Выделенные в ней когнитивный, аналитический, прогностический, проектировочный и рефлексивный компоненты являются авторскими: каждый соотнесен с одним из этапов принятия профессионального решения (опора на знания о режимах, анализ информации, прогноз последствий, разработка и выбор варианта, оценка и корректировка).

Для работы в условиях неопределенности существенна устойчивость к ней. М. В. Сокольская и О. Ю. Богомолова установили прямую связь между толерантностью студентов к ситуации неопределенности и уровнем их психологической готовности к профессиональной деятельности [10]. L. Kolyvanova и соавторы рассматривают готовность выпускников к работе в условиях неопределенности в связи с выбором

1 Приказ Минтруда России от 09.07.2025 № 431н «Об утверждении профессионального стандарта «Работник по оперативно-технологическому управлению объектами тепловой электростанции» (зарегистрирован в Минюсте России 12.08.2025 № 83180).

альтернативных способов решения неотложных профессиональных задач [11].

В исследовании введено понятие «учебная инженерная неопределенность», под которой понимается профессионально ориентированная учебная ситуация, где часть исходной информации отсутствует или непрерывно изменяется, а поступление новых данных может потребовать коррекции принятого решения. Подобную ситуацию удобно воспроизводить средствами имитационного моделирования: как отмечает А. В. Антошков, оно позволяет исследовать сложные сценарии, оценивать последствия различных решений и менять ход событий, приучая студентов принимать решения в условиях неопределенности [12]. Учебная неопределенность, таким образом, становится педагогическим условием, приближающим учебную деятельность к той, с которой выпускник столкнется на производстве.

Цель исследования – разработать педагогическую модель формирования готовности будущих инженеров-энергетиков к принятию профессиональных решений в условиях учебной инженерной неопределенности и экспериментально оценить ее результативность.

Материалы и методы исследования

Исследование проводилось на базе кафедры «Электрические станции» имени В. К. Шибанова Казанского государственного энергетического университета в осеннем семестре 2025/2026 учебного года. В нем участвовали 120 студентов третьего курса направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»: контрольную группу составили 58 человек, экспериментальную – 62. Участие студентов было добровольным; они были ознакомлены с целями исследования и дали согласие на использование обезличенных результатов.

Эксперимент проводился в рамках дисциплины «Режимы работы электрических станций и подстанций» и продолжался 16 недель; занятия проходили дважды в неделю по два академических часа. Разработанная педагогическая модель объединяет пять взаимосвязанных блоков. Целевой блок задает формирование готовности к принятию профессиональных решений при неполноте и изменении исходной информации. Содержательно-процессуальный включает профессионально ориентированные ситуации, проблемно-ситуационное обучение, компьютерное моделирование, коллективное обсуждение и рефлексивный анализ. Этапный блок определяет последовательность действий: выявление проблемы, анализ имеющихся и недостающих сведений, разработку альтернатив, оценку рисков, выбор решения и его последующую корректировку. Диагностический блок предусматривает оценку общей готовности и дополнительных показателей, результативный фиксирует достигнутый уровень готовности.

Студенты контрольной группы рассчитывали типовые режимы по заданным исходным данным и после каждого задания готовили индивидуальный отчет. В экспериментальной группе обучение строилось на основе модели: задачи были приближены к производственным, исходные данные в них менялись, и первоначальное решение приходилось пересматривать. Студент определял проблему, выявлял недостающую информацию, оценивал возможные риски и обосновывал решение, а по ходу работы вводились дополнительные данные, требовавшие изменить выбранный вариант.

Основным средством служило компьютерное моделирование режимов работы электрических станций и подстанций. Студенты проводили первоначальный анализ, выбирали алгоритм действий и применяли его, затем проверяли, насколько эффективными оказались принятые меры, и при необходимости корректировали решение. Например, на модели подстанции 110/10 кВ с двумя трансформаторами в период максимума нагрузки один трансформатор выводился в ремонт; требовалось оценить допустимость режима оставшегося трансформатора, предложить меры по его разгрузке и обосновать выбранный вариант. После того как студент фиксировал первоначальное решение, поступали новые сведения, например о росте температуры масла работающего трансформатора или о недоступности резервного питания для части потребителей, и решение приходилось пересматривать с учетом изменившихся рисков. Полученные решения обсуждались коллективно, после чего каждый студент оформлял индивидуальный отчет, включавший рефлексивный анализ: оценку эффективности выбранного решения и обоснование выбора.

Готовность оценивалась по диагностической карте, включавшей когнитивный, аналитический, прогностический, проектировочный и рефлексивный компоненты. Каждый компонент оценивался от 0 до 20 баллов: 0–5 баллов соответствовали фрагментарному выполнению с существенными ошибками, 6–10 – частичному выполнению при недостаточной аргументации, 11–15 – в основном правильному выполнению с отдельными упущениями, 16–20 – полному, самостоятельному и обоснованному выполнению. Итоговый показатель равен сумме оценок по пяти компонентам

и составляет от 0 до 100 баллов. Входной контроль и итоговые работы оценивались по единым критериям на сопоставимых по содержанию и профессиональной сложности задачах.

В ходе итогового контроля дополнительно фиксировались время принятия решения, количество предложенных альтернатив и число критических ошибок. Время измерялось с момента предъявления профессиональной ситуации до фиксации студентом окончательного решения.

Статистическая обработка включала расчет средних значений, стандартных отклонений, приростов и 95%-ных доверительных интервалов (ДИ). Характер распределения проверялся критерием Шапиро – Уилка, однородность дисперсий – критерием Левена. Независимые выборки сравнивались t-критерием Уэлча и U-критерием Манна – Уитни (для U-критерия p рассчитывалось с нормальной аппроксимацией), изменения внутри групп оценивались критерием Вилкоксона. Величина эффекта вычислялась как g Хеджеса для итоговых баллов и для приростов. Различия считались статистически значимыми при $p < 0,05$.

Результаты исследования и их обсуждение

До начала эксперимента средние показатели групп были близкими (табл. 1). Статистически значимых различий по входному баллу не выявлено ($t = 0,43$; $p = 0,667$; $U = 1717$; $p = 0,672$), поэтому исходный уровень общей готовности студентов можно считать сопоставимым.

По окончании эксперимента положительная динамика наблюдалась в обеих группах: средний балл вырос на 6,28 (95% ДИ [5,63; 6,93]) в контрольной и на 20,27 (95% ДИ [19,19; 21,35]) в экспериментальной группе. Изменения внутри каждой группы статистически значимы (критерий Вилкоксона, $p < 0,001$).

Итоговый показатель экспериментальной группы превысил результат контрольной в среднем на 13,13 балла (95% ДИ [10,31; 15,95]; $t = 9,22$; $df = 108,1$; $p = 2,7 \cdot 10^{-15}$). U-критерий Манна – Уитни подтвердил различие ($U = 450,5$; $z = –7,08$; $p = 1,5 \cdot 10^{-12}$). Величина эффекта для сравнения итоговых баллов групп составила $g = 1,69$ (95% ДИ [1,27; 2,10]).

Средний прирост в экспериментальной группе оказался выше на 13,99 балла (95% ДИ [12,73; 15,25]; $t = 22,15$; $df = 99,1$; $p = 3,6 \cdot 10^{-40}$; $U = 0$; $z = –9,44$; $p = 3,7 \cdot 10^{-21}$; $g = 3,95$). Значение $U = 0$ объясняется тем, что диапазоны индивидуальных приростов в группах не пересекались. Различия по дополнительным показателям приведены в таблице 2.

Студенты экспериментальной группы принимали решение в среднем на 8,2 минуты быстрее, допускали меньше критических ошибок и рассматривали больше вариантов решения.

Таблица 1

Результаты входного и итогового контроля, баллы

Группа	n	Входной контроль, M ± SD	Итоговый контроль, M ± SD	Прирост, M ± SD	95% ДИ прироста
Контрольная	58	52,38 ± 10,99	58,66 ± 8,64	6,28 ± 2,48	[5,63; 6,93]
Экспериментальная	62	51,52 ± 10,93	71,79 ± 6,78	20,27 ± 4,27	[19,19; 21,35]
Разница ЭГ – КГ [95% ДИ]	–	–0,86 [–4,83; 3,11]	13,13 [10,31; 15,95]	13,99 [12,73; 15,25]	–

Примечание: составлено автором по результатам исследования. M ± SD – среднее значение ± стандартное отклонение; ДИ – доверительный интервал.

Таблица 2

Дополнительные показатели итогового контроля

Показатель	Контрольная группа	Экспериментальная группа	Разница
Среднее время принятия решения, мин.	18,4	10,2	–8,2
Среднее число критических ошибок на одного студента	2,7	0,9	–1,8
Среднее число предложенных альтернатив	1,3	4,1	+2,8

Примечание: составлено автором по результатам исследования. Показатели зафиксированы как средние значения по группам, поэтому статистическое сравнение по ним не проводилось.

Поскольку эти показатели получены на уровне групповых средних, они дополняют основной результат на описательном уровне. Сокращение времени при этом нельзя трактовать как поспешность: оно сочеталось с меньшим числом критических ошибок и большим числом рассмотренных вариантов. Вероятно, многократное прохождение цикла «анализ – решение – новые данные – корректировка» закрепляло у студентов последовательность действий, позволявшую быстрее ориентироваться в изменившейся обстановке. Проверить это предположение позволит анализ индивидуальных данных о времени решения.

Сходные изменения описаны и при тренажерной подготовке в электроэнергетике. S. Yang и соавторы, оценивая интеллектуальную систему имитационного обучения управлению энергосистемой, сообщают о росте точности выполнения процедур с 68 до 90%, снижении доли нарушений топологических ограничений с 32 до 11% и сокращении времени реакции со 120 до 72 с [13]. В настоящем исследовании сокращение времени и числа ошибок сопровождало работу с задачами, исходные данные которых менялись по ходу решения: изменение условий требовало повторного анализа ситуации, а иногда и полного пересмотра первоначального плана действий.

Рефлексивная составляющая модели включала как индивидуальный анализ, так и коллективное обсуждение вариантов. Сопоставление решений позволяло взвешенно оценить выбранную стратегию; при этом студенту приходилось обосновывать и само решение, и внесенные в него корректировки. С. А. Михеев показал, что сочетание онлайн-дискуссий с очными рефлексивными занятиями сопровождается улучшением рефлексивных навыков будущих инженеров [14], а в другой работе установил, что онлайн-дискуссии повышают навыки аргументации будущих инженеров на 20–30% [15]. Эти данные согласуются с тем, что студенты экспериментальной группы рассматривали больше альтернатив, хотя раздельный статистический анализ компонентов готовности в настоящем исследовании не проводился.

Ограничения исследования. Апробация модели проводилась на одной кафедре одного университета в рамках одной дисциплины и в течение одного семестра, что ограничивает перенос результатов на другие условия. Анализ выполнялся по суммарному баллу, поэтому динамика отдельных компонентов готовности статистически не сравнивалась; дополнительные показатели фиксировались только как групповые средние. Полученные различия отражают связь между реализацией модели и динамикой показателей, но не доказывают причинного влияния отдельных ее элементов. Дальнейшая проверка предполагает раздельный анализ компонентов, использование модели в других дисциплинах профессионального цикла и отсроченный контроль устойчивости сформированных умений.

Заключение

Разработана и экспериментально оценена педагогическая модель формирования готовности будущих инженеров-энергетиков к принятию профессиональных решений в условиях инженерной неопределенности. Ее особенность заключается в последовательном включении студентов в анализ производственных ситуаций, характеризующихся неполной и изменяющейся исходной информацией, с опорой на компьютерное моделирование режимов, коллективное обсуждение и рефлексивный анализ.

При сопоставимом исходном уровне средний прирост общей готовности составил 6,28 балла в контрольной группе и 20,27 балла в экспериментальной, итоговые баллы различались в среднем на 13,13 балла. Студенты экспериментальной группы быстрее принимали решения, рассматривали больше альтернатив и допускали меньше критических ошибок. Реализация модели сопровождалась более выраженным ростом готовности к принятию профессиональных решений; модель может применяться на практических занятиях по дисциплинам профессионального цикла при подготовке инженеров-энергетиков.

Список литературы

1. Башлыков А. А., Еремеев А. П. Методы и программные средства конструирования интеллектуальных систем поддержки принятия решений для объектов энергетики // Вестник МЭИ. 2018. № 1. С. 72–85. URL: https://vestnik.mpei.ru/index.php/vestnik/article/view/257 (дата обращения: 24.10.2026). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-1-72-85.

2. Шейнбаум В. С., Никольский В. С. Инженерная деятельность и инженерное мышление в контексте экспансии искусственного интеллекта // Высшее образование в России. 2024. Т. 33. № 6. С. 9–27. URL: https://vovr.elpub.ru/jour/article/view/5029 (дата обращения: 24.10.2026). DOI: 10.31992/0869-3617-2024-33-6-9-27. EDN: LRFVIO.

3. Андрюхина Л. М., Гузанов Б. Н., Анахов С. В. Инженерное мышление: векторы развития в контексте трансформации научной картины мира // Образование и наука. 2023. Т. 25. № 8. С. 12–48. URL: https://www.edscience.ru/jour/article/view/3323 (дата обращения: 24.10.2026). DOI: 10.17853/1994-5639-2023-8-12-48. EDN: LNFPYR.

4. Мартынов В. Г., Шейнбаум В. С. Инженерная педагогика в контексте инженерной деятельности // Высшее образование в России. 2022. Т. 31. № 6. С. 152–168. URL: https://vovr.elpub.ru/jour/article/view/3823 (дата обращения:

24.10.2026). DOI: 10.31992/0869-3617-2022-31-6-152-168. EDN: PDCQIA.

5. Карпов В. В. Проблемный метод обучения в формировании профессиональной компетентности будущих бакалавров техносферной безопасности // Вестник Кемеровского государственного университета. Серия: Гуманитарные и общественные науки. 2022. Т. 6. № 1. С. 7–15. DOI: 10.21603/2542-1840-2022-6-1-7-15. EDN: RAWQTS.

6. Новиков А. В., Злобин А. И., Хорошинина Е. Н. Формирование практических навыков оперативных переключений при обучении специалистов-электроэнергетиков // Энергетические системы. 2025. Т. 10. № 1. С. 42–50. URL: https://j-es.ru/index.php/journal/article/view/2015-1-05 (дата обращения: 24.10.2026).

7. Mondragón Bernal I. F., Lozano-Ramírez N. E., Puerto Cortés J. M., Valdivia S., Muñoz R., Aragón J., García R., Hernández G. An Immersive Virtual Reality Training Game for Power Substations Evaluated in Terms of Usability and Engagement // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. Is. 2. № 711. DOI: 10.3390/app12020711.

8. Крылов Э. Г., Пономаренко Е. П. Формирование рефлексивного мышления студентов в процессе интерактивного обучения иностранному языку // Вопросы методики преподавания в вузе. 2022. Т. 11. № 3. С. 23–45. DOI: 10.57769/2227-8591.11.3.02. EDN: HVUECO.

9. Крюкова Т. Б. Современные подходы к исследованию проблемы психологической готовности к деятельности в электроэнергетической сфере // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2011. № 1. С. 155–160. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-podhody-k-issledovaniyu-problemy-psihologicheskoy-gotovnosti-k-deyatelnosti-v-elektroenergeticheskoy-sfere (дата обращения: 24.10.2026).

10. Сокольская М. В., Богомолова О. Ю. Толерантность к неопределенности как фактор формирования психологической готовности к профессиональной деятельности в процессе обучения в вузе // Вестник МГПУ. Серия: Педагогика и психология. 2024. Т. 18. № 1–2. С. 110–128. DOI: 10.25688/2076-9121.2024.18.1-2.14. EDN: JLKSJT.

11. Kolyvanova L., Chekanushkina E., Stelmakh Y. The Readiness of Future Specialists for Professional Activity under Conditions of Uncertainty // European Proceedings of Social and Behavioural Sciences. 2021. Vol. 119. P. 763–768. DOI: 10.15405/epsbs.2021.12.02.95.

12. Антошков А. В. Имитационное моделирование как инновационная педагогическая технология в условиях цифровизации // Человек и образование. 2025. № 2(83). С. 163–174. DOI: 10.54884/1815-7041-2025-83-2-163-174.

13. Yang S., Li S., Fu Y., Jiang W., You W., Chen M. An Intelligent Simulation Training System for Power Grid Control and Operations // Big Data and Cognitive Computing. 2026. Vol. 10. Is. 3. № 68. DOI: 10.3390/bdcc10030068.

14. Михеев С. А. Комбинированная online-дискуссия как инструмент формирования рефлексии будущих инженеров в условиях цифровизации образования // Высшее образование в России. 2024. Т. 33. № 1. С. 106–127. DOI: 10.31992/0869-3617-2024-33-1-106-127. EDN: CIDXSJ.

15. Mikheev S. The Influence of Online Discussions on the Formation of Argumentation Skills in Future Engineers // Education and Self Development. 2024. Vol. 19. Is. 2. P. 100–115. DOI: 10.26907/esd.19.2.08.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 373.31
DOI

CC BY 4.0

ПРОЕКТНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ КАК СРЕДСТВО ФОРМИРОВАНИЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ УМЕНИЙ МЛАДШИХ ШКОЛЬНИКОВ В ЭТНОКУЛЬТУРНОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ

Иванова А. В. ORCID ID 0009-0008-9615-4095,
Нестерева Н. А. ORCID ID 0000-0002-8844-0507

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова», Якутск, Российская Федерация, e-mail: n.nestereva@mail.ru

В статье представлены разработка и экспериментальная проверка технологии проектной деятельности, построенной на этнокультурном материале и направленной на развитие исследовательских умений у обучающихся начальной школы. Отправной точкой работы служит расхождение между нормативно закрепленной значимостью исследовательских умений и недостатком методических средств для их планомерного развития у детей 9–10 лет. Исследование базируется на системно-деятельностном подходе, теории проектного обучения и модели поэтапного становления исследовательских действий. Опытно-экспериментальная работа охватила 82 обучающихся 3–4-х классов двух сельских школ Чурапчинского улуса Республики Саха (Якутия): экспериментальная группа – 42 чел., контрольная – 40 чел. Эмпирическая база исследования является общей с ранее опубликованной работой авторов, посвященной цифровым инструментам развития исследовательских умений; настоящее исследование развивает этот материал в ином аспекте – через анализ типологии учебных проектов. Разработана и апробирована пятикомпонентная типология проектов, реализованных на материале якутских этнокультурных традиций: познавательно-исследовательские, практико-ориентированные, ролево-игровые, информационные и творческие. Результаты контрольного среза подтвердили статистически значимую динамику: доля обучающихся с высоким уровнем исследовательских умений в экспериментальной группе увеличилась с 11,9 до 31,0 % (прирост 19,1 п. п.). Различия между экспериментальной группой и контрольной группой на контрольном этапе статистически значимы ($U = 495{,}5$; $p < 0{,}01$). По результатам качественного наблюдения, наиболее привлекательными для детей оказались проекты, сочетающие самостоятельный сбор первичных данных с созданием практического продукта. Разработанная технология может быть тиражирована в образовательных учреждениях с этнокультурным компонентом и представляет собой вклад в методическое обеспечение начального образования.

Ключевые слова: проектная деятельность в начальной школе, формирование исследовательских умений, младшие школьники 9–10 лет, этнокультурная образовательная среда, типология учебных проектов, познавательно-исследовательские проекты, практико-ориентированные проекты, метапредметные результаты обучения, педагогическая технология, этнокультурные традиции народа саха, экспериментальное обучение

Благодарности: *Авторы выражают благодарность администрации и педагогическим коллективам муниципального бюджетного общеобразовательного учреждения «Сыланская средняя общеобразовательная школа имени профессора Г. П. Башарина» и муниципального бюджетного общеобразовательного учреждения «Арылахская средняя общеобразовательная школа имени Т. М. Каженкина» Чурапчинского улуса Республики Саха (Якутия) за содействие в организации и проведении экспериментального исследования.*

PROJECT ACTIVITY AS A MEANS OF DEVELOPING RESEARCH SKILLS IN PRIMARY SCHOOL STUDENTS IN AN ETHNOCULTURAL EDUCATIONAL ENVIRONMENT

Ivanova A. V. ORCID ID 0009-0008-9615-4095,
Nestereva N. A. ORCID ID 0000-0002-8844-0507

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov", Yakutsk, Russian Federation, e-mail: afgust1945@gmail.ru, n.nestereva@mail.ru

The paper presents the development and experimental verification of a project-based technology grounded in ethnocultural content, designed to foster research skills in primary school learners. The study's starting point is the observed gap between the normatively established significance of research skills and the shortage of methodological tools for their systematic development in children aged 9–10 years. The research draws upon the system-activity approach, project-based learning theory, and a phased model of research skill acquisition. The empirical investigation involved 82 third- and fourth-grade students from two rural schools in the Churapchinsky district of the Republic of Sakha (Yakutia): the experimental group comprised 42 students, the control group 40 students. The empirical base of the study is shared with the authors' previously published work on digital tools for developing research skills; the present study develops this material in a different aspect – through the analysis of the typology of educational projects. A five-type project typology – cognitive-

research, practice-oriented, role-play, information, and creative projects – was developed and piloted using Yakut ethnocultural traditions as the content base. The findings reveal a statistically significant improvement: the proportion of students demonstrating a high level of research skills in the experimental group rose from 11.9 to 31.0 % (a gain of 19.1 percentage points). Between-group differences at the control stage were statistically significant ($U = 495.5$; $p < 0.01$). According to qualitative observation, projects combining independent data collection with tangible output production proved most attractive to children. The proposed technology is replicable across educational settings incorporating an ethnocultural component and represents a contribution to the instructional resources available for primary education.

Keywords: primary school project-based learning, research skills development, students aged 9–10 years, ethnocultural educational environment, educational project typology, inquiry-based projects, practice-oriented projects, meta-subject educational outcomes, pedagogical technology, Sakha ethnocultural traditions, experimental pedagogy

Acknowledgements: *The authors express their gratitude to the administration and teaching staff of the Sylanskaya Secondary School named after Professor G. P. Basharin and Arylakhskaya Secondary School named after T. M. Kazhenkin of the Churapchinsky ulus of the Republic of Sakha (Yakutia) for their assistance in organizing and conducting the experimental study.*

Введение

Проблеме развития исследовательских умений у младших школьников посредством проектной деятельности в современной педагогической науке уделяется значительное внимание. Интерес к данной теме обусловлен требованиями федерального государственного образовательного стандарта начального общего образования (Приказ Минпросвещения России от 31 мая 2021 г. № 286), в котором овладение универсальными учебными действиями определено в качестве приоритетного результата освоения основной образовательной программы [1]. Исследовательские умения, наряду с другими метапредметными результатами, выступают в этом контексте системообразующим элементом. Именно они обеспечивают способность обучающегося не только к воспроизведению готовых знаний, но к их самостоятельному поиску, критической оценке и творческому применению в изменяющихся условиях.

В педагогической литературе проектная деятельность рассматривается как один из эффективных инструментов формирования исследовательских умений. Исследователи сходятся в том, что систематическое включение детей в проектно-исследовательскую работу создает условия для развития самостоятельности, критического мышления и навыков работы с информацией. Так, Е. В. Головнева и ее коллеги характеризуют проектную деятельность как целостный цикл, в котором ребенок последовательно проходит все этапы исследовательского поиска – от обнаружения проблемы до формулировки выводов [2]. И. В. Кондакова, Е. В. Долгошеева и Г. А. Корякина подчеркивают, что наиболее значимым фактором организации проектной деятельности с младшими школьниками является использование творческого, личностно-ориентированного подхода, поскольку реализация каждого проекта предполагает сотрудничество, сотворчество и совместный исследовательский поиск. Они выделяют ключевые проектные умения: поисковые, коммуникативные, рефлексивные, организационно-практические [3].

В зарубежной литературе за последние годы данному вопросу также уделяется значительное количество работ. Исследователи D. A. Putri и соавт. по результатам систематического обзора литературы отмечают, что систематическое применение проектной деятельности в начальной школе способствует развитию критического мышления и формированию базовых исследовательских компетенций [4]. Y. A. Guzman-Gutierrez с соавт. исследовали влияние специальной программы развития исследовательских умений на критическое мышление младших школьников; полученные ими данные свидетельствуют о положительной динамике, однако авторы не рассматривали отдельно эффект проектного обучения как такового [5]. В работе O. de los Santos с соавт. экспериментально подтверждено положительное влияние научного метода мышления на развитие критического мышления младших школьников [6].

Несмотря на признание значимости исследовательских умений в структуре метапредметных результатов, теоретические представления о формировании исследовательской компетентности в школьной практике остаются фрагментарными и несистематизированными [7]. Существующая проблема демонстрирует нехватку проверенных инструментов для диагностики и развития исследовательских умений с учетом индивидуальных особенностей обучающихся.

Особого внимания заслуживает интеграция этнокультурного компонента в проектную деятельность младших школьников. Реализация данного подхода способствует не только развитию познавательного интереса обучающихся, но и формированию ценностного отношения к культурному на-

следию, что обеспечивает комплексный воспитательно-развивающий эффект образовательного процесса [8]. Ребенок перестает быть пассивным получателем знаний и включается в исследовательский процесс: задает вопросы, собирает материал, сопоставляет факты, пробует объяснить замеченное. Такой опыт принципиально меняет характер усвоения – знание становится его собственным открытием [9].

В современных условиях включение младших школьников в активное освоение родных традиций обретает особый смысл: оно формирует уважение и живой интерес к культурному наследию. Данный процесс концептуально опирается на идеи этнопедагогизации Г. Н. Волкова, рассматривавшего национальную культуру как естественную среду для воспитания личности [10]. Эффективным механизмом реализации этого потенциала выступает проектная деятельность. Как отмечают Е. Э. Сидорова и Л. А. Корякина, вовлечение обучающихся начальных классов в учебное проектирование активизирует их самостоятельность и служит действенным средством формирования исследовательских компетенций [11]. Таким образом, интеграция проектного метода в этнокультурную образовательную среду позволяет успешно развивать исследовательские умения младших школьников на основе традиционных ценностей.

Этнокультурные традиции народа саха как содержательный ресурс проектной деятельности раскрыты в исследованиях И. С. Портнягина, Н. Д. Неустроева, Е. А. Бархановой, обосновавших педагогический потенциал традиционной культуры для воспитания и развития подрастающего поколения [12–14]. Настоящее исследование развивает предыдущие работы авторов, в которых была доказана целесообразность систематической диагностики уровня сформированности исследовательских умений младших школьников [15; 16].

Таким образом, потенциал проектной деятельности и этнокультурного содержания признан и теоретически обоснован. Однако педагогическая практика сталкивается с серьезным затруднением: при обилии проектных классификаций нет такой, которая была бы специально адаптирована для формирования исследовательских умений на этнокультурном материале.

Цель исследования – разработка и экспериментальная проверка технологии проектной деятельности на этнокультурном материале, направленной на формирование исследовательских умений у младших школьников (3–4-е классы).

Материалы и методы исследования

В основу работы легли два взаимодополняющих теоретических положения. Они опираются на системно-деятельностный подход и теорию поэтапного формирования действий. Проектное обучение в этом ряду рассматривается как способ организации деятельности, при котором новые способы действия осваиваются в ходе решения практических задач.

Эмпирические данные получены в рамках того же эксперимента, что и в предыдущей работе авторов А. В. Ивановой и Н. А. Нестеревой «Цифровые инструменты развития исследовательских умений младших школьников в этнокультурной образовательной среде» [17]. Настоящая статья посвящена иному аспекту анализа: если в указанной публикации рассматривались цифровые инструменты как средство развития исследовательских умений, то в данной работе предметом выступает типология учебных проектов, построенная на этнокультурном материале. Экспериментальная выборка, база и диагностический инструментарий являются общими; распределения по уровням приводятся как исходные данные для анализа проектной технологии, тогда как самостоятельным результатом настоящей статьи выступает авторская типология учебных проектов и ее дифференцированное влияние на компоненты исследовательских умений.

Эмпирическая часть исследования осуществлялась в условиях двух сельских школ Республики Саха (Якутия) – Сыланской и Арылахской. В эксперименте задействованы 82 ученика 3–4-х классов: экспериментальная группа объединила 42 школьника (21 третьеклассник и 21 четвероклассник), контрольная – 40 (19 третьеклассников и 21 четвероклассник). Возраст участников (9–10 лет) выбран с учетом его сензитивных возможностей: в этот период активно складываются аналитические механизмы и рефлексивные процессы, лежащие в основе исследовательской деятельности.

Исследование включало три этапа: констатирующий (сентябрь), формирующий (октябрь – апрель) и контрольный (май). В контрольной группе проектная деятельность велась по стандартной программе внеурочной работы без специальной типологии и без целенаправленного использования этнокультурного материала.

На основе анализа научной литературы разработана авторская типология проектов для младших школьников на материале этнокультурных традиций которая представлена в табл. 1.

Таблица 1

Типология проектов в этнокультурной образовательной среде

Тип проекта	Характеристика	Примеры тем	Формируемые исследовательские умения
Познавательно-исследовательский	Изучение этнокультурных объектов, сбор и анализ информации, выдвижение и проверка гипотез	«О чем рассказал орнамент?», «Тайна якутского чорона», «Проверь народную примету»	Наблюдение, анализ, сравнение, формулирование гипотез, выводы
Практико-ориентированный	Создание материального продукта на основе этнокультурных традиций	«Изготовление игрушки-оберега», «Макет якутской урасы», «Национальный костюм куклы»	Планирование, работа с материалами, оценка результата, саморефлексия
Ролево-игровой	Воссоздание обрядов, традиций, обычаев через театрализацию	«Семейная игра “Народный праздник”», «Театрализация олонхо», «Обряд алгыс»	Коммуникация, аргументация, рефлексия, работа в группе
Информационный	Сбор, систематизация и презентация информации об этнокультурных традициях	«Народный календарь: приметы и наблюдения», «Герои якутских легенд»	Поиск информации, систематизация, структурирование, презентация
Творческий	Создание продукта на основе этнокультурного материала	«Создание альбома “Традиции моей семьи”», «Видеофильм “Наш улус”»	Кооперация, распределение ролей, коллективная рефлексия

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования. Типология построена по единому основанию – доминирующему виду деятельности обучающихся.

Для фиксации уровня сформированности исследовательских умений служила диагностическая карта, сконструированная на основе методического инструментария, предложенного А. И. Савенковым [18, с. 20–25] и адаптированная авторами настоящего исследования. Каждый из пяти критериев оценивался по 3-балльной шкале (1 – низкий, 2 – средний, 3 – высокий). Суммарный балл варьировался от 5 до 15. Границы уровней: 5–8 баллов – низкий уровень, 9–12 – средний, 13–15 – высокий. Оценка уровня сформированности исследовательских умений опиралась на пять основных критериев. Первый касался отношения ребенка к этнокультурному материалу – насколько он проявляет интерес и готов ли самостоятельно искать информацию. Второй показывал, насколько упорядочены и объемны знания школьника о способах добычи и обработки данных. Третий был связан с операциональной стороной: умеет ли ученик анализировать, планировать, выдвигать гипотезы, выбирать адекватные методы. Четвертый – рефлексия, то есть способность оценить собственные действия и их результаты. Пятый, творческий, фиксировал, насколько ребенок способен предлагать нестандартные, оригинальные решения.

Для оценки межгрупповых различий между ЭГ и КГ на констатирующем и контрольном этапах применялся U-критерий Манна – Уитни. Внутригрупповая динамика в экспериментальной группе оценивалась описательно – через сопоставление долей и прирост в процентных пунктах; отдельных статистических критериев для связанных выборок в рамках данного исследования не применялось. Расчеты выполнены в SPSS Statistics 23.0.

Результаты исследования и их обсуждение

Констатирующий этап. Первичная диагностика подтвердила сопоставимость групп: статистически значимых различий не обнаружено ($U = 820{,}5$, $p > 0{,}05$). Распределение обучающихся по уровням в экспериментальной и контрольной группах носило сходный характер – преобладали низкий и средний уровни (табл. 2).

Таблица 2

Распределение обучающихся по уровням сформированности исследовательских умений на констатирующем этапе (%)

Уровень	ЭГ (n = 42)	КГ (n = 40)
Низкий	38,1	40,0
Средний	50,0	47,5
Высокий	11,9	12,5

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Чтобы понять, в чем именно дети испытывают затруднения, мы проанализировали не только результаты, но и сам процесс выполнения заданий. Выяснилось, что наибольшие сложности связаны с пятью исследовательскими действиями: определение проблемы, формулировка гипотез, построение плана, работа с информацией и обобщение результатов.

Формирующий этап. На формирующем этапе разработанная типология проектов была апробирована в экспериментальной группе в режиме систематической проектной работы, которая охватывала весь учебный год.

Познавательно-исследовательский проект «Народный календарь: проверка примет». Была организована серия весенних наблюдений за природными явлениями: распусканием листьев на березе, прилетом перелетных птиц и пробуждением насекомых после зимнего периода. Дети фиксировали наблюдаемые природные индикаторы, затем обращались к этнографическим источникам, содержащим описания народных примет, и сопоставляли свои данные с традиционными предсказаниями. Такое сравнение побуждало школьников выдвигать объяснительные гипотезы о том, почему народные прогнозы подтверждаются либо расходятся с реальными наблюдениями, что формировало у детей установку на самостоятельное исследование.

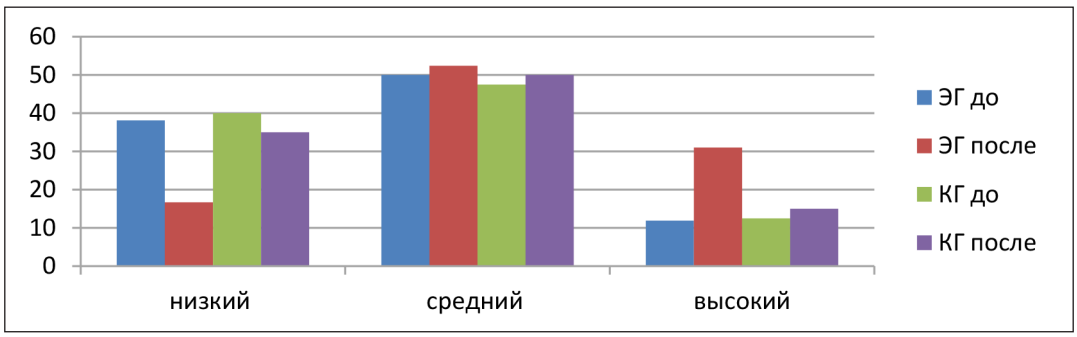
Практико-ориентированный проект «Орнамент моей семьи». Дети исследовали орнаменты на предметах быта, сохранившихся в их семьях (старые варежки, вышитые полотенца, берестяная и деревянная посуда). Они изучали значение символов, сравнивали элементы на разных предметах, выдвигали гипотезы о происхождении узоров. Итогом работы стало создание каждым ребенком собственного орнамента с объяснением значений использованных символов.

Ролево-игровой проект «Семейный праздник». Обучающиеся исследовали традиции и обычаи, связанные с якутскими национальными праздниками. Они собирали информацию о структуре праздника, значении обрядов, традиционной одежде и угощениях. На основе собранного материала дети распределяли роли и воссоздавали праздничный обряд в форме театрализованного представления.

Наблюдения позволили увидеть, что разные типы проектов дают неодинаковый эффект. Познавательно-исследовательские и практико-ориентированные проекты оказались наиболее привлекательными для детей. Они давали свободу действий, возможность экспериментировать и создавать что-то своими руками, позволяя проявить самостоятельность и творчество. Ролево-игровые проекты лучше других развивали умение договариваться и работать в группе, а также эффективно формировали коммуникативные навыки. Информационные проекты помогали детям осваивать приемы работы с текстами и учиться выделять главное. Творческие проекты формировали чувство общей ответственности и умение распределять роли. Следует подчеркнуть, что эти наблюдения носят качественный характер; отдельного количественного сравнения по типам проектов в рамках данного исследования не проводилось.

Контрольный этап. Динамика показателей, зафиксированная по итогам эксперимента, подтверждает наличие выраженных изменений в уровне сформированности исследовательских умений (рисунок).

Сравнение исходных и итоговых данных обнаруживает положительную динамику в экспериментальной группе, тогда как в контрольной группе изменения носят незначительный характер. Межгрупповые различия на контрольном этапе статистически значимы ($U = 495{,}5$; $p < 0{,}01$). Внутри ЭГ доля обучающихся с высоким уровнем выросла на 19,1 п. п., доля с низким уровнем сократилась на 21,4 п. п.



Распределение обучающихся по уровням сформированности исследовательских умений на контрольном этапе (%)
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Таблица 3

Распределение обучающихся по уровням сформированности исследовательских умений на контрольном этапе (%)

Уровень	ЭГ (n = 42)	КГ (n = 40)
Низкий	16,7	35,0
Средний	52,4	50,0
Высокий	31,0	15,0

Примечание: составлена авторами. Сумма процентов может отличаться от 100 % за счет округления.

В экспериментальной группе произошли не просто количественные, но и качественные сдвиги. Наиболее выраженная положительная динамика зафиксирована по двум направлениям: деятельностная готовность (способность планировать, выбирать способы проверки гипотез, организовывать свои действия) и рефлексивная культура (умение оценивать ход и результаты собственной работы, фиксировать затруднения и корректировать действия). Примечательно, что освоенные приемы исследовательской работы дети начали переносить на другие ситуации, что свидетельствует о формировании устойчивого способа действия, а не ситуативного навыка.

Разработанная типология проектов показала дифференцированное воздействие на разные компоненты исследовательских умений. Познавательно-исследовательские и практико-ориентированные проекты обеспечили развивающий эффект, ролево-игровые и творческие формы способствовали развитию коммуникативных и рефлексивных навыков.

Ограничения исследования. Данное исследование не позволяет строго разделить вклад этнокультурного содержания и проектной деятельности как таковой: обе группы занимались проектной работой, различие состояло в содержательном материале. Для проверки этого вопроса требуется отдельное исследование с контрольной группой, выполняющей проекты на неэтнокультурном материале. Кроме того, отсроченный контроль не проводился, поэтому выводы касаются непосредственного эффекта, а не устойчивости во времени. Внутригрупповая динамика оценивалась описательно; для строгой проверки связанных измерений в дальнейшем целесообразно применение критерия знаковых рангов Вилкоксона.

Заключение

Итак, что получили в итоге? В экспериментальной группе доля детей с высоким уровнем исследовательских умений выросла с 11,9 до 31,0 % (прирост 19,1 п. п.). В контрольной – изменения незначительны (с 12,5 до 15,0 %). Разница очевидна. Этнокультурное содержание проектной деятельности сыграло здесь не второстепенную, а ключевую функцию. Когда ребенок исследует то, что его окружает (семейные традиции, старые фотографии, орнаменты на посуде), задача перестает быть «школьной». Она становится своей. И это есть главный двигатель мотивации.

Разработанная в ходе эксперимента типология проектов тоже показала действенный результат. Познавательно-исследовательские проекты дали возможность младшим школьникам собирать данные и анализировать, практико-ориентированные – создавать своими руками, ролево-игровые – проживать ситуацию и договариваться. У каждого типа своя задача, и в сумме они дали системный результат.

Но важнее цифр качественные сдвиги. Дети перестали ждать инструкций. Они начали сами планировать, проверять, искать и делать выводы. И, пожалуй, самое ценное – научились видеть свои ошибки и исправлять их. Освоенные приемы дети начали переносить на другие учебные ситуации, что говорит о формировании устойчивого способа действия, а не ситуативного навыка.

Остались и вопросы. Дети из семей с ослабленной или утраченной этнокультурной традицией нуждаются в дополнительных педагогических опорах. Это указывает на необходимость разработки вариативных форм заданий, адаптируемых к разным стартовым условиям, и индивидуальных образовательных маршрутов для обучающихся с низкой исходной мотивацией.

Так что проектная деятельность на этнокультурном материале – это не просто формальное соответствие требованиям федеральных государственных образовательных стандартов. Это реальный механизм развития интеллектуальных операций и воспитания ценностного отношения к культурному наследию. Разработанная технология может быть рекомендована к внедрению в практику работы начальной школы, особенно в условиях образовательных организаций с этнокультурным компонентом содержания образования.

Список литературы

1. Приказ Минпросвещения России от 31 мая 2021 г. № 286 «Об утверждении федерального государственного образовательного стандарта начального общего образования» [Электронный ресурс]. URL: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202107050028 (дата обращения: 15.08.2026).

2. Головнева Е. В., Фатыхова А. Л., Рабаданова Р. С., Синдикова Г. М. К проблеме реализации технологий проект-

ного обучения и организации исследовательской деятельности младших школьников // Вестник РМАТ. 2020. № 4. С. 77–85. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/k-probleme-realizatsii-tehnologiy-proektnogo-obucheniya-i-organizatsii-issledovatelskoy-deyatelnosti-mladshih-shkolnikov (дата обращения: 15.08.2026).

3. Кондакова И. В., Долгошеева Е. В., Корякина Г. А. Особенности организации проектной деятельности обучающихся начальных классов // Научно-педагогическое обозрение (Pedagogical Review). 2020. Вып. 3 (31). С. 16–24. DOI: 10.23951/2307-6127-2020-3-16-24.

4. Putri D. A., Sumarno, Apriza B., Widianingrum A. Analysis of the Effectiveness of Implementing Project-Based Learning Models on Students' Critical Thinking Skills in Elementary Schools: A Systematic Literature Review // Journal for Lesson and Learning Studies. 2025. Vol. 8. Is. 1. P. 129–142. DOI: 10.23887/jlls.v8i1.90392.

5. Guzman-Gutierrez Y. A., Duran-Llaro K. L., Mucha-Hospital L. F. Research skills to improve critical thinking in elementary school students // Episteme Koinonía. 2025. Vol. 8. Is. esp1. P. 334–357. DOI: 10.35381/e.k.v8i1.4476.

6. De los Santos O., Hernández-Padilla E., Vázquez-Alonso Á., López-Aymes G., Aguilar-Tamayo M. F., Arce E. Scientific Thinking Promotes the Development of Critical Thinking in Primary Education // Education Sciences. 2025. Vol. 15. Is. 9. Art. 1174. DOI: 10.3390/educsci15091174.

7. Корякина С. Р., Миронова Т. И., Смирнова Е. Е. Методика оценки уровня исследовательской компетентности школьников // Вестник Костромского государственного университета. Серия: Педагогика. Психология. Социокинетика. 2022. Т. 28. № 2. С. 38–44. DOI: 10.34216/2073-1426-2022-28-2-38-44.

8. Гайсина Р. С., Головнева Е. В., Гребенникова Д. А. Этнокультурное образование младших школьников // Фундаментальные исследования. 2015. № 2–22. С. 4987–4991. URL: https://fundamental-research.ru/article/view?id=38145 (дата обращения: 23.09.2026).

9. Иванова А. В., Нестерева Н. А. Формирование исследовательских умений младших школьников средствами педагогического потенциала этнокультурных традиций // Современные проблемы науки и образования. 2025. № 1. URL: https://science-education.ru/article/view?id=33913 (дата обращения: 23.09.2026). DOI: 10.17513/spno.33913.

10. Волков Г. Н. Этнопедагогика: учебник для студентов средних и высших педагогических учебных заведений. М.: Академия, 1999. 168 с.

11. Сидорова Е. Э., Корякина Л. А. Проектная деятельность как средство формирования исследовательских компетенций младших школьников // Проблемы современного педагогического образования. 2018. № 61–1. С. 276–279. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/proektnaya-deyatelnost-kak-sredstvo-formirovaniya-issledovatelskih-kompetentsiy-mladshih-shkolnikov/viewer (дата обращения: 23.09.2026).

12. Портнягин И. С. Этнопедагогика «Кут-сюр»: педагогические воззрения народа саха. М.: Academia, 1998. 184 с.

13. Неустроев Н. Д. Этнопедагогика народов Севера. Якутск: Изд-во ЯГУ, 1999. 140 с.

14. Барахсанова Е. А., Семенова М. И. Педагогический потенциал этнокультурных традиций народа саха в воспитательно-образовательной работе средних специальных учебных заведений Якутии // Общество: социология, психология, педагогика. 2021. № 11 (91). С. 137–141. DOI: 10.24158/spp.2021.11.21.

15. Иванова А. В., Нестерева Н. А. Педагогические условия формирования исследовательских умений младших школьников средствами педагогического потенциала этнокультурных традиций // Концепт. 2025. № 3. С. 245–258. DOI: 10.24412/2304-120X-2025-11050.

16. Иванова А. В., Нестерева Н. А. Технология формирования исследовательских умений младших школьников средствами педагогического потенциала этнокультурных традиций // Современные наукоемкие технологии. 2025. № 4. С. 108–114. DOI: 10.17513/snt.40373.

17. Иванова А. В., Нестерева Н. А. Цифровые инструменты развития исследовательских умений младших школьников в этнокультурной образовательной среде // Современные наукоемкие технологии. 2026. № 5. С. 191–198. DOI: 10.17513/snt.40793.

18. Савенков А. И. Методика исследовательского обучения младших школьников. 3-е изд., перераб. Самара: Федоров; Учебная литература, 2010. 189 с. ISBN 978-5-9507-1159-6.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The authors declare no external funding.

УДК 372.881.1
DOI

CC BY 4.0

ФОРМИРОВАНИЕ КОМПЕТЕНЦИИ В ОБЛАСТИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА У БУДУЩИХ УЧИТЕЛЕЙ ИНОСТРАННОГО ЯЗЫКА

Кизрина Н. Г. ORCID ID 0000-0002-0410-0557,
Бояркина Л. М. ORCID ID 0000-0003-1944-7008,
Янкина О. Е. ORCID ID 0000-0003-2336-9903

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Мордовский государственный педагогический университет имени М. Е. Евсевьева», Саранск, Российская Федерация, e-mail: kizrinan@mail.ru

В условиях цифровизации образования, развития нейронных сетей актуальной становится проблема формирования у будущих учителей иностранного языка способности к методически обоснованному применению технологий искусственного интеллекта в профессиональной деятельности. Цель статьи состоит в теоретическом обосновании и разработке модели формирования компетенции в области искусственного интеллекта у будущих учителей иностранного языка, включающей концептуально-целевой, содержательный, организационно-деятельностный, результативный блоки, а также в определении методических условий ее эффективной реализации в системе высшего педагогического образования. В ходе теоретического анализа уточнена структура ИИ-компетенции, включающая шесть компонентов: мотивационно-ценностный, когнитивно-содержательный, операционно-технологический, методико-педагогический, этико-правовой и рефлексивно-профессиональный. Определены педагогические условия реализации модели. Экспериментальная апробация проводилась на базе Мордовского государственного педагогического университета с участием 55 студентов 4-го курса факультета иностранных языков в 2025–2026 учебном году и включала констатирующий, формирующий и контрольный этапы. Диагностический инструментарий состоял из шести разделов, оцениваемых в сумме до 100 баллов. Для статистической обработки данных использовался t-критерий Стьюдента для связанных выборок. Результаты контрольного этапа зафиксировали статистически значимую положительную динамику по всем компонентам ИИ-компетенции ($p < 0,01$ по пяти компонентам и $p < 0,05$ по этико-правовому). Поскольку апробация носила частичный характер и проводилась без контрольной группы, полученные данные следует рассматривать как свидетельство результативности завершающего этапа модели – этапа методической интеграции ИИ, а не всей ее четырехлетней траектории. Модель может быть рекомендована для дальнейшей экспериментальной проверки и внедрения в систему высшего педагогического образования при условии проведения исследования с группой сравнения и охватом всех этапов подготовки.

Ключевые слова: иностранный язык, учитель иностранного языка, искусственный интеллект, ИИ-компетенция

FORMATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE COMPETENCE IN PRE-SERVICE FOREIGN LANGUAGE TEACHERS

Kizrina N. G. ORCID ID 0000-0002-0410-0557,
Boyarkina L. M. ORCID ID 0000-0003-1944-7008,
Yankina O. E. ORCID ID 0000-0003-2336-9903

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Mordovian State Pedagogical University named after M. E. Evsevev", Saransk, Russian Federation, e-mail: kizrinan@mail.ru

In the context of digitalization of education and the development of neural networks, the problem of developing pre-service foreign language teachers' ability to apply artificial intelligence technologies in a methodologically sound manner in their professional activity becomes urgent. The purpose of the article is to theoretically substantiate and develop a model for the formation of artificial intelligence competence in pre-service foreign language teachers, comprising conceptual-target, content, organizational-activity, and resultant blocks, as well as to determine the methodological conditions for its effective implementation in the system of higher pedagogical education. In the course of theoretical analysis, the structure of AI competence has been clarified, including six components: motivational-value, cognitive-content, operational-technological, methodological-pedagogical, ethical-legal, and reflective-professional. Pedagogical conditions for the implementation of the model have been determined. Experimental approbation was carried out at Mordovia State Pedagogical University with the participation of 55 fourth-year students of the Faculty of Foreign Languages in the 2025–2026 academic year and included ascertaining, formative, and control stages. The diagnostic toolkit consisted of six sections, assessed in total up to 100 points. For statistical data processing, Student's t-test for paired samples was used. The results of the control stage recorded statistically significant positive dynamics across all components of AI competence ($p < 0.01$ for five components and $p < 0.05$ for the ethical-legal component). Since the approbation was partial and was carried out without a control group, the findings should be regarded as evidence of the effectiveness of the final stage of the model – the stage of methodological integration of AI – rather than of its entire four-year trajectory. The model can be recommended for further experimental validation and implementation in the system of higher pedagogical education, provided that a study with a comparison group covering all stages of training is conducted.

Keywords: foreign language, foreign language teacher, artificial intelligence, AI competence

Введение

В условиях цифровой трансформации образования профессиональная задача педагога все чаще связана с интеграцией искусственного интеллекта (ИИ) в повседневную практику. Речь идет уже не только о базовых цифровых компетенциях, но и о переосмыслении традиционных методик с учетом дидактических возможностей ИИ. При этом генеративный ИИ внедряется в образование зачастую бессистемно: либо попадает под полный запрет, либо используется некритично, без осмысления негативных последствий [1].

Педагогу необходимо эффективно применять ИИ-инструменты для анализа образовательных результатов обучающихся, адаптировать онлайн-платформы с элементами ИИ и создавать цифровые ресурсы с помощью генеративных моделей [2]. Такая подготовка помогает не потеряться в мире быстро развивающихся нейросетей. Современный педагог выступает не только носителем знаний, но и «архитектором образовательной среды, способной гибко подстраиваться под индивидуальные запросы обучающихся» [3, с. 799].

Особенно ярко роль педагога как «архитектора» проявляется в контексте иноязычного образования, где ИИ получил широкое распространение.

В последние годы в отечественной лингводидактике наблюдается активная разработка различных аспектов применения ИИ в профессиональной деятельности учителей иностранного языка. Особо весомый вклад в это направление внесли П. В. Сысоев и М. Н. Евстигнеев. В их совместных трудах, в том числе с соавторами, представлена матрица инструментов ИИ [4]; П. В. Сысоевым также детально проанализированы этические нормы и проблема ИИ-плагиата в академической среде [5]; М. Н. Евстигнеев предложил методику планирования занятий с использованием генеративного ИИ [6], а в соавторстве с И. А. Евстигнеевой разработал подход к формированию навыков промпт-инжиниринга у будущих педагогов [3]. Кроме того, проблематика использования ИИ в обучении иностранным языкам разрабатывается и другими исследователями: С. В. Боголепова создала технологию обучения использованию ИИ в преподавании иностранного языка на основе учебных кейсов [7], а Е. В. Варисова и Д. В. Грамма изучили возможности ИИ для автоматизации повседневных задач учителя [8]. Кроме того, имеются также работы, посвященные исследованию структуры и содержания ИИ-компетенции педагога [9–11]. Отдельно следует отметить исследования, посвященные структуре и содержанию ИИ-компетенции учителя иностранного языка [12–14].

Однако при наличии разработанных структур и отдельных методик остается ряд нерешенных вопросов. Во-первых, универсальные модели [9–11] не отражают специфики предметной области «Иностранный язык»: в них не конкретизировано, как ИИ-компетенция преломляется через обучение языковым аспектам и видам речевой деятельности. Во-вторых, работы [12; 13] описывают состав компетенции учителя иностранного языка, но не предлагают целостной модели ее формирования в системе вузовской подготовки. В работе [14] представлена не только структура ИИ-компетенции (нейролингводидактической компетенции), но и этапы ее формирования, а также апробированная на практике модель повышения квалификации педагогов иностранных языков. Однако данная разработка адресована практикующим преподавателям и реализуется в дополнительном профессиональном образовании. Предлагаемая нами модель решает иную задачу: она ориентирована на студентов бакалавриата и встроена в основную образовательную программу педагогического вуза, обеспечивая поэтапное формирование ИИ-компетенции на протяжении четырех лет обучения. В-третьих, существующие методические решения [3; 6; 7], направлены на отдельные аспекты подготовки (промпт-инжиниринг, планирование занятия, кейс-технология) и не выстроены в преемственную междисциплинарную последовательность. В-четвертых, вне исследовательского фокуса остаются критериально-уровневая диагностика ИИ-компетенции и экспериментальная проверка педагогических условий ее формирования.

Цель исследования – теоретическое обоснование и разработка модели формирования компетенции в области искусственного интеллекта у будущих учителей иностранного языка, включающей концептуально-целевой, содержательный, организационно-деятельностный, результативный блоки, а также в определении методических условий ее эффективной реализации в системе высшего педагогического образования.

Задачи исследования:

1. Уточнить структуру ИИ-компетенции учителя иностранного языка.

2. Разработать модель ее формирования в вузе.

3. Определить педагогические условия реализации модели.

4. Оценить результативность предложенной модели в ходе опытно-экспериментальной апробации.

Материалы и методы исследования

Опытно-экспериментальная работа была организована в 2025–2026 учебном году на площадке факультета иностранных языков Мордовского государственного педагогического университета имени М. Е. Евсевьева. В апробации участвовали студенты 4-го курса, обучающиеся по направлению «Педагогическое образование» профиль «Иностранный язык (английский, немецкий)» (27 студентов) и профиль «Иностранный язык (английский)» (28 студентов).

Для достижения поставленной цели применялся комплекс теоретических и эмпирических методов исследования, включающий изучение специальной литературы, наблюдение, педагогический эксперимент и проведение статистического анализа полученных экспериментальных данных.

Результаты исследования и их обсуждение

В современной научной литературе как в России, так и за рубежом имеются исследования, затрагивающие вопросы формирования ИИ-компетенций у педагогов.

Разработанная ЮНЕСКО модель предлагает универсальный подход к формированию профессиональных навыков педагога в эпоху цифровой трансформации образования. Модель включает 15 компетенций в пяти измерениях (человекоцентрическое мышление, этика ИИ, основы и приложения ИИ, педагогика ИИ, ИИ для профессионального обучения) и три уровня освоения (приобретение, углубление, создание) [9].

С. В. Титова и К. Т. Темурян на основе анализа зарубежных источников представили структуру и содержание ИИ-компетенции педагога. Согласно авторам, данная компетенция включает шесть следующих компонентов: знания и техническая грамотность; критическое мышление и оценка; этическая и правовая грамотность; педагогическая интеграция; автономия и сотрудничество (самостоятельная работа с ИИ, групповое и проектное обучение на базе ИИ-инструментов); непрерывность профессионального развития [14, с. 1044].

А. И. Минаков рассматривает данную компетенцию как составную часть ИКТ-компетенции и выделяет в ней шесть составляющих: «когнитивную, операционно-технологическую, мотивационную, этическую, социальную и поведенческую» [10, с. 322–323].

П. В. Сысоев, в свою очередь, предлагает более детализированную модель, включающую восемь компонентов: «мотивационно-целевой, нормативный правовой, информационной безопасности, этический, промпт-инжиниринг, обучение и контроль, управление учебным процессом, а также профессиональное развитие» [11, с. 65–68].

В современной методике четко прослеживается тенденция к уточнению структурно-содержательных компонентов ИИ-компетенции, адаптированных к профессиональной деятельности учителя иностранных языков.

Так М. Н. Евстигнеев, П. В. Сысоев, И. А. Евстигнеева выделяют пять компонентов в структуре ИИ-компетенции учителя иностранного языка: «политика в области интеграции технологий ИИ в образование; обучение иностранному языку на основе современных инструментов ИИ; организация автоматизированного контроля успеваемости обучающихся; обеспечение информационной безопасности; соблюдение правил авторской этики и предупреждение ИИ-плагиата» [12, с. 93].

С. В. Титова и И. В. Харламенко вводят вместо понятия «ИИ-компетенция педагога» понятие «нейролингводидактическая компетенция» и предлагают ее модель с трехкомпонентной структурой [13]. Каждый компонент соответствует дидактической задаче (изучение иностранного языка, организация учебного процесса, управление учебным процессом) и включает определенные педагогические и предметно-педагогические знания и умения.

Обобщая сказанное, под ИИ-компетенцией учителя иностранных языков авторы понимают интегративное качество личности, которое объединяет ценностно-мотивационные установки, профессиональные знания, умения и практический опыт, необходимые для методически грамотного, этичного и осознанного применения искусственного интеллекта в обучении, организации и управлении учебной деятельностью по иностранному языку, а также для непрерывного профессионального развития.

Модель ИИ-компетенции учителя иностранных языков включает шесть компонентов:

1. Мотивационно-ценностный (личностно-ориентированный) компонент отражает личностную позицию педагога: осознание образовательного потенциала искусственного интеллекта; устойчивую профессиональную направленность на его использование в обучении иностранному языку; готовность применять ИИ для решения различных профессиональных задач; понимание роли педагога как «архитектора образовательной среды».

2. Когнитивно-содержательный (знаниевый): знание принципов работы технологий ИИ; понимание дидактических возмож-

ностей и ограничений ИИ в обучении иностранному языку; знание нормативно-правовых и этических аспектов применения ИИ в образовании, знание ИИ-инструментов для обучения разным аспектам и видам иноязычной речевой деятельности.

3. Операционно-технологический (практико-ориентированный): умение формулировать дидактические промпты; использовать ИИ для развития языковых навыков и умений видов речевой деятельности; применять ИИ для осуществления контроля, создавать дидактические материалы с помощью генеративных нейросетей.

4. Методико-педагогический: умение интегрировать ИИ в процесс обучения иностранному языку, способность проектировать индивидуальные образовательные маршруты обучающихся на основе ИИ; использование ИИ для организации проблемного, продуктивного обучения.

5. Этико-правовой (нормативно-регулятивный): соблюдение авторских прав, предотвращение ИИ-плагиата; обеспечение информационной безопасности и защиты персональных данных; открытое указание на применение ИИ в педагогической деятельности.

6. Рефлексивно-профессиональный (развивающий): способность к непрерывному освоению новых ИИ-инструментов и методик, использование ИИ для собственного профессионального развития.

Учитывая содержание и структуру ИИ-компетенции учителя иностранных языков, авторы разработали модель формирования данной компетенции у студентов, обучающихся по направлению 44.03.05 Педагогическое образование профиль «Иностранный язык (английский, немецкий)»; 44.03.01 Педагогическое образование профиль «Иностранный язык (английский)». Основой разработки модели послужили основные положения современных подходов к профессиональному обучению: системно-деятельностного, компетентностного, личностно-ориентированного, контекстуального, аксиологического и акмеологического [15]. Модель апробирована на факультете иностранных языков в 2025–2026 учебном году.

Модель формирования ИИ-компетенции включает четыре блока: концептуально-целевой, содержательный, организационно-деятельностный, результативный. Рассмотрим каждый из представленных блоков.

Концептуально-целевой блок. Целью представленной модели является формирование у будущего учителя иностранного языка ИИ-компетенции как интегративного профессионально-личностного качества, объединяющего ценностно-мотивационные установки, профессиональные знания, умения и практический опыт, необходимые для методически обоснованного, этичного и осознанного применения искусственного интеллекта в обучении, организации и управлении учебной деятельностью по иностранному языку, а также в целях непрерывного профессионального развития.

Формирование данной компетенции осуществляется в рамках следующих дисциплин: «Технологии цифрового образования» (3 з. е.), «Системы искусственного интеллекта» (2 з. е.), «Методика обучения и воспитания (английский язык)» (12 з. е.), а также во время производственной (педагогической) практики. Указанные дисциплины изучаются с 1-го по 4-й курсы. На каждом курсе реализуется определенная задача, способствующая достижению поставленной цели. Формирование ИИ-компетенции осуществляется поэтапно. Во 2-м семестре в рамках дисциплины «Технологии цифрового образования» закладываются базовая цифровая грамотность, навыки работы с цифровыми образовательными ресурсами и мотивационно-ценностное отношение к инновациям. В 3-м семестре дисциплина «Системы искусственного интеллекта» обеспечивает освоение фундаментальных знаний о принципах работы ИИ, видах нейросетей и обработке естественного языка, а также формирует первичные умения промпт-инжиниринга и знакомит с этико-правовыми нормами. В 7-м и 8-м семестрах в рамках дисциплины «Методика обучения и воспитания (английский язык)» студенты учатся интегрировать ИИ в процесс обучения иностранному языку и развивают рефлексивно-профессиональные умения. В 8-м семестре в ходе производственной (педагогической) практики полученные умения закрепляются в реальной образовательной среде при обучении английскому языку, а также продолжается развитие рефлексивно-профессионального компонента.

Основными принципами обучения следует обозначить следующие: принцип поэтапного формирования профессиональных навыков и умений в области использования ИИ (от цифровой грамотности к методической); принцип практико-ориентированного профессионального обучения; принцип междисциплинарности, а также принцип этической рефлексии.

Содержательный блок. Содержание распределено по обозначенным выше дисциплинам, которые логически дополняют друг друга.

На 1-м курсе в рамках дисциплины «Технологии цифрового образования» формируется начальный уровень мотивационно-ценностного, когнитивного и этико-

правового компонентов ИИ- компетенции учителя иностранных языков.

На 2-м курсе в рамках дисциплины «Системы искусственного интеллекта» формируются следующие компоненты ИИ-компетенции: когнитивный (углубленный уровень), операционно-технологический (начальный уровень), этико-правовой (развернутый уровень).

На последующих курсах на дисциплине «Методика обучения и воспитания (английский язык)», а также во время прохождения производственной (педагогической) практики формируются методико-педагогический, операционно-технологический (продвинутый уровень), рефлексивно-профессиональный компоненты ИИ-компетенции.

Организационно-деятельностный блок. Процесс формирования ИИ-компетенции у будущих учителей иностранных языков можно условно разделить на три этапа: Первый этап можно обозначить как формирование цифровой грамотности будущего педагога. Второй этап – знакомство с ИИ и его возможностями в образовании. Третий этап – это методическая интеграция ИИ. Здесь изучается лингводидактический потенциал ИИ для обучения языковым аспектам и видам речевой деятельности на иностранном языке, студенты учатся проектировать уроки с интеграцией ИИ.

Эффективность реализации разработанной модели формирования ИИ-компетенции у будущих учителей иностранного языка обеспечивается совокупностью следующих педагогических условий, которые охватывают содержательный, процессуальный, организационно-методический и мотивационно-рефлексивный аспекты профессиональной подготовки.

1. Формирование ИИ-компетенции выстраивается как последовательный трехэтапный процесс, интегрированный в содержание нескольких дисциплин на протяжении всего периода обучения в вузе (с 1-го по 4-й курс).

2. Практико-ориентированная направленность содержания и заданий.

Обучение строится на решении профессионально ориентированных задач, максимально приближенных к реальной педагогической деятельности. Примеры заданий:

А. Разработайте фрагмент урока для 6-го класса по теме «Мой день» с использованием чат-бота Gliglish для отработки навыков диалогической речи. Пропишите цель, задачи, промпт для бота, варианты действий при ошибках бота, критерии оценки учащихся.

Б. Создайте серию упражнений на развитие грамматических навыков (Present Perfect) с помощью генеративного ИИ: 3 упражнения разных типов (подстановка, трансформация, выбор) с ключами. Оцените, насколько они соответствуют уровню B1.

В. Спроектируйте персонализированное домашнее задание по грамматической теме “Present continuous” с использованием ИИ для ученика 5-го класса с высоким уровнем и для ученика с низким уровнем. Обоснуйте выбор промптов.

Г. Решите методический кейс: «На уроке учащиеся использовали Гига-чат для написания эссе. Трое учеников сдали почти идентичные тексты. Ваши действия? Как выстроить беседу с классом о плагиате и академической честности?»

Д. Смоделируйте фрагмент урока с применением ИИ для формирования лексических навыков (например, генерация изображений по новой лексике или создание ассоциативных карт через ИИ).

Е. Проведите микроурок (10–15 мин) с группой студентов (peer-teaching), где вы используете ИИ-инструмент Twee. После проведения урока проанализируйте, что удалось, какие технические и дидактические сложности возникли, как можно их преодолеть.

3. Использование интерактивных и проектных методов обучения.

4. Применение современных ИИ-инструментов как предмета освоения и средства обучения.

С одной стороны, ИИ выступает как объект изучения – студенты знакомятся с функциональными возможностями различных ИИ-платформ, с другой стороны, ИИ выступает как средство обучения – студенты используют ИИ-инструменты для разработки собственных дидактических материалов.

5. Рефлексивно-оценочный компонент как обязательный элемент каждого занятия.

6. *Интеграция этико-правового компонента во все этапы обучения.*

7. *Связь аудиторной подготовки с реальной педагогической практикой.*

Основными формами обучения выступают лекционные, практические и лабораторные занятия.

Результативный блок. В качестве итогового контрольного задания в рамках курса «Методика обучения и воспитания» выступает защита проекта «Разработка серии уроков в рамках одного модуля для одного класса с использованием разных ИИ-инструментов».

Выделяются следующие уровни сформированности ИИ-компетенции у будущих учителей иностранного языка:

высокий: самостоятельно проектирует учебный процесс с оптимальной интегра-

цией ИИ, создает авторские промпты, критически анализирует риски;

средний: уверенно использует основные ИИ-инструменты по алгоритму, соблюдает этические нормы, но нуждается в помощи при решении нестандартных задач;

базовый: знает возможности искусственного интеллекта, выполняет отдельные операции (простой промпт, генерация текста), нуждается в помощи при методической интеграции;

низкий: формальные знания, отсутствие готовности применять искусственный интеллект, игнорирование этики.

Разработанная модель формирования ИИ-компетенции у будущих учителей иностранного языка была апробирована в ходе педагогического эксперимента на базе Мордовского государственного педагогического университета на кафедре иностранных языков и методик обучения. Эксперимент проводился в течение 2025–2026 учебного года и включал три этапа: констатирующий (03.09.2025–14.09.2025); формирующий (15.09.2025–30.04.2026), контрольный (03.05.2026–20.05.2026). В рамках эксперимента проводилось внутригрупповое сравнение (до/после) без выделения контрольной группы, что обусловлено организационными условиями апробации и частичным характером проверки модели.

На констатирующем этапе стояла задача определить исходный уровень ИИ-компетенции у студентов 4-го курса факультета иностранных языков направления подготовки 44.03.05 Педагогическое образование, профиль «Иностранный язык (английский, немецкий)» (27 чел.) и 44.03.01 Педагогическое образование, профиль «Иностранный язык (английский)» (28 чел.). В обеих группах по учебным планам отводится одинаковое число зачетных единиц на изучение дисциплин: «Технологии цифрового образования» (3 з. е.), «Системы искусственного интеллекта» (2 з. е.), «Методика обучения и воспитания (английский язык)» (12 з. е.). Как было указано выше, к 7-му семестру 4-го курса студенты изучили первые две дисциплины, в рамках дисциплины «Методика обучения и воспитания (английский язык)» освоены теоретические основы методики обучения и воспитания (английский язык), а также практические аспекты формирования иноязычной коммуникативной компетенции. В 7-м семестре изучается раздел, посвященный современным технологиям обучения.

С целью определения исходного уровня сформированности ИИ-компетенции у студентов была предложена диагностическая работа, которая включала шесть разделов. Каждый раздел был направлен на контроль одного из компонентов ИИ-компетенции и оценивался по критериальной шкале, предполагающей начисление баллов за полноту, корректность и методическую обоснованность выполнения задания.

Раздел 1. Мотивационно-ценностный (анкета «Готовность к интеграции ИИ в уроки иностранного языка», максимально 15 баллов). Оценивались: полнота и аргументированность ответов (0–5 баллов); выраженность устойчивой профессиональной направленности на использование ИИ (0–5 баллов); понимание образовательного потенциала и рисков ИИ (0–5 баллов). Раздел 2. Когнитивно-содержательный (тест на знание дидактических возможностей ИИ, максимально 15 баллов). 15 тестовых заданий по 1 баллу: знание принципов работы нейросетей, дидактических возможностей и ограничений ИИ, нормативно-правовых и этических составляющих, ИИ-инструментов для обучения аспектам языка и видам речевой деятельности. Раздел 3. Операционно-технологический (написание двух промптов, максимально 15 баллов). Оценивались: корректность структуры промпта (роль, контекст, задача, формат, ограничения) (0–5 баллов); соответствие промпта дидактической цели и уровню обучающихся (0–5 баллов); качество полученного результата и его методическая ценность (0–5 баллов). Раздел 4. Методико-педагогический (кейс-задание: проектирование фрагмента урока с интеграцией ИИ, максимально 25 баллов). Оценивались: обоснование выбора ИИ-инструмента (0–5 баллов); корректность постановки цели и задач фрагмента урока (0–5 баллов); соответствие сгенерированных с помощью ИИ упражнений и дидактических материалов поставленным целям и задачам (0–5 баллов); продуманность критериев оценки деятельности учащихся (0–5 баллов); описание рисков использования ИИ и способов их преодоления (0–5 баллов). Раздел 5. Этико-правовой (решение двух этических ситуаций, максимально 15 баллов). По каждой ситуации: корректность решения ситуации с правовой точки зрения (0–3 балла); аргументированность этической позиции (0–3 балла); предложенный алгоритм действий педагога (0–1,5 балла). Итого до 7,5 баллов за ситуацию. Раздел 6. Рефлексивно-профессиональный (рефлексивное эссе на тему «Мои возможности и дефициты в использовании ИИ на уроках иностранного языка», максимально 15 баллов). Оценивались: глубина самоанализа возможностей и дефицитов (0–5 баллов); конкретность и реалистичность плана профессионального развития

(0–5 баллов); критичность и отсутствие формальных формулировок (0–5 баллов). Таким образом, максимальный первичный балл за всю работу составлял 100 баллов.

Итоговый балл (0–100) переводился в уровень: высокий (100–85 баллов), средний (65–84 баллов); базовый (64–40); низкий (39–0).

Распределение студентов по уровням было следующим: высокий уровень не был зафиксирован ни у одного студента; средний уровень – у 10 чел. (18 %); базовый – у 41 чел. (75 %); низкий – у 4 чел. (7 %). Самые низкие баллы студенты получили за операционно-технологический (максимальный фактически полученный балл – 8) и методико-педагогический (максимальный фактически полученный балл –12) разделы.

Результаты констатирующего этапа (наиболее низкие баллы по операционно-технологическому и методико-педагогическому компонентам ИИ-компетенции) показали необходимость целенаправленной формирующей работы на третьем этапе модели, на этапе методической интеграции ИИ. Этот этап реализовывался в рамках дисциплины «Методика обучения и воспитания (английский язык)» (раздел «Современные технологии обучения иностранным языкам»), а также в ходе производственной (педагогической) практики. В содержание раздела был включен дополнительный модуль «Интеграция ИИ в процесс обучения иностранному языку» объемом 1 зачетная единица (36 ч: 18 аудиторных и 18 самостоятельной работы).

Учитывая, что теоретические основы использования искусственного интеллекта в образовании (понятийный аппарат, классификация инструментов, базовые дидактические возможности, этико-правовые нормы) студенты освоили на предыдущих этапах: в рамках изучения дисциплин «Технологии цифрового образования» и «Системы искусственного интеллекта», аудиторные занятия методического модуля были переориентированы с информационно-ознакомительного уровня на углубленный методико-прикладной, направленный на развитие операционно-технологического и методико-педагогического компонентов ИИ-компетенции.

На лекционных занятиях (4 занятия по 2 академических часа) рассматривались следующие вопросы: методическая целесообразность отбора ИИ-инструментов для конкретных этапов урока иностранного языка; критерии оценки качества контента, генерируемого нейросетями (содержательная точность, языковая аутентичность, возрастная адаптивность); стратегии интеграции ИИ в систему формирующего и итогового контроля, включая проектирование критериально-ориентированных заданий; этические и правовые аспекты использования ИИ в школьной практике; вопросы информационной безопасности при работе с ИИ-контентом. Каждая лекция включала интерактивные элементы: мини-дискуссии, анализ методических кейсов и демонстрацию работы с конкретными ИИ-сервисами в режиме реального времени.

Практические занятия (5 занятий по 2 академических часа) проводились в формате методической мастерской и носили деятельностный характер. На практических занятиях активно применялись интерактивные методы: метод «Аквариум» использовался для инсценировки фрагментов уроков с применением ИИ и их последующей экспертной оценкой; метод «Дебаты» – для обсуждения проблемных вопросов, например, «ИИ заменит учителя иностранного языка через 10 лет: за и против»; метод кейсов – для решения профессиональных ситуаций, связанных с академической честностью и этическими проблемами.

В рамках самостоятельной работы (18 ч) студентам предлагались задания на углубление практических навыков: составление справочника эффективных промптов для учителя иностранного языка; разработка серии упражнений по одной грамматической или лексической теме с использованием минимум двух различных ИИ-инструментов; подготовка индивидуальных методических проектов и др. Результаты самостоятельной работы фиксировались в портфолио студента и служили основой для промежуточной и итоговой аттестации.

В 8-м семестре, в период производственной (педагогической) практики, студенты переносили разработанные материалы в реальный процесс обучения: проводили фрагменты уроков и внеурочных занятий по иностранному языку с использованием ИИ-инструментов, наблюдали за эффективностью выполненных заданий.

Выстроенная последовательность аудиторной работы (лекции и практические занятия) и ее апробация в ходе педагогической практики обеспечили поэтапное формирование у студентов всех компонентов ИИ-компетенции. Основное внимание было уделено операционно-технологическому и методико-педагогическому компонентам, дефициты по которым были выявлены на констатирующем этапе эксперимента.

Целью контрольного этапа являлась диагностика уровня сформированности

ИИ-компетенции у будущих учителей иностранного языка после реализации разработанной модели и оценка эффективности предложенной методической системы. В контрольном срезе приняли участие те же группы студентов, что и на констатирующем этапе.

Для обеспечения сопоставимости результатов констатирующего и контрольного срезов использовался параллельный вариант диагностической работы. Оба варианта сохраняли единую структуру: шесть разделов, одинаковое число заданий в каждом разделе, одинаковую систему оценивания, одинаковое время выполнения. Содержательное наполнение заданий было обновлено: изменены формулировки вопросов анкеты, содержание тестовых заданий о дидактических возможностях ИИ, тематика упражнений для написания промптов, сюжеты методических кейсов, содержание этических ситуаций и темы рефлексивного эссе. При этом типы заданий, их число, структура и критерии оценивания оставались неизменными. Для подтверждения сопоставимой трудности вариантов была проведена независимая экспертная оценка. Три преподавателя кафедры иностранных языков и методик обучения оценили оба варианта без указания, какой из них является констатирующим, а какой предлагается в качестве контрольного, по четырем критериям: соответствие заданий целям диагностики ИИ-компетенции; сопоставимость сложности методических задач; сопоставимость объема и числа оцениваемых элементов; однозначность критериев оценивания. Каждый критерий оценивался по 5-балльной шкале. Согласованность экспертных оценок оценивалась по среднему абсолютному расхождению. Разность средних экспертных оценок между вариантами не превысила 0,3 балла по отдельным критериям и составила 0 баллов по итоговой оценке. Среднее абсолютное расхождение экспертных оценок по всем критериям составило 0,26 балла (при максимально возможном расхождении 4 балла), что свидетельствует о высокой согласованности экспертов и сопоставимой трудности вариантов диагностической работы.

Как показывают полученные данные, на контрольном этапе произошли существенные изменения в распределении студентов по уровням сформированности ИИ-компетенции. Высокий уровень был зафиксирован у 6 студентов (11 %), тогда как на констатирующем этапе такие результаты отсутствовали. Средний уровень продемонстрировали 28 чел. (51 %), что на 33 п. п. превышает показатель констатирующего этапа (18 %). Базовый уровень выявлен у 19 студентов (35 %), тогда как на начальном этапе он составлял 75 %. Низкий уровень сохранился только у 2 студентов (4 %), что свидетельствует о положительной динамике по сравнению с 7 % на констатирующем этапе.

Особого внимания заслуживает динамика по отдельным компонентам ИИ-компетенции, поскольку именно дефициты по операционно-технологическому и методико-педагогическому компонентам были выявлены как наиболее выраженные на констатирующем этапе эксперимента. Сравнительные результаты сформированности компонентов ИИ-компетенции на констатирующем и контрольном этапах (средние баллы и статистическая значимость различий) представлены в таблице.

Сравнительные результаты сформированности компонентов ИИ-компетенции на констатирующем и контрольном этапах (средние баллы и статистическая значимость различий)

Компонент	Макс. Балл	Констатирующий этап (M_1)	Контрольный этап (M_2)	Абсолютный прирост (Δ)	t-критерий Стьюдента	Уровень значимости (p)
Мотивационно-ценностный	15	10,0	11,3	+1,3	2,94	$p < 0,01$
Когнитивно-содержательный	15	9,5	10,8	+1,3	2,71	$p < 0,01$
Операционно-технологический	15	5,0	9,2	+4,2	6,18	$p < 0,01$
Методико-педагогический	25	9,5	13,3	+3,8	6,42	$p < 0,01$
Этико-правовой	15	11,0	12,3	+1,3	2,58	$p < 0,05$
Рефлексивно-профессиональный	15	9,0	10,8	+1,8	3,47	$p < 0,01$
Суммарный балл	100	54,0	67,7	+13,7	7,15	$p < 0,01$

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Данные, представленные в таблице, свидетельствуют о статистически значимой положительной динамике по всем компонентам ИИ-компетенции: по пяти компонентам – на уровне $p < 0,01$, по этико-правовому – на уровне $p < 0,05$ ($t = 2,58$). Наиболее выраженный прирост средних баллов отмечен по операционно-технологическому (+4,2 балла, $t = 6,18$, $p < 0,01$) и методико-педагогическому (+3,8 балла, $t = 6,42$, $p < 0,01$) компонентам, что согласуется с акцентами, сделанными на формирующем этапе, и может рассматриваться как косвенное подтверждение их обоснованности.

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о положительной динамике и позволяют оценить результативность апробированной методики в условиях реализованного плана эксперимента.

Выводы

1. В ходе теоретического анализа уточнена структура ИИ-компетенции будущего учителя иностранного языка, включающая шесть взаимосвязанных компонентов: мотивационно-ценностный, когнитивно-содержательный, операционно-технологический, методико-педагогический, этико-правовой и рефлексивно-профессиональный. Предложенное определение ИИ-компетенции как интегративного профессионально-личностного качества конкретизирует предметное содержание профессиональной подготовки будущего учителя иностранного языка в условиях цифровой трансформации образования.

2. Разработана и теоретически обоснована модель формирования ИИ-компетенции, включающая четыре блока: концептуально-целевой, содержательный, организационно-деятельностный и результативный. Реализация модели предполагает трехэтапный процесс (формирование цифровой грамотности; знакомство с ИИ; методическая интеграция ИИ). В отличие от модели развития ИИ-компетенции у практикующих преподавателей в системе повышения квалификации, представленной в работе [14], авторская модель ориентирована на студентов бакалавриата и встроена в основную образовательную программу, что обеспечивает преемственное формирование компетенции на протяжении обучения на 1–4-м курсах.

3. Определены педагогические условия эффективной реализации модели: поэтапное и преемственное формирование компетенции; практико-ориентированная направленность заданий; использование интерактивных и проектных методов обучения; двойное применение ИИ-инструментов (как предмета освоения и как средства обучения); систематическая рефлексия; интеграция этико-правового компонента во все этапы обучения; связь аудиторной подготовки с реальной педагогической практикой.

4. Полученные данные не противоречат гипотезе о результативности разработанной модели и позволяют рассматривать ее как перспективную для внедрения в практику профессиональной подготовки учителей иностранного языка. При этом следует отметить, что по этико-правовому компоненту достигнутый уровень значимости ($p < 0,05$) ниже, чем по остальным компонентам, что может объясняться высоким исходным уровнем данного компонента ($M_1 = 11,0$ из 15) и, соответственно, меньшим потенциалом прироста. Необходимо учитывать, что апробация модели носила частичный характер: проверке подвергся преимущественно ее завершающий, третий этап – методическая интеграция ИИ в рамках дисциплины «Методика обучения и воспитания (английский язык)» и производственной практики. Первые два этапа, реализуемые на 1–2-м курсах, задали исходный уровень сформированности отдельных компонентов ИИ-компетенции, но не являлись предметом специального экспериментального исследования. В связи с этим полученные результаты следует рассматривать как свидетельство результативности завершающего этапа модели, а не всей ее четырехлетней траектории. Полная оценка модели предполагает исследование, охватывающее все три этапа и все четыре курса обучения.

Список литературы

1. Коновалов А. А., Арбузов С. С., Грибан О. Н. Искусственный интеллект в образовательной деятельности: направления и перспективы использования // Педагогическое образование в России. 2026. № 2. С. 30–42. URL: https://pedobrazovanie.ru/archive/2026/2/iskusstvennyj-intellekt-v-obrazovatelnoj-deyatelnosti-napravleniya-i-perspektivy-ispolzovaniya (дата обращения: 17.07.2026).

2. Гриншкун В. В., Суворова Т. Н. Особенности подготовки педагогов в условиях цифровой трансформации системы образования // Вестник Московского университета. Серия 20. Педагогическое образование. 2024. Т. 22. № 1. С. 95–110. URL: https://msupedj.ru/upload/iblock/15b/2cfghtgun2svh413grwgshd32g236s26/Pedagogics_2024_1_95_110_Grinshkun_Suvorova.pdf (дата обращения: 17.07.2026). DOI: 10.55959/LPEJ-24-05.

3. Евстигнеев М. Н., Евстигнеева И. А. Развитие умений промпт-инжиниринга у будущего педагога иностранного языка // Вестник Тамбовского университета. Серия: Гуманитарные науки. 2025. Т. 30. № 4. С. 795–813. URL: https://vestsutmb.elpub.ru/jour/article/view/1674 (дата обращения: 17.07.2026). DOI: https://doi.org/10.20310/1810-0201-2025-30-4-795-813.

4. Сысоев П. В., Филатов Е. М., Евстигнеев М. Н., Поляков О. Г., Евстигнеева И. А., Сорокин Д. О. Матрица инструментов искусственного интеллекта в лингвометодической подготовке будущих учителей иностранного языка // Вестник Тамбовского университета. Серия: Гуманитарные нау-

ки. 2024. Т. 29. № 3. С. 559–588. URL: https://vestsutmb.elpub.ru/jour/article/view/1207/1102 (дата обращения: 17.07.2026). DOI: 10.20310/1810-0201-2024-29-3-559-588.

5. Сысоев П. В. Этика и ИИ-плагиат в академической среде: понимание студентами вопросов соблюдения авторской этики и проблемы плагиата в процессе взаимодействия с генеративным искусственным интеллектом // Высшее образование в России. 2024. Т. 33. № 2. С. 31–53. URL: https://vovr.elpub.ru/jour/article/view/4804 (дата обращения: 17.07.2026). DOI: 10.31992/0869-3617-2024-33-2-31-53.

6. Евстигнеев М. Н. Планирование учебного занятия по иностранному языку с помощью технологий генеративного искусственного интеллекта // Вестник Тамбовского университета. Серия: Гуманитарные науки. 2024. Т. 29. № 3. С. 617–634. URL: https://vestsutmb.elpub.ru/jour/article/view/1209 (дата обращения: 17.07.2026). DOI: 10.20310/1810-0201-2024-29-3-617-634.

7. Боголепова С. В. Искусственный интеллект в профессиональной деятельности преподавателя иностранного языка: технология обучения на основе кейсов // Преподаватель XXI век. 2025. № 3. Ч. 1. С. 99–113. DOI: 10.31862/2073-9613-2025-3-99-113.

8. Вариясова Е. В., Грамма Д. В. Искусственный интеллект как инструмент оптимизации в профессиональной подготовке преподавателей иностранного языка в вузе // Северный регион: наука, образование, культура. 2025. Т. 26. № 3. С. 24–31. DOI: 10.35266/2949-3463-2025-3-2.

9. Miao F., Cukurova M. AI competency framework for teachers. UNESCO, 2024. 52 p. DOI: 10.54675/ZJTE2084.

10. Минаков А. И. Структура компетенции педагога в области искусственного интеллекта для решения образовательных задач // Мир науки, культуры, образования. 2024. № 4 (107). С. 321–324. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=69155488 (дата обращения: 17.07.2026). DOI: 10.24412/1991-5497-2024-4107-321-324.

11. Сысоев П. В. Компетенция современного педагога в области искусственного интеллекта: структура и содержание // Высшее образование в России. 2025. Т. 34. № 6. С. 58–79. URL: https://vovr.elpub.ru/jour/article/view/5645 (дата обращения: 17.07.2026). DOI: 10.31992/0869-3617-2025-34-6-58-79.

12. Евстигнеев М. Н., Сысоев П. В., Евстигнеева И. А. Компетенция педагога иностранных языков в области искусственного интеллекта // Иностранные языки в школе. 2024. № 3. С. 90–96.

13. Титова С. В., Харламенко И. В. Структура профессиональной компетенции педагога иностранных языков в области использования искусственного интеллекта // Язык и культура. 2025. № 69. С. 220–246. DOI: 10.17223/19996195/69/11.

14. Титова С. В., Темурян К. Т. Профессиональное развитие педагогов иностранных языков в эпоху искусственного интеллекта: требования, компетенции, этапы формирования // Вестник Тамбовского университета. Серия: Гуманитарные науки. 2025. Т. 30. № 5. С. 1038–1062. URL: https://vestsutmb.elpub.ru/jour/article/view/1692 (дата обращения: 13.07.2026). DOI: 10.20310/1810-0201-2025-30-5-1038-1062.

15. Никитина Г. В. Характеристика современных подходов к подготовке педагогических кадров в России // Современная высшая школа: инновационный аспект. 2012. № 2. С. 136–142. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=18001161 (дата обращения: 12.06.2026).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Статья публикуется при поддержке гранта на проведение научно-исследовательских работ по приоритетным направлениям научной деятельности вузов – партнеров по сетевому взаимодействию (ФГБОУ ВО «БГПУ им. М. Акмуллы» – ФГБОУ ВО «МГПУ им. М. Е. Евсевьева»).

Finansing: The funding was provided by a grant for research in priority areas of scientific activity of partner universities for networking (BSPU named after M. Akmulla – MSPU named after M. E. Evsevyev).

УДК 378.147
DOI

CC BY 4.0

ЦИФРОВЫЕ ПЛАТФОРМЫ И ТЕХНОЛОГИИ В ПОДГОТОВКЕ КОНКУРЕНТОСПОСОБНЫХ ВЫПУСКНИКОВ ВУЗА НА СОВРЕМЕННОМ РЫНКЕ ТРУДА

Коноплянский Д. А. ORCID ID 0000-0002-6974-0440

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет», Томск, Российская Федерация, e-mail: lktgasu@mail.ru

Статья посвящена проблеме цифровой трансформации высшего образования, влияющей на обновление содержания и изменение организации профессиональной подготовки студентов вузов и актуализации поиска современных педагогических средств, способствующих формированию конкурентоспособности выпускников. Данная работа исследует влияние социально-педагогических и организационно-педагогических возможностей цифровых платформ и технологий на формирование конкурентоспособности выпускников вуза. Цель исследования состоит в выявлении педагогического потенциала цифровых платформ и технологий в подготовке конкурентоспособных выпускников вуза и определении условий их результативного применения в профессиональном образовании. Материалом исследования послужили отечественные и зарубежные научные публикации 2021–2025 гг. Использованы методы критического анализа научной литературы, синтеза научных мнений, сравнения, обобщения, классификации, систематизации и контент-анализа научных данных. В результате разработана авторская систематизация педагогических возможностей цифровых платформ и технологий. Установлено, что наибольшая значимость имплементации цифровых платформ и технологий в подготовку конкурентоспособных выпускников вуза проявляется в контексте компетентностно-развивающего, практико-ориентированного, оценочно-рефлексивного и организационно-методического сопровождения. Определены организационно-педагогические условия применения цифровых технологий, включающие их интеграцию в профессиональную подготовку, практико-ориентированность, индивидуализацию, обратную связь, профессиональное взаимодействие, методическую готовность преподавателя и непрерывность цифрового развития. Существенное заключение состоит в научной новизне исследования, заключающейся в систематизации педагогических возможностей цифровых платформ и технологий с позиции их влияния на формирование качеств конкурентоспособного выпускника. Сделан вывод о необходимости системного педагогически обоснованного включения цифровых технологий в профессиональную подготовку студентов. Предложено рассматривать цифровые инструменты не только как средства организации учебного процесса, но и как компонент профессионально ориентированной образовательной среды.

Ключевые слова: цифровые платформы, профессиональное образование, конкурентоспособность, выпускник, цифровые компетенции, цифровизация

DIGITAL PLATFORMS AND TECHNOLOGIES IN THE TRAINING OF COMPETITIVE UNIVERSITY GRADUATES IN THE MODERN LABOR MARKET

Konoplyanskiy D. A. ORCID ID 0000-0002-6974-0440

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Tomsk State University of Architecture and Building", Tomsk, Russian Federation, e-mail: lktgasu@mail.ru

The article addresses the issue of digital transformation in higher education, which affects the updating of content and the reorganization of professional training for university students, as well as the actualization of the search for modern pedagogical tools that contribute to the development of graduates' competitiveness. This work explores the impact of the socio-pedagogical and organizational-pedagogical capabilities of digital platforms and technologies on the development of graduates' competitiveness. The aim of the study is to identify the pedagogical potential of digital platforms and technologies in preparing competitive university graduates and to determine the conditions for their effective application in professional education. The research material consists of domestic and foreign scientific publications from 2021 to 2025. Methods of critical analysis of scientific literature, synthesis of scientific opinions, comparison, generalization, classification, systematization, and content analysis of scientific data were used. As a result, an author's systematization of the pedagogical potential of digital platforms and technologies was developed. It was established that the greatest significance of implementing digital platforms and technologies in the training of competitive university graduates is manifested in the context of competence-developing, practice-oriented, evaluative-reflective, and organizational-methodological support. The organizational and pedagogical conditions for the use of digital technologies have been identified, including their integration into professional training, practice-oriented approach, individualization, feedback, professional interaction, the teacher's methodological readiness, and the continuity of digital development. A significant conclusion lies in the scientific novelty of the research, which consists in systematizing the pedagogical potential of digital platforms and technologies from the perspective of their impact on the formation of the qualities of a competitive graduate. The conclusion is drawn that there is a need for a systematic, pedagogically grounded inclusion of digital technologies in students' professional training. It is proposed to consider digital tools not only as means of organizing the learning process, but also as a component of a professionally oriented educational environment.

Keywords: digital platforms, professional education, digital competencies, competitiveness, graduate, digitalization

Введение

Цифровая трансформация экономики и изменения социально-экономической ситуации влияют на положение молодежи на современном рынке труда. Особую значимость приобретает вопрос ее профессиональной конкурентоспособности, так как сохраняются сложности с трудоустройством молодых специалистов и одновременно возрастает потребность экономики в квалифицированных кадрах. В 2023–2024 гг. в структуре российской экономики произошел рост ВВП на 8,5 % и снижение уровня безработицы до рекордно низкого показателя в 2,4 % [1].

Недостаток работников особенно заметен в сегменте квалифицированного труда. Потребность предприятий в специалистах усиливается в связи с необходимостью технологического обновления, реализации инновационных проектов и решения задач импортозамещения. А. В. Мурычев также обращает внимание на обострение кадрового дефицита и возрастающую потребность российского бизнеса в квалифицированных специалистах [2].

Одновременно цифровые технологии становятся важным фактором развития системы высшего образования. Их внедрение меняет организацию образовательной деятельности и влияет на конкурентные позиции университетов, создавая возможности для более гибкого реагирования на запросы студентов и изменение требований рынка труда [3].

Цифровая трансформация высшего учебного заведения (вуза) при этом охватывает значительно более широкий круг изменений, чем внедрение отдельных технологических решений. Она затрагивает образовательный процесс, систему управления, инфраструктуру, коммуникационные механизмы и организационную культуру университета. Основой подобных преобразований становится использование цифровых технологий и данных при организации деятельности образовательной организации и взаимодействии с участниками образовательного процесса [4].

Опыт экономически развитых государств, включая США, Японию, Канаду, Южную Корею, Австрию, Данию, Великобританию, Германию, Израиль и Норвегию, свидетельствует о значимой роли ЦТ в системе высшего образования. Их применение способствует не только совершенствованию образовательного процесса, но и реализации программ социально-экономического развития, ориентированных на повышение уровня благосостояния населения и укрепление конкурентных позиций страны в мировой экономике [5].

Научная новизна исследования заключается в систематизации педагогических возможностей цифровых платформ и технологий с позиции их влияния на формирование качеств конкурентоспособного выпускника.

Цель исследования – выявление социально-педагогических и организационно-педагогических возможностей цифровых платформ и цифровых технологий в подготовке конкурентоспособных выпускников вуза и определение условий их эффективного применения в современном высшем образовании.

Материалы и методы исследования

Исследование носило обзорно-аналитический характер. Материалом послужили отечественные и зарубежные научные публикации 2021–2025 гг. Они посвящены цифровой трансформации высшего образования, применению цифровых образовательных платформ, формированию профессиональных и цифровых компетенций, профессиональной готовности и конкурентоспособности выпускников вуза. При анализе преимущественное внимание уделялось социально-педагогическим и организационно-педагогическим аспектам цифровой трансформации высшего образования.

Применялись методы анализа, сравнения, обобщения, классификации и систематизации научных данных. Дополнительно проведен контент-анализ публикаций по шести категориям: компетентностно-развивающей, практико-ориентированной, оценочно-рефлексивной, организационно-методической, индивидуализирующей и коммуникативно-кооперативной. Единицей анализа являлось содержательное положение публикации, характеризующее соответствующую педагогическую функцию цифровых технологий. Наличие категории фиксировалось по бинарному принципу. Одна публикация могла быть отнесена одновременно к нескольким категориям. По каждой категории рассчитаны абсолютная частота и доля от общего количества проанализированных публикаций. На основе полученных данных разработана авторская систематизация педагогических возможностей цифровых платформ и определены организационно-педагогические условия их применения в подготовке конкурентоспособных выпускников.

Результаты исследования и их обсуждение

В современных исследованиях цифровая трансформация высшего образования рассматривается прежде всего через изменение способов организации обучения

и взаимодействия его участников. В своих исследованиях В. И. Блинов, Е. Ю. Есенина и И. С. Сергеев связывают смешанное обучение с преобразованием совместной деятельности преподавателя и обучающихся и выделяют его организационно-дидактические характеристики [6]. Такой подход позволяет рассматривать ЦТ как средство изменения форм и методов профессиональной подготовки.

Одним из значимых результатов цифровой трансформации становится формирование цифровых компетенций студентов. В своих работах Г. С. Вяликова с соавт. рассматривают владение ими как необходимый ресурс профессиональной подготовки и конкурентоспособности будущего специалиста. Формирование инновационных навыков предполагает их включение в содержание образовательной деятельности и систематическую оценку достигнутых результатов [7].

Отдельное направление исследований связано с применением цифрового портфолио. Н. В. Тихонова рассматривает его как средство оценивания профессиональных компетенций будущих специалистов [8]. М. И. Бернадинер и О. Ю. Заславская связывают электронное портфолио с оценкой личностных и профессиональных образовательных результатов студентов [9]. В. А. Сотова показывает, что цифровое портфолио может применяться для фиксации достижений, мониторинга надпрофессиональных компетенций и персонализации образовательного процесса [10].

Значение цифровых средств проявляется и в сопровождении профессионального становления обучающихся. Так, А. А. Марголис с соавт. установили, что специально организованная образовательная среда с использованием электронного портфолио, совместно с регулярной работой куратора-супервизора, способствует развитию рефлексивного отношения студентов к собственному обучению и образовательным результатам [11].

В зарубежных исследованиях особое внимание уделяется связи цифровой образовательной среды (ЦОС) с подготовкой студентов к профессиональной деятельности. Например, ученые M.-J. Martínez-Argüelles, D. Plana-Erta и À. Fitó-Bertran показали, что применение аутентичных профессионально ориентированных заданий в онлайн-среде способствует развитию компетенций и повышению готовности студентов к трудовой деятельности [12]. Это подтверждает значение моделирования профессиональных ситуаций в цифровой образовательной среде (ЦОС).

P. Heymann с соавт. связывают использование онлайн-платформ с развитием компетенций, значимых для последующего трудоустройства. Авторы выделяют такие элементы, как диагностика имеющихся компетенций, постановка целей, выбор образовательных действий и последующая рефлексия полученного опыта [13]. Такой подход позволяет использовать цифровую платформу для индивидуализации профессиональной подготовки.

Результаты систематического обзора научной литературы, проведенного R. Scandurra с соавт., показывают, что программы развития готовности выпускников к трудовой деятельности включают комплекс образовательных мероприятий, направленных на развитие компетенций студентов и облегчение перехода от обучения к профессиональной деятельности [14]. Однако следует отметить, что существующая доказательная база недостаточно надежна для установления причинного влияния программ на развитие студентов и их карьерные результаты на рынке труда. Поэтому конкурентоспособность выпускника может рассматриваться как результат его целенаправленно организованной профессиональной подготовки для успешного выхода на рынок труда: от занятий в аудитории до стажировок и проектов с работодателями.

T. Gao обращает внимание на значение критического мышления для профессиональной готовности выпускников и рассматривает возможности цифровых образовательных технологий для его развития [15]. В данном контексте педагогический потенциал ЦТ связан с формированием способов анализа информации и решения профессиональных задач.

S. Otto с соавт. выделяют цифровые практики, поддерживающие совместное и студентоцентрированное обучение, развитие компетенций и цифровой грамотности. Большое значение приобретают взаимодействие студентов с преподавателями и другими обучающимися, совместное решение задач и активное включение в образовательную деятельность [16]. Это позволяет рассматривать ЦОС также с социально-педагогических позиций.

Результативность использования цифровых платформ во многом определяется готовностью преподавателей к их педагогически обоснованному применению. C. Fernández-Morante с соавт. подчеркивают значение цифровой компетентности преподавателей высшей школы и необходимость методической поддержки, ориентированной на совершенствование педагогической деятельности с использованием цифровых

средств [17]. Поэтому цифровая компетентность преподавателя выступает одним из организационно-педагогических условий результативной подготовки студентов.

Таким образом, современные исследования позволяют выделить несколько направлений применения цифровых платформ и технологий в профессиональном образовании: развитие профессиональных и цифровых компетенций, организация практико-ориентированной деятельности, индивидуализация обучения, профессиональная рефлексия, оценка образовательных достижений и расширение взаимодействия участников образовательного процесса. Вместе с тем данные направления исследуются раздельно, что обусловливает необходимость их систематизации с позиции подготовки конкурентоспособного выпускника вуза.

Проведенный анализ отечественных и зарубежных научных публикаций показал, что педагогический потенциал цифровых платформ в профессиональной подготовке студентов определяется характером их включения в образовательную деятельность. Использование цифрового инструмента само по себе не обеспечивает формирования качеств конкурентоспособного выпускника. Значение приобретают педагогические задачи, для решения которых применяется технология, содержание деятельности студентов и способы взаимодействия участников образовательного процесса.

На основе обобщения выявленных подходов разработана авторская систематизация цифровых платформ и технологий по выполняемым ими педагогическим функциям (табл. 1).

Предложенная систематизация показывает, что связь цифровых технологий с конкурентоспособностью выпускника имеет преимущественно педагогический характер. Цифровые платформы создают среду для выполнения профессионально ориентированных заданий, взаимодействия, самостоятельной деятельности, оценки собственных результатов и последовательного формирования компетенций. Поэтому их педагогическая ценность определяется соответствием цифрового средства целям и содержанию профессиональной подготовки студентов.

Таблица 1

Систематизация педагогических возможностей цифровых платформ и технологий в подготовке конкурентоспособного выпускника вуза

Педагогическая функция	Цифровые средства и формы их применения	Педагогические возможности	Результат профессиональной подготовки
Компетентностно-развивающая	LMS, электронные курсы, цифровые задания, онлайн-ресурсы	Освоение профессионального содержания и применение цифровых инструментов при решении учебно-профессиональных задач	Профессиональные и цифровые компетенции, критическое мышление
Практико-ориентированная	Профессионально ориентированные онлайн-задания, цифровые кейсы, проектная деятельность	Моделирование ситуаций будущей профессиональной деятельности и применение знаний при решении практических задач	Готовность к профессиональной деятельности, способность решать профессиональные задачи
Оценочно-рефлексивная	Цифровое портфолио, электронный мониторинг, цифровая обратная связь	Фиксация достижений, выявление образовательных дефицитов, самооценка и рефлексия результатов	Способность оценивать собственные достижения и корректировать профессиональное развитие
Индивидуализирующая	Индивидуальные цифровые маршруты, персонализированные задания, электронное портфолио	Учет образовательных потребностей, темпа и индивидуальных результатов студента	Самостоятельность, ответственность, готовность к непрерывному обучению
Коммуникативно-кооперативная	Платформы совместной работы, цифровые коммуникационные среды, групповые онлайн-проекты	Организация взаимодействия студентов, преподавателей и участников профессиональной среды	Профессиональная коммуникация, командная работа, социальная адаптивность
Организационно-методическая	Системы смешанного обучения, LMS, цифровые образовательные ресурсы и средства сопровождения	Интеграция цифровых средств в содержание и организацию профессиональной подготовки	Системность цифровой подготовки и повышение вариативности образовательного процесса

Примечание: составлена автором на основе анализа источников [5; 6; 10]

Таблица 2

Организационно-педагогические условия применения цифровых платформ и технологий в подготовке конкурентоспособного выпускника вуза

Организационно-педагогическое условие	Содержание условия	Механизм реализации в образовательном процессе	Ожидаемый результат
Интеграция цифровых технологий в содержание профессиональной подготовки	Включение цифровых средств непосредственно в освоение профессиональных дисциплин и решение профильных задач	Использование LMS, цифровых ресурсов, профессиональных программ и электронных заданий в рамках учебных дисциплин	Формирование взаимосвязанных профессиональных и цифровых компетенций
Практико-ориентированная направленность цифрового обучения	Моделирование ситуаций, приближенных к будущей профессиональной деятельности	Цифровые кейсы, симуляции, проектные задания, виртуальные профессиональные ситуации	Готовность применять знания при решении профессиональных задач
Индивидуализация образовательной деятельности	Учет различий в темпе обучения, уровне подготовки, образовательных потребностях и профессиональных интересах студентов	Индивидуальные задания, вариативные цифровые маршруты, электронные образовательные ресурсы разного уровня сложности	Развитие самостоятельности, ответственности и готовности к самообразованию
Систематическая обратная связь и мониторинг результатов	Регулярное получение информации о динамике образовательных результатов	Цифровое тестирование, электронное портфолио, автоматизированная и преподавательская обратная связь	Своевременное выявление дефицитов и коррекция индивидуальной траектории обучения
Организация цифрового профессионального взаимодействия	Расширение взаимодействия студентов с преподавателями, одногруппниками и представителями профессиональной среды	Совместные онлайн-проекты, цифровые коммуникационные площадки, профессиональные сообщества	Развитие коммуникативных навыков, командной работы и профессиональной мобильности
Методическая готовность преподавателя	Способность педагогически обоснованно выбирать и применять цифровые инструменты	Повышение цифровой и методической компетентности, разработка цифровых заданий и сценариев учебной деятельности	Повышение качества организации цифрового образовательного процесса
Обеспечение непрерывности профессионального и цифрового развития	Последовательное применение цифровых технологий на различных этапах обучения	Интеграция цифровых заданий в дисциплины, практики, проекты, самостоятельную и исследовательскую работу	Готовность выпускника к непрерывному профессиональному развитию и адаптации к изменяющимся требованиям рынка труда

Примечание: составлена автором на основе анализа источников [12; 14; 16]

Для определения наиболее представленных направлений применения цифровых платформ и технологий в образовательной практике по подготовке конкурентоспособных выпускников вуза был проведен контент-анализ научных публикаций [6; 7; 13; 15; 17], которые вошли в теоретическую базу исследования, что позволило выявить: компетентностно-развивающее, практико-ориентированное, оценочно-рефлексивное, организационно-методическое, индивидуализирующее и коммуникативно-кооперативное.

Преобладание компетентностно-развивающего воздействия показывает, что цифровая трансформация высшего образования в научном дискурсе наиболее часто связывается с формированием профессиональных, цифровых и универсальных компетенций студентов. Вторую позицию занимает практико-ориентированное направление. Оно отражает стремление приблизить образовательную деятельность студентов к условиям их будущей профессиональной деятельности.

В то же время индивидуализирующие и коммуникативно-кооперативные возможности цифровых платформ представлены реже. Полученное соотношение позволяет выделить социально-педагогический аспект

как одно из направлений, требующих более последовательного включения в цифровую профессиональную подготовку. Цифровая среда должна обеспечивать не только освоение содержания и контроль результатов, но и взаимодействие, совместную деятельность, профессиональную рефлексию и развитие самостоятельности студента.

Обобщение результатов позволило определить организационно-педагогические условия, при которых цифровые платформы могут быть связаны с подготовкой конкурентоспособного выпускника. К ним относятся содержательная интеграция цифровых средств в профессиональные дисциплины; использование профессионально ориентированных и практических заданий; систематическая цифровая обратная связь и мониторинг образовательных результатов; поддержка индивидуальной образовательной траектории; организация совместной деятельности и профессиональной коммуникации; методическая и цифровая готовность преподавателя.

На следующем этапе исследования были конкретизированы организационно-педагогические условия, при которых цифровые платформы и технологии могут оказывать устойчивое влияние на качество профессиональной подготовки студентов. Проведенный анализ показал, что педагогический эффект цифровой трансформации определяется степенью их включенности в содержание профессиональной подготовки, характером взаимодействия участников образовательного процесса и возможностью применять цифровые инструменты для решения учебно-профессиональных задач. На этой основе выделены семь взаимосвязанных организационно-педагогических условий, представленных в табл. 2.

Представленные организационно-педагогические условия образуют взаимосвязанную систему. Содержательная интеграция цифровых технологий позволяет включать цифровые инструменты непосредственно в решение профессиональных задач, благодаря чему формируемые навыки приобретают прикладной характер.

Практико-ориентированная направленность цифрового обучения связана с использованием кейсов, проектных заданий, симуляций и иных форм, моделирующих профессиональные ситуации. Это способствует развитию способности применять знания, анализировать информацию и принимать решения в условиях, приближенных к будущей профессиональной деятельности. Индивидуализация образовательного процесса обеспечивает возможность учитывать уровень подготовки, темп обучения и образовательные потребности студентов. Цифровые платформы при этом поддерживают самостоятельное планирование деятельности и развитие ответственности за образовательные результаты. Систематическая обратная связь реализуется посредством электронного портфолио, цифрового мониторинга и текущего оценивания. Она позволяет фиксировать динамику достижений, выявлять профессиональные дефициты и своевременно корректировать образовательную траекторию. Социально-педагогический аспект проявляется в организации цифрового профессионального взаимодействия. Совместные проекты, сетевые коммуникации и профессиональные сообщества способствуют развитию командной работы, профессиональной коммуникации и социальной адаптивности. Значимым условием выступает методическая готовность преподавателя к педагогически обоснованному выбору цифровых инструментов в соответствии с целями и содержанием подготовки. Непрерывность цифрового и профессионального развития предполагает их последовательное применение в учебной, проектной, исследовательской и практической деятельности студентов.

Заключение

Проведенное исследование показало, что цифровые платформы и технологии обладают значительным педагогическим потенциалом в подготовке конкурентоспособных выпускников вуза. Их результативность определяется системной интеграцией в содержание профессионального образования, практико-ориентированной направленностью, индивидуализацией обучения, развитием цифрового взаимодействия и организацией постоянной обратной связи. Выделенные организационно-педагогические условия способствуют формированию профессиональных и цифровых компетенций, самостоятельности, критического мышления, коммуникативных навыков и готовности выпускников к адаптации и непрерывному профессиональному развитию.

Предложено рассматривать цифровые инструменты не только как средства организации учебного процесса, но и как компонент профессионально ориентированной образовательной среды. Он обеспечивает развитие цифровых и профессиональных компетенций, самостоятельности, способности к профессиональному взаимодействию, адаптации и непрерывному обучению. Разработана авторская систематизация цифровых технологий по их педагогическим функциям и определены организационно-

педагогические условия их результативного применения в подготовке студентов к будущей профессиональной деятельности.

Полученные результаты позволяют рассматривать цифровые технологии как компонент профессионально ориентированной образовательной среды. Через него формируется связь между содержанием подготовки и требованиями современной профессиональной деятельности. Особое значение приобретает педагогически обоснованный выбор цифровых инструментов, при котором технология используется в соответствии с конкретными образовательными задачами и ожидаемыми результатами подготовки.

Перспективным направлением дальнейших исследований является разработка и апробация педагогических механизмов оценки эффективности цифровых платформ с точки зрения их влияния на профессиональную готовность, адаптивность и конкурентоспособность выпускников вуза.

Список литературы

1. Масленникова Е. В., Антонова О. А., Колмакова И. Д. Направления повышения конкурентоспособности молодежи на рынке труда // Экономика труда. 2025. Т. 12. № 7. С. 1035–1058. DOI: 10.18334/et.12.7.123506. EDN: UZIUPZ.

2. Мурычев А. В. Ключевые направления развития российской экономики: взгляд бизнеса // Научные труды Вольного экономического общества России. 2024. Т. 248. № 4. С. 188–191. DOI: 10.38197/2072-2060-2024-248-4-188-191. EDN: KGKPHF.

3. Гаврилюк Е. С., Изотова А. Г., Бикмулина Т. Н. Влияние цифровой трансформации на коммуникационные стратегии вуза: изменение характера отношений со студентами и абитуриентами // Естественно-гуманитарные исследования. 2025. № 1 (57). С. 116–125. EDN: OFFPIK.

4. Еленева Ю. Я., Можаровская А. А., Демушкин Д. И. Цифровая трансформация образовательных организаций высшего образования: современное состояние, задачи, риски // Экономика, предпринимательство и право. 2024. Т. 14. № 4. С. 1149–1170. DOI: 10.18334/epp.14.4.120670. EDN: FHOYPO.

5. Жуковская И. Е. Основные тренды совершенствования деятельности высшего учебного заведения в условиях цифровой трансформации // Открытое образование. 2021. Т. 25. № 3. С. 15–25. DOI: 10.21686/1818-4243-2021-3-15-25. EDN: ROMTTV.

6. Блинов В. И., Есенина Е. Ю., Сергеев И. С. Модели смешанного обучения: организационно-дидактическая типология // Высшее образование в России. 2021. Т. 30. № 5. С. 44–64. DOI: 10.31992/0869-3617-2021-30-5-44-64. EDN: YMTLMQ.

7. Вяликова Г. С., Ерофеева М. А., Плеханова М. В., Плужникова Ю. А. Мониторинг процесса формирования цифровых компетенций у студентов вуза // Прикладная психология и педагогика. 2024. Т. 9. № 4. С. 1–20. DOI: 10.12737/2500-0543-2024-9-4-1-20. EDN: WUXHHE.

8. Тихонова Н. В. Использование цифрового портфолио при оценивании профессиональных компетенций будущих учителей // Казанский лингвистический журнал. 2021. Т. 4. № 3. С. 440–457. DOI: 10.26907/2658-3321.2021.4.3.440-457. EDN: PJJBXJ.

9. Бернадинер М. И., Заславская О. Ю. Электронное портфолио как средство оценки достижений студентов педагогических вузов // Вестник МГПУ. Серия «Информатика и информатизация образования». 2023. № 1 (63). С. 58–67. DOI: 10.25688/2072-9014.2023.63.1.05. EDN: ZPXQTT.

10. Сотова В. А. Цифровое портфолио студента в практике ведущих российских университетов // Вестник Шадринского государственного педагогического университета. 2025. № 4 (68). С. 166–171. DOI: 10.52772/25420291_2025_4_166. EDN: INHFXC.

11. Марголис А. А., Сафронова М. А., Дробязько А. А., Куравский Л. С., Голованова И. А., Поминов Д. А. Электронное портфолио как средство формирования рефлексивного отношения студентов к учебе // Психолого-педагогические исследования. 2021. Т. 13. № 2. С. 3–16. DOI: 10.17759/psyedu.2021130201. EDN: YFARRW.

12. Martínez-Argüelles M.-J., Plana-Erta D., Fitó-Bertran À. Impact of Using Authentic Online Learning Environments on Students' Perceived Employability // Educational Technology Research and Development. 2023. Vol. 71. Is. 2. P. 605–627. DOI: 10.1007/s11423-022-10171-3.

13. Heymann P., Hukema M., van Rosmalen P., Beausaert S. Towards Design Principles for an Online Learning Platform Providing Reflective Practices for Developing Employability Competences // Education and Information Technologies. 2024. Vol. 29. Is. 13. P. 17211–17234. DOI: 10.1007/s10639-024-12530-4.

14. Scandurra R., Kelly D., Fusaro S., Cefalo R., Hermannsson K. Do Employability Programmes in Higher Education Improve Skills and Labour Market Outcomes? A Systematic Review of Academic Literature // Studies in Higher Education. 2024. Vol. 49. Is. 8. P. 1381–1396. DOI: 10.1080/03075079.2023.2265425.

15. Gao T. Employability of College Students in the New Digital Era: Which Thinking Skills Are Optimal? // Interactive Learning Environments. 2023. Vol. 31. Is. 10. P. 7029–7039. DOI: 10.1080/10494820.2022.2059521.

16. Otto S., Bertel L. B., Lyngdorf N. E. R., Markman A. O., Andersen T., Ryberg T. Emerging Digital Practices Supporting Student-Centered Learning Environments in Higher Education: A Review of Literature and Lessons Learned from the Covid-19 Pandemic // Education and Information Technologies. 2024. Vol. 29. Is. 2. P. 1673–1696. DOI: 10.1007/s10639-023-11789-3.

17. Fernández-Morante C., Cebreiro López B., Casal-Otero L., Mareque León F. Teachers' Digital Competence. The Case of the University System of Galicia // Journal of New Approaches in Educational Research. 2023. Vol. 12. Is. 1. P. 62–76. DOI: 10.7821/naer.2023.1.1139.

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest.

Финансирование: Автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 378.147
DOI

CC BY 4.0

ТЕХНОЛОГИЯ ПОДГОТОВКИ ИНЖЕНЕРОВ-НЕФТЯНИКОВ ДЛЯ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОГО НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА

[1]Минин М. Г. ORCID ID 0009-0003-5848-9080,
[2]Савельева Н. Н. ORCID ID 0000-0001-5075-9590

[1]Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Томск, Российская Федерация;
[2]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Российская Федерация, e-mail: nnsavelieva@yandex.ru

Применение цифровых оболочек, методов моделирования систем и объектов, цифровых двойников, предиктивной диагностики и искусственного интеллекта способствуют цифровой трансформации нефтегазового комплекса и обеспечивают технологическое лидерство России. Индустрия 4.0, промышленный интернет вещей, искусственный интеллект встраивается в производственные и технологические процессы. Выпускники технических вузов должны уметь работать в цифровом профессиональном пространстве. Цифровая трансформация меняет требования к результатам подготовки инженерных кадров, перестраивает процесс обучения с встраиванием цифровых инструментов в инженерные науки. Исследование основывается на методологическом анализе научных работ по педагогической дидактике и педагогическом эксперименте по цифровой трансформации образовательного процесса технического вуза. Проведенный анализ научных работ по вопросам цифровизации образовательного процесса позволил выделить направления модернизации подготовки инженеров-нефтяников для обеспечения образовательных результатов в соответствии с требованиями работодателей. Для выполнения поставленной цели была разработана технология подготовки будущих инженеров-нефтяников для высокотехнологичного нефтегазового комплекса, которая предлагает формирование цифровых компетенций у обучающихся посредством цифровых образовательных ресурсов и искусственного интеллекта. Цифровые инструменты обучения вводятся на каждом курсе в дисциплины для постепенного погружения в цифровую профессиональную среду. В течение педагогического эксперимента проводилась диагностика состояния подготовки обучающихся на каждом этапе (курсе). Рассмотрены основные цифровые образовательные ресурсы обеспечения образовательного процесса и проанализированы возможности и перспективы применения искусственного интеллекта для поддержки и сопровождения подготовки инженеров-нефтяников. Применение цифровых образовательных ресурсов при подготовке инженеров-нефтяников способствует гармоничному развитию личности и будущего профессионала. Предложенная технология может быть использована для организации обучения будущих инженеров-нефтяников в технических вузах.

Ключевые слова: цифровая трансформация, онлайн-обучение, цифровые образовательные ресурсы, подготовка инженеров-нефтяников, искусственный интеллект, нефтегазовое оборудование, тренажеры

TECHNOLOGY FOR TRAINING PETROLEUM ENGINEERS FOR THE HIGH-TECH OIL AND GAS INDUSTRY

[1]Minin M. G. ORCID ID 0009-0003-5848-9080,
[2]Saveleva N. N. ORCID ID 0000-0001-5075-9590

[1]Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "National Research Tomsk Polytechnic University", Tomsk, Russian Federation;
[2]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Tyumen Industrial University", Tyumen, Russian Federation, e-mail: nnsavelieva@yandex.ru

The use of digital shells, methods for modeling systems and objects, digital twins, predictive diagnostics, and artificial intelligence contributes to the digital transformation of the oil and gas sector and ensures Russia's technological leadership. Industry 4.0, the Internet of Things, and artificial intelligence are becoming an integral part of production and technological processes. Graduates of technical universities must be able to work in a digital professional environment. Digital transformation is changing the requirements for the competencies of engineering personnel, necessitating the updating of educational programs and the restructuring of the learning process with the integration of digital tools into engineering sciences. The study is based on a methodological analysis of scientific works on pedagogical didactics and a pedagogical experiment on the digital transformation of the educational process in a technical university. The analysis of scientific works on the digitalization of the educational process made it possible to identify the directions for modernizing the training of petroleum engineers to ensure educational outcomes in line with the requirements of employers. To achieve the set goal, a technology for training future petroleum engineers for the high-tech oil and gas sector was developed; it proposes the development of digital competencies among students through digital educational resources and artificial intelligence. Digital learning tools were introduced in each course across various disciplines to gradually immerse students in the digital professional environment. During the pedagogical experiment, diagnostics were carried out to assess the level of students' preparedness at each stage of the experiment. The main digital educational resources supporting the educational process were examined, and the possibilities and prospects of using artificial intelligence to support and facilitate the training of oil and gas engineers were analysed. The proposed technology can be used to organise the training of future oil and gas engineers at technical universities. The use of digital educational resources in the training of oil and gas engineers contributes to the harmonious development of the individual and the future professional.

Keywords: digital transformation, online learning, digital educational resources, artificial intelligence, training of petroleum engineers, oil and gas equipment, training simulators

Введение

Рынок труда требует от выпускников инженеров-нефтяников высокого уровня готовности к будущей деятельности на производстве в условиях цифровой трансформации. Применение в нефтегазовом комплексе цифровых оболочек, методов моделирования систем и объектов, технологии больших данных, цифровых двойников, предиктивной диагностики и искусственного интеллекта обеспечивает технологическое лидерство нефтегазового комплекса России [1, с. 58]. Цифровые компетенции необходимы для работы в нефтегазовом комплексе, и, по мнению работодателей, они являются дефицитами подготовки инженеров-нефтяников [2, с. 15]. Индустриальные партнеры подчеркивают, что выпускники технических вузов должны уметь работать с профессиональными программами, владеть цифровыми компетенциями и использовать искусственный интеллект для выполнения профессиональных задач [3]. Цифровая трансформация требует перестройки процесса подготовки будущих инженеров [4]. Решением данной проблемы стала разработка технологии подготовки инженеров-нефтяников для высокотехнологичного нефтегазового комплекса.

Цель исследования – разработать и обосновать технологию подготовки инженеров-нефтяников с использованием цифровых средств обучения (ЦСО) для высокотехнологичного нефтегазового комплекса и провести ее апробацию в образовательном процессе технического вуза.

Материалы и методы исследования

Методы исследования: анализ профессиональных стандартов нефтегазового комплекса, опрос удовлетворенности работодателей, изучение научных и научно-педагогических работ в области цифровизации образования, педагогический эксперимент в Тюменском индустриальном университете.

Результаты исследования и их обсуждение

Технология подготовки инженеров – это не просто набор дисциплин, а целостная система, которая сочетает фундаментальное образование с глубокой практико-ориентированной составляющей, развивает необходимые компетенции и готовит специалиста к работе в условиях быстро меняющегося технологического уклада. Можно отметить, что технология подготовки обладает следующими признаками: целеполагание, плановость, непрерывность, обоснованность, персонализация, диагностируемость, достижение планируемого результата. Многие ученые изучали технологии обучения: Л. С. Выготский заложил теоретические основы обучения [1], а В. П. Беспалько [5], Э. Ф. Зеер [6], К. Дьюк, Г. К. Селевко [7] и др. разрабатывали образовательные технологии на основе разных подходов.

В созданной технологии подготовки инженеров-нефтяников особое внимание уделено цифровым образовательным ресурсам. В нашем представлении, это не новая образовательная технология, а иной уровень организации обучения по созданию инженера нового типа, способного, применяя цифровые технологии, обслуживать производство на протяжении всего жизненного цикла изделия с увеличением эффективности технологического процесса [8; 9]. Ключевыми принципами технологии подготовки будущих инженеров-нефтяников являются участие индустриальных партнеров в проектировании образовательных программ; повышение практико-ориентированности образовательного процесса подготовки специалиста быстро адаптирующегося к рынку труда; развитие компетенций на основе цифровых технологий и ИИ. Главной особенностью является погружение в решение реальных производственных задач через производственные практики, проведение практических и лабораторных работ с использованием цифровых средств обучения, выполнение проектов по реальным заказам индустриальных партнеров. Подготовку сопровождают цифровые инструменты: компьютерное моделирование пластовых систем, программные комплексы для проектирования и оптимизации добычи углеводородов, виртуальная и дополненная реальность (VR/AR) для отработки действий в штатных и нештатных ситуациях. Это повышает эффективность освоения материала и реализацию индивидуальных образовательных траекторий с учетом выбранного профиля. По результатам обучения проводят оценку сформированных цифровых компетенций: В целом технология подготовки инженеров-нефтяников направлена на то, чтобы как можно раньше «погрузить» студента в профессиональную среду, связать абстрактные знания с реальными вызовами индустрии.

Реализации технологии подготовки инженеров-нефтяников проходит по этапам (курсам), каждый курс наполняется цифровым дидактическим сопровождением образовательного процесса. Дидактическое сопровождение, представляет систему взаимосвязанных средств обучения, которая обеспечивает единство педагогического воздействия и помогает эффективно решать образовательные задачи на разных этапах

обучения с участием работодателей. Дидактический комплекс подготовки инженеров-нефтяников включает цифровые программно-аппаратные средства и учебно-методические материалы: электронную образовательную среду Educon, массовые открытые онлайн-курсы (МООК), виртуальные лабораторные работы (ВЛР), прикладную профессиональную программу «Компас 3D V25» для 3D моделирования, автоматизированные рабочие места по управлению добычей нефти и газа (АРМ СУ ДНГ), конструкторскую лабораторию с возможностью применения аддитивных технологий (3D печати), электронные учебники, методические указания и пособия, автоматизированные программы для оценки итоговых знаний, чат-боты и др.

Педагогический процесс построен последовательно, на каждом курсе студент погружается в профессиональную среду и решает реальные задачи отрасли. Организация образовательного процесса построена на электронной образовательной среде Educon Тюменского индустриального университета (ТИУ). Обучающийся, используя электронную среду на протяжении всего обучения в вузе, может изучать теоретический материал в виде текста, презентаций или видео (рис. 1), выполнять практические и лабораторные работы используя ВЛР, проходить тесты контроля и т. п. [10; 11].

Для изучения *естественно-научных дисциплин* созданы массовые открытые онлайн-курсы (МООК), которые позволяют обучать большое количество обучающихся, где бы они ни находились, в удобном темпе, совмещая с работой или другой занятостью. Студент выступает субъектом собственной учебной деятельности, формирует компетенции, а обучение трансформируется в гибридное.

На 1-м курсе освоение инженерных дисциплин начинается с профессиональной программы «Компас 3D V25» предназначенной для конструкторской подготовки студентов и развития цифровых компетенций в виде выполнения трехмерного моделирования объектов, расчетов физических величин и прочностных характеристик объекта, сборочных чертежей, спецификаций и другой технической документации (дисциплины «Компьютерная графика», «Инженерный дизайн»).

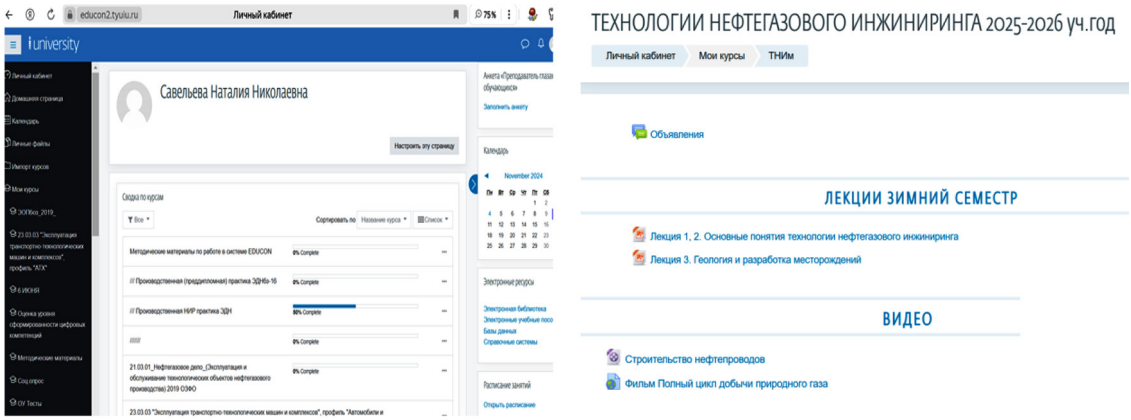


Рис. 1. Программа поддержки учебного процесса Educon
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

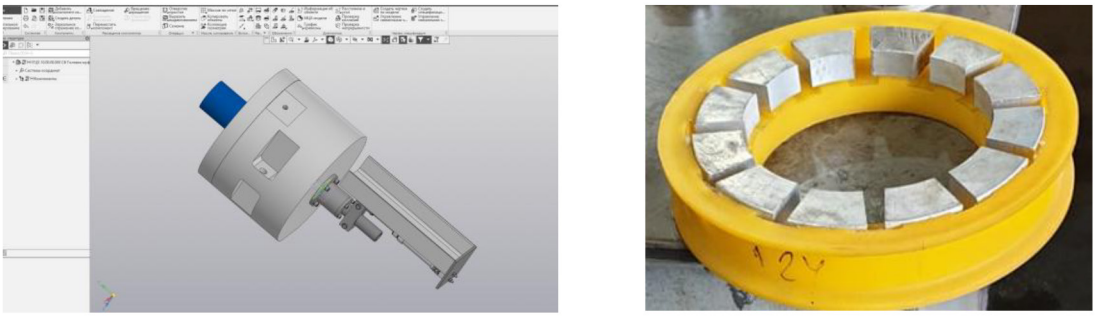


Рис. 2. 3D-модель сборочной единицы и напечатанная деталь
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

После освоения навыков создания 3D-объектов на 2-м курсе студенты изучают аддитивные технологии с целью изготовления прототипов изделий посредством печати на 3D-принтере в виде послойного изготовления (рис. 2). Обучение последовательно проходит на дисциплинах, специально введенных в учебный план для формирования цифровых компетенций по 3D-моделированиею и 3D-печати: «Инженерный дизайн», «Прототипирование», «Концептуальный инжиниринг». Аддитивные технологии создают новые возможности по созданию деталей фасонной формы, позволяют выполнять реальные производственные задачи, формируют цифровые компетенции у будущих инженеров [12].

На 3-м и 4-м курсах для формирования профессиональных и цифровых компетенций будущих нефтяников на кафедре «Нефтегазовое дело» ТИУ применяют тренажер АРМ СУ ПДНГ, имитирующий добычу нефти на месторождении. Используя тренажер, студенты изучают виды добычи нефти, нефтегазовое оборудование, технологии добычи нефти, методы освоения скважины, способы устранения аварийных ситуаций и др. (рис. 3). Тренажер имитирует кустовую площадку из 10 скважин, на которой присутствуют добывающие и нагнетательные скважины с технологическим оборудованием. Выполнение лабораторных работ способствует формированию компетенций и отработке практических навыков при выполнении операций технологического процесса. Успешному обучению способствуют учебно-методические пособия по лабораторным работам дисциплин «Скважинная добыча нефти», «Оборудование для добычи нефти» и др. Геймификация образовательного процесса посредством применения виртуальных лабораторных работ (ВЛР), VR, AR способствует развитию цифровых компетенций. Компьютерные модели дают возможность выполнять любые лабораторные и практические работы, научные эксперименты и т. д. Работу в виртуальных лабораториях могут проводить люди с ограниченными возможностями здоровья и др. [13; 14].

Современными инструментами цифровизации обучения являются использование интерактивной доски, создание презентаций, генерирование различных заданий, опросов, тестов контроля знаний с помощью различных программ (Яндекс Формы, ChatGPT, чат-боты), создание виртуальных лабораторных работ, просмотр интерактивных видеороликов, организация видеолекций и др. [16].

Подготовка инженера-нефтяника дополняется применением искусственного интеллекта (ИИ) в виде чат-ботов на протяжении всего обучения. ИИ позволяет преподавателю создавать учебный контент, адаптируя сложность заданий, темп работы и содержание под каждого обучающегося и этим повышая эффективность обучения [17; 18]. Использование ИИ позволяет передавать некоторые функции преподавателя ИИ, но с постоянным сопровождением обучения человеком. ИИ может рассказывать новый материал, демонстрировать видеоролики, видеопрезентации, регистрировать планы студента и преподавателя, выдавать задания в виде методических пособий или указаний, отвечать на стандартные и повторяющиеся вопросы, осуществлять поддержку решения несложных задач, подбирать литературу по теме исследования и др. В перспективе студент должен думать, что он общается не с искусственным интеллектом, а с живым человеком. Выделены шесть основных направлений обучения искусственным интеллектом: представление знаний, манипулирование знаниями, общение, восприятие, обучение. В процессе обучения ИИ может дополнительно обучаться, накапливать новые знания, учиться дополнительным выражениям в изучаемой профессиональной деятельности [19; 20].

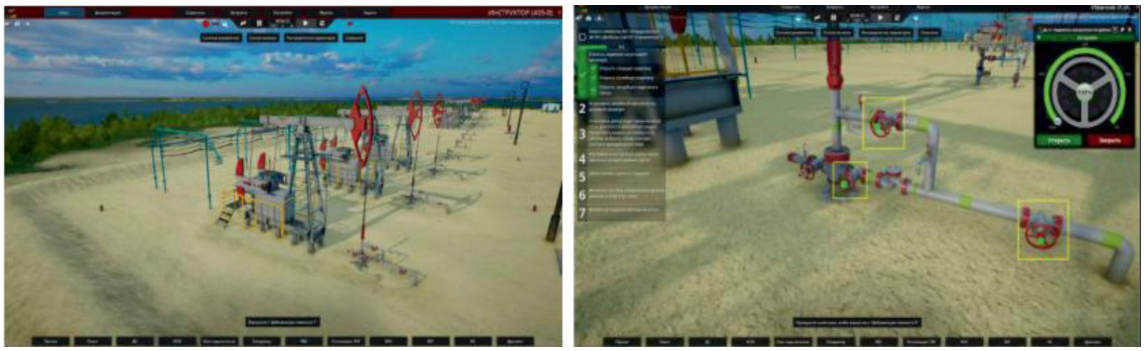


Рис. 3. АРМ СУ ПДНГ
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Важной задачей ИИ является диагностика достижений и мониторинг системы личностных и когнитивных качеств обучаемого в цифровой среде профессионального образования [21]. Для этого создается портфолио, которое содержит личные данные и все достижения студента в процессе обучения. Студенты имеют разный уровень знаний, умений и компетенций, обладают разными психофизиологическими характеристиками и когнитивными способностями [22]. С помощью систем ИИ возможно прогнозировать успеваемость студента, выявлять сложные темы для изучения, усиливать подготовку на основе пробелов и запросов студента и работодателей, «повышать инициативность студентов в образовательном процессе» [23, с. 18].

Проблематике совершенствования подготовки инженеров в настоящее время посвящено большое количество исследований, поскольку их эффективность напрямую зависит от слаженного взаимодействия человека и цифровых технологий. Она рассматривается с позиций педагогики, психологии, сетевых технологий и искусственного интеллекта, но существующие исследования с точки зрения цифровизации образовательного процесса являются недостаточными.

Гибридное и смешанное обучение требуют от преподавателя владения цифровым инструментарием. Преподаватели должны эффективно использовать современные технологии для улучшения качества обучения, реализовывать новые методики преподавания, создавать образовательный контент (видеолекции), уметь работать с ИИ. С внедрением цифровых технологий преподаватель превращается в организатора образовательного процесса, фасилитатора, который помогает студентам учиться. Преподаватель постоянно должен повышать свою квалификацию, заниматься самообразованием для освоения ИИ, создавать дидактические материалы и комплексы с использованием цифровых технологий, формировать «цифровой образ» преподавателя [24].

Обучение по предлагаемой технологии подготовки инженеров-нефтяников по формированию цифровых компетенций проводилось в ТИУ на кафедре «Нефтегазовое дело» со студентами направления 21.03.01. Нефтегазовое дело профиль «Эксплуатация и обслуживание объектов добычи» нефти в 2020–2025 гг. В эксперименте приняли участие: в контрольной группе 21 чел., в экспериментальной группе 45 чел. В экспериментальной группе использовалась технология подготовки инженеров-нефтяников с использованием цифровых средств обучения. В результате взаимодействия дидактических компонентов: ЭОС, МООК, аддитивных технологий, виртуальных тренажеров и ВЛР, ИИ – было выявлено, что они способствуют эффективной подготовке будущих инженеров-нефтяников для дальнейшей успешной профессиональной деятельности на предприятиях нефтегазового комплекса.

В качестве реализации технологии подготовки инженеров-нефтяников для обучения применялись цифровые средства обучения, встроенные в электронную образовательную среду университета. Последовательное выполнение различных заданий с использованием цифровых инструментов формирует цифровые компетенции, необходимые инженеру-нефтянику для работы в высокотехнологичном нефтегазовом комплексе. Уровни развития цифровых компетенций на формирующем эксперименте оценивались на всех этапах эксперимента (с 1-го по 4-й курс) по результатам выполнения контрольных заданий, кейс-заданий, проектов, курсовых работ по дисциплинам, выпускной квалификационной работы. Оценка всех результатов рассчитывалась по методике А. В. Усовой:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^{N} n_i}{n_{max} \cdot N}, \quad (1)$$

где K – коэффициент эффективности выполнения задания, деятельности или усвоения учебного материала;

n – количество баллов, которое получил i-й студент, выполнив необходимые действия и операции;

N – количество студентов;

n_{max} – максимальное количество баллов за выполнение упражнений.

На каждом этапе (курсе) были выделены работы для оценки уровня развития цифровых компетенций. На 1-м этапе (курсе) оценивалась итоговая работа по дисциплине «Инженерный дизайн» по проектированию 3D-прототипа изделия. На 2-м этапе (курсе) проводилась публичная защита проекта по представлению опытного образца, напечатанного на 3D-принтере. На 3-м этапе (курсе) оценивался цифровой двойник технологического оборудования. На 4-м этапе (курсе) оценка выставлялась экспертами государственной экзаменационной комиссии за цифровую часть выпускной квалификационной работы в виде математической модели, программного обеспечения и др. В ходе выполнения ВКР каждым студентом экспериментальной группы были созданы математические модели, системы предиктивной диагностики технологического оборудования, 3D-модели, прототипы и др.

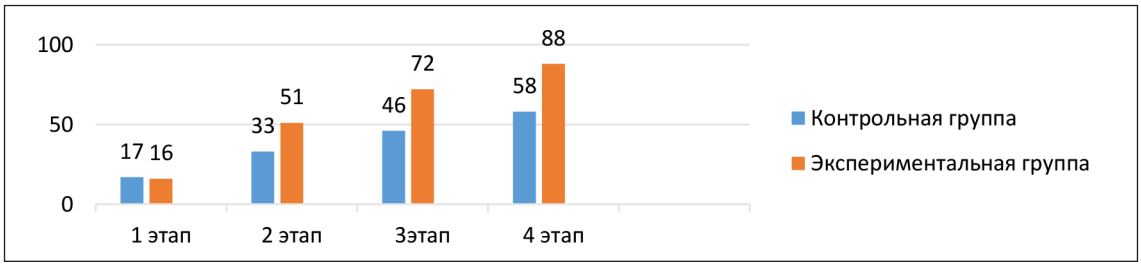


Рис. 4. Диаграмма изменения средних уровней развития цифровых компетенций (в баллах) в экспериментальной и контрольной группах на этапах формирующего эксперимента
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Частоты результатов наблюдений

Время наблюдений	Результаты, баллы			Всего, чел
	30–50	51–74	75–100	
До эксперимента (1-й этап)	25	18	2	45
После эксперимента (4-й этап)	8	25	12	45

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

В эксперименте принимали участие ведущие специалисты индустриальных партнеров совместно с преподавателями вуза в качестве консультантов проектов. Обычно лекции читались в стенах университета, а изучение профессиональных прикладных программ, моделирование проходило на территории предприятия-партнера с участием специалиста с производства. Например, на дисциплине «Моделирование нефтяных и газовых месторождений» лекции читались в университете, а лабораторные работы проходили в отделе по моделированию месторождений индустриального партера, на дисциплине «Геология» студенты изучали реальные и цифровые керны в кернохранилище и др.

На рис. 4 представлена диаграмма уровней развития цифровых компетенций будущих инженеров-нефтяников экспериментальной и контрольной групп на этапах формирующего эксперимента. Анализ результатов формирующего эксперимента показывает, что в процессе подготовки от этапа к этапу (курса к курсу) растет уровень сформированности цифровых компетенций у будущих инженеров-нефтяников. Диаграмма позволяет проследить динамику роста цифровых компетенций у студентов экспериментальной и контрольной групп. Как видим, в экспериментальной группе на этапе формирующего эксперимента значительно возрос средний уровень развития цифровых компетенций – от 16 баллов после усвоения 1-го этапа до 88 баллов после усвоения 4-го этапа. При этом в контрольной группе средний уровень развития профессиональных компетенций вырос с 17 только до 58 баллов, что свидетельствует об эффективности технологии подготовки инженеров-нефтяников для высокотехнологичного нефтегазового комплекса.

Для достоверности полученных результатов был проведен анализ статистически значимых различий между результатами констатирующего и формирующего экспериментов в экспериментальной группе с помощью метода Хи-квадрат. Расчеты проводились по формуле

$$\chi^2 = \sum_{k=1}^{m} \frac{(V_k - P_k)^2}{P_k}, \qquad (2)$$

где P_k – частоты результатов наблюдений до эксперимента;

V_k – частоты результатов наблюдений, сделанных после эксперимента;

m – общее число групп, на которые разделились результаты наблюдений.

Были приняты уровни развития цифровых компетенций: высокий (1÷0.75), средний (0.51÷0.74), низкий (0.5÷0.3)

В таблице приведены частоты результатов наблюдений по 1-му и 4-му этапам.

Определим степень значимости различий до и после эксперимента в распределении баллов. Полученное значение $\chi^2 = 129{,}8$ больше соответствующего табличного значения составляющего 9,21 при 2-й степени свободы, при вероятностной допустимой ошибке 0,1 %. Это свидетельствует о статистически значимых изменениях результатов формирующего эксперимента, которые произошли вследствие реализации предложенной технологии обучения.

Математико-статистический анализ проводился при помощи стандартизованной программы IBM SPSS Statistics 17.0. с использованием непараметрического статистического U-критерия Манна – Уитни. Проводилось сопоставление результатов (до формирующего воздействия) на предмет отсутствия статистически достоверных различий между экспериментальной и контрольной группами. Результаты, полученные в ходе его применения, продемонстрировали отсутствие статистически достоверных различий между выборками.

Оценивались результаты трудоустройства выпускников по направлению 21.03.01. Нефтегазовое дело (бакалавриат) в 2025 г.: через 3 месяца после получения диплома 84 % работают в нефтегазовом комплексе, 3 % служат в армии, 12 % продолжают обучение в магистратуре, 1 % в поисках работы. По результатам мониторинга летом 2026 г. трудоустроено 100 % студентов. Успешное трудоустройство выпускников кафедры «Нефтегазовое дело» Тюменского индустриального университета подтверждают национальные рейтинги Министерства труда РФ (12-е место по результатам трудоустройства выпускников). При формировании рейтинга учитывались доля трудоустроившихся выпускников и медианный доход через 2 года после выпуска[1].

Выводы

Значимым дидактическим аспектом функционирования цифровых образовательных ресурсов является их гармоничное встраивание в ЭОС университета, состоящую из дидактических комплексов дисциплин, обеспечивающих полноценное освоение – от приобретения знаний до формирования компетенций. ЭОС университета должна обеспечивать коммуникации между преподавателем и студентом для консультирования и контроля. Причем обратная связь может быть организована посредством ИИ. Все работы студента и отклики преподавателя, которые остаются в виде «цифрового следа», позволяют выстраивать персонализированные траектории обучения студентов в зависимости от индивидуальных способностей студента. Реализация подготовки студентов с использованием цифровых образовательных ресурсов на кафедре «Нефтегазовое дело» Тюменского индустриального университета показала, что они способствуют успешному формированию компетенций, развитию практических навыков и отвечают запросам предприятий нефтегазового комплекса.

По результатам эксперимента можно отметить, что:

− образовательные результаты подготовки будущих инженеров должны отвечать требованиям индустриальных партнеров и способствовать быстрой адаптации на производстве через раннее вовлечение студентов в решение реальных задач отрасли;

− образовательные программы должны быть персонализированы и ориентированы на развитие цифровых компетенций и интеграции искусственного интеллекта в процесс обучения;

− стоит активно применять цифровые инструменты (тренажеры, виртуальные лабораторные работы (ВЛР), VR, AR) для погружения в будущее профессиональное поле деятельности.

В XXI в. технологии меняются каждые несколько лет. Тотальная автоматизация и цифровизация производства требует трансформировать образовательные результаты подготовки инженеров-нефтяников в связи с повышением сложности технических объектов, многозадачностью технологических процессов, внедрением Индустрии 4.0, сложностью внешней среды. Профессиональная деятельность инженеров постоянно сопровождается цифровыми технологиями, обучение которым является не только важнейшей, но и наиболее сложной составляющей кадрового обеспечения инженеров. Проблемой является необходимость использования для подготовки инженеров-нефтяников цифровых средств обучения, электронных образовательных ресурсов, искусственного интеллекта, тренажеров, имитирующих технологический процесс производства. Программное обеспечение стоит дорого, может находиться под санкциями, а российские нефтегазовые компании не всегда хотят делиться лицензиями корпоративных программ.

В целом современная технология подготовки инженеров-нефтяников направлена на то, чтобы как можно раньше «погрузить» студента в профессиональную среду, связать абстрактные знания с реальными вызовами индустрии. В итоге такой подход помогает вырастить инженера, который понимает, как теоретические знания работают в реальных задачах отрасли, глубоко погружен в свою профессиональную область, быстро адаптируется на производстве.

Список литературы

1. Савельева Н. Н. Дидактическая концепция непрерывного профессионального образования нефтяников в России // Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2024. 239 с. [Электронный ресурс]. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=65641269 (дата обращения: 19.08.2026). ISBN 978-5-9961-3257-7.

[1] Национальные рейтинги трудоустройства выпускников – 2026 // Работа России. [Электронный ресурс]. URL: https://trudvsem.ru/ratings_education_organizations-2026 (дата обращения: 10.06.2026).

2. Савельева Н. Н., Шедь С. Н., Колосов Е. А. Формирование профессиональных компетенций у будущих бакалавров нефтяников посредством цифровых образовательных ресурсов // Современные наукоемкие технологии. 2020. № 11–2. С. 395–400. URL: https://top-technologies.ru/article/view?id=38395 (дата обращения: 19.08.2026). DOI: 10.17513/snt.38395.

3. Сабитов Р. А., Смирнова Г. С., Елизарова Н. Ю., Сабитов Ш. Р., Епонешников А. В., Григорьев И. С., Кутдусов А. А. Трансформации подходов в обучении студентов инженерных специальностей информационным технологиям // Информатика и образование. 2023. Т. 38. № 4. С. 5–13. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54482374 (дата обращения: 19.08.2026). DOI: 10.32517/0234-0453-2023-38-4-5-13.

4. Котлярова И. О. Технологии искусственного интеллекта в образовании // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Образование. Педагогические науки. 2022. Т. 14. № 3. С. 69–82. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologii-iskusstvennogo-intellekta-v-obrazovanii-2. (дата обращения: 19.08.2026). DOI: 10.14529/ped220307.

5. Беспалько В. П. Педагогический манифест // Новое в психолого-педагогических исследованиях. 2008. № 3 (11). С. 52–65. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15113671. (дата обращения: 29.09.2026).

6. Зеер Э. Ф., Степанова Л. Н. Акмеологическая технология прогнозирования индивидуальных профессионально-ориентированных траекторий развития личности студентов // Образование и наука. 2023. Т. 25. № 6. С. 69–98. DOI: 10.17853/1994-5639-2023-6-69-99.

7. Селевко Г. К. Педагогические технологии на основе информационно-коммуникационных средств. М.: НИИ школьных технологий, 2005. 204 с. (Энциклопедия образовательных технологий: школьных технологии). [Электронный ресурс]. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19912322 (дата обращения: 29.09.2026). ISBN 5-87953-203-8.

8. Резаев А. В., Трегубова Н. Д. ChatGPT и искусственный интеллект в университетах: какое будущее нам ожидать? // Высшее образование в России. 2023. Т. 32. № 6. С. 19–37. URL: https://vovr.elpub.ru/jour/article/view/4450. (дата обращения: 19.08.2026). DOI: 10.31992/0869-3617-2023-32-6-19-37.

9. Стародубцев В. А., Нерадовская О. Р. Искусственный интеллект и иммерсивные технологии в высшем педагогическом образовании // Открытое образование. 2024. Т. 28. № 2. С. 13–23. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/iskusstvennyy-intellekt-i-immersivnye-tehnologii-v-vysshem-pedagogicheskom-obrazovanii (дата обращения: 19.08.2026). DOI: 10.21686/1818-4243-2024-2-13-23.

10. Соловов А. В., Меньшикова А. А. Models for the Design and Operation of Digital Educational Environments // Высшее образование в России. 2021. Т. 30. № 1. С. 144–155. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/modeli-proektirovaniya-i-funktsionirovaniya-tsifrovyh-obrazovatelnyh -sred (дата обращения: 19.08.2026). DOI: 10.31992/0869-3617-2021-30-1-144-155.

11. Савельева Н. Н., Минин М. Г. Эффективность применения гибридного обучения в техническом вузе // Современные наукоемкие технологии. 2024. № 11. С. 225–230. DOI: 10.17513/snt.40234.

12. Мурат Э. Т. Аддитивные технологии в подготовке инженеров для цифрового производства // Синтез науки и образования как механизм перехода к постиндустриальному обществу: сборник статей Международной научно-практической конференции (г. Оренбург, 25 июня 2025 г.). Уфа: ООО «Аэтерна», 2025. С. 16–18. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82561932&ysclid=mt0ijghzj2976722150 (дата обращения: 19.08.2026). ISBN 978-5-00249-320-3.

13. Сысоев П. В. Обучение по индивидуальной траектории // Язык и культура. 2013. № 4 (24). С. 121–131. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/obuchenie-po-individualnoy-traektorii (дата обращения: 03.06.2026).

14. Хаперская А. В., Минин М. Г. Разработка метода обучения инвалидов с применением онлайн-платформ на основе имитационного моделирования // Современные наукоемкие технологии. 2023. № 8. С. 198–204. URL: https://top-technologies.ru/article/view?id=39755 (дата обращения: 19.08.2026). DOI: 10.17513/snt.39755.

15. Пивень В. В., Челомбитко С. И. Практико-модульное обучение как технология формирования профессиональных компетенций в инженерном образовании // Современные проблемы науки и образования. 2019. № 1. URL: https://science-education.ru/ru/article/view?id=28531 (дата обращения: 03.06.2026).

16. Скворчевский К. А., Дятлова О. В. Современные адаптивные и интеллектуальные цифровые системы обучения: механизмы и потенциал // Вопросы образования. 2024. Т. 2. № 3. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-adaptivnye-i-intellektualnye-tsifrovye-sistemy-obucheniya-mehanizmy-i-potentsial (дата обращения: 16.08.2026). DOI: 10.17323/vo-2024-19751.

17. Karrenbauer C., Brauner T., König C., Breitner M. Design, development, and evaluation of an individual digital study assistant for higher education students // Educational Technology Research and Development. 2023. Dev 71. P. 2047–2071 DOI: 10.1007/s11423-023-10255-8.

18. DiCerbo K. Assessment for Learning with Diverse Learners in a Digital World // Educational Measurement Issues and Practice. 2020. Vol. 39. Is. 3. P. 90–93. DOI: 10.1111/emip.12374.

19. König C. M., Karrenbauer C., Breitner M. H. Development guidelines for individual digital study assistants in higher education // International Journal of Educational Technology in Higher Education. 2024. Vol. 21. Art. 9. DOI: 10.1186/s41239-024-00439-4.

20. Lin C.-C., Huang A., Lu O. Artificial intelligence in intelligent tutoring systems toward sustainable education: a systematic review // Smart Learning Environments. 2023. Vol. 10. Is. 1. Art. 41. DOI: 10.1186/s40561-023-00260-y.

21. Фотина О. В. К вопросу о цифровой личности и цифровом двойнике в формировании идентичности в дистанционном образовании // Информатика и образование. 2025. № 40 (4). С. 18–27. DOI: 10.32517/0234-0453-2025-40-4-18-27.

22. Глухов А. П., Игна О. Н., Червонный М. А., Синогина Е. С., Колесникова Е. В., Пикалова Л. Р., Иваницкий А. Е., Фатеев А. В., Газизов Т. Т., Долганова Н. Ф., Гельфман Э. Г., Подстригач А. Г. Процессы генерации и реализации цифровых инициатив образовательной направленности студентов педагогических вузов: коллективная монография // Томск: Томский государственный педагогический университет, 2024. 430 с. [Электронный ресурс]. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=80290103. (дата обращения: 19.08.2026). ISBN 978-5-907791-21-3.

23. Глухов А. П., Синогина Е. С., Минин М. Г., Скрипко З. А. Управление цифровыми инициативами студентов в педагогическом вузе // Вестник Удмуртского университета. Серия Философия. Психология. Педагогика. 2024. Т. 34. № 4. С. 392–407. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-tsifrovymi-initsiativami-studentov-v-pedagogicheskom-vuze (дата обращения: 19.08.2026). DOI: 10.35634/2412-9550-2024-34-4-392-407.

24. Бычкова М. Н., Смирнова П. Л. Цифровая грамотность преподавателей и студентов университета: «открытия» пандемии // Современные проблемы науки и образования. 2020. № 4. URL: https://science-education.ru/ru/article/view?id=29946 (дата обращения: 20.08.2026). DOI: 10.17513/spno.29946.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 372.8:378.1
DOI

CC BY 4.0

МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ НАДПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ ОБУЧАЮЩИХСЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ В РАМКАХ АУТЕНТИЧНОЙ МУЗЕЙНОЙ СРЕДЫ

[1]Панкратьева Г. И. ORCID ID 0000-0003-2252-1440,
[2]Богданова Н. В. ORCID ID 0000-0002-8604-7306,
[2]Каталкина Н. А. ORCID ID 0000-0003-4150-6596, [3]Кузнецова У. К.

[1]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», Санкт-Петербург, Российская Федерация;
[2]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: nvbogdanova.imop@mail.ru;
[3]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Российская Федерация

В статье демонстрируется специфика аутентичной музейной среды как средства развития надпрофессиональных компетенций студентов высших учебных заведений. Цель исследования – разработка структурно-функциональной модели использования музейной педагогики, обеспечивающей формирование надпрофессиональных компетенций студентов вузов различных специальностей. Модель состоит из целевого, содержательного, технологического и оценочного блоков и реализуется путем прохождения подготовительного, организационного, ознакомительно-практического и рефлексивного этапов. В статье представлены сценарии реализации модели для студентов технических, гуманитарных и медицинских специальностей. В ходе исследования был сделан вывод, что применение разработанной структурно-функциональной модели использования музейной педагогики может способствовать формированию у обучающихся таких надпрофессиональных компетенций, как навыки анализа информации и выработки решений, эффективного партнерства, коммуникативной грамотности, планирования и организации, саморазвития и лидерства. Предложенная модель может быть рекомендована для внедрения в различные учебные дисциплины и форматы обучения (очный, смешанный, дистанционный). Научная новизна исследования заключается в создании теоретической базы для интеграции музейной педагогики в образовательное пространство высшей школы, а также в предложении типологии блоков, этапов и заданий для универсальной модели, напрямую соотнесенных с индикаторами надпрофессиональных компетенций.

Ключевые слова: музейная педагогика, структурно-функциональная методическая модель, аутентичная музейная среда надпрофессиональные компетенции

MODEL FOR DEVELOPING SUPRA-PROFESSIONAL COMPETENCIES IN HIGHER EDUCATION STUDENTS WITHIN AN AUTHENTIC MUSEUM ENVIRONMENT

[1]Pankrateva G. I. ORCID ID 0000-0003-2252-1440,
[2]Bogdanova N. V. ORCID ID 0000-0002-8604-7306,
[2]Katalkina N. A. ORCID ID 0000-0003-4150-6596, [3]Kuznetsova U. K.

[1]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Emperor Alexander I Saint Petersburg State Transport University", Saint Petersburg, Russian Federation;
[2]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University", Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: nvbogdanova.imop@mail.ru;
[3]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Saint Petersburg State Pediatric Medical University", Saint Petersburg, Russian Federation

The article examines the specific nature of an authentic museum environment as a means of developing supra-professional competencies among university students. The study aims to develop a structural and functional model for the use of museum pedagogy, which facilitates the formation of supra-professional competencies in students across various fields of study. The model comprises goal-oriented, content-related, technological, and evaluative components and is implemented through preparatory, organizational, introductory-practical and reflective stages. The article presents implementation scenarios for students specializing in technical, humanities, and medical fields. The study concluded that applying the developed structural and functional model for the use of museum pedagogy can enable higher education students to develop supra-professional competencies: skills in information analysis and decision-making, effective partnership, communicative literacy, planning and organization, self-development, and leadership. The proposed model can be recommended for implementation in various academic disciplines and learning formats (in-person, blended, and remote learning). The scientific novelty of the study lies in establishing a theoretical framework for integrating museum pedagogy into higher education, as well as in proposing a typology of assignments correlated with indicators of supra-professional competencies.

Keywords: museum pedagogy, structural and functional methodological model, supra-professional competencies, authentic museum environment

Введение

В условиях трансформации образовательных практик возрастает роль интерактивных форм обучения, включающих мультимодальные и внешние ресурсы, например музеи. С одной стороны, интеграция музейной педагогики может вносить разнообразие в учебный процесс, служить средством создания мотивации у обучающихся к изучению специальности и освоению метапредметных компетенций, а также способствовать переносу полученных теоретических знаний в реальную среду. С другой стороны, музейная педагогика до сих пор не рассматривается как неотъемлемая составная часть процесса обучения в высшей школе ввиду недостаточной теоретической обоснованности ее включения в учебные программы. Актуальность представляемого исследования обусловлена необходимостью создания теоретической базы, обеспечивающей интеграцию музейной педагогики в процесс обучения студентов высших учебных заведений различных специальностей, поскольку аутентичная музейная среда может выступать как образовательное пространство, в котором компетенции формируются через деятельность, подразумевающую анализ аутентичных источников, интерпретацию экспонатов, сопоставление различных контекстов, презентацию информации, проектирование образовательных и исследовательских задач.

Цель исследования – разработка структурно-функциональной модели использования музейной педагогики, обеспечивающей формирование надпрофессиональных компетенций студентов вузов различных специальностей. Для достижения цели исследования решались следующие задачи:

− раскрыть содержание понятия «надпрофессиональные компетенции» применительно к подготовке студентов высших учебных заведений;

− обосновать потенциал аутентичной музейной образовательной среды для развития надпрофессиональных компетенций;

− описать структурно-функциональные компоненты модели музейной педагогики, используемой для формирования надпрофессиональных компетенций студентов высших учебных заведений.

Материалы и методы исследования

Теоретическую базу исследования составили работы, описывающие надпрофессиональные компетенции, востребованные на современном рынке труда и необходимые выпускникам вузов различных специальностей [1–3], труды, посвященные музейной педагогике как самостоятельной педагогической отрасли и истории ее развития [4–6], а также интеграции музейной педагогики в образовательный процесс для формирования различных компетенций, в том числе надпрофессиональных [7–9].

В ходе работы применялся метод моделирования. Сначала путем анализа полученных в ходе практической педагогической деятельности данных была создана структурно-функциональная модель использования музейных ресурсов в образовательном процессе высшей школы, предполагающая определение целей, описание процесса и оценки результатов интеграции музейной педагогики. Далее были разработаны сценарии реализации данной модели на занятиях по иностранному языку с обучающимися высших учебных заведений разных специальностей: с бакалаврами 4-го курса направления подготовки «Зарубежное регионоведение» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, бакалаврами 1-го курса технических специальностей Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I и специалистами 1-го курса направления подготовки «Педиатрия» Санкт-Петербургского государственного педиатрического медицинского университета.

Теоретическая значимость работы заключается в создании универсальной модели использования музейной педагогики для формирования надпрофессиональных компетенций обучающихся высших учебных заведений (на примере технических, гуманитарных и медицинских специальностей).

Практическая значимость работы состоит в возможности использования ее результатов в курсах по общей педагогике, теории преподавания иностранных языков, а также в практике преподавания иностранных языков в высших учебных заведениях различного профиля.

Результаты исследования и их обсуждение

В научной литературе понятие «надпрофессиональные компетенции» нередко используют как синоним терминов «мягкие навыки» (soft skills), «метакомпетенции» (meta-competencies) или «ключевые/универсальные компетенции» [10–12].

Надпрофессиональные компетенции помогают специалисту адаптироваться к меняющимся условиям, эффективно взаимодействовать в команде и решать комплексные задачи – то есть дополняют узкопрофессиональные компетенции (hard skills) и делают человека более конкурентоспособным в динамичной среде [13].

Иными словами, надпрофессиональные компетенции – это универсальные деловые и управленческие качества индивидуума, позволяющие эффективно и/или наилучшим образом выполнять поставленные задачи [1].

Центром компетенций Президентской платформы «Россия – страна возможностей» проводится проект, направленный на выявление и тестирование надпрофессиональных компетенций, необходимых современному специалисту, в котором уже приняли участие 1,3 млн участников, 287 университетов-партнеров, 22 образовательных курса. Сейчас на данной платформе созданы и работают 203 центра компетенций на базе 287 образовательных организаций в каждом федеральном округе страны. Пройти диагностику «гибких навыков» могут обучающиеся по программам высшего и среднего профессионального образования в возрасте от 18 лет[1]. В результате исследования был выявлен ряд ключевых надпрофессиональных компетенций:

– партнерство/сотрудничество – объединение усилий для достижения общих целей;

– критическое мышление (анализ информации и выработка решений) – процесс извлечения полезных данных из входящего потока информации в обоснованные, практические действия с целью минимизации рисков;

– коммуникативная грамотность – способность человека эффективно и бесконфликтно общаться, правильно выражать свои мысли и понимать собеседника, умение слушать, подбирать стиль общения под коммуникативную ситуацию и владеть правилами этикета;

– стрессоустойчивость – способность нервной системы адаптироваться к нагрузкам, сохраняя работоспособность и хладнокровие, которая базируется на самоконтроле, анализе ситуации и умении быстро восстанавливать внутренний баланс;

– планирование и организация – базовые функции управления, которые задают вектор развития и обеспечивают достижение поставленных целей;

– саморазвитие – осознанный, непрерывный процесс работы над собой, направленный на раскрытие личного потенциала, улучшение физических, умственных и духовных качеств, а также достижение жизненных целей;

– лидерство – способность оказывать социальное влияние на отдельных личностей и группы, направляя их усилия на достижение общих целей, умение вдохновлять людей, строить сильные команды и вести за собой [14].

Поскольку надпрофессиональные компетенции представляют собой социальные навыки, необходимые для специалистов любой сферы деятельности, их следует развивать в процессе преподавания различных дисциплин на аудиторных занятиях, в рамках внеаудиторной самостоятельной и проектной работы, в частности посещения обучающимися профильных музеев. При этом музейное пространство предоставляет возможность применения надпрофессиональных навыков в реальной практической деятельности.

Музейная педагогика рассматривается как самостоятельная отрасль педагогики, изучающая специфику воспитательно-образовательного процесса, основанного на музейно-педагогических программах, и являющаяся сферой пересечения таких научных дисциплин, как педагогика и музееведение [7]. «Музейная педагогика – это отрасль педагогической науки и построенная на ее основе научно-практическая деятельность, ориентированная на передачу культурного опыта в условиях музейной среды» [15, с. 301]. В зависимости от целей исследования музейная педагогика может рассматриваться в двух направлениях. С одной стороны, под музейной педагогикой можно понимать просветительскую деятельность музеев [16; 17]. С другой стороны, музейную педагогику можно определять как использование культурно-образовательного музейного пространства в ходе учебного процесса [18]. Авторами данного исследования используется последняя трактовка понятия.

Музейно-педагогическая работа может проводиться по информативной модели, главной задачей которой является передача информации в доступной форме. Однако современным тенденциям в музейной педагогике больше отвечает интерактивная модель, позволяющая активизировать посетителя музея, стимулировать его самостоятельную поисковую работу и познавательную активность. Не случайно Л. В. Попова и М. М. Пикуленко одной из важнейших тенденций музейной педагогики считают интерактивность, состоящую во «взаимодействии обучающегося с учебным окружением, учебной средой, которая служит областью осваиваемого опыта» [19, с. 281]. Стоит отметить, что использование музейной педагогики обеспечивает междисциплинарный подход, который подразумевает объединение знаний и навыков, полученных в ходе освоения различных учебных дисциплин, в цельную картину и применение их в ходе практической деятельности.

[1] Центр компетенций Президентской платформы «Россия – страна возможностей». [Электронный ресурс]. URL: https://rsv.ru/competitions/project/1/f9d73c66-a75b-4f01-bc37-287165289a9c/ (дата обращения: 02.08.2026).



Структурно-функциональная модель использования музейной педагогики для формирования надпрофессиональных компетенций студентов многопрофильных вузов
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Музейная педагогика выполняет ряд воспитательно-образовательных функций. Музейное пространство может стимулировать личностный рост и профессиональное развитие [20]. Для ряда исследователей основной целью музейной педагогики является активизация творческого потенциала обучающихся [21; 22]. Е. В. Лопатина подчеркивает важную роль музейного пространства в формировании общекультурной компетенции, которая определяется ею «как интегративная способность личности обучаемого, обусловленная опытом освоения культурного пространства, уровнем обученности, воспитанности и развития, ориентированная на использование культурных эталонов как критериев оценки при решении задач познавательного, нравственного, мировоззренческого, профессионального характера» [23, с. 250–251]. А. С. Подлесная обосновывает необходимость внедрения объектов музейного пространства в образовательный процесс тем, что их использование способствует наиболее эффективному формированию надпрофессиональных компетенций будущего специалиста [8]. В работе с музейными ресурсами могут целенаправленно развиваться такие мягкие навыки, как партнерство, критическое мышление, коммуникативная грамотность, планирование и организация, саморазвитие и лидерство.

В ходе исследования была разработана структурно-функциональная модель музейной педагогики для формирования надпрофессиональных компетенций студентов высших учебных заведений, включающая целевой, содержательный, технологический и оценочный блоки. Кроме того, были выделены подготовительный, организационный, ознакомительно-практический и рефлексивный этапы работы с музейными ресурсами (рисунок).

В табл. 1 описано содержание компонентов структурно-функциональной модели использования музейной педагогики для формирования надпрофессиональных компетенций студентов многопрофильных вузов.

Описанная на рисунке и в табл. 1 структурно-функциональная модель использования аутентичной музейной среды для формирования надпрофессиональных компетенций студентов многопрофильных вузов может применяться в процессе преподавания различных дисциплин с обучающимися разных специальностей. В ходе ее реализации помимо развития мягких навыков могут также ставиться различные профессиональные задачи. В зависимости от условий работы преподаватель может определять время реализации музейного проекта (отдельный модуль освоения программы, несколько занятий или частей занятий, аудиторная либо внеаудиторная работа) и выбирать формы работы (лекции, семинары, практические занятия, самостоятельная работа; индивидуальная работа, работа в парах или группах). Посещение музейной экспозиции может реализовываться как на исследовательском этапе, так и на ознакомительно-практическом.

В ходе исследования были разработаны сценарии реализации предложенной структурно-функциональной модели для студентов гуманитарных, технических и медицинских специальностей, осуществленные на практике в рамках преподавания дисциплины «Иностранный язык».

Обучающиеся 4-го курса бакалавриата Высшей школы международных отношений Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого в рамках дисциплины «Немецкий язык: Профессионально-ориентированный курс», посетили выставку «Русский авангард» в Русском музее Санкт-Петербурга с целью ознакомления с работами русских художников, творчество которых тесно связано с представителями немецкой живописи («Синий всадник», «Мост», «Баухаус») [24]. Работа проводилась как внеурочная проектная деятельность в рамках системы индивидуальных достижений. Проект описан в табл. 2.

Таблица 1

Содержание компонентов структурно-функциональной модели использования музейной педагогики для формирования надпрофессиональных компетенций студентов многопрофильных вузов

<table>
<tr><td colspan="2">Блоки</td></tr>
<tr><td>Название блока</td><td>Содержание блока</td></tr>
<tr><td>Целевой блок (определяет цель и задачи)</td><td>Формирование у обучающихся высших учебных заведений разного профиля надпрофессиональных компетенций: критического мышления (например, при выборе темы исследования и выборе содержания работы); эффективного партнерства (в ходе работы в парах либо в группах); коммуникативной грамотности (во время самостоятельного проведения экскурсий, организации мини-выставок, подготовки презентаций, докладов, рецензий и т. п.); планирования и организации (при подготовке мини-выставок и т. п.); саморазвития (подразумевает овладение тактиками и инструментами самостоятельного расширения кругозора по окончании вуза); лидерства (в ходе работы в парах либо в группах)</td></tr>
<tr><td>Содержательный блок (определяет материал и формы работы)</td><td>Виртуальные и очные экскурсии с элементами интерактивности, семинары, практические занятия, самостоятельная работа студентов</td></tr>
<tr><td>Технологический блок (определяет содержание самостоятельной исследовательской и творческой работы обучающихся)</td><td>Выбор темы исследования; поиск и анализ музейных источников; подготовка образовательного продукта; презентация результатов; разработка мини-выставок; создание мультимедийных проектов и презентаций; написание рецензий, отзывов и т. п.</td></tr>
<tr><td>Оценочный блок (определяет критерии достижения результата – уровень сформированности надпрофессиональных компетенций)</td><td>Оценка преподавателем таких параметров, как активность работы обучающихся и качество выполнения самостоятельных творческих заданий; устная (обсуждение) или письменная (заполнение анкет) саморефлексия участников проекта</td></tr>
<tr><td colspan="2">Этапы работы с аутентичными музейными ресурсами</td></tr>
<tr><td>Этап 1. Подготовительный
обучающиеся получают базовые знания о музейных ресурсах и методике их представления и интерпретации.
Цель и задачи:
изучение методов работы с музейными экспонатами; освоение методологии культурно-исторического анализа; знакомство с профильным музеем; формирование навыка саморазвития.
Формы работы:
вводная мини-лекция; семинар; встреча с куратором музея; самостоятельная работа.
Задания:
изучить сайт музея; подготовить краткий обзор истории выбранного музея; сформулировать два-три исследовательских вопроса по тематике музея.
Планируемые результаты:
Обучающиеся знакомятся с музеями, соответствующими их профилю, знают способы анализа музейных экспонатов и принципы структурирования музейной экспозиции, что способствует формированию навыка саморазвития</td><td>Этап 2. Организационный
обучающиеся получают задания, которые они должны выполнить в ходе посещения экспозиции, и опосредованно учатся описывать и анализировать музейные экспонаты.
Цель и задачи:
освоение методов работы с экспонатами; формирование навыков наблюдения, описания и анализа информации.
Формы работы:
практическое занятие; семинар.
Задания:
Ознакомиться с заданием или маршрутным листом и прояснить возникшие вопросы.
Планируемые результаты:
Обучающиеся умеют описывать и анализировать музейные экспонаты</td></tr>
</table>

Окончание табл. 1

Этап 3. Ознакомительно-практический Обучающиеся посещают музейную экспозицию и анализируют музейные экспонаты. *Цель и задачи:* применение полученных знаний на практике; формирование навыков наблюдения, описания и анализа информации; подготовка образовательного продукта по экспозиции профильного музея; формирование креативного мышления, навыков планирования, эффективного партнерства (в ходе работы в парах либо в группах), лидерских способностей, организаторских навыков, коммуникативной грамотности. *Формы работы:* посещение музея; самостоятельная работа студентов. *Задания:* описать экспонат/ы по заданному алгоритму (происхождение, датировка, материал, функции, символика; функция; достоинства; критика и т. п.); провести сравнительный анализ экспонатов, например, одной эпохи, но разных культур. *Планируемые результаты:* Обучающиеся умеют планировать создание образовательного продукта; анализировать доступную информацию об экспонатах, распределять обязанности в случае работы в парах или в группе	***Этап 4. Рефлексивный*** Обучающиеся представляют подготовленные ими образовательные продукты и проводят оценку результатов совместно с преподавателем. *Цель и задачи:* осмысление полученного опыта; оценка результатов обучения; планирование дальнейшего взаимодействия с музеем. *Формы работы:* практическое занятие; семинар. *Задания:* представить образовательный продукт по материалам посещенной музейной экспозиции (мини-выставку, презентацию, мультимедийный гид); написать рецензию или отзыв об экспозиции, создать плакат или стенд по материалам выставки, заполнить анкету. *Планируемые результаты:* Обучающиеся умеют представлять образовательный продукт, пополняют портфолио работ, овладевают коммуникативной грамотностью, имеют возможность обдумать, какие надпрофессиональные навыки им удалось развить в ходе работы над проектом, какие из них нуждаются в дальнейшем совершенствовании

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Предлагаемая авторами структурно-функциональная модель использования музейной педагогики для развития надпрофессиональных компетенций была также испытана на студентах-первокурсниках технических специальностей Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I в ходе реализации дисциплины «Иностранный язык». Приводим сценарий образовательного проекта «Посещение музея ПГУПС» (табл. 3).

Таблица 2

Сценарий образовательного проекта «Посещение выставки «Русский авангард»

Цель: формирование иноязычной коммуникативной компетенции (рабочий язык проекта – немецкий) и надпрофессиональных компетенций. Задачи: • показать связь искусства с историческим контекстом (формирование аналитических способностей); • стимулировать интерес к культурному наследию в аутентичном музейном пространстве (формирование креативного мышления); • сформировать навыки групповой работы и публичного выступления (партнерство/сотрудничество, коммуникативная грамотность)	
Этап 1. Подготовительный (1,5 ч самостоятельной работы)	
Цель и задачи этапа: – дать базовые знания о «Русском авангарде» как о явлении в живописи; – подготовить студентов к активному восприятию экспозиции	Задания: Познакомиться с виртуальным туром по экспозиции на сайте музея. Изучить основные течения русского авангарда (супрематизм, кубизм, футуризм, конструктивизм) и их характерные черты. Ознакомиться с краткими биографиями трех-четырех ключевых художников. Сформулировать два-три вопроса, которые хотелось бы прояснить во время посещения выставки
Этап 2. Организационный (10 мин)	
Цель и задачи этапа: – освоение методов работы с экспонатами	Задания: 1. Разделиться на группы по 3–4 чел. В каждой группе выбрать: координатора (организует работу группы); исследователя (анализирует художественные приемы); историка (ищет связь произведения с эпохой); докладчика (подготавливает выступление). 2. Получить маршрутный лист, включающий название и авторов произведений, которые группе следует проанализировать (каждая группа получает задания к разным картинам); вопросы для анализа; цитаты знаменитостей по поводу анализируемых произведений

Окончание табл. 2

Этап 3. Ознакомительно-практический (посещение выставки, 1,5 ч)	
Цель и задачи этапа: − применить полученные знания на практике; − проанализировать произведения искусства; − собрать материал для группового отчета	Задания для групп (выполняются по маршрутному листу): Найти указанные произведения в залах выставки. Внимательно рассмотреть картину и записать первые ассоциации и эмоции. Ответить на вопросы: Какая идея, по вашему мнению, заложена автором? Какие художественные приемы (композиция, форма, цвет, линия) использованы для выражения идеи? По названию, теме и другим характеристикам произведения определить приметы времени. Соотнести личные впечатления с рецензиями критиков. Обсудить выводы внутри группы, подготовить краткое выступление (3–4 мин)
Этап 4. Рефлексивный (45 мин)	
Цель и задачи этапа: – представить результаты работы; – овладеть коммуникативной грамотностью	Задания: Каждая группа делает презентацию по проанализированным произведениям на основе информации из маршрутного листа

Примечание: составлена Н. В. Богдановой на основе полученных данных в ходе исследования.

Таблица 3

Сценарий образовательного проекта «Посещение музея ПГУПС»

Цель: формирование иноязычной коммуникативной компетенции (рабочий язык проекта – английский) в сочетании с формированием надпрофессиональных компетенций Задачи: • познакомить студентов с историей развития транспорта в Санкт-Петербурге: (анализ информации и выработка решений); • сформировать представление о роли транспорта в экономике и социальной сфере города и страны (формирование критического мышления)	
Этап 1. Подготовительный (1,5 ч самостоятельной работы)	
Цель и задачи этапа: − дать базовые знания о музее транспорта в Санкт-Петербурге; − подготовить студентов к активному восприятию экспозиции	Задания: Изучить тему «The History of Our University» по учебным пособиям кафедры. Просмотреть видеолекцию об истории университета. Прочитать краткие биографии трех-четырех знаменитых ученых и выдающихся инженеров-транспортников
Этап 2. Организационный (10 мин)	
Цель и задачи этапа: − освоение методов работы с экспонатами	Задания: Получить маршрутный лист с вопросами по экспонатам экспозиции
Этап 3. Ознакомительно-практический (посещение выставки 1 ч)	
Цель и задачи этапа: − применить полученные знания на практике; − проанализировать представленные экспонаты; − собрать материал для создания образовательного продукта	Задания для групп (выполняются по маршрутному листу): − кратко законспектировать или запомнить ключевую информацию об указанных в маршрутном листе экспонатах в ходе экскурсии; − внимательно рассмотреть и записать данные об изобретателе, годе изобретения, материале, цели использования
Этап 4. Рефлексивный (45 мин аудиторного занятия / самостоятельной работы после посещения музея)	
Цель и задачи этапа: − проанализировать развитие инженерных изобретений через призму исторического контекста; − развить навыки групповой работы, публичных выступлений на иностранном языке	Задания: Студенты делятся на группы в соответствии с эпохой, к которой относились анализируемые ими экспонаты, и делают мини-сообщение на тему «Роль инженерных изобретений в развитии города/страны в данную эпоху»

Примечание: составлена Г. И. Панкратьевой на основе полученных данных в ходе исследования.

По предлагаемой авторами модели, как показала практическая реализация, проведенная в Санкт-Петербургском государственном педиатрическом медицинском университете, оказалось возможным работать также и со студентами медицинских специальностей. В проекте участвовали первокурсники специалитета «Педиатрия». Апробация сценария проводилась в аудиторное время как часть практического занятия по дисциплине «Английский язык». Приводим сценарий образовательного проекта «Посещение музея Санкт-Петербургского государственного педиатрического медицинского университета» (табл. 4).

Таблица 4

Сценарий образовательного проекта «Посещение музея Санкт-Петербургского государственного педиатрического медицинского университета»

Цель: формирование иноязычной коммуникативной компетенции и надпрофессиональных компетенций. Задачи: • развить навыки анализа экспонатов (критическое мышление); • стимулировать интерес к музейным источникам как вспомогательным материалам медицинского образования (саморазвитие); • сформировать навыки групповой работы и научной презентации на английском языке (партнерство/сотрудничество, коммуникативная грамотность, иноязычная коммуникативная компетенция)	
Этап 1. Подготовительный (1,5 ч самостоятельной работы)	
Цель и задачи этапа: – дать базовые знания о медицинских музеях в Санкт-Петербурге; – подготовить студентов к активному восприятию экспозиции	**Задания:** – ознакомиться с информацией о музее и его экспозиции на сайте университета, посмотреть видеоэкскурсию по музею; – повторить текст об университете, прочитать дополнительные тексты о Ю. А. Менделевой и Детской больнице по теме Saint Petersburg State Pediatric Medical University по учебным пособиям кафедры иностранных языков; – сформулировать два-три вопроса, которые студент хотел бы прояснить в ходе посещения музея
Этап 2. Организационный (5 мин)	
Цель и задачи этапа: – освоение методов работы с экспонатами	**Задания:** Получить маршрутный лист с вопросами по экспонатам экспозиции. Распределиться по мини- группам, каждая группа получает одну тему из списка: академическая база, наследие основателей, наука в блокаду, блокадные документы и др.
Этап 3. Ознакомительно-практический (посещение выставки 1,5 ч)	
Цель и задачи этапа: – применить полученные знания на практике; – проанализировать представленные экспонаты; – собрать материал для создания образовательного продукта	Найти и проанализировать экспонаты (ценные личные вещи профессоров, рукописи, документы, научные труды и учебники, архивные истории болезней, рецептуры соевого молока и хвойных витаминных отваров, скульптуру «Врач – больной» и др.), задать интересующие вопросы сотруднику музея
Этап 4. Рефлексивный	
Цель и задачи этапа: – представить результаты работы групп; – овладеть коммуникативной грамотностью	Задания: Представить краткие сообщения (1–1,5 мин) от спикеров мини-групп о результатах работы на английском языке

Примечание: составлена У. К. Кузнецовой на основе полученных данных в ходе исследования и на основании: Городской центр общественного здоровья и медицинской профилактики. [Электронный ресурс]. URL: https://gcmp.ru (дата обращения: 02.08.2026); Педиатрический университет. [Электронный ресурс]. URL: https://gpmu.org/university/structure/museum/ (дата обращения: 14.09.2026).

Заключение

Проведенное исследование показывает, что музейная педагогика должна рассматриваться не как дополнение к учебному процессу, а как педагогически организованный регулярно используемый канал познания, где формируются общекультурные и надпрофессиональные компетенции. Практическая значимость разработанной универсальной структурно-функциональной модели использования музейной педагогики для развития надпрофессиональных компетенций студентов высших учебных заведений проявляется в нескольких плоскостях – образовательной, институциональной и социально-культурной. Модель позволяет встраивать музейно-педагогические практики (реальные и виртуальные экскурсии, работу с цифровыми коллекциями, проектные задания по экспозиции) в дисциплины гуманитарного, технического и медицинского профиля. Работа с аутентичными музейными материалами повышает достоверность и глубину освоения темы, учит студентов различать первичные и вторичные источники, критически оценивать информацию. Модель предусматривает разные типы заданий (индивидуальные, групповые, исследовательские, творческие), что дает возможность преподавателю адаптировать ее под конкретные компетенции и уровень подготовки студентов.

Музейная педагогика позволяет внедрять в традиционные формы организации образовательного процесса элементы системно-деятельностного и практико-ориентированного подходов, стимулирующих познавательную и практическую деятельность обучающихся, что способствует формированию надпрофессиональных компетенций. Она предоставляет условия для целенаправленного формирования мягких навыков обучающихся высших учебных заведений через активное освоение предметного содержания, формирование исследовательских и коммуникативных навыков, междисциплинарную интеграцию знаний и учет современных образовательных вызовов.

Парадигма музейной педагогики включает в себя знание методов работы с музейными источниками и принципов построения музейных экспозиций; умение анализировать экспонаты в культурно-историческом контексте, проводить самостоятельные исследования на базе музейных коллекций и создавать образовательные продукты (мини-экскурсии, презентации, рецензии и т. д.); а также развитие надпрофессиональных навыков критического мышления, эффективного партнерства, коммуникативной грамотности, планирования и организации, саморазвития и лидерства.

Список литературы

1. Комиссаров А. Г., Степашкина Е. А., Соболева О. Б., Гужеля Д. Ю., Селезнев П. С. Методология оценки надпрофессиональных компетенций в российских образовательных организациях // Гуманитарные науки. Вестник Финансового университета. 2022. № 6. С. 53–62. DOI: 10.26794/2226-7867-2022-12-6-53-62.

2. Сербина Н. В., Чудиновских М. В. Исследование сформированности надпрофессиональных компетенций студентов экономических специальностей первого года обучения в вузе // Вестник ОмГУ. 2023. № 3. С. 59–68. URL: https://economic-journal.omsu.ru/issues/372/11093.php (дата обращения: 06.08.2026).

3. Культенко С. К. К вопросу формирования надпрофессиональных компетенций у студентов высших учебных заведений // Журнал педагогических исследований. 2024. Т. 9. № 1. С. 136–149. DOI: 10.12737/2500-3305-2024-9-1-136-149.

4. Ахунов В. М. Музейная педагогика как научная дисциплина: к истории становления // Вестник Московского университета. 2008. № 4. С. 36–44. DOI: 10.51314/2073-2635-2008-4-36-44.

5. Шушара Т. В., Ридченко Г. В. Музейная педагогика как современная инновационная педагогическая технология // Гуманитарные науки. 2016. № 3 (35). С. 35–39. EDN: WJXMZX.

6. Короткова М. В. Музейная педагогика и историческое просвещение: задачи, формы и технологии в образовательной деятельности // История сегодня: векторы формирования профессиональной идентичности и культуры учителя: сборник материалов Всероссийской научной конференции (г. Москва, 25 октября 2024 г.). М.: Московский педагогический государственный университет, 2025. С. 103–111. EDN: BDEYKT.

7. Чупаха И. В. Музейная педагогика: социокультурный, воспитательно-образовательный потенциал и возможности // ЦИТИСЭ. 2019. № 4 (21). С. 41–48. DOI: 10.15350/24097616.2019.4.05.

8. Подлесная А. С. Интерактивные средства профессиональной педагогики как структурный компонент музейной педагогики // Вестник Барановичского государственного университета. 2024. № 2 (16). С. 23–28. EDN: OAKVNK.

9. Erbaş A. A., Akcan L., Akcan E. Museum-based learning for cultural heritage: Examining primary students' awareness and perceptions // Frontiers in Psychology. 2026. Vol. 17. DOI: 10.3389/fpsyg.2026.1836754.

10. Botke J. A, Jansen P. G. W., Khapova S. N., Tims M. Work factors influencing the transfer stages of soft skills training: A literature review // Educational Research Review. 2018. Vol. 24. DOI: 10.1016/j.edurev.2018.04.001.

11. Сырина Т. А., Померанцева Н. Г. Методы и технологии формирования мягких навыков на занятиях по иностранному языку для специальных целей // Мир науки. Педагогика и психология. 2021. Т. 9. № 5. EDN: HNOOGR.

12. Савельев М. Е. Использование универсальных учебных действий для формирования soft skills (мягких навыков) у обучающихся // Вопросы педагогики. 2022. № 6–2. С. 147–153. EDN: WFOGPU.

13. Iskhakbaeva T. G. Digital transformation and students' skill development: forging the balance of hard and soft skills // Bulletin of the Karaganda University. Pedagogy series. 2024. Vol. 29. № 4 (116). P. 167–174. EDN: OSRMDM.

14. Степашкина Е. А., Суходоев А. К., Гужеля Д. Ю. Исследование профиля надпрофессиональных компетен-

ций, востребованных ведущими работодателями при приеме на работу студентов и выпускников университетов и молодых специалистов // Современная аналитика образования. 2022. Т. 2. № 62. С. 1–32. URL: https://publications.hse.ru/articles/1118613431 (дата обращения: 28.09.2026).

15. Столяров Б. А. Педагогические аспекты образовательной деятельности музея. СПб.: Гос. Русский музей, 2013. 316 с.

16. Кетова Л. М. Музейная педагогика как инновационная педагогическая технология // Человек в мире культуры. 2012. № 4. С. 76–81. EDN: PLVRWX.

17. Kirillova N. B., Lyapustina P. A. Virtual museum as a new model of communicative culture and museum pedagogy prospects // Perspectives of Science and Education. 2023. № 3 (63). P. 662–675. DOI: 10.32744/pse.2023.3.40.

18. Троянская С. Л. Развитие общекультурной компетентности студентов средствами музейной педагогики: дис. … канд. пед. наук. Ижевск, 2004. 190 с. [Электронный ресурс]. URL: www.dissercat.com/content/razvitie-obshchekulturnoi-kompetentnosti-studentov-sredstvami-muzeinoi-pedagogiki-na-primere (дата обращения: 02.08.2026).

19. Попова Л. В., Пикуленко М. М. Современные тенденции музейной педагогики // Жизнь Земли. 2015. Т. 37. С. 278–282. EDN: ZCRKYV.

20. Kim K., Manohar S., Kalkat M., Iuliano K., Chisolm M. S. Museum-Based Education in Health Professions Learning: A 5-Year Retrospective // Perspectives on Medical Education. 2024. 13 (1). P. 585–591. URL: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11606393/ (дата обращения: 03.09.2026). DOI: 10.5334/pme.1448.

21. Васильева Т. Е. Роль музейной педагогики в формировании целостной личности // Вестник КрасГАУ. 2007. № 4. С. 251–255. EDN: IAFLPP.

22. Ambarwati D. R., Wulandari D., Isa B., Astuti E. P., Suardana I. W. Museum-based learning for creativity: Indonesian and Malaysian teachers' expectation vs reality // Humanities, Arts and Social Sciences Studies. 2023. № 23 (2). P. 316–326. URL: https://so02.tci-thaijo.org/index.php/hasss/article/view/263724 (дата обращения: 03.09.2026). DOI: 10.14456/hasss.2023.29.

23. Лопатина Е. В. Образовательно-воспитательный потенциал музейной педагогики // Актуальные вопросы гуманитарных наук: теория, методика, практика: сборник научных статей (г. Москва, 20 апреля 2016 г.). Выпуск IV. М.: Книгодел, 2017. С. 249–253. EDN: ZDWZBX.

24. Русский музей в Санкт-Петербурге. [Электронный ресурс]. URL: https://rusmuseumvrm.ru/online_resources/virtual_tours (дата обращения: 02.08.2026).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 378.147
DOI

CC BY 4.0

ПЕРСПЕКТИВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПОДГОТОВКИ УЧИТЕЛЕЙ ЕСТЕСТВЕННО-НАУЧНЫХ УЧЕБНЫХ ПРЕДМЕТОВ

[1]Паршутина Л. А., [1]Заграничная Н. А., [2]Рыжова О. Н.

[1]Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр психологических и междисциплинарных исследований», Москва, Российская Федерация, e-mail: parshutinala@mail.ru;

[2]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», Москва, Российская Федерация

Учителя физики, химии и биологии, как правило, хорошо владеют предметным содержанием, но хуже – методикой преподавания и цифровыми инструментами, тогда как программы повышения квалификации ориентированы преимущественно на предметную подготовку. Цель исследования – выявить структуру профессиональных дефицитов учителей естественно-научных предметов и обосновать направления совершенствования программ их подготовки и повышения квалификации. Теоретической основой послужила интеграционная модель, в которой предметные, методические и цифровые компетенции учителя рассматриваются во взаимосвязи. Применены анкетирование и тестирование учителей школ Московской области, полуструктурированные интервью, лонгитюдное наблюдение за слушателями программ разных форматов и контент-анализ учебных планов; данные обработаны методами дисперсионного, корреляционного и регрессионного анализа. Установлено, что предметная подготовка учителей сформирована лучше методической, а наиболее отстает цифровая, причем с возрастом учителя это отставание увеличивается. Слабее всего развиты умения вести научную дискуссию, строить контраргументы и критически анализировать аргументы. Продолжительность программы и доля практических занятий связаны с устойчивостью приобретенных компетенций; смешанные и модульно-накопительные форматы результативнее лекционных и дистанционных. Скорость адаптации начинающих учителей связана с качеством наставничества. Обоснована целесообразность сместить акцент программ повышения квалификации на методическую, аргументационную и цифровую подготовку, шире использовать сопровождение на рабочем месте и учитывать этап профессиональной карьеры учителя.

Ключевые слова: подготовка учителей, естественно-научное образование, профессиональная компетентность, повышение квалификации, цифровые компетенции, профессиональные дефициты, методическая подготовка

PROSPECTS FOR IMPROVING THE TRAINING OF TEACHERS OF NATURAL SCIENCE SUBJECTS

[1]Parshutina L. A., [1]Zagranichnaya N. A., [2]Ryzhova O. N.

[1]Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Center for Psychological and Interdisciplinary Research", Moscow, Russian Federation, e-mail: parshutinala@mail.ru;

[2]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Lomonosov Moscow State University", Moscow, Russian Federation

Physics, chemistry and biology teachers usually have a good command of subject content but are less proficient in teaching methods and digital tools, whereas in-service training programmes focus mainly on subject training. The aim of the study is to identify the structure of the professional deficits of natural science teachers and to substantiate the directions for improving their training and in-service training programmes. The theoretical framework is an integrative model in which the teacher's subject, methodological and digital competences are considered as interrelated. The study used questionnaires and tests for teachers from Moscow region schools, semi-structured interviews, longitudinal observation of participants in programmes of different formats and content analysis of curricula; the data were processed using variance, correlation and regression analysis. The teachers' subject training was found to be better developed than their methodological training, with digital training lagging furthest behind and the gap increasing with the teacher's age. The skills of conducting a scientific discussion, building counterarguments and critically analysing arguments are the least developed. Programme duration and the share of practical classes are associated with the stability of the acquired competences; blended and modular cumulative formats are more effective than lecture-based and distance formats. The speed of adaptation of novice teachers is associated with the quality of mentoring. The study substantiates the expediency of shifting the emphasis of in-service programmes to methodological, argumentative and digital training, making wider use of workplace support and taking into account the stage of the teacher's professional career.

Keywords: teacher training, science education, professional competence, professional development, digital competencies, professional gaps, methodological training

Введение

Естественно-научное образование за последние десятилетия существенно изменилось, однако подготовка учителей не всегда успевает за этими изменениями. При проектировании образовательных программ для учителей естественно-научных предметов исходят из того, что обучение должно охватывать все виды профессиональной компетентности и строиться как последовательность согласованных этапов разработки учебного плана [1]. Разрыв между теоретическим обучением будущего учителя и требованиями реальной профессиональной деятельности разработчики практико-ориентированных моделей предлагают сокращать, включая в образовательный процесс больше практических форм учебной деятельности [2].

Международные сравнительные исследования TIMSS и PISA показывают, что изучение естественно-научных предметов в российской школе в большей мере ориентировано на приобретение и демонстрацию знаний, чем на их применение и освоение научных практик: постановки научных вопросов, планирования исследования, интерпретации данных и построения научных доказательств [3]. Освоение этих практик учениками во многом зависит от того, умеет ли учитель организовать исследовательскую работу на уроке. К этому добавляются усложнение содержания предметов, развитие межпредметных связей и цифровизация обучения; для подготовки будущих учителей естественных наук к использованию информационно-коммуникационных технологий сформулированы принципы наглядности, системности, индивидуализации, интерактивности и ряд других [4].

Концептуальные основы подготовки учителя в последние годы пересматриваются. Предлагается сочетать традиционное обучение со смешанными, проектными и «перевернутыми» формами в специально организованной педагогико-технологической образовательной среде [5]. Отмечается, что сложившаяся система методической подготовки слабо учитывает реальное содержание методической работы учителя в классе, и предлагаются структурно-функциональные модели такой подготовки с предметным и метапредметным компонентами [6]. В основу концепции профессионально-педагогического образования положена идея непрерывности, при которой этапы подготовки педагога согласованы между собой и не завершаются получением диплома [7]. Отдельно обсуждается, как помочь молодому учителю освоиться в преподавании физики, химии или биологии и как выстроить для него действенное наставничество.

Понятие «профессиональная компетентность учителя естественно-научных предметов» трактуется по-разному, что затрудняет сопоставление результатов исследований. В настоящей работе под ней понимается интегративная характеристика педагога, включающая предметные знания, методические умения, психолого-педагогические способности и рефлексивные навыки, которые позволяют результативно решать задачи естественно-научного образования. Особое значение придается умению организовать исследовательскую деятельность школьников, т. е. помочь им сформулировать научную проблему, спланировать эксперимент, проанализировать данные и прийти к обоснованному выводу. С этим умением связана аргументационная компетентность – способность учителя вести на уроке научную дискуссию и учить школьников обосновывать свои утверждения.

Анализ публикаций позволяет выделить несколько недостаточно изученных вопросов. Первый касается аргументационной компетентности педагогов. В квазиэкспериментальном исследовании Дж. Осборна и соавторов программа повышения квалификации, направленная на аргументацию на основе доказательств, значимо улучшила организацию учебной дискуссии учителями начальной школы [8]; в отечественных исследованиях подобные данные для учителей естественно-научных предметов практически отсутствуют, а методических решений, пригодных для переноса в практику, предлагается мало. Второй вопрос связан с соединением фундаментальной и практико-ориентированной подготовки: оно обосновано теоретически, в том числе применительно к программам дополнительного профессионального образования [9], однако эмпирических сопоставлений разных форматов повышения квалификации с учетом специфики естественно-научных предметов немного.

Третий вопрос касается адаптации начинающих учителей. В опросе молодых педагогов Московской области она рассматривалась с точки зрения взаимодействия с коллегами, учениками и родителями, учебной нагрузки, оплаты труда и применимости вузовской подготовки в работе [10]; затруднения начинающих учителей физики, химии и биологии и роль наставничества в их преодолении изучены меньше. Четвертый вопрос связан с цифровизацией: ее влияние на содержание подготовки описано прежде всего для учителей математики и информатики, применительно к которым к приоритетам цифровой образовательной среды отнесены виртуальные тренажеры и лаборатории, персонализация образовательной траектории и оперативная обратная связь [11].

В отличие от названных работ, в настоящем исследовании система подготовки учителей естественно-научных предметов рассматривается с позиций интеграционного подхода: предметная, методическая и цифровая составляющие компетентности анализируются совместно. Исходным служит положение о том, что изменения в подготовке учителей следует строить на анализе их профессиональных дефицитов; в работе Л. Г. Смышляевой и соавторов такие дефициты сопоставлялись с учебными трудностями школьников, выявленными по результатам единого государственного экзамена [12]. Результативность форматов профессионального развития сравнивается в лонгитюдном дизайне: оценивается не только результат по окончании курсов, но и его сохранность через шесть месяцев. Работа развивает представления об исследовательской функции учителя как самостоятельной цели подготовки, требующей особой системы педагогических условий [13], а полученные данные могут использоваться при обновлении программ педагогического образования и повышения квалификации, в том числе при создании учебных средств, формирующих готовность будущего учителя «учиться учить» [14].

Цель исследования – выявить структуру профессиональных дефицитов учителей естественно-научных предметов общеобразовательных организаций Московской области и на этой основе обосновать направления совершенствования программ их подготовки и повышения квалификации.

Материалы и методы исследования

Методологической основой послужил системно-деятельностный подход, позволяющий рассматривать подготовку учителей естественно-научных предметов как многокомпонентную систему в изменяющейся образовательной среде и учитывать связи между компонентами профессиональной компетентности. Компетентностный подход использовался для операционализации изучаемых явлений и построения инструментария оценки профессиональной подготовленности педагогов.

Исследование проводилось с сентября 2023 г. по декабрь 2024 г. в три этапа. На первом этапе (сентябрь – ноябрь 2023 г.) проведено диагностическое анкетирование учителей по разработанной авторами анкете «Профессиональные компетенции учителя естественно-научных предметов» (ПК-ЕНП). Анкета включает 47 вопросов, сгруппированных по четырем компонентам профессиональной компетентности: предметно-содержательному, методическому, цифровому и рефлексивно-аналитическому. Она прошла экспертизу у семи специалистов в области педагогического образования и апробацию на 23 респондентах; коэффициент α Кронбаха составил 0,89.

На втором этапе (декабрь 2023 г. – март 2024 г.) проведены полуструктурированные интервью с 12 руководителями программ переподготовки учителей и 15 ведущими методистами по естественно-научным дисциплинам, а также углубленные интервью с 19 начинающими учителями основной выборки, проработавшими в школе не более пяти лет; использовался гид «Проблемы и перспективы профессионального развития учителей естественно-научных предметов» (15 основных вопросов). За 15 из этих 19 учителей в течение 16 месяцев велось педагогическое наблюдение, фиксировавшее сроки преодоления профессиональных затруднений. Третий этап (апрель – декабрь 2024 г.) был лонгитюдным: с помощью фокусированного педагогического наблюдения и контент-анализа продуктов профессиональной деятельности прослежено развитие 694 слушателей курсов повышения квалификации шести форматов. Параллельно выполнен контент-анализ учебных планов 15 таких программ, реализуемых пятью крупнейшими центрами профессионального развития Московской области.

Выборку анкетирования составили 89 учителей естественно-научных предметов общеобразовательных организаций Московской области (табл. 1). Использован стратифицированный отбор с пропорциональным распределением по преподаваемому предмету, педагогическому стажу, квалификационной категории и типу школы. В выборку включались учителя с высшим педагогическим образованием по профилю преподаваемого предмета, опытом преподавания не менее одного полного учебного года и добровольным информированным согласием на участие. Аргументационную компетентность оценивали тестом «Организация научной дискуссии» (ОНД), разработанным для данного исследования на основе модели аргументации С. Тулмина.

Данные обрабатывали в IBM SPSS Statistics 28.0. Рассчитывали описательные статистики и коэффициенты корреляции Пирсона; межгрупповые различия проверяли однофакторным дисперсионным анализом с апостериорными сравнениями по Тьюки. Для различий между компонентами компетентности, оцененными у каждого учителя, применяли дисперсионный анализ повторных измерений, для различий долей критерий χ^2 Пирсона; строили множественную регрессионную модель с пошаговым включением переменных.

Таблица 1

Состав выборки (n = 89)

Характеристика	Категория	Абсолютная частота	Относительная частота, %
Преподаваемый предмет	Физика	28	31,5
	Химия	31	34,8
	Биология	30	33,7
Педагогический стаж	До 5 лет	19	21,3
	5–15 лет	34	38,2
	Свыше 15 лет	36	40,4
Квалификационная категория	Высшая	41	46,1
	Первая	32	36,0
	Без категории	16	18,0
Тип образовательной организации	Городская школа	67	75,3
	Сельская школа	22	24,7

Примечание: составлено авторами по данным исследования. Выборка сформирована в сентябре – ноябре 2023 г.; по структуре она значимо не отличается от генеральной совокупности учителей естественно-научных предметов Московской области (сверка с данными Министерства образования Московской области: $\chi^2 = 2{,}14$, $p > 0{,}05$). Из-за округления сумма долей по признаку может отличаться от 100% на 0,1.

Нормальность распределений проверяли по критерию Колмогорова – Смирнова, а однородность дисперсий по критерию Левена. Уровень значимости принят равным 0,05, при множественных сравнениях долей применялась поправка Бонферрони. Наряду с p рассчитывали величину эффекта η^2, считая эффект малым при 0,01–0,06, средним при 0,06–0,14 и большим при значении более 0,14.

Результаты исследования и их обсуждение

Анкетирование выявило разрыв между содержанием подготовки и требованиями школьной практики: 65 из 89 опрошенных (73,0%) считают, что программы подготовки не отвечают современным требованиям к работе учителя. Чем продолжительнее пройденная программа профессионального развития, тем выше педагогическая эффективность ее выпускников ($r = 0{,}672$, $p < 0{,}001$).

Компоненты профессиональной компетентности сформированы неравномерно (табл. 2). Лучше всего развит предметно-содержательный компонент, т. е. знание научных понятий и логики учебного предмета: средний балл 8,4 ± 1,6 из 10, высокий уровень у 68 учителей (76,4%) при наименьшем коэффициенте вариации (19,0%). Методический компонент, отражающий владение педагогическими технологиями и методами обучения, оценен ниже (7,2 ± 2,2) при большем разбросе (30,6%): высокий уровень отмечен у 40 учителей (44,9%), низкий у 15 (16,9%).

Слабее всего сформирован цифровой компонент (6,2 ± 2,4), и разброс по нему наибольший (38,7%). Высокий уровень владения цифровыми технологиями применительно к преподаванию естественно-научных предметов показали 25 учителей (28,1%), а низкий уровень отмечен у 26 (29,2%). Рефлексивно-аналитический компонент, т. е. умение критически оценить собственную работу и определить направления ее улучшения, на высоком уровне сформирован у 37 респондентов (41,6%).

Наибольшие затруднения связаны с организацией научной дискуссии на уроке (табл. 3). Средний общий балл по тесту ОНД составил 5,13 ± 2,89 из 12, что соответствует нижней границе среднего уровня. Даже с наиболее успешно выполненным заданием на использование модели Тулмина полностью справился лишь 31 учитель (34,8%). Хуже других выполнены задания на построение контраргументов и критический анализ аргументов: полностью с ними справились 18 (20,2%) и 19 (21,3%) учителей, а 44 и 41 человек соответственно не получили за них ни одного балла. Организовать дискуссию между самими учениками в полной мере может 21 учитель (23,6%).

Общий балл ОНД значимо коррелирует с результатами учеников этих учителей на государственной итоговой аттестации ($r = 0{,}548$, $p < 0{,}01$), т. е. слабость аргументации учителя, по всей видимости, сказывается и на его классе.

Таблица 2

Сформированность компонентов профессиональной компетентности учителей естественно-научных предметов (n = 89)

Компонент компетентности	Высокий уровень (8–10 баллов)	Средний уровень (5–7 баллов)	Низкий уровень (0–4 балла)	Средний балл (M ± SD)	Коэффициент вариации, %
Предметно-содержательный	68 (76,4%)	18 (20,2%)	3 (3,4%)	8,4 ± 1,6	19,0
Методический	40 (44,9%)	34 (38,2%)	15 (16,9%)	7,2 ± 2,2	30,6
Цифровой	25 (28,1%)	38 (42,7%)	26 (29,2%)	6,2 ± 2,4	38,7
Рефлексивно-аналитический	37 (41,6%)	35 (39,3%)	17 (19,1%)	7,0 ± 2,0	28,6

Примечание: составлено авторами по данным исследования. Оценка по анкете ПК-ЕНП (47 вопросов, четыре компонента, α Кронбаха = 0,89); балл по компоненту получен суммированием стандартизированных баллов вопросов и выражен по 10-балльной шкале. Все компоненты оценивались у каждого из 89 учителей, поэтому различия между ними проверены дисперсионным анализом повторных измерений: $F(3; 264) \geq 17{,}15$, $p < 0{,}001$, частная $\eta^2 \geq 0{,}16$. Приведена нижняя граница статистики, рассчитанная по средним и стандартным отклонениям таблицы без учета положительной связи оценок компонентов; при ее учете значение F возрастает.

Таблица 3

Аргументационная компетентность учителей естественно-научных предметов по результатам теста ОНД (n = 89)

Аспект аргументационной компетентности	Справились полностью (2 балла)	Справились частично (1 балл)	Не справились (0 баллов)	Средний балл (M ± SD)
Формулирование научных тезисов	26 (29,2%)	35 (39,3%)	28 (31,5%)	0,98 ± 0,78
Подбор эмпирических оснований	22 (24,7%)	31 (34,8%)	36 (40,4%)	0,84 ± 0,80
Организация научных дискуссий	21 (23,6%)	33 (37,1%)	35 (39,3%)	0,84 ± 0,78
Критический анализ аргументов	19 (21,3%)	29 (32,6%)	41 (46,1%)	0,75 ± 0,79
Построение контраргументов	18 (20,2%)	27 (30,3%)	44 (49,4%)	0,71 ± 0,79
Использование модели Тулмина	31 (34,8%)	28 (31,5%)	30 (33,7%)	1,01 ± 0,83
Общий балл по тесту ОНД (0–12)	–	–	–	5,13 ± 2,89

Примечание: составлено авторами по данным исследования. Тест ОНД («Организация научной дискуссии») построен на модели аргументации С. Тулмина и включает шесть заданий, каждое оценивается от 0 до 2 баллов; максимальный общий балл – 12 (9–12 – высокий уровень, 5–8 – средний, 0–4 – низкий). Ретестовая надежность $r = 0{,}84$ ($p < 0{,}001$).

Типичными ошибками были смешение разных типов аргументации, неучет специфики научного дискурса и недостаточное внимание к развитию критического мышления учеников.

Сопоставление данных табл. 2 и 3 (рис. 1) показывает, что учитель уверенно владеет предметным содержанием, но значительно менее уверен в методике, особенно при работе с цифровыми средствами и при ведении научной дискуссии.

Форматы профессионального развития существенно различаются по результативности (табл. 4, рис. 2). В лонгитюдном наблюдении участвовали 694 слушателя шести форматов. Через шесть месяцев после окончания обучения наиболее высокий коэффициент устойчивости компетенций отмечен у модульно-накопительного формата (180 ч; 0,91 ± 0,07) и смешанного обучения (144 ч; 0,84 ± 0,09), наиболее низкий у традиционных лекционных программ (0,52 ± 0,12) и дистанционных онлайн-курсов (0,43 ± 0,18). Новые методы стали использовать в работе 74,3% выпускников модульно-накопительных программ и 28,5% слушателей лекционных курсов, т. е. примерно в 2,6 раза меньше.

Дистанционные онлайн-курсы требуют наименьших затрат и в расчете на слушателя (8400 руб.), и в расчете на одного слушателя, применяющего новые методы (около 38 тыс. руб. против 43–44 тыс. руб. у смешанного и модульно-накопительного форматов и почти 55 тыс. руб. у лекционного). Однако устойчивость приобретенных компетенций у них самая низкая, и применяют пройденное в работе лишь 22,1% слушателей, поэтому как самостоятельный формат они уступают программам с сопровождением.

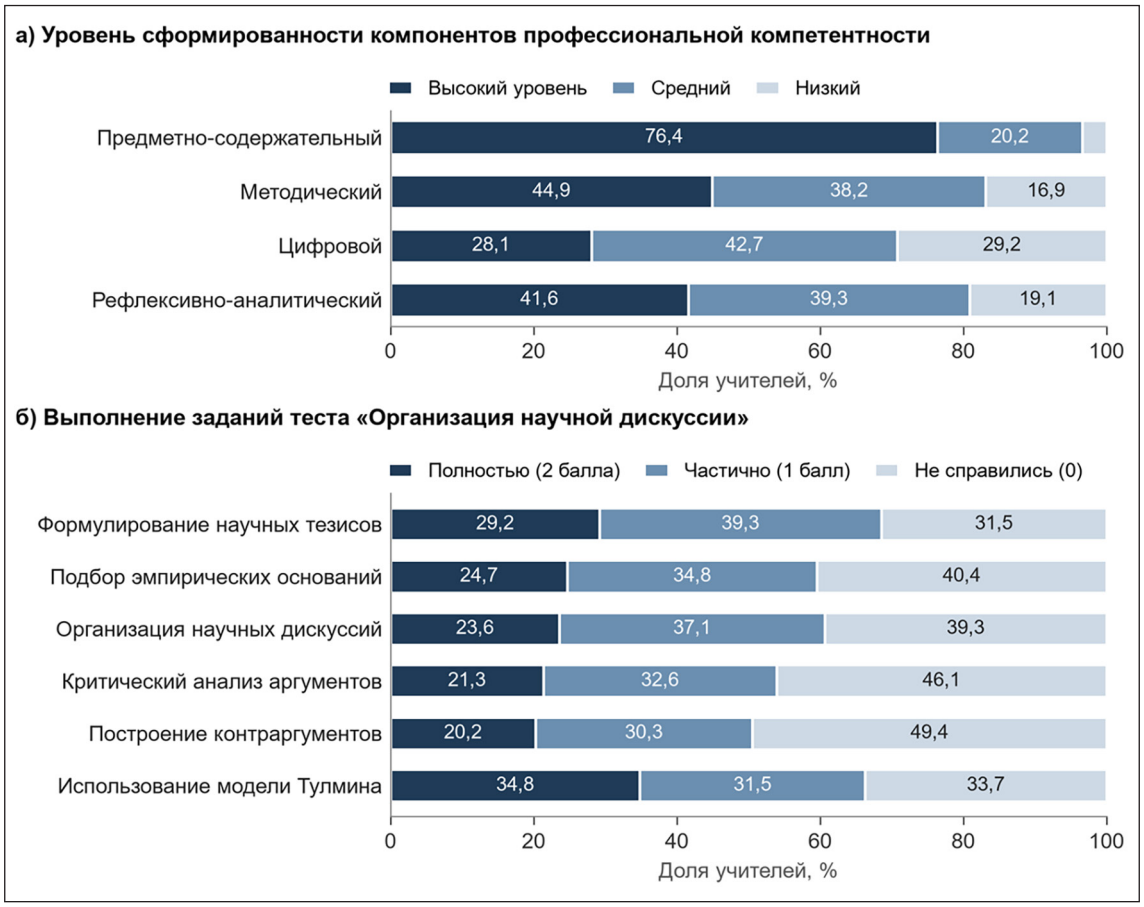


Рис. 1. Распределение учителей естественно-научных предметов по уровням сформированности компонентов профессиональной компетентности (а) и по результатам выполнения заданий теста «Организация научной дискуссии» (б), % (n = 89)
Примечание: составлено авторами по результатам исследования.
Уровни компонентов: высокий – 8–10 баллов, средний – 5–7, низкий – 0–4 балла по 10-балльной шкале

Таблица 4

Сравнение шести форматов профессионального развития учителей
(лонгитюдные данные, 2024 г.)

Формат профессионального развития	Количество участников	Продолжительность, акад. ч	Коэффициент устойчивости компетенций через 6 мес.	Внедрение инноваций, %	Средняя стоимость на одного участника, руб.
Традиционный лекционный	156	72	0,52 ± 0,12	28,5	15 600
Семинарско-практический	134	96	0,68 ± 0,15	45,2	21 300
Смешанное обучение	89	144	0,84 ± 0,09	67,1	28 900
Практико-ориентированный	67	120	0,79 ± 0,11	58,9	25 200
Дистанционный онлайн	203	60	0,43 ± 0,18	22,1	8400
Модульно-накопительный	45	180	0,91 ± 0,07	74,3	32 800

Примечание: составлено авторами по данным исследования. Наблюдение велось с апреля по декабрь 2024 г. Коэффициент устойчивости – отношение балла повторного тестирования через 6 мес. к баллу по окончании программы; процент внедрения инноваций определялся экспертной оценкой изменений педагогической практики участников; стоимость приведена по данным пяти крупнейших центров профессионального развития Московской области. Различия между форматами по коэффициенту устойчивости значимы: $F(5; 688) = 197{,}72$, $p < 0{,}001$, $\eta^2 = 0{,}59$.

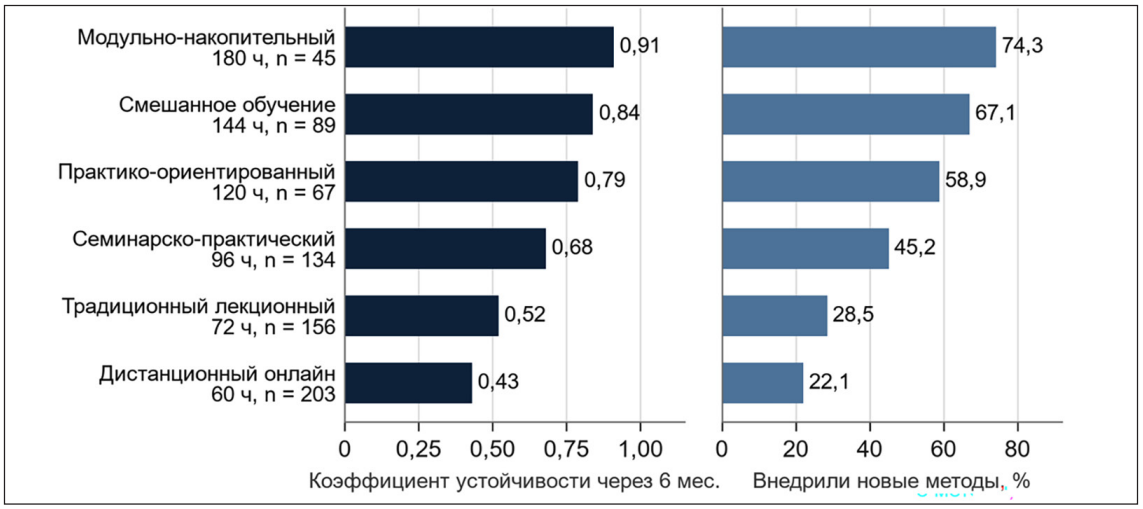


Рис. 2. Результативность форматов профессионального развития учителей: коэффициент устойчивости компетенций через 6 мес. и доля слушателей, внедривших новые методы
Примечание: составлено авторами по результатам исследования.
Под названием формата указаны его продолжительность и число участников

Таблица 5

Приоритетные направления профессионального развития
в оценке учителей с разным стажем

Направление профессионального развития	Стаж до 5 лет (n = 19)	5–15 лет (n = 34)	Свыше 15 лет (n = 36)	Средняя доля, % (место в рейтинге)
Методические компетенции	16 (84,2%)	18 (52,9%)	12 (33,3%)	56,8 (1)
Цифровые технологии в обучении	11 (57,9%)	23 (67,6%)	15 (41,7%)	55,7 (2)
Современные методы оценивания	12 (63,2%)	21 (61,8%)	14 (38,9%)	54,6 (3)
Аргументационные навыки	8 (42,1%)	19 (55,9%)	22 (61,1%)	53,0 (4)
Обновление предметного содержания	6 (31,6%)	15 (44,1%)	28 (77,8%)	51,2 (5)
Работа с одаренными детьми	7 (36,8%)	16 (47,1%)	21 (58,3%)	47,4 (6)
Инклюзивное образование	9 (47,4%)	12 (35,3%)	18 (50,0%)	44,2 (7)

Примечание: составлено авторами по данным исследования. Вопрос допускал выбор не более четырех направлений, поэтому сумма долей по столбцу превышает 100%; доли рассчитаны от численности стажевой группы. Место в рейтинге определено по средней доле выбравших направление в трех стажевых группах (каждая группа учитывается с равным весом). Поскольку один респондент мог выбрать несколько направлений, различия между группами проверялись отдельно по каждому направлению (критерий χ^2 Пирсона для таблицы 2 × 3, df = 2).

Запросы к повышению квалификации зависят от педагогического стажа (табл. 5). Учителя со стажем до пяти лет на первое место ставят методику: о нехватке практических навыков организации учебного процесса сообщили 16 из 19 (84,2%), чаще всего называя планирование урока с учетом индивидуальных особенностей учеников (15 из 19), организацию групповой работы (14) и дифференцированное обучение (13). В группе со стажем 5–15 лет чаще выбирают цифровые технологии (23 из 34; 67,6%) и современные методы оценивания (21; 61,8%), а учителя со стажем свыше 15 лет чаще называют обновление предметного содержания (28 из 36; 77,8%) и новые подходы к организации исследовательской деятельности школьников.

Статистически значимо различаются между стажевыми группами доли выбравших методические компетенции ($\chi^2(2) = 12{,}93$, $p = 0{,}002$, V Крамера = 0,38) и обновление предметного содержания ($\chi^2(2) = 13{,}39$, $p = 0{,}001$, $V = 0{,}39$); оба различия сохраняются после поправки Бонферрони на семь сравнений. По цифровым технологиям и методам оценивания различия находятся на уровне тенденции ($p = 0{,}09$), по остальным направлениям они незначимы. Следовательно, единая программа для всех учи-

телей вряд ли окажется результативной, и программы профессионального развития целесообразно проектировать дифференцированно по этапам карьеры.

Приоритеты учителей с разным стажем и затруднения начинающих педагогов сопоставлены на рис. 3. С ростом стажа интерес учителей смещается от методики к цифровым технологиям и далее к обновлению предметного содержания (рис. 3а), а у начинающих учителей наиболее частым затруднением остается управление учебным процессом (рис. 3б).

Данные по начинающим учителям приведены в табл. 6. В интервью 15 из 19 (78,9%) сообщили о серьезных трудностях в первый год работы и связывали их с нехваткой практических навыков и отсутствием методической поддержки. Чаще всего (13 чел., 68,4%) речь шла об управлении учебным процессом, критичность которого оценена в 4,7 ± 0,6 балла из 5; выше оценено только поддержание дисциплины (4,8 ± 0,4), хотя упоминалось оно реже (рис. 3б). Одиннадцать учителей (57,9%) испытывали сложности с лабораторными и практическими работами, а десять (52,6%) не были уверены в современных методах оценивания.

Без дополнительной поддержки в первый год адаптировались шестеро из 19 учителей (31,6%); остальным тринадцати понадобилось систематическое наставничество с методическим сопровождением. По данным 16-месячного наблюдения за 15 учителями, на освоение базовых навыков уходило не менее восьми месяцев, на поддержание дисциплины в классе требовалось до 16, а скорость адаптации была связана с качеством помощи наставника ($r = 0{,}719$, $n = 15$, $p < 0{,}01$).

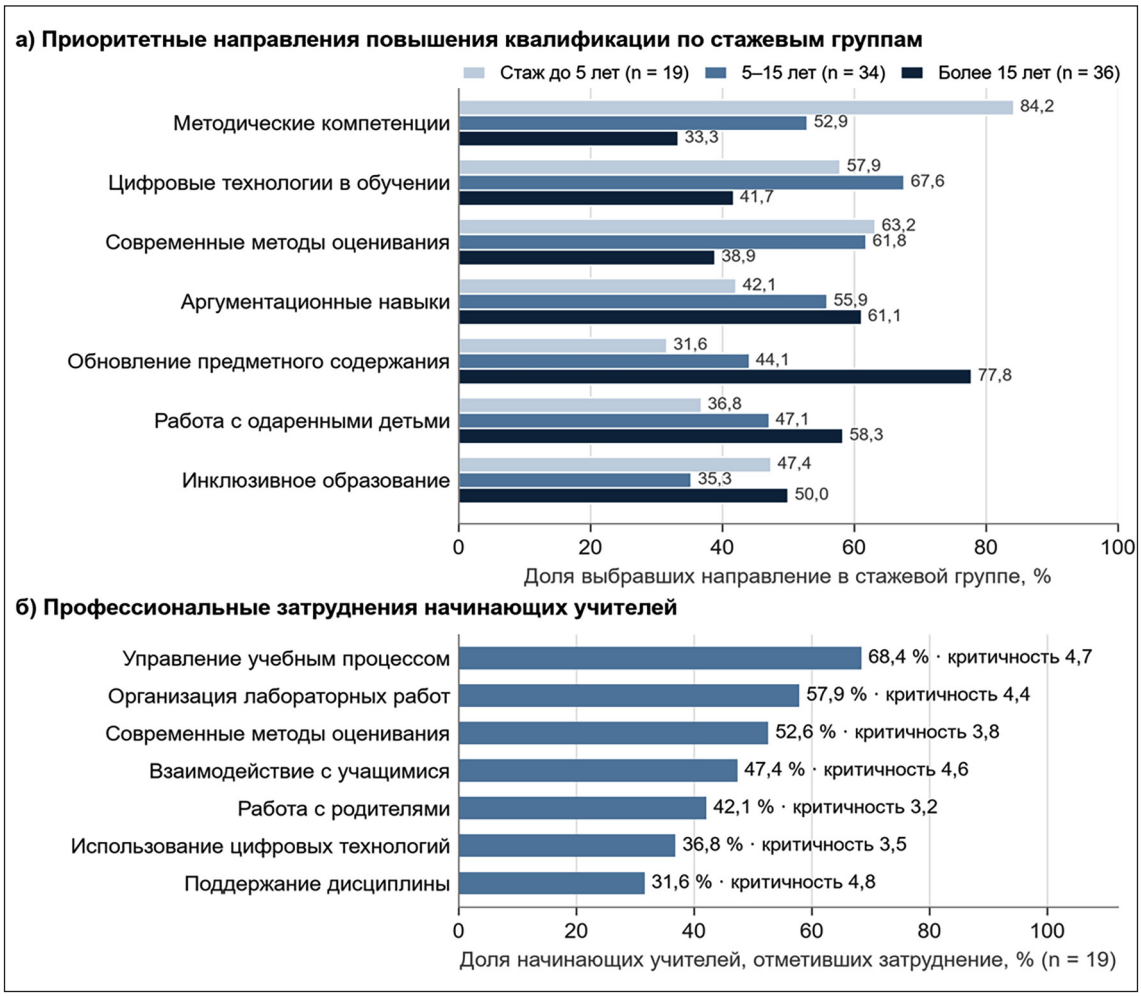


Рис. 3. Приоритетные направления повышения квалификации учителей с разным стажем (а) и профессиональные затруднения начинающих учителей естественно-научных предметов (б)
Примечание: составлено авторами по результатам исследования.
На фрагменте «б» рядом с долей учителей, отметивших затруднение, указана средняя оценка его критичности по 5-балльной шкале

Таблица 6

Профессиональные затруднения начинающих учителей естественно-научных предметов (n = 19)

Тип профессиональных затруднений	Частота проявления	Степень критичности (1–5 баллов)	Потребность в наставнической поддержке	Среднее время преодоления, мес.
Управление учебным процессом	13 из 19 (68,4%)	4,7 ± 0,6	17 из 19 (89,5%)	8–12
Организация лабораторных работ	11 из 19 (57,9%)	4,4 ± 0,8	15 из 19 (78,9%)	6–10
Современные методы оценивания	10 из 19 (52,6%)	3,8 ± 0,7	12 из 19 (63,2%)	4–8
Взаимодействие с учащимися	9 из 19 (47,4%)	4,6 ± 0,5	14 из 19 (73,7%)	6–14
Работа с родителями	8 из 19 (42,1%)	3,2 ± 0,9	9 из 19 (47,4%)	3–6
Использование цифровых технологий	7 из 19 (36,8%)	3,5 ± 1,1	11 из 19 (57,9%)	4–8
Поддержание дисциплины	6 из 19 (31,6%)	4,8 ± 0,4	13 из 19 (68,4%)	8–16

Примечание: составлено авторами по данным исследования. Частота затруднений, их критичность и потребность в поддержке наставника определены по материалам углубленных интервью с 19 начинающими учителями (декабрь 2023 г. – март 2024 г.); критичность оценивалась респондентами по 5-балльной шкале Ликерта (1 – минимальная, 5 – максимальная). Сроки преодоления затруднений получены в ходе 16-месячного наблюдения за 15 из этих учителей; на этой подвыборке связь качества наставнической поддержки со скоростью профессиональной адаптации составила $r = 0{,}719$ ($n = 15$, $p < 0{,}01$).

Таблица 7

Владение цифровыми инструментами у учителей до 35 лет, 35–50 лет и старше 50 лет

Цифровая технология / инструмент	До 35 лет (n = 32)	35–50 лет (n = 38)	Старше 50 лет (n = 19)	Вся выборка (n = 89)
Интерактивные презентации	30 (93,8%)	28 (73,7%)	8 (42,1%)	66 (74,2%)
Онлайн-тестирование	28 (87,5%)	24 (63,2%)	6 (31,6%)	58 (65,2%)
Виртуальные лаборатории	19 (59,4%)	12 (31,6%)	2 (10,5%)	33 (37,1%)
Симуляционные программы	17 (53,1%)	10 (26,3%)	3 (15,8%)	30 (33,7%)
Цифровые микроскопы	14 (43,8%)	18 (47,4%)	7 (36,8%)	39 (43,8%)
Мобильные приложения для обучения	25 (78,1%)	16 (42,1%)	4 (21,1%)	45 (50,6%)
Облачные сервисы для совместной работы	29 (90,6%)	22 (57,9%)	5 (26,3%)	56 (62,9%)
Средний индекс цифровой компетентности (M ± SD)	7,4 ± 1,2	5,1 ± 1,8	3,5 ± 1,6	5,6 ± 2,2

Примечание: составлено авторами по данным исследования. По каждому инструменту фиксировалось «владеет уверенно» или «не владеет» на основании практических заданий и самооценки учителя. Индекс цифровой компетентности объединяет семь показателей и пересчитан в 10-балльную шкалу; значение по всей выборке рассчитано как взвешенное по численности групп. Возрастные группы различаются значимо: $F(2; 86) = 40{,}21$, $p < 0{,}001$, $\eta^2 = 0{,}48$; по критерию Тьюки различия значимы для каждой пары групп ($p < 0{,}01$).

Готовность к работе в цифровой среде существенно различается у учителей разного возраста (табл. 7). Средний индекс цифровой компетентности у педагогов моложе 35 лет составил 7,4 ± 1,2 балла из 10, у учителей 35–50 лет 5,1 ± 1,8, у учителей старше 50 лет 3,5 ± 1,6, т. е. примерно вдвое меньше, чем у самых молодых. Облачными сервисами для совместной работы уверенно пользуются 29 из 32 молодых учителей и 5 из 19 старшего возраста. Наименее освоены виртуальные лаборатории и симуляционные программы: по всей выборке ими уверенно владеют 33 (37,1%) и 30 человек (33,7%), а специализированными программами для моделирования физических и химических процессов владеют лишь 10 из 89 (11,2%).

Возраст и цифровая компетентность связаны отрицательно ($r = -0{,}68$, $p < 0{,}001$), поэтому повышение цифровой квалификации учителей старшего поколения требует систематической работы. По данным регрессионного анализа, рост цифровой компетентности учителя на одно стандартное отклонение сопровождается повышением средних результатов его учеников по естественно-научным предметам на 0,23 стандартного отклонения ($\beta = 0{,}23$, $p < 0{,}05$).

Таблица 8

Структура программ повышения квалификации учителей естественно-научных предметов в Московской области

Программа повышения квалификации	Общий объем, акад. ч	Теоретические модули, %	Практические модули, %	Модуль «Аргументация в науке», %	Цифровые технологии, %	Коэффициент эффективности
«Современные технологии в естественно-научном образовании»	72	68,5	31,5	12,0	18,5	0,31 ± 0,15
«Методика преподавания физики в условиях ФГОС»	108	62,3	37,7	22,5	28,1	0,58 ± 0,12
«Интегративный подход в естественно-научном образовании»	144	55,1	44,9	31,8	35,7	0,74 ± 0,09
«Цифровая трансформация химического образования»	120	48,6	51,4	42,3	41,2	0,86 ± 0,07
«Модульная система профессионального развития»	180	43,2	56,8	48,9	46,3	0,92 ± 0,06

Примечание: составлено авторами по данным исследования. Проанализированы учебные планы 15 программ, реализуемых пятью крупнейшими центрами профессионального развития Московской области в 2023/2024 учебном году; в таблице приведены программы, содержащие модуль «Аргументация в науке». Доли теоретических и практических модулей в сумме составляют 100%; доли модуля по аргументации и цифровых технологий указаны от общего объема программы и с ними не суммируются. Коэффициент эффективности – средневзвешенное значение трех показателей, измеренных через 6 мес. после окончания программы: устойчивости знаний, их практического применения и удовлетворенности участников. Корреляция доли практических занятий с коэффициентом эффективности по 15 программам $r = 0,89$ ($p < 0,01$).

Контент-анализ 15 учебных планов показал, что в краткосрочных курсах теория преобладает над практикой (табл. 8). В 72-часовой программе «Современные технологии в естественно-научном образовании» на практические занятия приходится 31,5% объема, а коэффициент эффективности самый низкий (0,31 ± 0,15); в модульной системе профессионального развития (180 ч) их доля составляет 56,8%, коэффициент достигает 0,92 ± 0,06. Доля практических занятий и коэффициент эффективности тесно связаны ($r = 0,89$, $p < 0,01$).

Модуль «Аргументация в науке» включен лишь в пять из пятнадцати программ, все они приведены в табл. 8; его доля колеблется от 12,0% объема 72-часовой программы до 48,9% в модульной системе профессионального развития. По лонгитюдным данным, устойчивые изменения в работе учителя обеспечивают программы объемом не менее 120 ч, в которых практические модули занимают больше половины времени.

Полученные данные согласуются с результатами исследований, выполненных на сходном материале. Б. Д. Кучер, опросивший 32 учителя естественно-научных предметов Севастополя, выделяет в структуре их профессиональной компетентности восемь компонентов, в том числе предметно-методический, исследовательский и информационно-коммуникационный [15]. Среди источников роста своей компетентности учителя на первое место поставили обмен опытом с коллегами (30,8%), а курсам повышения квалификации отвели только третье место (20,5%); наиболее результативными они сочли очную и смешанную формы обучения [15]. Это согласуется с выявленным преимуществом форматов, в которых обучение дополняется сопровождением на рабочем месте. Аргументационная составляющая в названной структуре отдельно не выделяется, тогда как результаты теста ОНД показывают, что ее целесообразно рассматривать как самостоятельный объект диагностики и обучения.

Б. Д. Кучер и А. Д. Дегтяр, обосновывая организационно-педагогические условия формирования у учителей физики, химии и биологии компетентности в области дистанционных образовательных технологий, исходят из противоречия между нормативными требованиями к цифровой компетентности педагога и его фактической подготовкой; эффективность этих условий проверена в эксперименте со студентами направления «Педагогическое образование» (профиль «Математика и физика») [16]. Результаты анкетирования работающих учителей подтверждают это противоречие: цифровой компонент оказался наименее сформированным, а у учителей старше 50 лет соответствующий индекс вдвое ниже, чем у учителей моложе 35 лет. Виртуальные лаборатории и симуляционные программы,

которые для учителей математики и информатики относят к приоритетам цифровой образовательной среды [11], уверенно используют лишь около трети опрошенных.

Н. С. Сологуб, Н. В. Науменко и Р. И. Айзман показали, что готовность будущих учителей естественно-научных предметов к STEAM-образованию формируется целенаправленной методической подготовкой в рамках специальной учебной дисциплины, включенной в учебный план; необходимость такого обучения отметили более 75% опрошенных ими учителей [17]. Сходный вывод следует из сравнения форматов повышения квалификации: при сопоставимой продолжительности результативнее те программы, в которых методическая и практическая составляющие выделены явно. В исследовании Дж. Осборна и соавторов программа, специально направленная на аргументацию, улучшила организацию учебной дискуссии [8], тогда как в изученных программах Московской области модуль по аргументации есть лишь в пяти из пятнадцати.

М. В. Семенова, Н. В. Ефимова и Т. В. Шилкова описывают использование оборудования технопарка универсальных педагогических компетенций в подготовке будущих учителей биологии через междисциплинарные задания и учебно-методические комплексы нового поколения [18]. По-видимому, сходное условие действует и в повышении квалификации: новые форматы и средства обучения дают эффект при перестройке содержания программы. По данным анкетирования, учителя, охотно говоря о потребности в практико-ориентированных форматах, выбирают программы, построенные вокруг предметного содержания. Предметный компонент сформирован у них лучше всего (8,4 балла из 10), однако педагоги со стажем свыше 15 лет первым приоритетом называют его обновление (77,8%), т. е. привычная логика повышения квалификации пока оказывается сильнее реальных дефицитов, лежащих в методической и цифровой области.

Связь общего балла ОНД с результатами учеников на государственной итоговой аттестации ($r = 0{,}548$) согласуется с подходом, при котором профессиональные дефициты учителя выявляются по учебным трудностям его учеников [12]. Дефицит аргументационной компетентности учителя, по-видимому, проявляется в слабости школьников в тех научных практиках, которые фиксируют международные исследования: постановке вопросов, интерпретации данных, построении доказательств [3]. Выявленная связь скорости адаптации начинающих учителей с качеством наставничества дополняет данные опроса молодых педагогов Московской области, где адаптация рассматривалась с точки зрения взаимодействия с коллегами, учениками и родителями и применимости вузовской подготовки в работе [10].

Ограничения исследования связаны с региональным характером выборки, самооценочным характером части показателей и небольшим объемом подвыборки начинающих учителей (19 человек в интервью и 15 под наблюдением), поэтому выявленные связи требуют проверки на выборках других регионов.

Заключение

Проведенное исследование показало, что традиционная система подготовки учителей естественно-научных предметов во многом расходится с требованиями современной школы. Средний балл учителей по тесту ОНД (5,13 из 12) соответствует нижней границе среднего уровня, а с заданиями на построение контраргументов и критический анализ аргументов полностью справляется лишь каждый пятый учитель. Продолжительность программ профессионального развития значимо связана с педагогической эффективностью ($r = 0{,}672$, $p < 0{,}001$), что обосновывает увеличение их объема до 120–180 академических часов: через полгода после обучения коэффициент устойчивости компетенций у модульно-накопительных программ составил 0,91, у традиционных лекционных 0,52. Результативнее программы, в которых практические занятия занимают больше половины объема.

Цифровой компонент компетентности сформирован хуже остальных: высокий уровень показали 25 учителей из 89 (28,1%), и с возрастом показатели снижаются ($r = -0{,}68$, $p < 0{,}001$). Цифровую составляющую целесообразно встраивать в каждый модуль подготовки учителя естественно-научных предметов, уделяя особое внимание виртуальным лабораториям и симуляционному программному обеспечению; учителям старшего поколения требуется дополнительная поддержка.

Программы следует проектировать с учетом этапа профессиональной карьеры. Начинающим учителям прежде всего нужна методическая помощь (о ее необходимости сообщили 16 из 19), опытным нужно обновление предметного содержания (28 из 36), и различия между стажевыми группами по этим направлениям статистически значимы. Специфика содержания и лабораторного практикума по физике, химии и биологии обосновывает выделение отдельных модулей для учителей каждого предмета. Начинающим учителям необходимо наставничество продолжительностью не менее восьми месяцев; связь его качества со скоростью адаптации ($r = 0{,}719$, $p < 0{,}01$) обосновывает институционализацию наставничества с привлечением опытных педагогов-методистов.

Перспективными представляются модульно-накопительные программы объемом 120–180 академических часов с долей практических занятий более 50% и обязательным модулем по развитию аргументационной компетентности, включающим структурированные методики аргументации (в том числе модель Тулмина) и критический анализ научных утверждений. Такая организация позволяет реализовать интеграционную модель, в которой предметные, методические, цифровые и исследовательские компетенции учителя формируются совместно и на практико-ориентированной основе.

Список литературы

1. Nurmukhamedova Zh., Nurbayeva D., Yerzhenbek B., Nassirova D. Strategies and techniques for creating educational programs for teachers of natural science subjects // International Journal of Evaluation and Research in Education. 2025. Vol. 14. № 2. P. 1369–1378. DOI: 10.11591/ijere.v14i2.28905.

2. Власова В. К., Закирова В. Г., Камалова Л. А., Каюмова Л. Р., Сабирова Э. Г., Хаирова И. В. Механизмы оптимизации и обновления содержательно-методической подготовки будущих учителей начальных классов // Образование и саморазвитие. 2023. Т. 18. № 1. С. 87–105. DOI: 10.26907/esd.18.1.07.

3. Пентин А. Ю., Ковалева Г. С., Давыдова Е. И., Смирнова Е. С. Состояние естественнонаучного образования в российской школе по результатам международных исследований TIMSS и PISA // Вопросы образования. 2018. № 1. С. 79–109. DOI: 10.17323/1814-9545-2018-1-79-109.

4. Sovhira S., Braslavska O., Dushechkina N., Liulenko S., Zadorozhna O. Training of future teachers of natural sciences for the use of information and communication technologies in their professional activities // Amazonia Investiga. 2022. Vol. 11. № 60. P. 167–176. DOI: 10.34069/AI/2022.60.12.18.

5. Наумкин Н. И., Шекшаева Н. Н., Купряшкин В. Ф., Забродина Е. В. Подготовка будущих педагогов к инновационной деятельности в педагогико-технологической образовательной среде // Образование и наука. 2022. Т. 24. № 10. С. 124–164. DOI: 10.17853/1994-5639-2022-10-124-164.

6. Saipov A., Kamalov M., Kamalov Yu., Poshayev D., Ortayev B. A conceptual model of the system of methodical training of future teachers for vocational training // International Journal of Innovative Research and Scientific Studies. 2024. Vol. 7. № 1. P. 146–158. DOI: 10.53894/ijirss.v7i1.2568.

7. Федоров В. А., Кубрушко П. Ф., Дубицкий В. В., Феоктистов А. В. Профессионально-педагогическое образование в России на современном этапе: концептуальный аспект // Образование и наука. 2022. Т. 24. № 7. С. 11–44. DOI: 10.17853/1994-5639-2022-7-11-44.

8. Osborne J. F., Borko H., Fishman E., Gomez Zaccarelli F., Berson E., Busch K. C., Reigh E., Tseng A. Impacts of a practice-based professional development program on elementary teachers' facilitation of and student engagement with scientific argumentation // American Educational Research Journal. 2019. Vol. 56. № 4. P. 1067–1112. DOI: 10.3102/0002831218812059.

9. Boronenko T. A., Kaisina A. V., Fedotova V. S. Transdisciplinary understanding of the fundamental and practice-oriented nature of pedagogical education // Perspectives of Science and Education. 2024. № 3(69). P. 27–43. DOI: 10.32744/pse.2024.3.2.

10. Болдышева Н. О., Лубский А. А. Адаптация молодых учителей в условиях дефицита рабочей силы в системе образования Московской области // Стандарты и мониторинг в образовании. 2021. Т. 9. № 3. С. 13–20. DOI: 10.12737/1998-1740-2021-9-3-13-20.

11. Boronenko T. A., Fedotova V. S. Fundamentalisation of professional training of future teachers of mathematics and computer science in the conditions of digitalisation // Perspectives of Science and Education. 2023. № 4(64). P. 90–107. DOI: 10.32744/pse.2023.4.6.

12. Смышляева Л. Г., Семенова Н. А., Куровская Л. В., Смышляев К. А. Оценка и развитие профессионализма преподавателей высшего педагогического образования: изменения концепции и технологии // Вестник Томского государственного университета. 2022. № 483. С. 209–220. DOI: 10.17223/15617793/483/23.

13. Imankulova L., Kurmanbay A., Bakirova L., Seidaliyeva G., Aizhanova G., Ergeshov E. Enhancement of scientific research function of future teachers in modern education system // Cypriot Journal of Educational Sciences. 2022. Vol. 17. № 3. P. 741–751. DOI: 10.18844/cjes.v17i3.6936.

14. Бархатова Д. А., Марьясова А. Н., Пак Н. И., Фаут Ю. В. Технология создания инновационного учебника для системы педагогического образования // Информатика и образование. 2024. Т. 39. № 4. С. 51–61. DOI: 10.32517/0234-0453-2024-39-4-51-61.

15. Кучер Б. Д. Формирование профессиональной компетентности учителей естественно-научного цикла: сущность, структура и функции // Концепт. 2024. № 4. С. 158–172. DOI: 10.24412/2304-120X-2024-11049.

16. Кучер Б. Д., Дегтяр А. Д. Развитие готовности учителей физики, химии и биологии к использованию дистанционных образовательных технологий в профессиональной деятельности: организационно-педагогические условия // Педагогика. Вопросы теории и практики. 2025. Т. 10. № 5. С. 600–609. DOI: 10.30853/ped20250073.

17. Сологуб Н. С., Науменко Н. В., Айзман Р. И. Оценка сформированности STEAM-компетентности будущих учителей естественно-научных учебных предметов // Science for Education Today. 2023. Т. 13. № 5. С. 7–30. DOI: 10.15293/2658-6762.2305.01.

18. Семенова М. В., Ефимова Н. В., Шилкова Т. В. Междисциплинарное учебно-методическое сопровождение медико-биологических дисциплин с использованием ресурсов «Технопарка универсальных педагогических компетенций» // Перспективы науки и образования. 2024. № 1(67). С. 258–284. DOI: 10.32744/pse.2024.1.14.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Исследование выполнено в рамках государственного задания Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр психологических и междисциплинарных исследований» по теме «Ресурсно-прогностическая детерминация личностного и профессионального развития учащихся и педагогов как субъектов непрерывного образования: психологические основы, технологии, факторы эффективности» (FNRE-2024-0017) (Паршутина Л.А., Заграничная Н.А.); в рамках государственного задания Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», регистрационный номер 121121600197-3 (Рыжова О.Н.). Источники финансирования не участвовали в разработке дизайна исследования, сборе и анализе данных, подготовке рукописи и решении о публикации.

Financing: The study was carried out within the state assignment of the Federal Scientific Center for Psychological and Interdisciplinary Research on the topic "Resource-prognostic determination of the personal and professional development of students and teachers as subjects of continuing education: psychological foundations, technologies, efficiency factors" (FNRE-2024-0017) (Parshutina L.A., Zagranichnaya N.A.) and within the state assignment of Lomonosov Moscow State University, registration number 121121600197-3 (Ryzhova O.N.). The funding sources were not involved in the study design, data collection and analysis, preparation of the manuscript or the decision to publish.

УДК 378.147
DOI

CC BY 4.0

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ АДАПТИВНОГО КУРСА ДЛЯ ИНЖЕНЕРНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ НА ПРИМЕРЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТА ПО ЭЛЕКТРОНИКЕ

Потапов А. А. ORCID ID 0000-0002-4497-5796

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», Казань, Российская Федерация, e-mail: aapot@ya.ru

В статье рассматривается проблема персонализации инженерного образования в условиях цифровой трансформации высшей школы. Несмотря на широкое внедрение электронных образовательных сред, проектная деятельность студентов, особенно в технических дисциплинах, зачастую остается слабо адаптированной к индивидуальным особенностям обучающихся. Автором предложена и экспериментально обоснована методика проектирования адаптивного курса на базе Moodle для выполнения курсового проекта по электронике. Методика основана на ветвлении учебных материалов в зависимости от результатов промежуточного тестирования и автоматическом управлении доступом к модулям курса. Эксперимент проведен на 123 студентах 3-го курса Казанского государственного энергетического университета, разделенных на экспериментальную (63 чел.) и контрольную (60 чел.) группы. Статистический анализ показал повышение итоговых баллов в экспериментальной группе (79,7 против 68,6), рост доли оценок «отлично» с 13,3 до 28,6 %, сокращение сроков выполнения проекта на 14,4 дня и снижение числа обращений к преподавателю в 2,5 раза. Показано, что предлагаемый комплекс адаптивных организационно-методических условий, реализуемый стандартными инструментами Moodle, сопровождался повышением самостоятельности обучающихся, снижением временных затрат преподавателя на сопровождение и может быть адаптирован для других инженерных дисциплин с проектной составляющей.

Ключевые слова: адаптивное обучение, LMS Moodle, курсовой проект, инженерное образование, персонализация, управление доступом, модульная структура, электроника, методика обучения, качество образования

METHODOLOGY FOR DESIGNING AN ADAPTIVE COURSE FOR AN ENGINEERING DISCIPLINE ON THE EXAMPLE OF A COURSE PROJECT IN ELECTRONICS

Potapov A. A. ORCID ID 0000-0002-4497-5796

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kazan State Power Engineering University", Kazan, Russian Federation, e-mail: aapot@ya.ru

The article discusses the problem of personalization of engineering education in the context of the digital transformation of higher education. Despite the widespread introduction of electronic educational environments, the project activities of students, especially in technical disciplines, often remain poorly adapted to the individual characteristics of students. The author proposes and experimentally substantiates a methodology for designing an adaptive course based on Moodle for the implementation of a course project in electronics. The methodology is based on branching of training materials depending on the results of intermediate testing and automatic control of access to course modules. The experiment was conducted on 123 3rd year students of Kazan State Power Engineering University, divided into experimental (63 people) and control (60 people) groups. Statistical analysis showed an increase in the final scores in the experimental group (79.7 versus 68.6), an increase in the share of "excellent" grades from 13.3 to 28.6 %, a reduction in the project implementation time by 14.4 days and a decrease in the number of requests to the teacher by 2.5 times. It is shown that the proposed set of adaptive organizational and methodological conditions, implemented by standard Moodle tools, was accompanied by an increase in the independence of students, a decrease in the teacher's time spent on support and can be adapted for other engineering disciplines with a project component.

Keywords: adaptive learning, LMS Moodle, course project, engineering education, personalization, access control, modular structure, electronics, teaching methodology, quality of education

Введение

Современный этап развития высшего профессионального образования характеризуется активной цифровой трансформацией, внедрением электронных образовательных сред и поиском эффективных моделей персонализации обучения [1]. Федеральные государственные образовательные стандарты (ФГОС 3++) задают требования к результатам освоения образовательных программ в виде универсальных, общепрофессиональных и профессиональных компетенций, однако оставляют за образовательной организацией право выбора средств и технологий их формирования. В этих условиях особое значение приобретают подходы, позволяющие обеспечить достижение единых для всех студентов компетенций при одновременном учете их индивидуальных особенностей, начального уровня подготовки и темпа освоения материала. Одним из перспективных направлений является адаптивное обучение, реализуемое с использованием функциональных возможностей систем

управления обучением (LMS), в частности – платформы Moodle.

Проблематика адаптивного обучения активно разрабатывается как в зарубежной, так и в отечественной педагогической науке [2–4]. Однако большинство исследований сосредоточено либо на теоретическом обосновании адаптивных моделей, либо на их применении в рамках лекционно-семинарской системы [5, 6]. Значительно меньше работ посвящено вопросам адаптации проектной деятельности студентов в инженерных дисциплинах, в которых курсовое проектирование выступает основным механизмом для формирования профессиональных компетенций [7]. Курсовой проект по электронике, как правило, представляет собой комплексную самостоятельную работу, включающую многовариантные расчеты, компьютерное моделирование и оформление технической документации. При этом в пределах одной академической группы каждый студент получает индивидуальное задание. Существующие подходы либо ориентированы на единые для всех студентов материалы, либо требуют индивидуальной разработки под каждый вариант, что ограничивает их применение в условиях массового обучения. Не менее значимым фактором является различие в предпочтениях студентов при работе с учебным контентом, проявляющееся в выборе предпочитаемых форматов учебных материалов [8]. Наконец, темп работы над проектом у каждого студента индивидуален, и жесткая последовательность этапов без автоматического контроля завершенности может привести к накоплению задолженностей [9].

Изложенные особенности проектной работы обостряют противоречие между требованием достижения единых образовательных результатов и отсутствием в традиционных методиках инструментов для автоматизированной индивидуализации содержания, форматов и темпа работы. Для его разрешения требуется разработка таких организационно-методических решений, которые, не увеличивая трудоемкость работы преподавателя, обеспечивали бы персонализированную поддержку каждого студента на всех этапах проекта [10, 11]. При этом важно, чтобы реализация таких решений опиралась на стандартные функциональные возможности широко распространенных систем управления обучением, что гарантирует их воспроизводимость и масштабируемость [12]. Данным требованиям отвечает адаптивный курс в Moodle, где содержание, формат и последовательность изучения материалов динамически настраиваются в зависимости от результатов текущего контроля, а доступ к новым этапам открывается автоматически по мере выполнения предыдущих [13–15].

Цель исследования – разработать и апробировать комплексную методику проектирования адаптивного курса для инженерной дисциплины, учитывающую многовариантность исходных данных, поддержку студентов с разными учебными предпочтениями и автоматическое управление доступом к модулям на основе результатов тестирования, и экспериментально проверить ее влияние на качество выполнения проектов.

Материалы и методы исследования

Эмпирическое исследование проводилось на базе кафедры промышленной электроники Казанского государственного энергетического университета в осеннем семестре 2025–2026 учебного года. В эксперименте приняли участие студенты 3-го курса направления подготовки 11.03.04 Электроника и наноэлектроника, выполняющие курсовой проект по дисциплине «Проектирование источников вторичного электропитания». Общая численность выборки составила 123 чел. Исследование проводилось в форме квазиэксперимента с неэквивалентными группами. Формирование групп осуществлялось по академическим группам, поскольку индивидуальная рандомизация была организационно невозможна, а перераспределение студентов между группами могло бы нарушить учебный процесс и создать эффект новизны. Контрольная группа (КГ) включала две академические группы общей численностью 60 студентов, экспериментальная группа (ЭГ) – 63 студента из двух академических групп. Все четыре группы занимались с одним преподавателем, консультации проводились индивидуально во внеурочное время. Перед началом эксперимента было подтверждено отсутствие статистически значимых различий между группами по успеваемости в электротехнических дисциплинах за предшествующий семестр путем онлайн-тестирования.

Для выполнения курсового проекта экспериментальной группой в среде LMS Moodle был разработан отдельный электронный курс, логика ветвления которого представлена на рис. 1. При первом входе в электронный курс пользователи вносят в свой профиль порядковый номер по списку, благодаря чему все студенты получают строго индивидуальные задания. Для каждого модуля заданы условия отображения/скрытия учебных материалов и заданий с помощью настройки Restrict Access в зависимости от номера варианта и результатов промежуточных тестов.

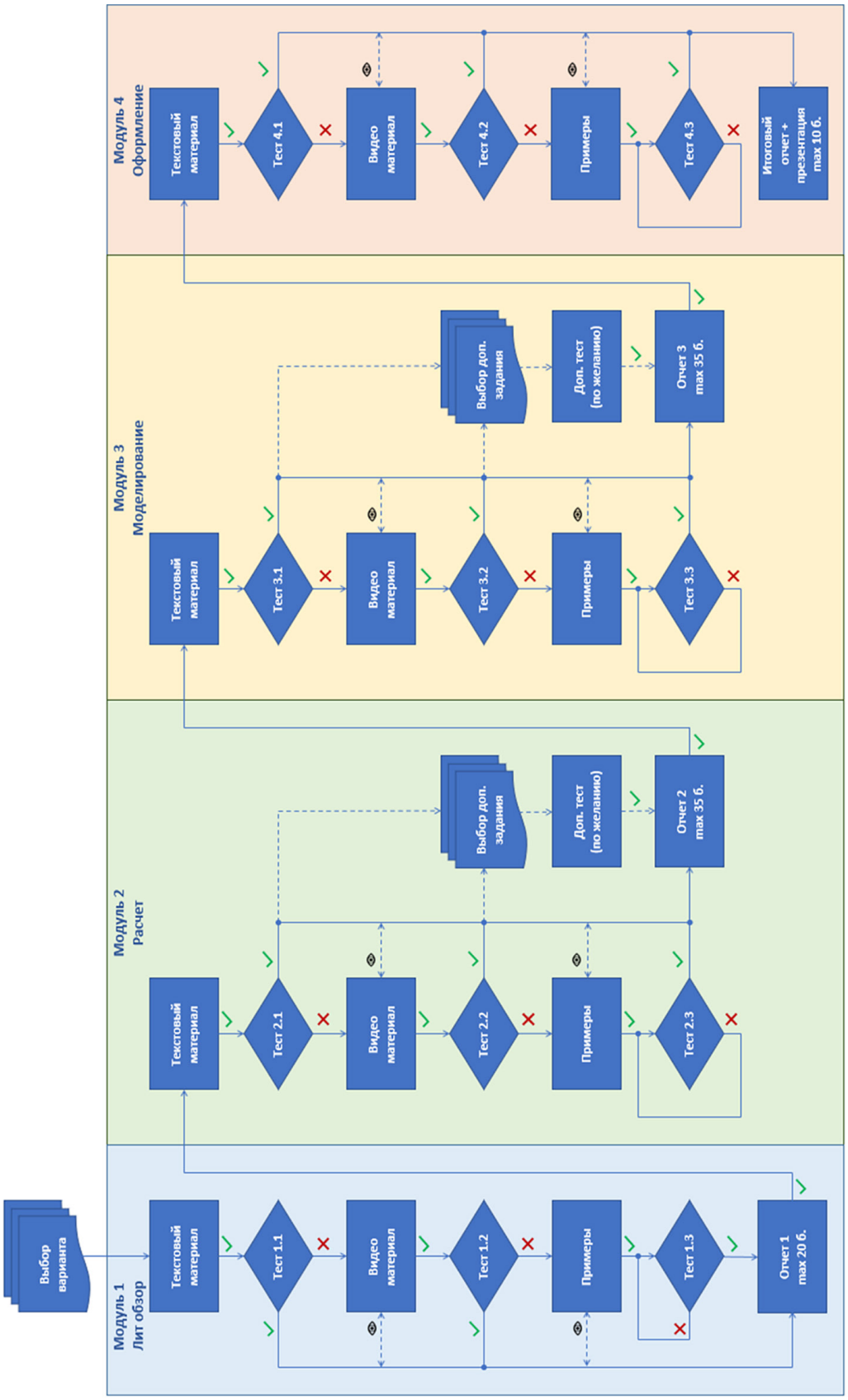


Рис. 1. Маршрутная карта курса «Курсовой проект – проектирование импульсных преобразователей»
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

Каждый модуль построен по принципу многоуровневой поддержки. Первоначально студенту доступны текстовые пояснения – фрагменты учебного пособия, структурированные по модулям и вариантам. После изучения пособия студент проходит проверочный тест, выявляющий уровень понимания материала. Проходным считается результат ≥ 7 баллов из 10. При результате ниже проходного балла студенту открывается следующий уровень поддержки – видеокомментарии с разбором ключевых формул, последовательности расчета и методики моделирования. После просмотра видео студент повторно проходит тест. Если тест вновь не пройден, открывается последний уровень поддержки – готовые примеры с пошаговыми расчетами и скриншотами моделирования, максимально близкими к варианту студента. После чего тест сдается до набора проходного балла. Таким образом, каждый неудачный результат тестирования открывает очередной уровень поддержки, компенсирующий выявленный пробел. За каждую неудачную попытку прохождения теста из максимальной оценки за модуль вычитается 2 штрафных балла, но суммарно не более 4 баллов за модуль. Это стимулирует студентов более тщательно готовиться к тестированию, позволяет дифференцировать студентов по уровню освоения материала и предотвращает тактику «проб и ошибок». Даже со штрафом студент может получить положительную оценку за модуль, если качество отчета достаточно высокое. После успешного прохождения теста студенту становятся доступны все форматы учебных материалов. Такой подход обеспечивает равный доступ к полному содержанию модуля, позволяет сильным студентам работать вперед и не рассматривать видео и примеры исключительно как «материалы для отстающих». Одновременно открываются дополнительные задания, которые носят необязательный характер и не учитываются при выставлении итоговой оценки, но их выполнение создает возможности для углубленной самостоятельной работы и лучшего понимания дисциплины. Также становится доступен элемент для сдачи отчета, после загрузки которого автоматически открывается доступ к следующему модулю.

Контрольная группа обучалась в отдельном электронном курсе Moodle по традиционной методике, которая включала выдачу индивидуальных заданий, единого текстового методического пособия для всех вариантов, объяснение расчетов на лекционных и практических занятиях. Выполнение проекта проходило по тем же четырем модулям с загрузкой отчетов в элемент «Задание» электронного курса в Moodle. Доступ к следующему модулю открывался преподавателем вручную после проверки текущего отчета. Применялась система штрафных баллов: когда отчет возвращался на доработку, то из максимального балла за модуль вычиталось 2 балла, но суммарно не более 4 баллов за модуль. Это обеспечивало сопоставимость мотивационных условий с ЭГ, где аналогичную функцию выполняли штрафы за неудачные попытки тестирования. Дополнительные задания в традиционной методике не предусматривались, поскольку они являются элементом экспериментальной методики и открываются только по результатам промежуточного тестирования, которое в контрольном условии не проводилось. Консультации в КГ и ЭГ проводились очно, а также через форум Moodle и видеоконференции. Отчеты в каждом модуле оценивались в обеих группах по единым критериям, представленным в табл. 1.

Итоговая оценка (max 100) переводилась в традиционную шкалу: 85–100 – «отлично», 70–84 – «хорошо», 55–69 – «удовлетворительно», менее 55 – «неудовлетворительно».

В ходе эксперимента фиксировались следующие показатели для каждого студента:

1. Успеваемость – балл за каждый модуль и итоговый балл за курсовой проект.

Таблица 1

Критерии оценки отчетов по модулям

Модуль	Максимальный балл	Основные критерии оценивания
Модуль 1	20	Полнота обзора, правильность описания топологии, качество написания технического задания
Модуль 2	35	Корректность расчетов, обоснование выбора компонентов
Модуль 3	35	Достоверность моделирования, анализ графиков, соответствие результатов техническому заданию
Модуль 4	10	Оформление по ГОСТ, наличие чертежа и спецификации

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

2. Время выполнения – количество календарных дней от выдачи задания до сдачи финального отчета (модуль 4).

3. Число обращений к преподавателю – суммарное количество сообщений в форуме, личных сообщений в Moodle, видеоконференций и очных консультаций.

4. Выполнение дополнительных заданий (только для ЭГ).

5. Количество попыток прохождения тестов и использование разных форматов представления материалов (только для ЭГ).

Для статистической обработки данных использовался t-критерий Уэлча для независимых выборок, не предполагающий равенства дисперсий. Предварительно проверялась нормальность распределений по критерию Шапиро – Уилка и однородность дисперсий по критерию Левена. Для оценки величины эффекта рассчитывалась d Коэна по объединенному стандартному отклонению. Для сравнения долей использовался φ-критерий Фишера, для оценки линейной связи – коэффициент корреляции Пирсона. Статистическая значимость принималась при $p < 0,05$. Расчеты проводились в среде IBM SPSS Statistics 26 и Microsoft Excel 2019.

Все участники были проинформированы о целях и процедуре исследования, было получено информированное добровольное согласие до начала эксперимента. Участие было добровольным и не влияло на текущую и итоговую оценку по дисциплине. Обработка цифровых следов Moodle осуществлялась в соответствии с Федеральным законом № 152-ФЗ «О персональных данных» и локальными актами университета. Данные обезличены и представлены в агрегированном виде.

Результаты исследования и их обсуждение

В ходе эксперимента были проанализированы показатели успеваемости и временные затраты студентов в обеих группах, а также количество консультаций с преподавателем (табл. 2).

Данные из табл. 2 демонстрируют статистически значимое превосходство экспериментальной группы по большинству показателей. Наиболее выраженные различия получены по модулям, связанным с расчетной частью и моделированием, а также по итоговому баллу. По модулю 1 различия также статистически значимы, хотя размер эффекта остается умеренным, а по модулю 4 различия не достигают порога значимости. Анализ распределения итоговых оценок также выявил существенную неоднородность (рис. 2). Доля положительных оценок в ЭГ оказалась значительно больше, чем в КГ.

Сроки выполнения проекта в ЭГ оказались существенно короче (табл. 2), при этом сокращение времени выполнения не сопровождалось снижением качества, так как коэффициент корреляции Пирсона между длительностью выполнения и результирующим баллом в ЭГ оказался близок к нулю ($r = –0,11$, $p = 0,31$), то есть статистически значимой взаимосвязи между этими показателями не выявлено. Можно предположить, что в традиционной схеме студенты нередко затягивают работу из-за неопределенности в интерпретации методических указаний или ожидания обратной связи от преподавателя. Автоматическое управление доступом, реализованное в Moodle, создало для студентов «дорожную карту» с четкими точками контроля, что могло способствовать снижению когнитивной нагрузки, связанной с планированием собственной деятельности.

Таблица 2

Сравнение показателей между группами (среднее ± стандартное отклонение)

Показатель	ЭГ (n = 63), M ± SD	КГ (n = 60), M ± SD	t Уэлча	df	p	d Коэна
Модуль 1 (литературный обзор)	16,2 ± 2,8	14,9 ± 3,4	2,31	114,4	0,023	0,42
Модуль 2 (расчеты)	28,1 ± 4,7	23,6 ± 6,1	4,57	110,9	< 0,001	0,83
Модуль 3 (моделирование)	27,5 ± 5,2	22,8 ± 6,9	4,25	109,6	< 0,001	0,77
Модуль 4 (оформление)	7,9 ± 1,7	7,3 ± 2,1	1,74	113,5	0,085	0,32
Итоговый балл	79,7 ± 9,2	68,6 ± 11,5	5,89	112,9	< 0,001	1,07
Время выполнения, дни	44,3 ± 12,1	58,7 ± 15,8	–5,66	110,5	< 0,001	–1,03
Число обращений к преподавателю	3,8 ± 2,9	9,6 ± 4,3	–8,73	102,8	< 0,001	–1,59

Примечание: составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования. Для времени выполнения и числа обращений отрицательные значения *d* означают преимущество ЭГ (меньше дней, меньше обращений).

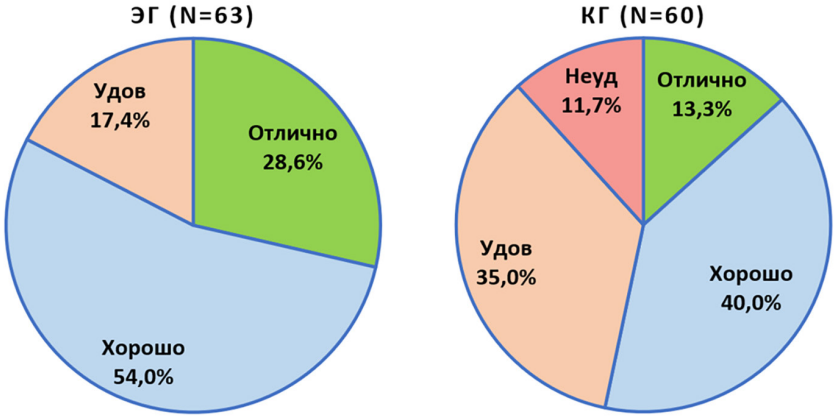


Рис. 2. Распределение итоговых оценок по группам
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

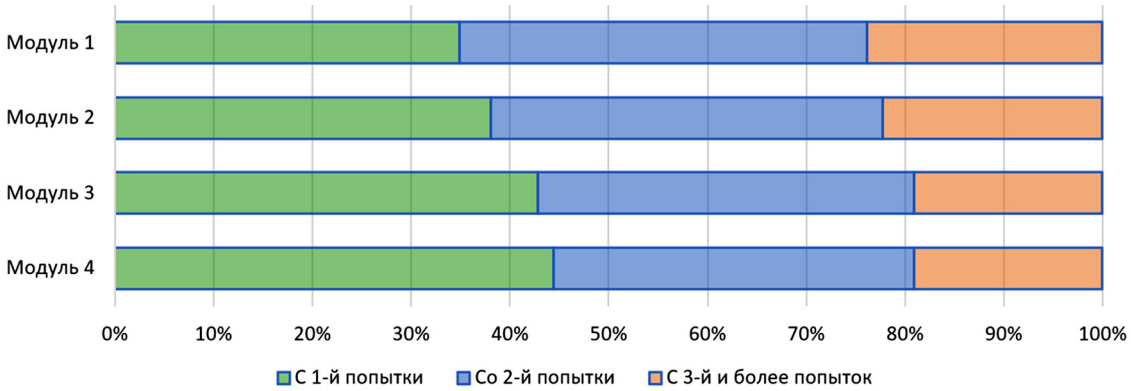


Рис. 3. Распределение студентов экспериментальной группы по числу попыток для успешной сдачи теста в каждом модуле (n = 63)
Примечание: составлен автором по результатам данного исследования

Частота контактов с преподавателем в ЭГ снизилась в 2,5 раза (табл. 2). В экспериментальной группе 26 студентов ограничились одной-двумя консультациями за весь проект, тогда как в контрольной таких было лишь 7 чел. Это можно рассматривать как косвенный признак возросшей самостоятельности.

Дополнительные задания, которые предлагались только студентам ЭГ, привлекли 42,9 % участников (27 из 63). Те, кто взялся за дополнительные модули, показали более высокий итоговый балл – 84,1 ± 6,7 против 76,4 ± 8,9 у тех, кто ограничился обязательной программой (t-критерий Уэлча: $t(61,0) = 5,04$; $p < 0,001$; $d = 1,23$). Впрочем, эта связь не обязательно причинно-следственная, поскольку инициатива выполнения дополнительной работы могла быть следствием исходно более высокой мотивации, а не результатом самого факта ее выполнения.

Изучение поведения студентов ЭГ в процессе работы выявило определенные закономерности в обращении к ресурсам. Все без исключения участники начинали с текстового формата – так задумано архитектурой курса. Первичное тестирование в модуле 1 выявило средний результат 6,1 балла из 10, и лишь 34,9 % с первой попытки преодолели порог в 7 баллов (рис. 3). Еще 41,3 % общей выборки успешно прошли тест после просмотра видео. Для 23,8 % потребовалась третья попытка с доступом к примерам – и все они в итоге достигли проходного уровня.

По данным рис. 3 наблюдается увеличение доли студентов, сдающих тест с первой попытки, и снижение доли тех, кому требуется три и более попытки. Это может быть связано с адаптацией студентов к формату тестирования и постепенным освоением материала, однако статистическая значимость указанных изменений в рамках данного дизайна не проверялась.

Отдельно можно отметить распределение предпочтений среди студентов, которые после прохождения теста получали доступ

ко всем форматам. Например, в модуле 2 из 24 студентов, успешно сдавших тест с первой попытки, 17 чел. впоследствии просматривали видеоформат и 13 чел. – примеры, хотя эти материалы не являлись обязательными. Это может указывать на то, что часть успешных студентов используют дополнительные каналы восприятия для более полного освоения материала, а не только для компенсации пробелов.

Заключение

В рамках исследования создан и внедрен адаптивный курс по курсовому проектированию, функционирующий в LMS Moodle. Разработанный адаптивный курс построен на принципах персонализации, модульности и смены форматов обучения в зависимости от успешности прохождения тестов. Проведенный педагогический эксперимент показал, что реализация разработанной методики сопровождалась статистически значимым улучшением итоговых баллов, сокращением сроков выполнения проекта и снижением числа обращений к преподавателю по сравнению с контрольной группой, обучавшейся по традиционной методике.

Предложенная методика не требует установки дополнительных плагинов или специализированного программного обеспечения и может быть воспроизведена в организациях, располагающих совместимой версией Moodle и необходимыми кадровыми ресурсами. Требуется лишь заблаговременно подготовить разноформатный учебный контент для каждого модуля – эта работа компенсируется последующим снижением трудозатрат на педагогическое сопровождение. Полученные результаты открывают возможности для дальнейшего развития методик проектирования адаптивных курсов в проектной подготовке инженерных кадров.

Список литературы

1. Сысоев П. В. Персонализированное обучение на основе технологий искусственного интеллекта: насколько готовы современные студенты к новым возможностям получения образования // Высшее образование в России. 2025. Т. 34. № 2. С. 51–71. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=80425757 (дата обращения: 10.07.2026). DOI: 10.31992/0869-3617-2025-34-2-51-71.

2. El-Sabagh H. A. Adaptive e-learning environment based on learning styles and its impact on development students' engagement // International journal of educational technology in higher education. 2021. Vol. 18. Is. 53. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=72706650 (дата обращения: 10.07.2026). DOI: 10.1186/s41239-021-00289-4.

3. Булаева М. Н., Зубкова Я. В., Мельников Д. Д. Персонализированный подход в образовании // Проблемы современного педагогического образования. 2022. № 77–3. С. 4–6. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=50074059 (дата обращения: 10.07.2026).

4. Major L., Francis G. A., Tsapali M. The effectiveness of technology-supported personalised learning in low- and middle-income countries: A meta-analysis // British journal of educational technology. 2021. Vol. 52. Is. 5. P. 1935–1964. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=72936551 (дата обращения: 10.07.2026). DOI: 10.1111/bjet.13116.

5. Shemshack A., Kinshuk, Spector J. M. A comprehensive analysis of personalized learning components // Journal of computers in education. 2021. Vol. 8. Is. 4. P. 485–503. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=53298346 (дата обращения: 10.07.2026). DOI: 10.1007/s40692-021-00188-7.

6. Вайнштейн Ю. В., Есин Р. В., Цибульский Г. М. Модель образовательного контента: от структурирования понятий к адаптивному обучению // Открытое образование. 2021. Т. 25. № 1. С. 28–39. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=44855369 (дата обращения: 10.07.2026). DOI: 10.21686/1818-4243-2021-1-4-28-39.

7. Kukartsev V. V., Chzhan E. A., Tynchenko V. S., Antamoshkin O. A., Stupina A. A. Development of adaptive educational course in the SibFU e-learning system // Journal of Siberian Federal University. Humanities and social sciences. 2018. Vol. 11. Is. 5. P. 740–752. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=35143043 (дата обращения: 10.07.2026). DOI: 10.17516/1997-1370-0267.

8. Зайцева Л. В. Технология разработки адаптивных электронных учебных курсов для компьютерных систем обучения // Образовательные технологии и общество. 2008. Т. 11. № 1. С. 400–412. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=9914168 (дата обращения: 10.07.2026).

9. Шамсутдинова Т. М. Формирование индивидуальной образовательной траектории в адаптивных системах управления обучением // Открытое образование. 2021. Т. 25. № 6. С. 36–44. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=47994116 (дата обращения: 10.07.2026). DOI: 10.21686/1818-4243-2021-6-36-44.

10. Потапов А. А. Использование интеллектуальных обучающих систем на основе искусственного интеллекта для персонализации образовательного процесса // Современные наукоемкие технологии. 2026. № 5. С. 237–242. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=91489108 (дата обращения: 10.07.2026). DOI: 10.17513/snt.40799.

11. Кухтина Я. В., Филипская А. В. Адаптивное обучение студентов вузов в системе электронной образовательной среды // Современное педагогическое образование. 2022. № 2. С. 134–137. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=48088850 (дата обращения: 10.07.2026).

12. Ristić I., Runić-Ristić M., Savić Tot T., Tot V., Bajac M. The effects and effectiveness of an adaptive e-learning system on the learning process and performance of students // International journal of cognitive research in science, engineering and education. 2023. Vol. 11. Is. 1. P. 77–92. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=50784376 (дата обращения: 10.07.2026). DOI: 10.23947/2334-8496-2023-11-1-77-92.

13. Фукалова А. О., Ямских Т. Н. Организация пользовательского интерфейса адаптивного электронного обучающего курса в виртуальной среде Moodle // Право и образование. 2018. № 5. С. 21–29. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=34860029 (дата обращения: 10.07.2026).

14. Шамсутдинова А. И., Хасанова Г. Ф. Реализация индивидуальных образовательных траекторий в LMS «Moodle» // Управление устойчивым развитием. 2023. № 3 (46). С. 108–114. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=54203573 (дата обращения: 10.07.2026). DOI: 10.55421/2499992X_2023_3_108.

15. Исакова А. И., Левин С. М. Преимущества LMS Moodle в формировании персонализированной среды электронного обучения студентов // Информационные технологии. Проблемы и решения. 2021. № 4 (17). С. 145–150. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=47187737 (дата обращения: 24.09.2026).

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest.

Финансирование: Автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 378.14
DOI

CC BY 4.0

ТЕХНОЛОГИЯ «МЯГКОЙ СИЛЫ» В ПРОЦЕССЕ ПОДГОТОВКИ БУДУЩИХ УЧИТЕЛЕЙ К ПАТРИОТИЧЕСКОМУ ВОСПИТАНИЮ ОБУЧАЮЩИХСЯ

Семенова Е. В. ORCID ID 0000-0003-2530-1582

Лесосибирский педагогический институт – филиал Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский федеральный университет», Лесосибирск, Российская Федерация, e-mail: elenacs@mail.ru

Статья посвящена проблеме поиска средств, способствующих эффективному профессиональному образованию будущих педагогов с целью подготовки их к патриотическому воспитанию обучающихся. Цель исследования – теоретическое обоснование использования технологии «мягкой силы» и описание опыта работы в данном направлении. Опытно-экспериментальная работа была проведена со студентами Лесосибирского педагогического института – филиала Сибирского федерального университета в 2025–2026 гг. Материалом для работы послужило содержание факультатива «Применение в образовательной деятельности проблематики геноцида советского народа в годы Великой Отечественной войны». Методы исследования: опытно-экспериментальная работа, рефлексия, анализ, дедукция, историко-сравнительный метод. Методологической основой исследования стали системно-деятельностный и личностный подходы. Представлен анализ источников по проблемам патриотизма и патриотического воспитания и отмечена сложная природа этих феноменов. Дано определение технологии «мягкой силы» как педагогического средства, обоснована возможность использования данной технологии в подготовке будущих учителей к патриотическому воспитанию обучающихся, доказана целесообразность ее использования в современных условиях открытого информационного пространства. Приведены примеры использования технологии «мягкой силы», выявлены условия эффективного использования указанной технологии. Отмечается высокая оценка студентами использования технологии «мягкой силы» в патриотическом воспитании самих студентов и в их профессиональной подготовке.

Ключевые слова: патриотизм, патриотическое воспитание, «мягкая сила», педагогическая технология, профессиональная подготовка, будущие учителя

SOFT POWER TECHNOLOGY IN THE PROCESS OF TRAINING FUTURE TEACHERS FOR PATRIOTIC EDUCATION OF STUDENTS

Semenova E. V. ORCID ID 0000-0003-2530-1582

Lesosibirsk Pedagogical Institute – branch of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Siberian Federal University," Lesosibirsk, Russian Federation, e-mail: elenacs@mail.ru

This article addresses the challenge of identifying methods that facilitate the effective professional training of future teachers, specifically preparing them to foster patriotism in their students. The study aims to provide a theoretical justification for employing "soft power" techniques and to describe practical experience in this area. An experimental study was conducted with students at Lesosibirsk Pedagogical Institute—the branch of the Siberian Federal University—during the 2025–2026 academic year. The study utilized content from an elective course titled "Incorporating the Topic of the Genocide of the Soviet People During the Great Patriotic War into Educational Practice." Research methods included experimental work, reflection, analysis, deduction, and the historical-comparative method. The study was grounded in the systems-activity and personality-oriented approaches. The article presents an analysis of literature regarding patriotism and patriotic education, highlighting the complex nature of these phenomena. It defines "soft power" as a pedagogical tool, substantiates its applicability to training future teachers for fostering patriotism in students, and demonstrates the rationale for its use within the context of today's open information environment. Examples of applying "soft power" techniques and the conditions necessary for their effective implementation are identified. The study notes that students highly valued the use of "soft power" techniques both for their own patriotic development and for their professional training.

Keywords: patriotism, patriotic education, "soft power," pedagogical technology, professional training, future teachers

Введение

В настоящее время проблема патриотического воспитания представляет интерес как для теоретиков в данной области, так и для практиков – специалистов, занимающихся патриотическим воспитанием подрастающих поколений: от учителей всех уровней образования до преподавателей высших учебных заведений. Актуализация патриотического воспитания продиктована геополитикой и сложными международными отношениями. Но при этом необходимо учитывать особенности современного образовательного пространства и его участников. Прежде всего это относится к пониманию специфики современных подростков и молодежи как поколения, живущего в открытом информационном пространстве. В этих условиях патриотическое воспитание должно осуществляться в гармонии между принятием подрастающей личностью идеи долга и обязанности человека

перед государством, отечеством, Родиной и его личными патриотическими убеждениями и поступками. Работа, которая проводится в этом направлении в школьном и вузовском образовании, часто не достигает успеха и блокируется тем, что не принимается во внимание сложная внутренняя работа обучающегося по самоопределению в диаде «Я и Родина». Это можно объяснить применением средств воспитания, где преобладает прямое воздействие. В результате у обучающегося не формируется внутренняя позиция, при которой идея патриотического долга становится для него личностно значимой, и он готов реализовывать ее в жизненных реалиях. В условиях доминирования субъект-субъектных отношений в среднем и высшем образовании обостряется проблема поиска таких средств воспитания, которые позволили бы решить поставленную задачу и вызывали бы у обучающихся желание самим понять суть происходящих событий, выработать собственный взгляд на происходящее в мире и принять для себя идею важности патриотизма в настоящее время. Эта идея чрезвычайно актуальна для подготовки будущих учителей к реализации патриотического воспитания обучающихся в школе, поскольку именно им предстоит выполнять эту работу с подрастающим поколением. По мнению автора, одним из вариантов решения проблемы может стать использование технологии «мягкой силы» в профессиональной подготовке учителей.

Целью исследования явилось теоретическое обоснование использования технологии «мягкой силы» как педагогического средства в процессе подготовки будущих учителей к патриотическому воспитанию обучающихся и описание опыта работы в данном направлении.

Материалы и методы исследования

Опытно-экспериментальная работа была проведена со студентами Лесосибирского педагогического института – филиала Сибирского федерального университета в период 2025–2026 учебного года в рамках действия ФГОС 3++ ВО. Общее количество испытуемых – 20 человек. Материалом для работы послужило содержание факультатива «Применение в образовательной деятельности проблематики геноцида советского народа в годы Великой Отечественной войны». Название факультатива было основано на рекомендации Министерства просвещения Российской Федерации по внедрению вариативного модуля для подготовки студентов педагогических вузов к работе с проектом «Без срока давности» [1; 2]. Были использованы следующие методы исследования: наблюдение, опытно-экспериментальная работа, рефлексия, анализ, дедукция, историко-сравнительный метод. Последний метод понадобился автору при изучении сущности феномена фашизма, исторических причин появления нацизма в XX веке и неонацизма в современную эпоху. Методологической основой исследования стали системно-деятельностный и личностный подходы.

Результаты исследования и их обсуждение

Понятия «патриотическое воспитание», «патриотизм» тесно связаны между собой. По сути, именно патриотизм является сущностной характеристикой и целью патриотического воспитания.

Понятие «патриотизм» многофакторное и в настоящее время изучается на разных уровнях. Автор согласен с точкой зрения, согласно которой «…универсальность и многофакторность понятия «патриотизм» требуют глубокого изучения и сущностной целостности на теоретическом уровне» [3, с. 26]. На многозначность феномена неоднократно ссылаются исследователи: педагоги, философы, социологи, психологи, политологи и др. При этом проблема патриотизма часто рассматривается с разных сторон, что еще раз подчеркивает сложность феномена. Так, А. С. Алиева трактует патриотизм как интегральное качество личности, куда правомерно относятся патриотическое сознание, убеждения, чувства, умения, толерантность [4, с. 29]. Ю. А. Клейберг квалифицирует патриотизм как элемент политического сознания [5, с. 31]. М. П. Арутюнян пишет о патриотизме как инстинкте самосохранения народа [6, с. 5]. В коллективной монографии подчёркивается идея цивилизационного чувства как основы патриотизма, что позволяет говорить о его «полноте», временном аспекте и считать патриотизм экзистенциональным качеством личности. Отсюда возникает возможность определения уровней патриотизма: рационального, эмоционального, иррационального [7, с. 24]. Автор полагает, что наличие разнообразных трактовок понимания сущности патриотизма может свидетельствовать о динамичности исследовании феномена и о поиске методологического единства, которое пока еще не определено [8, с. 62].

Исследования феномена патриотизма позволили современному отечественному образованию реализовывать патриотическое воспитание в различных сферах и на различных уровнях [9].

В настоящее время можно встретить обращение к проблемам патриотического воспитания обучающихся разного возраста: от обучающихся в начальной школе и стар-

шеклассников [10; 11] до студенческой молодежи [12]. Подтверждением идеи связи обучения и воспитания служит обращение специалистов к возможности осуществлять патриотическое воспитание непосредственно во время учебного процесса [13].

Главным вектором в приведенных выше исследованиях выступает идея смыслообразования и формирования ценностной картины мира как сущностных характеристик современного патриотического воспитания [14, с. 90]. Эта идея отражает суть «субъект-субъектной» модели современного учебно-воспитательного процесса в целом и, по мнению автора, может стать методологической основой патриотического воспитания в современных условиях. Эта же позиция диктует необходимость поиска новых средств патриотического воспитания для обучающихся в средней и высшей школе [15].

Автор полагает, что одним из средств патриотического воспитания будущих педагогов и их подготовки к патриотическому воспитанию обучающихся может стать технология «мягкой силы».

Для доказательства выдвинутого предположения была проведена опытно-экспериментальная работа. На первом этапе автор изучил публикации последних лет по проблемам патриотизма и патриотического воспитания. Выводом стало подтверждение сложности обоих феноменов. На втором этапе автор провел аналитическую работу по выявлению сущности понятия «мягкой силы» и возможности её использования в образовании. Этот термин давно и прочно обрел научное гражданство, но сфера его применения ограничивается внешней политикой и образованием иностранных студентов в России, а также возможностью использовать образование, науку и культуру как «мягкую силу» в формировании положительного образа страны [16]. Вполне логично, что в данном контексте «мягкая сила» трактуется как инструмент, позволяющий достичь желаемого результата [17]. В настоящее время наблюдается некоторое расширение смыслового значения термина «мягкая сила». Идут исследования явлений, которые могли бы обеспечить эффективность использования «мягкой силы» в педагогике [18]. Следует отметить, что отношение к феномену «мягкой силы» не однозначно у исследователей. Так, можно встретить мнение о наличии в «мягкой силе» манипулятивного начала [19, с. 94].

Задача автора состояла в том, чтобы выявить и вскрыть образовательный потенциал феномена «мягкой силы» в педагогике высшей школы. По мнению автора, этот аспект в настоящее время недостаточно разработан и представляет собой интерес как с теоретической, так и с практической точек зрения. При разработке опытно-экспериментальной работы автором было разработано следующее определение «мягкой силы» как педагогического средства: «мягкая сила» является средством косвенного воздействия на студентов с целью формирования у них потребности определять собственную позицию относительно патриотического сознания, позиции и поведения. Речь идет не о переносе термина из одной области в другую, а о возможности поиска новых смыслов в разработанных и принятых понятиях.

Третьим этапом работы стал поиск доказательств соответствия понятия «мягкой силы» термину «технология». Известно, что понятие «технология» предполагает достаточно жесткое следование определенным алгоритмам и достижение заранее запланированного результата. В данном случае таким результатом мог стать ответ, где была бы отражена общепринятая точка зрения. Но идея отказа от прямого воздействия стала препятствием для разработки критериев сформированности патриотических чувств, знаний, убеждений, мотивации к поступкам патриотической направленности. В равной степени область опытно-экспериментальной работы не позволила автору установить шкалы и абсолютные значения, поскольку речь шла о воспитании, где на итоговый результат влияет множество факторов, а не только проведенная опытно-экспериментальная работа. Поэтому автор счел возможным несколько смягчить жесткую алгоритмизацию технологии, допустить вариативность как самой процедуры ее реализации, так и результативность. Ведущими методами исследования были избраны наблюдение и анализ письменных работ студентов, что логично вошло в процедуру исследования.

Четвертым этапом стала разработка заданий для студентов, где применение «мягкой силы» было органичным и позволило достичь желаемого результата. С этой целью были проанализированы содержание и все задания предлагаемой программы факультатива, составленного на основе «Рабочей программы» вариативного модуля. Автор счел целесообразным расширить содержание факультатива и ввести туда важные реалии, касающиеся возрождения неонацизма и признаков геноцида в современном мире. Поэтому девизом работы автором была предложена идея «Вспоминаем прошлое, живем настоящим, думаем о будущем!». Такое временное триединство обеспечивало постановку в центр работы личность студента для того, чтобы он сам определял для себя позицию относительно прошлого нашей страны, ее настоящего и будущего и смог прогнозировать варианты будущей работы с обучающимися следующих поко-

лений. Во все задания был добавлен эмоционально-личностный компонент, предполагающий необходимость выражения собственного отношения к обсуждаемой проблеме. Например, при задании «Выберите любой художественный фильм о Великой Отечественной войне и расскажите о нем (год создания, режиссёр, актёры)» было добавлено: «Что в этом фильме задело лично Вас? Может, ничего? Стали ли бы Вы показывать его обучающимся? Если да, то почему, если нет, то тоже почему?» В ходе выполнения таких заданий практически всегда возникал полилог, где мнение каждого было важным.

Следующим этапом работы стало создание условий для поиска собственного отношения к таким важным реалиям и понятиям, как Родина, защита Отечества, патриотизм. Наиболее важными условиями автор считает создание атмосферы доверительности, позволяющей студентам не испытывать страха высказать свою позицию, и рефлексивный анализ тех изменений, которые произошли со ними в ходе обсуждений предложенных заданий.

Приведём примеры опытно-экспериментальной работы. В качестве доказательства обратимся к оценке прошлого, настоящего и будущего, сделанной студентами.

При изучении исторических причин возникновения нацизма в Германии в XX в. студентам было предложено ответить на вопрос: «Какие эмоции вызвало у вас изучение исторического материала?» Многих поразила скорость и масштаб распространения идей нацизма, привлекательность фашистских идей для разных социальных групп, использование псевдонауки, готовность к насилию. Студенты испытывали глубокое потрясение от масштабов страданий, причиненных этим режимом. Они признавались, что сами будто оказывались на месте обманутых жителей поверженной в Первой мировой войне Германии и в то же время оценивали историческую ситуацию с позиции современности. В качестве доказательства приведем отрывок из сочинения студента В.: «Меня, как человека, живущего в XXI веке, всегда больше всего поражают не сами зверства, а процесс, механизм, системность произошедшего. Ужас заключается в том, как чудовищная идея была превращена в рутинную бюрократическую процедуру. Когда читаешь протоколы совещаний, поначалу кажется, что это скучное деловое собрание менеджеров среднего звена. Они сидят в красивом особняке, пьют кофе, вежливо обсуждают «проблему», «трудовые ресурсы», «логистику» и «пропускную способность» объектов. Но за этими сухими бюрократическими терминами скрывалось планирование величайшего преступления в истории человечества – промышленного уничтожения миллионов людей… Зло надело костюм, выучило профессиональный жаргон и стало работать с 9 до 17. С одной стороны – дневники узников, где каждая строчка пропитана болью, страхом, голодом, тоской по утраченной нормальной жизни. Дети, описывающие, как у них на глазах убили мать. Люди, пытающиеся сохранить частичку достоинства в аду. С другой стороны – фотографии эсэсовцев, отдыхающих с семьями рядом с лагерем, играющих с собственными детьми. Они не выглядели как монстры. Они были «обычными людьми», которые после рабочего дня, состоявшего в организации убийств, могли слушать Баха или писать нежные письма домой. Меня поражает эта страшная двойственность».

Что касается «настоящего», то здесь главное внимание было обращено к злободневной теме фальсификации истории, которая в настоящее время чрезвычайно распространена в открытом информационном пространстве. Целью фальсификации является попытка изменения исторического и культурного кода российского народа. Эти задания были ориентированы на умение логически и аргументированно доказывать свою правоту, опираясь на исторические факты. Приводим примеры таких заданий. «Что бы Вы ответили на следующие высказывания: «На Бессмертный полк ходят только дураки», «9 Мая надо скорбеть, а не праздновать»?» Все участники опытно-экспериментальной работы выразили готовность к гипотетическому диалогу, находили весомые аргументы для доказательства своей позиции, сумели логически выстроить систему опровержений. Наблюдения показали, что современные будущие учителя чувствовали себя уверенно и проявляли умения опровержения фальсификационных заявлений. Это может свидетельствовать о высокой степени патриотического сознания и о формировании умений вести дискуссию на сложные политические темы.

Особый интерес у студентов вызвало предложение осуществить рефлексивную оценку работы по патриотическому воспитанию, которая проводилась с ними в недавнем прошлом, когда они были обучающимися в школе. Оптимальным вариантом патриотического воспитания была избрана модель взаимодействия «учитель – обучающиеся» с предоставлением последним права самим определять позицию, используя для этого интерактивные методы и приемы, где главным смыслом должен стать собственный выбор обучающихся. При этом студенты называли «мягкую силу» ведущей технологией, помогающей решить сложную задачу формирования собственной позиции.

Выводы

Проведенная работа позволила сделать следующие выводы.

1. Технология «мягкой силы» является специфичным педагогическим средством, суть которого заключена в косвенном воздействии на обучающихся.

2. Технология «мягкой силы» является эффективным средством формирования собственной позиции личности будущего учителя, призванного эффективно реализовать патриотическое воспитание обучающихся, поскольку сами студенты обретают подобный опыт на этапе профессиональной подготовки. В этом скрыт обучающий смысл технологии.

3. Условиями, позволяющими обосновать правомерность использования термина «технология мягкой силы» и высоко оценивать её эффективность, являются:

- контент, основанный на временном триединстве «Помним прошлое, живем настоящим, думаем о будущем!»;
- разнообразие заданий, имеющих потенциальные возможности для выбора позиции и формирования патриотических чувств, убеждений, сознания и мотивации к патриотическому поведению;
- создание атмосферы доверительности в ходе полилога.

Отсутствие критериев сформированности собственной позиции относительно понятий «патриотизм» и «патриотическое воспитание», по мнению автора, не является доказательством отсутствия научной объективности и не ограничивает доказательность исследования, которое будет продолжаться с опорой на последние достижения в данной области.

Список литературы

1. Проект «Без срока давности». URL: https://memory45.su/ (дата обращения: 14.09.2026)

2. Рабочая программа дисциплины вариативного модуля «Применение в образовательной деятельности проблематики геноцида советского народа в годы Великой Отечественной войны на основе проекта «Без срока давности». М., 2021.URL: https://xn--2-btbklghc0c8b.xn--p1ai/images/doc/bsd/obrmod/%D0%A0%D0%B0%D0%B1%D0%BE%D1%87%D0%B0%D1%8F%20%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%BC%D0%B0%20%D0%B4%D0%B8%D1%81%D1%86%D0%B8%D0%BF%D0%BB%D0%B8%D0%BD%D1%8B%20%D0%B2%D0%B0%D1%80%D0%B8%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE%20%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BB%D1%8F%C2%A0.pdf (дата обращения: 15.09.2026)

3. Болбас В. С., Болбас Г. В. Патриотизм как научно-педагогический феномен // Педагогика. № 1. 2026. С. 26-34.

4. Алиева А. С. Военно-патриотическое воспитание старшеклассников: методология, теория, практика: монография. Махачкала: ДГПУ, 2023. 263 с. ISBN: 978-5-907698-16-1.

5. Клейберг Ю. А. Патриотизм и антипатриотизм в контексте актуальной ситуации: монография. Ульяновск: Зебра, 2026. 284 с. ISBN: 978-5-00275-054-2.

6. Арутюнян М. П., Салин Ю. С. Патриотическое воспитание – в школу! От методологии к практике: монография. Хабаровск: Издательство ТОГУ, 2024. 135 с. ISBN: 978-5-7389-3913-6.

7. Патриотическое воспитание в современной России: коллективная монография. Ульяновск: Зебра, 2024. 236 с. ISBN: 978-5-93856-785-6.

8. Кудинов С. И., Кудинов С. С., Кудинов В. С., Гасанова С. А. Ценностно-смысловые предпосылки гражданско-патриотического самовыражения личности: монография. М.: Перо, 2023. 236 с. ISBN: 978-5-00218-956-4.8

9. ЧикаеваТ. А. Патриотическая идея и патриотическое воспитание в современном обществе: монография. М.: МХПИ, 2024. 104 с. ISBN: 978-5-6049876-5-0.9.

10. Камакина О. Ю. Особенности патриотической воспитанности младших школьников // Общество: социология, психология, педагогика. 2020. № 5. С. 158-161. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-patrioticheskoy-vospitannosti-mladshih-shkolnikov (дата обращения 11.07.2026).

11. Иванова Е. Ю. Патриотическое воспитание старшеклассников средствами исторической реконструкции. автореф. дис. … канд. пед. наук. Ялта, 2024. 23 с. URL: https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01013197758?page=2&rotate=0&theme=black (дата обращения: 26.08.2026).

12. Спасенников В. В., Монахова Л. Ю., Печников А. Н. Проблемы военно-патриотического воспитания студенческой молодежи в современных условиях // Современные проблемы науки и образования. 2023. № 2. URL: https://science-education.ru/ru/article/view?id=32471 (дата обращения: 15.08.2026). DOI: 10.17513/spno.32471.

13. Григорян М. Э. Патриотическое воспитание в процессе изучения линейной алгебры // Современные проблемы науки и образования. 2025. № 6. URL: https://science-education.ru/ru/article/view?id=34340 (дата обращения: 16.08.2026). DOI: 10.17513/spno.34340.

14. Шитякова Н. П. Патриотическое воспитание личности как процесс смыслообразования: монография. Челябинск: Южно-Уральский научный центр РАО, 2022. 248 с. ISBN: 978-5-907538-75-7.

15. Кипреев С. Н. Методы формирования чувства патриотизма в условиях современного российского общества: монография. Краснодар: Новация, 2024. 126 с. ISBN: 978-5-00179-505-6.

16. Лебедева М. М. «Мягкая сила»: понятие и подходы // Вестник МГИМО Университета. 2017. № 3(54). С. 212-223. URL: https://www.vestnik.mgimo.ru/jour/article/view/708?locale=ru_RU (дата обращения: 10.08.2026). DOI: 10.24833/2071-8160-2017-3-54-212-223.

17. Торкунов А. В. Образование как инструмент «мягкой силы» во внешней политике России // Вестник МГИМО–Университета. 2012. № 4(25). С. 85-92. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/obrazovanie-kak-instrument-myagkoy-sily-vo-vneshney-politike-rossii (дата обращения: 13.08.2026).

18. Ивус О. Н., Тимофеева Т. В., Женевская Е. В. Педагог как инструмент мягкой силы в патриотическом воспитании молодежи // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Гуманитарные науки. 2024. № 3. С. 45-47 URL: http://www.nauteh-journal.ru/index.php/2/2024/%E2%84%9603/c5ac8189-1821-486d-adda-496ec6236ac3 (дата обращения: 11. 08.2026).

19. Макулин А. В., Мирелли М. А. Глобальные векторы «мягкой силы» в науке и образовании: социально-эпистемологические аспекты // Вестник САФУ. Философия. 2023. Т. 23. № 4. С. 92-103. URL: https://journals.narfu.ru/index.php/gum/article/view/1593/998 (дата обращения: 15.09.2026).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 378.147.34
DOI

CC BY 4.0

ПРОФЕССИОНАЛЬНО ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД В ОБУЧЕНИИ СТУДЕНТОВ ПЕДАГОГИЧЕСКОГО ВУЗА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛОГИКЕ И ТЕОРИИ АЛГОРИТМОВ

[1]Тагаева Е. А. ORCID ID 0000-0002-1234-5678,
[1]Шалина О. Н. ORCID ID 0000-0002-0520-6724,
[2]Садовников Н. В. ORCID ID 0000-0003-4567-8901

[1]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Мордовский государственный педагогический университет имени М. Е. Евсевьева», Саранск, Российская Федерация;
[2]Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулёва», Пензенский филиал, Пенза, Российская Федерация, e-mail: katrin_87.08@mail.ru

В статье рассматривается проблема профессионально ориентированного обучения студентов педагогического вуза дисциплине «Математическая логика и теория алгоритмов». Актуальность исследования обусловлена необходимостью усиления связи между фундаментальной математической подготовкой и будущей профессиональной деятельностью учителей математики и информатики. Цель исследования состоит в обосновании и апробации путей реализации профессионально ориентированного подхода в процессе изучения математической логики и теории алгоритмов. Методологическую основу исследования составили анализ научной и учебно-методической литературы, нормативных документов, педагогическое наблюдение, обобщение опыта преподавания, разработка и апробация кейсов и проектных заданий. В исследовании, которое проводилось в 2025–2026 учебном году, приняли участие 87 студентов 2–3-го курсов направления подготовки 44.03.05 Педагогическое образование (с двумя профилями подготовки) профилей «Математика. Информатика», «Математика. Физика», «Информатика. Менеджмент в образовании». Показано, что включение профессионально ориентированных заданий, моделирующих фрагменты будущей педагогической деятельности, способствует более осознанному освоению логического материала, развитию умения интерпретировать учебные ситуации. Полученные результаты позволяют рассматривать профессионально ориентированный подход как эффективное средство формирования профессиональной компетенции ПК-1 у студентов педагогического вуза в ходе профессиональной подготовки.

Ключевые слова: профессионально ориентированный подход, педагогический вуз, математическая логика, теория алгоритмов, кейс-технологии, проектное обучение, профессиональная компетенция

THE PROFESSIONALLY-ORIENTED APPROACH TO TEACHING MATHEMATICAL LOGIC AND ALGORITHM THEORY TO PEDAGOGICAL UNIVERSITY STUDENTS

[1]Tagaeva E. A. ORCID ID 0000-0002-1234-5678,
[1]Shalina O. N. ORCID ID 0000-0002-0520-6724,
[2]Sadovnikov N. V. ORCID ID 0000-0003-4567-8901

[1]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Mordovian State Pedagogical University named after M. E. Evsevev", Saransk, Russian Federation;
[2]Federal State Official Military Educational Institution of Higher Education "Military Academy of Logistics named after General of the Army A. V. Khrulev" of the Ministry of Defence of the Russian Federation, Penza branch, Penza, Russian Federation, e-mail: katrin_87.08@mail.ru

The article addresses the problem of professionally-oriented teaching of the discipline "Mathematical Logic and Theory of Algorithms" to students of a pedagogical university. The relevance of the study is determined by the need to strengthen the connection between fundamental mathematical training and the future professional activity of teachers of mathematics and computer science. The aim of the study is to substantiate and test ways of implementing a professionally-oriented approach in the process of studying mathematical logic and theory of algorithms. The methodological basis of the study comprises the analysis of scientific and educational-methodological literature, normative documents, pedagogical observation, generalization of teaching experience, and the development and testing of cases and project assignments. The study, conducted in the 2025–2026 academic year, involved 87 second- and third-year students of the training direction 44.03.05 Pedagogical Education (with two training profiles) in the profiles Mathematics and Informatics, Mathematics and Physics, and Informatics and Management in Education. It is shown that the inclusion of professionally-oriented tasks that simulate fragments of future pedagogical activity promotes a more conscious mastery of logical material and the development of the ability to interpret learning situations. The results obtained allow the professionally-oriented approach to be viewed as an effective means of forming professional competence PC-1 in pedagogical university students during professional training.

Keywords: professionally-oriented approach, pedagogical university, mathematical logic, theory of algorithms, case technologies, project-based learning, professional competence

Введение

Современное развитие высшего педагогического образования связано с усилением требований к качеству подготовки будущего учителя, способного не только владеть предметным содержанием, но и применять его в реальных профессиональных ситуациях [1]. В условиях цифровизации образования и необходимости обеспечения кадрового и технологического суверенитета России особую значимость приобретает профессионально ориентированный подход, предполагающий включение в образовательный процесс задач, связанных с будущей профессиональной деятельностью студента [2]. Профессионально ориентированный подход понимается нами как конкретизация практико-ориентированного подхода применительно к условиям вузовской подготовки будущего педагога, что соответствует задачам настоящего исследования.

Анализ современных исследований практико-ориентированного подхода при подготовке педагогов позволил выделить несколько основных направлений. Одно из них (А. И. Уман, П. И. Образцов, Т. А. Дмитренко и др.) состоит в необходимости построения образовательного процесса таким образом, чтобы и профильные, и непрофильные дисциплины были связаны с будущей профессией студентов [3; 4]. Профессионально ориентированный подход отличается разнообразием реализуемых образовательных технологий, чему посвящены работы О. И. Вагановой, Н. Н. Сергеевой и др. [5–7]. В рамках компетентностного подхода практико-ориентированные задания признаются действенным инструментом оценивания уровня овладения профессиональными компетенциями, поскольку они моделируют реальные педагогические ситуации и требуют интегрированного применения знаний, умений и навыков, при этом современные образовательные технологии предоставляют широкий арсенал средств для реализации таких заданий в учебном процессе [8]. Как отмечает Ф. Г. Ялалов, «при деятельностно-компетентностном подходе традиционная триада дополняется новой дидактической единицей: “знания – умения – навыки – опыт деятельности”», что придает практико-ориентированному обучению целостный и завершенный характер [9, с. 92].

В исследованиях П. Д. Васильевой и В. С. Тугульчиевой анализируются проблемы реализации практико-ориентированного подхода в естественно-математическом образовании в региональном вузе [10]. Авторы рассматривают кейс-задания и проекты, однако в качестве основной технологии в своей работе выбирают контекстное обучение, что позволяет им связать предметное содержание с будущей профессиональной деятельностью. Их точку зрения разделяют и другие исследователи, которые рассматривают практико-ориентированные задания как эффективное средство формирования и оценивания профессиональных компетенций будущих педагогов [11]. В то же время в работах ряда авторов предложены типологии и алгоритмы конструирования практико-ориентированных кейс-ситуаций и исследовательских заданий, что расширяет методический инструментарий их применения в образовательном процессе вуза [12–14].

Для фундаментальных теоретических дисциплин предметно-методических модулей «Математика» и «Информатика» в педагогическом вузе такой подход особенно важен, поскольку абстрактный характер их содержания затрудняет восприятие студентами практической значимости изучаемого материала. Это в полной мере относится к дисциплине «Математическая логика и теория алгоритмов», которая нередко воспринимается как теоретически сложная и недостаточно связанная со школьной практикой. Вместе с тем именно данный курс обладает значительным потенциалом для формирования логической культуры, точности рассуждений, умения анализировать высказывания и строить доказательные объяснения, что особенно важно в деятельности учителя математики и информатики.

Цель исследования – определить пути обучения студентов педагогического вуза математической логике и теории алгоритмов на основе профессионально ориентированного подхода и показать возможности его реализации через кейс-технологии и проектные задания.

Материалы и методы исследования

В исследовании приняли участие студенты 2–3-х курсов направления подготовки 44.03.05 Педагогическое образование (с двумя профилями подготовки), обучающиеся по профилям «Математика. Информатика», «Математика. Физика», «Информатика. Менеджмент в образовании». Дисциплина изучалась в рамках обязательной части учебного плана. Исследование проводилось на базе физико-математического факультета Мордовского государственного педагогического университета имени М. Е. Евсевьева. Экспериментальная группа состояла из 44 студентов (22 студента 2-го курса профиля «Математика. Информатика» и 22 студента 3-го курса профиля «Информатика. Менеджмент в образовании»), изучавших дисциплину с использованием системы профессионально

ориентированных кейсов и проектных заданий, контрольная группа – из 43 студентов (22 студента 3-го курса профиля «Математика. Информатика» и 21 студент 2-го курса профиля «Математика. Физика»), обучавшихся по традиционной схеме с преобладанием объяснительно-иллюстративных и репродуктивных методов. Группы были сопоставимы по курсу обучения и исходному уровню академической успеваемости по дисциплине. Целевым результатом обучения выступало формирование профессиональной компетенции ПК-1 Способен осваивать и использовать теоретические знания и практические умения и навыки в предметной области при решении профессиональных задач. Индикаторами достижения профессиональной компетенции являются: ПК-1.1 Знает структуру, состав и дидактические единицы предметной области; ПК-1.2 Умеет осуществлять отбор учебного содержания для его реализации в различных формах обучения в соответствии с требованиями ФГОС ОО. Для оценивания учебных достижений использовались следующие критерии: 1) умение проводить логический анализ учебной ситуации; 2) полнота и обоснованность решения; 3) умение переводить условие задачи на язык логики и алгоритма; 4) степень самостоятельности при выполнении задания; 5) педагогическая корректность объяснения решения. Каждый критерий оценивался по 3-балльной шкале (0–2). Максимальный суммарный балл составлял 10. Критерии оценивания: 0 баллов – критерий не проявлен; 1 балл – проявлен частично; 2 балла – проявлен полностью. Проверка работ осуществлялась двумя преподавателями независимо, расхождения разрешались путем обсуждения.

Результаты исследования и их обсуждение

Практико-ориентированный подход был реализован на основе кейс-технологий и метода проектов. Разработанная система кейсов и проектных заданий была направлена не только на освоение содержания дисциплины, но и на поэтапное формирование компетенции ПК-1. Кейс-задания в основном способствовали развитию ПК-1.1, поскольку требовали от студентов знания структурных элементов предметной области, понимания логической организации содержания, выделения ключевых дидактических единиц и установления связей между ними. Проектные задания преимущественно были нацелены на формирование ПК-1.2, так как предполагали самостоятельный отбор учебного содержания и его адаптацию для различных форм образовательной деятельности. Для обеспечения профессиональной направленности обучения, на основе анализа ФГОС ВО по направлению 44.03.05 и рабочих программ дисциплины было установлено соответствие между разделами курса, типовыми задачами будущего учителя и индикаторами ПК-1, которые конкретизированы в основной профессиональной образовательной программе [15]. Эта взаимосвязь отражена в таблице.

При выполнении кейсов по первому разделу студенты должны были распознать логическую форму представленного рассуждения, установить тип ошибки и соотнести школьный текст с формализованной логической схемой. При изучении второго раздела использовались преимущественно кейсы, в которых было необходимо обосновать правильность рассуждения с опорой на правила вывода. Кейсы по булевой алгебре и теории алгоритмов позволяли актуализировать знание дидактических единиц курса и их применение в школьном контексте. Приведем примеры.

Пример кейса по разделу «Алгебра высказываний»: Учитель математики предложил семиклассникам следующее задание: «Если число делится на 6, то оно делится на 3. Число 15 делится на 3. Значит, число 15 делится на 6». Ученик должен определить, верно ли рассуждение. Один из учеников написал: «Рассуждение неверно, потому что 15 на 6 не делится». Второй написал: «Рассуждение верно, потому что 15 делится на 3, а если делится на 3, то и на 6, вы же сами сказали».

Задание: 1) Проверьте правильность рассуждения с точки зрения логики высказываний (найдите логическую ошибку в рассуждении). 2) Постройте таблицу истинности для формулы $((A \rightarrow B) \wedge B) \rightarrow A$ и объясните, как она связана с данной ошибкой. 3) Сформулируйте комментарий для каждого из учеников, используя только математические аргументы, избегая терминов «импликация» и «конъюнкция».

Кейс разбирается в малых группах (3–4 чел.) с последующей общей дискуссией. Продолжительность работы – 15 мин.

Пример кейса по разделу «Исчисление высказываний и предикатов». Рассмотрим учебную ситуацию: ученик сформулировал определение «Две прямые называются параллельными, если они не пересекаются». В геометрии Лобачевского или на сфере это определение требует уточнения. Ученик на уроке задал вопрос: «А в пространстве, если прямые не пересекаются, они всегда параллельны?» Другой ученик исправил: «Прямые параллельны, если они лежат в одной плоскости и не пересекаются», – а третий ученик заметил: «Значит, скрещивающиеся прямые – это не параллельные? Но они же не пересекаются!»

Соответствие разделов дисциплины «Математическая логика и теория алгоритмов» профессиональным задачам учителя и индикаторам ПК-1

Раздел дисциплины	Формируемый индикатор ПК-1	Типовые профессиональные задачи будущего учителя	Образовательные результаты
Алгебра высказываний	ПК-1.1	Анализировать логическую корректность школьных рассуждений; выявлять ошибки в цепочках умозаключений; переводить учебный текст на язык логических формул	Умение распознавать логическую структуру высказываний, устанавливать истинностные значения, объяснять ошибки рассуждения в доступной для школьника форме
Исчисление высказываний и предикатов	ПК-1.1	Обосновывать правильность доказательных рассуждений; проверять выводимость заключений из посылок; подбирать корректные правила вывода при решении и объяснении задач	Умение строить и проверять логические доказательства, использовать правила вывода, аргументированно объяснять ход рассуждения учащимся
Булева алгебра	ПК-1.1, ПК-1.2	Преобразовывать логические выражения при решении учебных задач; применять законы булевой алгебры к упрощению высказываний и условий; моделировать логические основы алгоритмов и поисковых запросов	Умение выполнять логические преобразования, находить эквивалентные формы выражений, использовать булевы операции для построения алгоритмических и учебных моделей
Основы теории алгоритмов	ПК-1.2	Описывать пошаговые процедуры решения задач; составлять алгоритмы учебных действий; интерпретировать алгоритмические модели, используемые в школьном курсе информатики; объяснять принципы формализации вычислительных процессов	Умение проектировать и анализировать алгоритмы, представлять решение в виде последовательности действий, соотносить формальные модели алгоритма с учебными и практическими задачами

Примечание: составлена авторами на основе источников [1; 15].

Задание: 1) Представьте логическую структуру исходного и уточненного определений на языке логики предикатов, выделив родовое понятие и видовое отличие. 2) Докажите, что исходное определение не соответствует требованию соразмерности (объемы определяемого и определяющего понятий не совпадают). 3) Составьте фрагмент объяснения важности каждого слова в определении, используя этот пример и понятия необходимых и достаточных условий.

Кейс разбирается в парах с последующей общей дискуссией. Продолжительность работы – 15 мин.

Пример кейса по разделу «Булева алгебра». К учителю информатики обратился директор школы со следующей просьбой: «В базе данных выпускников 9-го класса нужно найти всех, кто сдал математику больше чем на 75 баллов из 100 и (информатику больше чем на 75 из 100 или физику больше чем на 75 из 100)». Учитель предложил учащимся 10-го класса аналогичное задание. Один ученик составил запрос, который работает долго. Учитель предлагает представить выражение в другой нормальной форме: $M \wedge (I \vee F)$.

Задание: 1) Преобразуйте данное выражение к дизъюнктивной нормальной форме (ДНФ). 2) Объясните, какая из форм (ДНФ или КНФ) в данном случае соответствует запросу, выполняющему поиск по отдельным более простым категориям с последующим объединением, и почему это может быть эффективнее. 3) Придумайте аналогичную задачу для поискового запроса в интернете.

Кейс разбирается в парах с последующей общей дискуссией. Продолжительность работы – 15 мин.

После реализации разработанных кейсов студенты стали лучше объяснять суть ошибки, предлагали верные способы ее исправления и формулировали разъяснения для школьников на понятном для них языке.

Кроме кейсов, студенты выполняли проектные работы. Например, один проект предполагал разработку материалов по теме «Машина Тьюринга как формальная модель алгоритма» для углубленного курса информатики в старших классах, другой – создание набора заданий по теме «Алгоритмы сортировки» с описанием решений и их реализацией на языке программирования. Проектная деятельность не только углу-

бляла предметные знания, но и развивала умения, которые востребованы в школьной практике учителя (умение отбирать и структурировать содержание учебного материала, конструировать учебные задания, аргументировать дидактические решения и др.).

Количественные результаты апробации

Как показала входная диагностика, средний балл в обеих группах был приблизительно одинаковый: средний суммарный балл в КГ составил M = 8,0 (SD = 1,6), в ЭГ – M = 7,9 (SD = 1,7). После проведения эксперимента итоговый балл в КГ стал M = 8,2 (SD = 1,6), а в ЭГ M = 9,4 (SD = 1,5), что свидетельствует о заметном практико-ориентированном эффекте.

Динамика внутри экспериментальной группы, состоящей из 44 студентов, по отдельным критериям показала прирост: корректность логического анализа – с 52,3 до 77,3 %; полнота и обоснованность решения – с 47,7 до 72,7 %; перевод задачи в логическую форму или алгоритм – с 45,5 до 75 %; самостоятельность выполнения – с 50 до 72,7 %; педагогически корректное объяснение решения – с 43,2 до 75 %. Наибольший прирост зафиксирован по показателям, связанным с переводом учебного содержания в логическую форму и с педагогической интерпретацией решения. Уточним, что приведенные данные в процентном соотношении отражают долю студентов экспериментальной группы, достигших установленного порога по каждому критерию (не менее 1 балла из 2). Так, по первому критерию «корректность логического анализа» 52,3 % соответствуют 23 студентам из 44, 77,3 % – 34 студентам из 44; по второму критерию 47,7 % соответствуют 21 студенту, а 72,7 % – 32 студентам; по третьему критерию 45,5 % соответствуют 20 студентам, а 75 % – 33 студентам; по четвертому критерию 50 % соответствуют 22 студентам, а 72,7 % – 32 студентам; по пятому критерию 43,2 % соответствуют 19 студентам, а 75 % – 33 студентам.

Качественный анализ результатов

Качественный разбор выполнения кейсов и проектных материалов выявил три ключевых изменения. Во-первых, студенты стали точнее различать логическую форму высказывания и его содержательный школьный контекст. Во-вторых, уменьшилось число ошибок, связанных с подменой достаточного условия необходимым при объяснении определений и рассуждений. В-третьих, в проектных работах чаще появлялись методические компоненты: четкие цели урока, педагогические пояснения для учащихся, задания разного уровня сложности и критерии оценивания.

Дополнительные наблюдения показали, что в первом кейсе 78 % студентов правильно указали на нарушение схемы вывода; во втором кейсе 72 % корректно выделили родовое понятие и видовое отличие; в третьем кейсе 76 % верно преобразовали выражение в нормальные формы и обосновали практическую ценность логических преобразований для поиска данных.

Сравнение результатов проектных работ показало, что задания по теме «Алгоритмы сортировки» оказались более доступными, чем создание материалов по «Машине Тьюринга», что объясняется различной степенью абстрактности тем. Полученные данные подтверждают, что профессионально ориентированный подход в изучении курса «Математическая логика и теория алгоритмов» повышает осмысленность усвоения теоретического материала и способствует его продуктивному применению в педагогической практике.

Заключение

Проведенное исследование показало, что профессионально ориентированный подход является эффективным средством совершенствования обучения студентов педагогического вуза дисциплине «Математическая логика и теория алгоритмов». Его реализация через кейс-технологии и проектные задания обеспечивает устойчивую связь между абстрактными логическими конструкциями и будущей профессиональной деятельностью учителя математики и информатики. Разработанная система заданий создает условия для формирования компетенции ПК-1 в ее двух ключевых аспектах: знания структуры и дидактических единиц предметной области (ПК-1.1) и умения отбирать, преобразовывать и дидактически адаптировать учебное содержание для различных форм обучения (ПК-1.2). Перспективы дальнейшего исследования связаны с расширением выборки, сравнительным анализом эффективности разных типов профессионально ориентированных заданий, а также с разработкой диагностического инструментария, позволяющего оценивать не только ближний, но и отсроченный перенос формируемых компетенций в реальную педагогическую практику.

Список литературы

1. Приказ Минобрнауки России от 22 февраля 2018 г. № 125 (ред. от 08 февраля 2021 г.) «Об утверждении федерального государственного образовательного стандарта высшего образования – бакалавриат по направлению подготовки 44.03.05 Педагогическое образование (с двумя профилями

подготовки)». [Электронный ресурс]. URL: https://fgos.ru/fgos/fgos-44-03-05-pedagogicheskoe-obrazovanie-s-dvumya-profilyami-podgotovki-125/ (дата обращения: 04.08.2026).

2. Указ Президента РФ от 9 мая 2017 г. № 203 «О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы» [Электронный ресурс]. URL: https://base.garant.ru/71670570/#block_1000 (дата обращения: 04.08.2026).

3. Образцов П. И., Уман А. И., Виленский М. Я. Технология профессионально ориентированного обучения в высшей школе: учебник для вузов / Под ред. В. А. Сластенина. 3-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2026. 248 с. [Электронный ресурс]. URL: https://urait.ru/bcode/585366 (дата обращения: 04.08.2026). ISBN 978-5-534-07122-1.

4. Дмитренко Т. А. Профессионально ориентированные технологии обучения в системе высшего педагогического образования // Сибирский педагогический журнал. 2005. № 1. С. 24–37. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/professionalno-orientirovannye-tehnologii-obucheniya-v-sisteme-vysshego-pedagogicheskogo-obrazovaniya (дата обращения: 04.08.2026).

5. Ваганова О. И., Абрамова Н. С., Максимова К. А. Профессионально ориентированные образовательные технологии // Балтийский гуманитарный журнал. 2019. Т. 8. № 4 (29). С. 38–41. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/professionalno-orientirovannye-obrazovatelnye-tehnologii (дата обращения: 04.08.2026). DOI: 10.26140/bgz3-2019-0804-0007

6. Галушина П. С., Ильясов О. Р., Лопаева Н. Л., Неверова О. П., Ражина Е. В. Практико-ориентированный подход в современном высшем образовании // Российский научный вестник. 2025. № 1. С. 272–276. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/praktiko-orientirovannyy-podhod-v-sovremennom-vysshem-obrazovanii (дата обращения: 04.08.2026). DOI: 10.24412/2782-3830-2025-1-272-276.

7. Сергеева Н. Н., Сорокоумова С. Н. Профессионально ориентированный подход при обучении иностранному языку в неязыковом вузе: сущность и принципы // Язык и культура. 2022. № 57. С. 223–239. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/professionalno-orientirovannyy-podhod-pri-obuchenii-inostrannomu-yazyku-v-neyazykovom-vuze-suschnost-i-printsipy (дата обращения: 04.08.2026). DOI: 10.17223/19996195/57/11.

8. Семенова Н. Г., Якунчев М. А., Маркинов И. Ф. Практико-ориентированные задания как средство оценивания результатов подготовки обучающихся // Современные наукоемкие технологии. 2023. Vol. 9. С. 172–179. URL: https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=39780 (дата обращения: 04.08.2026). DOI: 10.17513/snt.39780.

9. Ялалов Ф. Г. Деятельностно-компетентностный подход к практико-ориентированному образованию // Высшее образование в России. 2008. № 1. С. 89–93. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/deyatelnostno-kompetentnostnyy-podhod-k-praktikoorientirovannomu-obrazovaniyu (дата обращения: 04.08.2026).

10. Тугульчиева В. С., Васильева П. Д. Проблемы реализации практико- ориентированного подхода в естественно-математическом образовании регионального вуза // Бизнес. Образование. Право. 2019. Vol. 1 (46). С. 421–425. DOI: 10.25683/VOLBI.2019.46.152. EDN: YYDWQP.

11. Аржакова М. И., Егорова К. Е. Практико-ориентированные учебные задания как средство оценивания уровня сформированности профессиональной компетентности будущих учителей химии // Мир науки. Педагогика и психология. 2023. Т. 11. № 6. URL: https://mir-nauki.com/PDF/11PDMN623.pdf (дата обращения: 04.08.2026).

12. Замкин П. В. Алгоритмы конструирования практико-ориентированных исследовательских заданий в подготовке будущего педагога // Современные наукоемкие технологии. 2025. № 12. С. 280–288. URL: https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=40632 (дата обращения: 04.08.2026). DOI: 10.17513/snt.40632.

13. Качалова Л. П., Светоносова Л. Г. Понятие, виды и характеристика практико- ориентированных кейс-ситуаций, используемых в подготовке будущих педагогов // Вестник ШГПУ. 2021. № 4 (52). С. 73–75. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ponyatie-vidy-i-harakteristika-praktiko-orientirovannyh-keys-situatsiy-ispolzuemyh-v-podgotovke-buduschih-pedagogov (дата обращения: 04.08.2026). DOI: 10.52772/25420291_2021_4_73.

14. Тагаева Е. А., Бакулина Е. А. Кейс-задача как средство формирования цифровых компетенций будущих педагогов // Учебный эксперимент в образовании. 2021. № 1 (97). С. 91–97. URL: https://www.mordgpi.ru/upload/iblock/b78/UEvO1_2021.pdf (дата обращения: 04.08.2026).

15. Основная профессиональная образовательная программа 44.03.05 Педагогическое образование (с двумя профилями подготовки) профиль Математика. Информатика, реализуемая в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Мордовский государственный педагогический университет имени М. Е. Евсевьева». [Электронный ресурс]. URL: https://www.mordgpi.ru/sveden/files/ris/2024_OPOP_Matematika._Informatika_2024.pdf (дата обращения: 12.09.2026).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Финансирование осуществлялось за счет гранта на проведение научно-исследовательских работ по приоритетным направлениям научной деятельности вузов-партнеров (ФГБОУ ВО «МГПУ имени М. Е. Евсевьева» и ФГБОУ ВО «Чувашский государственный педагогический университет им. И. Я. Яковлева») по теме «Методика практико-ориентированного обучения физике и информатике как средство подготовки учителя для работы в инженерно-технических классах».

Financing: The funding was provided through a grant for conducting research in priority areas of scientific activity of partner universities (Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Mordovian State Pedagogical University named after M. E. Evsevev” and Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Chuvash State Pedagogical University named after I. Ya. Yakovlev”) on the topic “Methodology of practice-oriented teaching of physics and computer science as a means of preparing teachers for work in engineering and technical classes”.

УДК 376.37:373.3
DOI

CC BY 4.0

ИССЛЕДОВАНИЕ БАЗОВЫХ ОПЕРАЦИЙ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ПРЕДПОСЫЛКИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРАТЕГИЙ ОБРАБОТКИ ТЕКСТОВОЙ ИНФОРМАЦИИ ОБУЧАЮЩИМИСЯ С ТЯЖЕЛЫМИ НАРУШЕНИЯМИ РЕЧИ НА УРОКАХ МАТЕМАТИКИ

Тишина Л. А. ORCID ID 0000-0001-8421-4206

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный психолого-педагогический университет», Москва, Российская Федерация, e-mail: tishinala@mgppu.ru

В условиях инклюзивного образования обучающиеся с тяжелыми нарушениями речи уже на ранних этапах испытывают сложности с пониманием и интерпретацией текстовых сообщений. Одним из первых самостоятельно анализируемых первоклассниками текстов является текст арифметической задачи. В рамках представленных материалов исследования уделено внимание состоянию базовых операций, обеспечивающих понимание вербальной информации на уроках математики младшими школьниками с речевой патологией и являющихся предпосылками формирования стратегий анализа текста арифметической задачи. Для реализации поставленных задач были адаптированы диагностические задания, направленные на оценку сформированности интеллектуальных операций и математических представлений у первоклассников и предъявляемые с учетом целевых ориентиров программы дошкольной ступени образования. Выборку составили 168 обучающихся в возрасте от 6 лет 8 месяцев до 7 лет 9 месяцев: 98 школьников с тяжелыми нарушениями речи и 70 нормативно развивающихся сверстников. В состав экспериментальной группы вошли школьники с тяжелыми нарушениями речи, обучающиеся по варианту 5.1 и не имеющие в анамнезе речевого диагноза. Контрольную группу составили первоклассники без каких-либо нарушений развития, отобранные методом случайной выборки. Сравнительный анализ полученных результатов позволил изучить и систематизировать типичные ошибки, выделить группы по уровню базовых операций, определяющих качество интерпретации текстового сообщения на материале текста задач. В материалах статьи представлены результаты выполнения заданий первоклассниками и определено состояние предпосылок, обеспечивающих понимание текстов математических задач. Выявленные качественные и количественные характеристики на исследуемой выборке могут обосновать предположение о разработке комплексного междисциплинарного подхода на ранних этапах коррекционного обучения.

Ключевые слова: обучающиеся с тяжелыми нарушениями речи, математические умения, лингвистическое мышление, математическое мышление, инклюзивное образование, арифметическая задача, учебный текст

A STUDY OF BASIC OPERATIONS UNDERLYING THE DEVELOPMENT OF TEXT INFORMATION PROCESSING STRATEGIES BY STUDENTS WITH SEVERE SPEECH DISORDERS IN MATHEMATICS LESSONS

Tishina L. A. ORCID ID 0000-0001-8421-4206

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Moscow State Psychological and Pedagogical University", Moscow, Russian Federation, e-mail: tishinala@mgppu.ru

In the context of inclusive education, students with severe speech disorders experience difficulties in understanding and interpreting written texts at an early stage. One of the first texts that first-grade students analyze independently is the text of an arithmetic problem. The presented research materials focus on the state of basic operations that ensure the understanding of verbal information in mathematics lessons by younger students with severe speech disorders and that serve as prerequisites for the development of strategies for analyzing the text of an arithmetic problem. To achieve the set objectives, diagnostic tasks were adapted to assess the level of development of intellectual operations and mathematical concepts among first-grade students; these tasks were presented taking into account the target guidelines of the preschool education program. The sample consisted of 168 students aged between 6 years 8 months and 7 years 9 months: 98 schoolchildren with severe speech disorders and 70 typically developing peers. The experimental group consisted of schoolchildren with severe speech disorders who were studying under option 5.1 and had no history of speech diagnoses. The control group consisted of first-graders without any developmental disorders, selected using the random sampling method. A comparative analysis of the obtained results made it possible to study and systematize typical errors, and to identify groups based on the level of basic operations that determine the quality of interpretation of the educational text based on the material of the tasks. The article presents the results of assignments completed by first-grade students and identifies the state of the prerequisites that ensure understanding of mathematical problem texts. The identified qualitative and quantitative characteristics in the study sample may substantiate the assumption that a comprehensive interdisciplinary approach can be developed at the early stages of remedial education.

Keywords: students with severe speech disorders, mathematical skills, linguistic thinking, mathematical thinking, inclusive education, arithmetic problem, educational text

Введение

Процесс формирования у обучающихся с тяжелыми нарушениями речи (ТНР) математических представлений имеет ряд особенностей и требует создания специальных педагогических условий, особенно в системе инклюзивного образования [1–3]. Отсутствие специальных учебников математики, предназначенных для обучения детей с речевой патологией, создает дополнительные сложности при подготовке учителя к уроку. Особого внимания заслуживают вопросы, которые касаются разработки эффективных технологий обучения решению арифметических задач, поскольку само представление задачи в материалах учебника может быть представлено или текстом, или рисунком (чертежом, таблицей, схемой, алгоритмом), или сочетанием текста и рисунка, что переводит наше внимание в аспект креолизованных текстов, где вербальный и графический компонент должны дополнять друг друга [4–6]. Практика показывает, что у детей с ТНР не создается целостного представления и единого образа, обеспечивающих адекватность восприятия и интерпретации учебного материала [7–9].

В психолого-педагогических исследованиях достаточно широко представлен анализ причин, вызывающих трудности формирования академических знаний у обучающихся с нормативным и нарушенным развитием [10–12]. Разработка условий, форм и методов обучения математике, определение стратегий работы с текстовым материалом, в том числе и текстом арифметической задачи, обусловлены не только характером и вариативностью нарушений в усвоении математических знаний обучающимися с ТНР, но и недостаточным уровнем абстрактного мышления, который и ассоциирован с усвоением алгоритмов решения вербальных задач [13–15]. По мнению автора, определение стратегических подходов к анализу текста арифметической задачи может способствовать разработке комплекса когнитивных и языковых стратегий предтекстовой, текстовой, послетекстовой деятельности в обучении младших школьников с ТНР [16].

Состояние операций лингвистического и математического мышления младших школьников с ТНР часто на уроке может являться показателем скорости и адекватности интерпретации любого текстового учебного материала (художественного произведения, правила, памятки или алгоритма, арифметической задачи и др.) и представляется основным прогностическим фактором, определяющим качество усвоения академических знаний и успешность обучения [17–19].

Цель исследования – изучение базовых операций, обеспечивающих стратегии обработки текстовой информации младшими школьниками с ТНР на уроках математики при решении арифметических задач. Автором было предпринято экспериментальное исследование, в котором принимали участие учащиеся первых классов образовательных организаций г. Москвы (3 образовательные организации) и Московской области (2 образовательные организации). В исследование были вовлечены обучающиеся 12 первых классов.

Выборку составили 168 обучающихся в возрасте от 6 лет 8 месяцев до 7 лет 9 месяцев, которые были разделены на две группы. В экспериментальную группу (ЭГ) вошли 98 первоклассников, имеющих ТНР и рекомендации ПМПК об обучении по федеральной адаптированной образовательной программе начального общего образования (ФАОП НОО) для обучающихся с ограниченными возможностями здоровья (вариант 5.1) [20], контрольную группу (КГ) составили 70 нормативно развивающихся сверстников. Речевой статус детей ЭГ характеризовался как общее недоразвитие речи (III уровень речевого развития по классификации Р. Е. Левиной), а значит, у школьников наблюдались нарушения в развитии фонетико-фонематического и лексико-грамматического компонентов языковой системы, которые согласно рекомендованному варианту ФАОП НОО не предполагали пролонгации срока обучения. Критерии невключения в выборку: наличие различного рода речевых нарушений органического характера (дизартрия, заикание, ринолалия и пр.) при имеющихся рекомендациях ПМПК об обучении по варианту 5.1. ФАОП НОО; рекомендации ПМПК об обучении по варианту 5.2 при отсутствии ярко выраженных органических проявлений речевой патологии; наличие у обучающихся логопедического заключения о IV уровне речевого развития при наличии рекомендаций об обучении по варианту 5.1 ФАОП НОО.

Экспериментальное исследование было ориентировано на оценку состояния ключевых навыков и умений, являющихся базой для решения арифметических задач, и предполагало дифференциальный анализ уровня сформированности навыков и умений, необходимых для дальнейшего восприятия и усвоения математического материала [21]. Представленные в статье материалы исследования имеют ряд существенных методологических ограничений. Так, для анализа результатов на этом этапе исследования не применялись статистиче-

ские методы, так как представленные результаты не позволяют сделать однозначных выводов о наличии значимых эффектов, поскольку для дальнейшей проверки гипотез и оценки значимости полученных результатов необходимыми будут являться критерии ограничений для определения локальной выборки.

В рамках представленных материалов исследования мы ориентировались в первую очередь именно на состояние речевого развития обучающихся, не учитывая предварительные данные о состоянии когнитивного развития, продолжительность обучения по программе дошкольного образования, наличие/отсутствие рекомендаций ПМПК об обучении по адаптированной образовательной программе дошкольного образования для обучающихся с ограниченными возможностями здоровья и следование этим рекомендациям, наличие группы комбинированной/компенсирующей направленности или обучение по ФОП ДО. В случаях определения дальнейших критериев ограничения выборки следует предусмотреть и условия школьного обучения: инклюзивное или специальное образование. Представленные в настоящей статье материалы рассматриваются только в отношении системы инклюзивного образования: общая численность обучающихся первых классов варьировалась от 25 до 32 чел., среди обучающихся с ТНР в составе классов обучались школьники, имеющие и другие нарушения развития (задержка психического развития, нарушения слуха, расстройства аутистического спектра). Экспериментальное исследование проводилось индивидуально, а обучающиеся, не имеющие нарушений развития, были включены в исследование на основе метода случайной выборки, что позволило приблизить полученные результаты к относительно объективным.

Материалы и методы исследования

Основой для диагностики послужили специально разработанные задания и адаптированные варианты общепринятых диагностических методик. Формат предлагаемых заданий был идентичен материалам учебника «Математика» (М. И. Моро, С. И. Волкова, С. В. Степанова) и рабочих тетрадей к ним.

Инструкция к заданиям предлагалась в устном формате, при необходимости повторялась, но сама процедура выполнения заданий не предполагала никаких подсказок, помощи или разъяснений со стороны экспериментатора. Такая ситуация была создана намеренно, поскольку содержание заданий было ориентировано на уровень элементарных математических представлений, соответствующих программе подготовительной к школе группы.

Сама процедура выполнения заданий была достаточно разнообразной, так как предполагала постоянную целенаправленную предметную деятельность с предлагаемым материалом (разложить, собрать, объединить в группы, спрятать, наложить, приложить и пр.) и графические задания (дорисовать, зачеркнуть, раскрасить, заштриховать, соединить и пр.). Все предлагаемые задания были разделены на блоки (сформированность интеллектуальных операций и математических представлений) и серии внутри каждого блока. Для большинства заданий были разработаны рабочие листы. При проведении диагностики в качестве критериев оценки мы отмечали объем, качество, самостоятельность выполнения заданий каждым ребенком. Результаты выполнения заданий фиксировались в индивидуальных протоколах.

Результаты исследования и их обсуждение

Полученные в ходе констатирующего эксперимента результаты оценки сформированности мыслительных операций позволили выявить у младших школьников с ТНР стойкое недоразвитие компонентов, являющихся базисом для дальнейшего усвоения математических знаний, в сравнении с результатами контрольной группы (табл. 1). Наиболее сложными для выполнения оказались задания на обобщение: дети, имеющие речевые нарушения, смешивали понятия, не могли правильно подобрать общее слово, затруднялись с подбором общих характеристик для предъявляемых предметов; а также задания, связанные с установлением причинно-следственных связей: школьники не понимали последовательности событий, не могли установить зависимость между причиной и следствием, действовали наугад. Кроме того, можно говорить о тенденции к уменьшению процента качества выполнения заданий по мере предъявления более сложного (абстрактного) материала. Такая закономерность косвенно подтверждает, что ведущим видом мышления обучающихся с третьим уровнем речевого развития остается наглядно-образное, а переход в область логических и абстрактных интеллектуальных операций вызывает значительные сложности вплоть до непонимания инструкции педагога и невозможности выполнить задание.

Таблица 1

Результаты выполнения заданий на оценку сформированности интеллектуальных операций обучающимися ЭГ и КГ, в %

Интеллектуальные операции	Результаты ЭГ	Результаты КГ
Серия 1. Анализ и синтез	61,1	89,4
Серия 2. Сравнение	77,4	87,3
Серия 3. Классификация	72,6	81,7
Серия 4. Обобщение	46,3	76,9
Серия 5. Причинно-следственные связи	42,6	73,7

Примечание: составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования. Представлен % правильных ответов от общего числа предложенных экспериментальных заданий.

Таблица 2

Результаты выполнения заданий на оценку сформированности математических представлений обучающимися ЭГ и КГ, в %

Серии заданий	Результаты ЭГ	Результаты КГ
Серия 1. Понятия «один», «множество», «больше», «меньше»	86,8	96,2
Серия 2. Представления о взаимно однозначном соответствии между предметами, владение понятиями «столько же», «равное количество», «одинаково»	45,0	89,5
Серия 3. Представления о неравенстве предметов, владение понятиями «больше» и «меньше» применительно к совокупности элементов	36,5	78,1
Серия 4. Понятие о способах уравнивания двух совокупностей, а также уровень владения понятиями «прибавить» и «вычесть»	30,9	74,7

Примечание: составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования. Представлен % правильных ответов от общего числа предложенных экспериментальных заданий.

Следует отметить, что и у обучающихся КГ процент качества снижался при переходе к выполнению абстрактных логических заданий, однако в сравнении со школьниками ЭГ ошибки не носили такого системного характера и были скорее обусловлены отсутствием представлений о предметах и явлениях, чем отсутствием стратегий выполнения задания. В отношении первоклассников ЭГ можно предположить, что обучение анализу и выбору способа решения задачи следует начинать на предметном материале, поскольку задания, содержащие абстрактные понятия, цифры и математические знаки, могут быть недоступны для построения и усвоения алгоритма учебного действия.

Результаты диагностики уровня сформированности математических представлений у младших школьников обеих исследуемых групп показали разницу в процентах правильных ответов при выполнении разных серий заданий (табл. 2): чем сложнее была сформулирована инструкция с точки зрения лингвистического компонента (включение сравнительных и косвенных оборотов, включение совокупностей), тем больше ошибок при выполнении заданий допускали дети с ТНР.

Анализ частотности ошибок при выполнении первой серии заданий обучающимися ЭГ показал, что навык адекватного сравнения количества предметов (больше, меньше) без учета формальных признаков (размер, цвет, расположение предметов и пр.) практически отсутствует – 76,5 % школьников с ТНР допустили ошибки. Рассматриваемые в этой серии заданий понятия являются базовыми, поэтому овладение ими является обязательным условием, без выполнения которого дальнейшее обучение решению задач невозможно. Следует отметить, что при изучении интеллектуальных операций задания на сравнение при обследовании операций мышления были выполнены школьниками с ТНР гораздо лучше, чем другие предлагаемые задания. Это дает основание считать, что у детей с речевой патологией необходимо акцентно формировать операции сравнения на материале совокупностей предметов.

Во второй серии все задания были ранжированы по степени сложности и предъ-

являлись от простых к более сложным. Анализ результатов показал, что обучающиеся ЭГ и КГ допускали два типа ошибок: не могли правильно определить одинаковое количество предметов и затруднялись в формировании совокупности, аналогичной заданной по числу входящих в нее элементов. В дошкольный период обучения у детей исследуемой выборки не сформировалось четких представлений о понятии равенства предметов, что существенно затрудняет выполнение заданий по установлению взаимно однозначного соответствия между элементами.

Результаты выполнения заданий третьей серии показали ярко выраженную тенденцию к снижению показателей качества, вызванную увеличением сложности и абстрактности: от наложения и приложения к произвольному порядку предметов совокупностей и их пространственному удалению. Практически все участники ЭГ (89,8 %) допустили ошибки в формировании совокупности, отличной по количеству предметов от заданной. Обучающиеся КГ допускали случайные ошибки, отвлекаясь на несущественные детали. Анализ результатов показал, что сравнение двух групп предметов по числу входящих в них элементов является сложным для понимания детьми с речевой патологией материалом. Несформированность категорий «больше» и «меньше» не позволяет обучающимся осознать те количественные отношения, в которых находятся элементы совокупностей: путают понятия («больше здесь и здесь тоже больше», «нигде не меньше»), отвечают первым пришедшим в голову словом или вовсе отказываются отвечать. В заданиях, где нужно было выложить (нарисовать) предметов больше (или меньше), чем задано, школьники наугад перебирали варианты, брали все предметы, которые были предложены, отвлекались и переводили задачу из учебной в игровую: обводили и дорисовывали произвольные предметы, играли с карточками, прятали их в конверт или просто перекладывали с одного места на другое. Кроме того, можно констатировать, что спонтанно, в процессе повседневной игровой или бытовой деятельности, понятия «больше» и «меньше» у обучающихся с речевой патологией не формируются, поскольку в этом случае не связаны ни с пересчетом предметов, ни с формированием конкретных совокупностей по числу.

Четвертая серия заданий у школьников с ТНР вызвала наибольшие затруднения. Дети испытывали сложности при сравнении количества предметов, не могли уравнять одну совокупность относительно другой, путали понятия «прибавить» и «вычесть». Наибольшее число ошибок было допущено в тех случаях, когда уравнять совокупности требовалось вычитанием: отодвинуть предметы, убрать со стола или зачеркнуть и пояснить свой выбор. Особую трудность вызвало графическое задание, где инструкция (уравнять зернышки и птиц) абсолютным большинством игнорировалась: обучающиеся с ТНР или рисовали произвольное число «зернышек», или изображали что-то свое, не относящееся к заданию (ветки для птиц, кормушки, клетки, солнце, палочки).

Обобщая полученные результаты, автор отметил, что обучающиеся с ТНР исследуемой группы при переходе на ступень школьного обучения испытывают существенные трудности, связанные с формированием базовых компонентов, обеспечивающих усвоение математических представлений и определяющих возможности решения текстовых арифметических задач. На основе анализа индивидуальных протоколов обучающиеся ЭГ и КГ были условно разделены на три группы по уровню сформированности базовых операций, определяющих качество интерпретации текстового материала на уроках математики.

В группу I вошли школьники, у которых отсутствовали навыки установления взаимно-однозначного соответствия между элементами двух совокупностей, отмечались трудности владения понятиями «прибавить», «вычесть», «больше», «меньше», многочисленные ошибки при сравнении количества предметов (из ЭГ – 31 чел.).

К группе II отнесли обучающихся, в протоколах которых фиксировалось неполное и неточное владение математическими категориями: понятия «больше» и «меньше» находятся в стадии формирования, понятия «вычесть» и «прибавить» в основном отсутствуют; установление равенства двух совокупностей доступно в большинстве случаев только на более легких вариантах заданий (наложение и приложение предметов); уравнивание элементов двух совокупностей вызывает значительные трудности (из ЭГ – 37 чел., из КГ – 26 чел.).

В группе III первоклассники демонстрировали наиболее высокие показатели владения математическим материалом, хотя навыки установления взаимно однозначного соответствия на уровне совокупностей предметов не автоматизированы (из числа участников ЭГ – 30 чел., из числа КГ – 44 чел.).

Результаты проведенного исследования позволили установить разницу в показателях успешности выполнения заданий на оценку сформированности базовых интеллектуальных операций и изучение математических представлений между обучающимися ЭГ и КГ (табл. 3).

Таблица 3

Результаты выполнения заданий на оценку сформированности интеллектуальных операций и математических представлений обучающимися ЭГ и КГ, в %

Исследуемые компоненты	Средний показатель успешности в ЭГ	Средний показатель успешности в КГ
Оценка сформированности интеллектуальных операций	60	81,8
Оценка сформированности математических представлений	49,7	84,6

Примечание: составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования. Представлен средний % правильных ответов от общего числа предложенных экспериментальных заданий.

Заключение

Проведенное исследование не является исчерпывающим, однако поднимает крайне важную проблему взаимосвязи лингвистических компонентов мышления не только в формировании математических умений и навыков обучающихся с ТНР, но и вопросов формирования и усвоения разнообразных стратегий работы с текстовым материалом в рамках разных предметных областей. Качество и эффективность таких стратегий могут быть связаны со способностью к вербализации математических действий, умением объяснить ход решения, способностью выстраивать в умственном плане необходимую цепочку действий, абстрагироваться от несущественных деталей, отстаивать свой выбор способа решения задачи, формулировать умозаключения и делать выводы.

Полученные результаты в обследованной выборке свидетельствуют о необходимости реализации междисциплинарного подхода и создания специальных педагогических условий. Значительное количество современных психолого-педагогических исследований посвящено вопросам профилактики дискалькулии. Вместе с этим приходится констатировать, что на разных ступенях обучения уделяется недостаточное внимание разработке новых эффективных методов и приемов коррекционно-развивающего обучения математике детей с ТНР.

Наличие вариативных речевых нарушений в структуре общего недоразвития речи при сохранных базовых когнитивных функциях с учетом возможных проявлений дискалькулии в той или иной степени может отразиться на овладении математическими умениями и навыками у младших школьников с ТНР. Выявленные нарушения в рамках представленного исследования согласуются с предположением о разработке и реализации междисциплинарного подхода к решению проблемы в триаде «учитель начальных классов – учитель-логопед – педагог-психолог».

Список литературы

1. Алехина С. В., Быстрова Ю. А., Самсонова Е. В., Шеманов А. Ю. Особенности личностного развития обучающихся в инклюзивной образовательной среде // Культурно-историческая психология. 2025. № 4. С. 70–80. DOI: 10.17759/chp.2025210407.

2. Исаев Е. И., Марголис А. А. Трудности в обучении: диагностика, профилактика, преодоление // Психологическая наука и образование. 2023. № 28 (5). С. 7–20. DOI: 10.17759/pse.2023280501.

3. Коробейников И. А., Бабкина Н. В. Ребенок с ограниченными возможностями здоровья: прогнозирование психосоциального развития в современной образовательной среде // Клиническая и специальная психология. 2021. № 10 (2). С. 239–252. DOI: 10.17759/cpse.2021100213.

4. Исаев Е. И., Марголис А. А., Сафронова М. А. Психологический анализ компетентности учителя начальной школы в работе над предметными ошибками обучающихся // Психологическая наука и образование. 2023. № 1. С. 5–24. DOI: 10.17759/pse.2023000002.

5. Санина С. П., Соколов В. Л. Подходы к типологии основных ошибок младших школьников при освоении математических понятий // Современная зарубежная психология. 2021. № 10 (4). С. 138–146. DOI: 10.17759/jmfp.2021100413.

6. Талызина Н. Ф. Психология детей младшего школьного возраста: формирование познавательной деятельности младших школьников. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Юрайт, 2026. 174 с. ISBN 978-5-534-06448-3.

7. Андриашина А. И., Тишина Л. А. Общие и специфические проблемы формирования интеллектуальных операций у младших школьников с трудностями в обучении // Клиническая и специальная психология. 2024. № 4. С. 135–148. DOI: 10.17759/cpse.2024130407.

8. Артемова Е. Э., Тишина Л. А., Сунько Т. Ю. и др. Современные коррекционно-развивающие технологии в системе начального общего образования обучающихся с особыми образовательными потребностями: монография. М.: Издательство «МГППУ», 2024. 186 с. [Электронный ресурс]. URL: https://psyjournals.ru/nonserialpublications/mcdtspgessen2024/mcdtspgessen2024.pdf (дата обращения: 30.07.2026). ISBN 978-5-94051-339-1.

9. Артемова Е. Э., Тишина Л. А., Сунько Т. Ю., Сорокина В. Т. А., Богданова А. И., Данилова А. М., Подвальная Е. В., Труханова Ю. А., Евтушенко И. В., Евтушенко А. И., Антонова Е. Е., Васильева Е. А., Калмыкова А.С ., Борякова Н. Ю., Акимова Н. А. Актуальные вопросы подготовки учителей-

дефектологов в системе высшего образования: монография. М.: ФГБОУ ВО МГППУ, 2025. 152 с. [Электронный ресурс]. URL: https://psyjournals.ru/nonserialpublications/citsetshe2025 (дата обращения: 30.07.2026). ISBN: 978-5-94051-361-2.

10. Данилова А. М., Подвальная Е. В., Шишкова М. И. Междисциплинарный подход в формировании коммуникативных универсальных учебных действий у обучающихся с задержкой психического развития // Современные наукоемкие технологии. 2022. № 2. С. 187–195. DOI: 10.17513/snt.39056.

11. Маркова Т. В. Формирование образовательных компетенций обучающихся с нарушениями интеллектуального развития // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Педагогика. 2015. № 4. С. 71–77. DOI: 10.18384/2310-7219-2015-4-71-77.

12. Тишина Л. А., Данилова А. М., Подвальная Е. В. Стартовые возможности обучающихся с расстройствами аутистического спектра в овладении элементарными представлениями начального курса математики // Современные наукоемкие технологии. 2022. № 12–2. С. 388–396. DOI: 10.17513/snt.39490.

13. Соколов В. Л. Психолого-педагогические приемы работы над ошибками младших школьников при освоении математических понятий // Вестник практической психологии образования. 2023. № 20 (1). С. 46–60. DOI: 10.17759/bppe.2023200105.

14. Алексеева О. С., Ржанова И. Е., Бритова В. С., Бурдукова Ю. А. Академическая успешность и когнитивные способности у младших школьников // Вестник РГГУ. Серия: Психология. Педагогика. Образование. 2021. № 1. С. 51–64. DOI: 10.28995/2073-6398-2021-1-51-64.

15. Антонова Е. Е., Алексеева О. С., Бурдукова Ю. А., Лыкова Н. С., Ржанова И. Е. Невербальный интеллект у детей с общим недоразвитием речи // Ананьевские чтения – Человек в современном мире: потенциалы и перспективы психологии развития. Материалы международной научной конференции (г. Санкт-Петербург, 17–20 октября 2023 г.) / Под общ. ред. О. Ю. Стрижицкой и А. В. Шаболтас, отв. ред. В. И. Прусаков и Ю. О. Ременюк. М.: ООО «Союзкниг», ООО «Кириллица». С. 121. EDN: QYDDUJ. ISBN 978-5-605-10690-6.

16. Тишина Л. А. Системный подход к анализу проблемы готовности обучающихся с тяжелыми нарушениями речи к решению арифметических задач // Современные наукоемкие технологии. 2020. № 2. С. 117–121. DOI: 10.17513/snt.37926.

17. Андриашина А. И. Особенности вербально-логического мышления у обучающихся с нарушениями письменной речи / Дефектология в свете современных нейронаук: теоретические и практические аспекты: сборник материалов I Международной научной конференции (г. Москва, 23–24 апреля 2021 г.). М.: ООО «Когито-Центр». С. 255–259. EDN: YNDRNW. ISBN 978-5-89353-624-9.

18. Адильжанова М. А., Илларионова О. И. Особенности предикативного словаря и префронтального синтеза у дошкольников с расстройствами аутистического спектра // Аутизм и нарушения развития. 2026. № 1. С. 3–11. DOI: 10.17759/autdd.2026240101.

19. Филатова А. В., Тишина Л. А. Специфика интерпретации текстовой и подтекстовой информации младшими школьниками с речевым недоразвитием // Традиции и инновации в современном образовательном пространстве: сборник статей молодых ученых Российской академии образования (г. Москва, 17 апреля 2025 г.) / Отв. ред. Н. А. Краснощеков; научн. ред. О. Ю. Васильева. М.: ФГБУ «Российская академия образования», 2025. С. 734–741. EDN: ECKCZS. ISBN 978-5-605-20007-9.

20. Приказ Министерства просвещения Российской Федерации от 24 ноября 2022 г. № 1023 «Об утверждении федеральной адаптированной образовательной программы начального общего образования для обучающихся с ограниченными возможностями здоровья» (Зарегистрирован 21 марта 2023 г. № 72654) [Электронный ресурс]. URL: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202303220005?ysclid=mtya1609xw368196396 (дата обращения: 12.09.2026).

21. Кондратьева С. Ю. Характер нарушений временных представлений у дошкольников с ограниченными возможностями здоровья и пути их коррекции в системе профилактики дискалькулии // Педагогика. Вопросы теории и практики. 2025. № 1. С. 108–114. DOI: 10.30853/ped20250014.

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest.

Финансирование: Автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 37.035.6:72.03(470.23-25)
DOI

CC BY 4.0

ФОРМИРОВАНИЕ ГРАЖДАНСКОЙ ИДЕНТИЧНОСТИ И ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ СТУДЕНТОВ ЧЕРЕЗ ОСВОЕНИЕ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ (НА МАТЕРИАЛЕ ХРАМОВОЙ АРХИТЕКТУРЫ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА)

Чернышова Э. П. ORCID ID 0000-0001-5086-5713,
Гильдина Т. А. ORCID ID 0000-0003-3808-3764,
Ткаченко Д. А. ORCID ID 0000-0003-4000-5466

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный педагогический университет имени А. И. Герцена», Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: ch-elvira@bk.ru

Статья посвящена исследованию дидактического потенциала православной храмовой архитектуры Санкт-Петербурга как средства патриотического воспитания и формирования гражданской идентичности будущих специалистов в области культуры и образования. Актуальность исследования обусловлена необходимостью поиска новых подходов к формированию гражданской идентичности и ценностных ориентаций студенческой молодежи в условиях трансформации системы ценностей и цифровизации образования. Цель исследования – разработать комплекс заданий по дисциплине «Основы архитектуры и дизайна», направленных на формирование профессиональных компетенций, и обосновать их методический потенциал в патриотическом воспитании и формировании гражданской идентичности будущих специалистов. Теоретико-методологическую базу исследования составили труды по педагогике, искусствоведению, культурологии, а также нормативно-правовые документы в сфере образования и государственной культурной политики. В работе использованы методы теоретического анализа и синтеза, обобщения педагогического опыта, искусствоведческого анализа памятников архитектуры, а также метод моделирования учебных заданий. Эмпирическую конкретизацию теоретических положений составил анализ структуры и содержания учебной дисциплины «Основы архитектуры и дизайна», реализуемой в Институте художественного образования Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена. Разработан комплекс учебных заданий, выстроенный по принципу последовательного усложнения и интегрирующий тематику православного храмостроения в содержание дисциплины. Задания направлены на развитие чувства сопричастности к отечественной истории, уважение к традициям и духовным ценностям и обеспечивают целенаправленное формирование гражданской идентичности. В заключение отмечено, что предложенный комплекс заданий может быть адаптирован для программ педагогического образования (направление 44.03.05), в частности для дисциплины «Анализ и интерпретация произведения искусства», что будет способствовать подготовке педагога, способного транслировать ценности отечественной культуры будущим поколениям.

Ключевые слова: культурно-историческое наследие, патриотическое воспитание, храмовая архитектура, православная культура, РГПУ им. А. И. Герцена, Институт художественного образования, Санкт-Петербург, основы архитектуры и дизайна

FORMATION OF CIVIC IDENTITY AND PROFESSIONAL COMPETENCIES OF STUDENTS THROUGH THE STUDY OF CULTURAL HERITAGE (BASED ON THE CHURCH ARCHITECTURE OF SAINT PETERSBURG)

Chernyshova E. P. ORCID ID 0000-0001-5086-5713,
Gildina T. A. ORCID ID 0000-0003-3808-3764,
Tkachenko D. A. ORCID ID 0000-0003-4000-5466

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "State Pedagogical University of Russia named after A. I. Herzen", Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: ch-elvira@bk.ru

The article is devoted the didactic potential of Orthodox church architecture in St. Petersburg as a means of patriotic education and the development of civic identity among future professionals in the fields of culture and education. The relevance of the study is determined by the need to develop new approaches to fostering civic identity and value orientations among university students amid transformations in the system of values and the increasing digitalization of education. The aim of the study is to provide a theoretical substantiation of and reveal the didactic potential of using examples of Orthodox church architecture in St. Petersburg in the professional training of future specialists in the fields of culture and education. The theoretical and methodological framework of the study draws on works in pedagogy, art history, and cultural studies, as well as regulatory and legal documents in the fields of education and state cultural policy. The research employs methods of theoretical analysis and synthesis, generalisation of pedagogical experience, art-historical analysis of architectural monuments, and the modelling of learning assignments. The empirical specification of the theoretical propositions is based on an analysis of the structure and content of the academic course Fundamentals of Architecture and Design, delivered at the Institute of Arts Education of the A. I. Herzen Russian State Pedagogical University. A set of learning assignments has been developed in accordance with the principle of progressive complexity, integrating the theme of Orthodox church architecture into the course content. The assignments are designed to foster a sense of belonging to national history, respect for traditions and spiritual values, and to ensure the purposeful formation of civic identity. The article concludes that the proposed set of assignments may be adapted for teacher education programmes (specialisation 44.03.05), in particular for the course Analysis and Interpretation of a Work of Art. Such adaptation would contribute to the training of teachers capable of conveying the values of national culture to future generations.

Keywords: patriotic education, church architecture, cultural and historical heritage, Orthodox culture, Herzen State Pedagogical University, Institute of Art Education, Saint Petersburg, fundamentals of architecture and design

Введение

Современное российское общество переживает период трансформации ценностных ориентиров, что актуализирует проблему патриотического воспитания. При этом ключевая роль в этом процессе отводится подготовке специалистов в области культуры и образования, чьи чувства гражданской идентичности и культурный багаж определяют вектор воспитания будущих поколений. В условиях цифровизации и фрагментации информационного пространства обращение к подлинному культурно-историческому наследию становится важнейшим ресурсом формирования нравственных ориентиров студенческой молодежи. Нормативной основой исследования выступают положения Указа Президента РФ от 09 ноября 2022 г. № 809 «Об утверждении Основ государственной политики по сохранению и укреплению традиционных российских духовно-нравственных ценностей». В документе обозначен приоритет сохранения и популяризации историко-культурного наследия народов Российской Федерации как базы для формирования гражданской идентичности [1]. Обращение в процессе воспитательной работы к ценностям и традициям российской культуры представляется перспективным направлением в процессе становления гражданской идентичности [2, с. 129]. Система высшего педагогического образования призвана готовить компетентного специалиста, способного не только транслировать ценности отечественной культуры обучающимся, но и лично быть их носителем. В связи с этим культурологический и искусствоведческий компоненты в профессиональной подготовке приобретают не только познавательное, но и стратегическое воспитательное значение.

Культурно-историческое наследие России является неисчерпаемым ресурсом для формирования гражданской идентичности. При этом важно разграничивать понятия «гражданская идентичность» и «патриотизм». Гражданская идентичность – это осознание принадлежности к сообществу граждан того или иного государства, имеющее для индивида значимый смысл, основанное на признании ценностей, норм и традиций этого сообщества. Патриотизм – это чувство любви к Родине, готовность служить ее интересам, уважение к ее истории и культуре. Эти понятия тесно связаны: гражданская идентичность служит основой для патриотизма, а патриотизм, в свою очередь, укрепляет и развивает гражданскую идентичность. В контексте данного исследования формирование гражданской идентичности рассматривается как процесс осознания студентами своей принадлежности к российской культурно-исторической традиции через изучение православной храмовой архитектуры, а патриотизм – как эмоционально-ценностное отношение к этому наследию, проявляющееся в готовности его сохранять и транслировать.

В контексте культурно-исторического наследия особое место занимает культовая (религиозная) архитектура, включающая христианские храмы, представленные православием, католицизмом и протестантизмом, мечети, буддийские храмы и т. д. Культовая архитектура представляется духовным символом различных конфессий регионов России и обладает огромным потенциалом в процессе формирования гражданской идентичности будущих поколений. В рамках настоящей статьи авторским коллективом данный вопрос предлагается к рассмотрению через храмовую православную архитектуру, поскольку ее изучение входит в программу дисциплин Института художественного образования РГПУ им. А. И. Герцена. Разработан комплекс учебных заданий, выполнение которых обеспечивает формирование как профессиональных компетенций, так и внедрение патриотического компонента. Данный материал рассматривается авторами как методическая основа для последующей интеграции в программы педагогического профиля. В заключительной части статьи сформулированы предложения по адаптации разработанного комплекса заданий для дисциплин, входящих в подготовку будущих учителей по направлению 44.03.05 Педагогическое образование (с двумя профилями подготовки), в частности в дисциплину «Анализ и интерпретация произведения искусства».

Анализ современных исследований, посвященных проблемам художественно-педагогического образования, показывает, что профессиональная подготовка в области искусства рассматривается не только как процесс передачи знаний и умений, но и как средство формирования мировоззренческих позиций обучающихся [3–5]. В отдельную категорию можно отнести работы, посвященные траекториям развития художественного образования в условиях тотальной цифровизации общества [6; 7]. На этом фоне особую значимость приобретают содержательно-ценностные аспекты подготовки будущего специалиста. В работах последних лет отмечается, что обращение к культурному наследию способствует не только эстетическому развитию студентов, но и осознанию ими своей принадлежности к тысячелетней культурной традиции

[8, с. 156]. Также вопрос рассматривается с позиции поисков способов и подходов успешного формирования патриотизма у будущих специалистов [9]. В направлении теории и методики преподавания на уровне основного общего образования также можно отметить повышение внимания к вопросу важности культурного наследия в обучении [10]. В зарубежной педагогической практике значительное внимание уделяется проблеме рефлексии студентами архитектурного наследия и его творческого освоения в будущей профессиональной деятельности архитектора [11, с. 850], и редкие исследования касаются педагогического потенциала изучения архитектуры [12]. Вопросы же методического обеспечения непосредственно в художественном образовании данного процесса остаются недостаточно разработанными.

Выявленный пробел обусловливает необходимость обращения к конкретным учебным дисциплинам, содержание которых создает естественную основу для интеграции патриотического компонента в профессиональную подготовку будущих педагогов. В этом отношении особый интерес представляет рабочая программа дисциплины «Основы архитектуры и дизайна» [13], реализуемая в Институте художественного образования Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена (РГПУ им. А. И. Герцена) по направлению подготовки 50.03.03 История искусств, профиль «История искусств и дизайна». Содержание дисциплины включает разделы, непосредственно связанные с изучением православного храмостроения: древнерусская архитектура (тема 5), архитектура Европы и России Нового времени (тема 6), средства гармонизации в архитектуре (тема 8). Данные темы создают сущностную основу для включения материалов о православном храмостроении в учебный процесс и разработки заданий, направленных на формирование общепрофессиональной компетенции ОПК-2 (способность применять знания основных проблем и концепций в области истории искусства с учетом историографии) и профессиональной компетенции ПК-1 (способность использовать навыки художественно-творческой деятельности в области визуальных искусств). Обращаясь к содержанию указанных компетенций, также необходимо обозначить их связь в деле формирования гражданской идентичности обучающегося. Формирование ОПК-2 через изучение храмовой архитектуры позволяет студентам осознать вклад России в мировое культурное наследие, что напрямую способствует укреплению гражданской идентичности. Формирование ПК-1 через практическую работу с архитектурными объектами (натурное обследование, зарисовки, композиционный анализ) способствует эмоционально-ценностному освоению культурного наследия, что является основой гражданской идентичности.

Цель исследования – разработать комплекс заданий по дисциплине «Основы архитектуры и дизайна», направленных на формирование профессиональных компетенций (ОПК-2, ПК-1) и обосновать их методический потенциал в патриотическом воспитании и формировании гражданской идентичности будущих специалистов. Для достижения поставленной цели необходимо выполнение следующих задач:

1. Проанализировать нормативно-правовую базу и научно-методическую литературу по проблеме.

2. Раскрыть методический потенциал православной храмовой архитектуры Санкт-Петербурга как ресурса формирования гражданской идентичности студентов.

3. Определить содержательные и структурные возможности дисциплины «Основы архитектуры и дизайна».

4. Разработать комплекс учебных заданий, направленных на формирование профессиональных компетенций, и обосновать их методическую эффективность в патриотическом воспитании студентов.

Материалы и методы исследования

Теоретико-методологическая база исследования опирается на фундаментальные положения педагогики искусства, культурологии и художественного образования. Ключевую роль в концептуальном аппарате работы играет понимание гражданской идентичности как значимого осознания принадлежности к сообществу, основанное на признании ценностей, норм и традиций и патриотического воспитания как целенаправленного процесса формирования у обучающихся любви к Родине, уважения к ее истории и культуре, готовности к служению Отечеству [3; 12]. В качестве важной теоретической категории выступает понятие «культурно-историческое наследие», которое можно трактовать как совокупность материальных и духовных ценностей, созданных предшествующими поколениями и составляющих основу сохранения и развития национальной идентичности.

В основе исследовательской процедуры лежало изучение и обобщение научных трудов, посвященных вопросам патриотического воспитания, художественно-педагогического образования и роли архитектурного наследия в формировании ценностных ориентаций молодежи [4; 6; 9].

Для выявления специфики использования храмовой архитектуры в образовательном процессе был задействован инструментарий искусствоведческого анализа памятников архитектуры, а также метод моделирования учебных заданий.

Эмпирическую базу для конкретизации теоретических положений составил анализ структуры и содержания дисциплины «Основы архитектуры и дизайна» (рабочая программа, фонд оценочных средств), реализуемой в Институте художественного образования РГПУ им. А. И. Герцена, а также анализ предыдущего практического опыта авторского коллектива [8; 13].

Результаты исследования и их обсуждение

Институт художественного образования РГПУ им. А. И. Герцена, являясь старейшим педагогическим вузом страны и одним из ведущих центров художественно-педагогического образования в России, обладает значительным ресурсом для интеграции культурологического и искусствоведческого компонентов в процесс профессиональной подготовки будущих специалистов в области культуры и образования. Географическое положение института в центре Санкт-Петербурга создает уникальные условия для включения в образовательный процесс работы с подлинными памятниками архитектуры, в том числе православными храмами.

Ключевыми храмовыми сооружениями Санкт-Петербурга на сегодня являются собор преподобного Исаакия Далматского (Исаакиевский собор), собор Казанской иконы Божией Матери (Казанский собор), собор Воскресения Христова (Смольный собор), собор святых апостолов Петра и Павла (Петропавловский собор), храм Воскресения Христова на Крови (Спас-на-Крови) и ряд других выдающихся памятников, выступающих важнейшими историко-культурными символами как города, так и России в целом. Эти знаковые сооружения занимают центральное место в общем курсе истории искусств, поскольку наглядно демонстрируют ключевые этапы архитектурной эволюции. Включение этих объектов в содержание учебных дисциплин позволяет организовать их целенаправленное искусствоведческое и культурологическое изучение студентами.

Интеграция тематики храмовой архитектуры в содержание дисциплины «Основы архитектуры и дизайна» может осуществляться через различные формы работы: лекционные и семинарские занятия, выездные экскурсии, проектные и исследовательские работы студентов, а также через специально разработанные задания в рамках текущего и промежуточного контроля. При разработке заданий необходимо учитывать требования рабочей программы дисциплины и компетенции, которые должны быть сформированы у обучающихся.

На основе проведенного анализа структуры и содержания дисциплины «Основы архитектуры и дизайна» были разработаны типовые задания, интегрирующие тематику православной храмовой архитектуры Санкт-Петербурга и направленные на формирование компетенций ОПК-2 и ПК-1. Представленный авторским коллективом статьи комплекс учебных заданий дисциплины инвариантной части выстроен в логике постепенного усложнения. Первым этапом студент сталкивается с проблемой осмысления конкретного памятника в историческом контексте. Вторым этапом студент переходит непосредственно к практической работе и получению опыта проведения натурного обследования архитектурного сооружения и композиционного анализа. Третьим этапом студент должен продемонстрировать понимание смысловых характеристик и взаимосвязей в архитектуре. Вариативная часть включает задание классического академического характера, подразумевающее знакомство студента с историографией на выбранную тему. Задание практической части охватывает знания, полученные студентом в рамках освоения дисциплины по теме, и подразумевает включение художественно-творческого компонента.

Задания инвариантной части самостоятельной работы

Задание 1 (тема 5 «Древнерусская архитектура»). Эссе на тему «Памятник древнерусского зодчества в контексте истории развития русской архитектуры» (на выбор: Софийский собор в Киеве, Софийский собор в Новгороде, Успенский собор во Владимире, церковь Покрова на Нерли в поселке Боголюбово Владимирской области).

Требования к выполнению. В тексте эссе необходимо отразить основные фактические данные наряду с личным осмыслением памятника архитектуры. Студент должен продемонстрировать понимание значения памятника в контексте развития национальной архитектурной традиции. Рекомендуется обратить внимание на вопросы влияния византийской традиции и формирование национального своеобразия, а также композиционного решения и конструктивного типа храма (крестово-купольный), особен-

ностей архитектурного и изобразительного декора и символики. *Критерии оценивания задания:* полнота раскрытия темы; аргументированность и корректное владение профессиональной терминологией; способность студента отвечать на дополнительные вопросы, связанные с заданием; степень сформированности гражданской идентичности: осознание значения памятника как части национального культурного наследия; способность выразить личностное отношение к отечественной истории и культуре; понимание связи архитектурного объекта с историей России.

Необходимо отметить, что указанное задание направлено на формирование компетенции ОПК-2 и прекрасно отражает специфику включения ценностно-ориентированного компонента в образовательный процесс.

Задание 2 (тема 6 «Архитектура Европы и России Нового времени»). Композиционный анализ православного храма Санкт-Петербурга XVIII–XIX вв. (на выбор из предложенных).

Требования к выполнению. Студенту необходимо познакомиться с алгоритмом анализа архитектурной композиции и оформить результаты в форме презентационных материалов. В качестве рекомендованного предложен алгоритм анализа архитектуры по В. Г. Лисовскому [14, с. 554]. Алгоритм анализа архитектурной композиции должен выполняться по следующему плану: история строительства и архитектор; стилевая принадлежность; композиционное решение (планировка, объемно-пространственная структура); средства художественной выразительности; символика и архитектурный и изобразительный декор; роль храма в градостроительном ансамбле Санкт-Петербурга. Проведению анализа композиции предшествует сбор натурного материала. Во время натурного обследования архитектурного сооружения необходимо подготовить авторские фотографии, зарисовки архитектурных элементов и особенностей ландшафта. *Критерии оценивания задания:* полнота раскрытия темы; аргументированность и корректное владение профессиональной терминологией; умение выявлять стилевые особенности; качество оформления презентационных материалов; способность студента отвечать на дополнительные вопросы, связанные с заданием; степень сформированности гражданской идентичности: умение видеть в архитектурном памятнике отражение культурно-исторического пути России; способность интерпретировать храм как символ национальной идентичности; проявление ценностного отношения к культурному наследию.

Заметим, что полученный студентом опыт натурного обследования памятника и его последующая интерпретация по предложенному алгоритму способствуют формированию ценностного отношения к культурному наследию. В этом задании патриотическое воспитание осуществляется непосредственно через профессиональную практическую деятельность.

Задание 3 (тема 8 «Средства гармонизации в архитектуре»). Подготовка аналитической таблицы формальных средств гармонизации архитектуры по обозначенным критериям.

Требования к выполнению. На примере одного из православных храмов Санкт-Петербурга (по выбору) выявить и охарактеризовать средства гармонизации, использованные архитектором: средство гармонизации (симметрия/асимметрия, ритм, масштабность, контраст/нюанс, колористическое решение, тектоника); характеристика проявления в выбранном объекте; визуальное подтверждение (указание на конкретные элементы). *Критерии оценивания:* полнота и точность выявления средств гармонизации; обоснованность характеристик и их связь с конкретными архитектурными элементами; владение профессиональной искусствоведческой терминологией; качество визуального подтверждения (соответствие иллюстраций описанию); способность к синтезу: умение связывать формальный анализ с историко-культурным контекстом; глубина осмысления памятника как элемента национального наследия и основы историко-культурной идентичности; степень сформированности гражданской идентичности: способность видеть в гармонии архитектурных форм отражение духовных и эстетических идеалов народа; осознание ценности храмовой архитектуры как объекта культурного наследия России.

Данное задание предполагает использование навыков, сформированных в ходе выполнения предыдущих заданий: умения работать с историко-культурным контекстом (задание 1), навыков натурного обследования и композиционного анализа (задание 2), а также способности применять профессиональный искусствоведческий инструментарий для интерпретации памятника как целостного явления. Системный анализ средств гармонизации позволяет увидеть в храме не просто архитектурный объект, а художественно осмысленное воплощение культурной традиции.

Задание для вариативной самостоятельной работы (вариативность задания обеспечивается выбором темы)

Задание (темы 5, 6, 8). Реферат «Православные храмы Санкт-Петербурга в контексте историко-культурного наследия России».

Требования к выполнению. Тематика рефератов: Роль православных храмов в формировании архитектурного облика Санкт-Петербурга XVIII–XIX вв.; Синтез европейских и русских традиций в архитектуре Исаакиевского собора; Казанский собор как памятник воинской славы и архитектурный символ империи; Собор Воскресения Христова Смольного монастыря: история замысла и воплощение творческой идеи; Храмы-памятники Санкт-Петербурга как объекты культурного наследия и ресурс патриотического воспитания. Реферат представляет собой письменную работу, в которой студентом собрана информация по теме на основе анализа актуальных статей по теме, фундаментальных трудов и других источников. *Критерии оценивания задания:* полнота раскрытия темы; аргументированность и корректное владение профессиональной терминологией; качество научного поиска и систематизации; качество оформления реферата; способность студента отвечать на дополнительные вопросы, связанные с заданием.

Задание в рамках практических занятий

Задание (тема 5 «Древнерусская архитектура»). Поле знания по теме «Древнерусская храмовая архитектура и ее роль в формировании национального самосознания».

Требования к выполнению. Поле знания представляет собой упорядоченное описание основных понятий и связей между ними в предметной области. Поле знания необходимо оформить в виде аналитического плаката. В плакате должно быть наглядно отражено, каким образом древнерусская храмовая архитектура формировала и закрепляла в сознании общества представление о национальной культурной традиции. Плакат создается вручную с использованием художественных материалов. Элементы, выполненные от руки (зарисовки архитектурных деталей, орнаменты, схемы, инфографика), являются обязательной частью работы. Допускается и приветствуется авторская интерпретация материала через художественные средства (стилизация, авторские композиционные решения). Плакат должен содержать логически выстроенные блоки. Критерии оценивания: глубина проработки материала, использование научной и справочной литературы, качество визуальных материалов, аргументированность выводов, активное участие в дискуссии.

Создание поля знания формирует умение систематизировать искусствоведческую информацию. Форма исполнения исключает возможность использования средств искусственного интеллекта для генерации готовых изображений, что обеспечивает подлинность творческой работы студента. Зарисовка архитектурных деталей, проработка орнаментов, оформление текста и т. д. позволяют будущему искусствоведу глубже прочувствовать материальную природу памятника, его фактуру, масштаб, ритм.

Представленные задания интегрированы в логику рабочей программы дисциплины и могут быть использованы как для аудиторной работы, так и для самостоятельной подготовки студентов. Их систематическое применение способствует не только формированию профессиональных компетенций, но и воспитанию у будущих специалистов чувства патриотизма и уважения к культурному наследию России.

Оценивая перспективы разработанного подхода, необходимо отметить возможности включения комплекса заданий в содержание дисциплины других программ, в частности педагогического профиля. Интеграция предложенных заданий в программы педагогического образования (в частности, в дисциплину «Анализ и интерпретация произведения искусства» направления 44.03.05) позволяет решать комплекс задач по нескольким направлениям.

Во-первых, изучение культовой (храмовой) архитектуры способствует обогащению профессиональных искусствоведческих знаний студентов. Анализ архитектурных стилей, конструктивных особенностей, символики и декора храмов расширяет кругозор студентов, формирует их компетентность в области истории искусства и мировой художественной культуры. Как отмечается в исследовании Е. А. Московцевой, современный педагог должен владеть широким спектром компетенций, позволяющим ему эффективно работать как в системе общего, так и дополнительного образования [15, с. 41].

Во-вторых, культовая (храмовая) архитектура является мощным средством развития эстетического вкуса и эмоциональной сферы. Созерцание гармоничных архитектурных форм, погружение в художественное пространство храмов способствует формированию «чувства красоты», которое, как подчеркивает В. П. Новоселова, является осно-

вой для воспитания эстетических чувств у будущих учеников [4, с. 91]. Эстетическое развитие студентов в процессе изучения храмовой архитектуры выступает неотъемлемым компонентом их профессиональной подготовки, поскольку учитель изобразительного искусства должен не только сам владеть художественным вкусом, но и уметь формировать его у школьников.

В-третьих, изучение знаковых памятников способствует формированию чувства сопричастности к истории и культуре. Храмы являются «свидетелями» ключевых событий отечественной истории. Знакомство с их историей, с судьбами архитекторов, строителей и прихожан помогает студентам ощутить себя частью тысячелетней культурной традиции. Изучение культовой (храмовой) архитектуры как части культурного ландшафта способствует формированию патриотических чувств и осознанию своей принадлежности к месту.

В-четвертых, культовая (храмовая) архитектура является материальным воплощением духовных ценностей народа – веры, этических представлений о добре, красоте и истине. Анализ символики храмового пространства, иконографических программ и декоративного убранства способствует формированию нравственных ориентиров у студентов, что является ядром патриотического воспитания [3, с. 5].

Анализируя содержание учебного плана программы направления 44.03.05 Педагогическое образование (с двумя профилями подготовки), направленности «Изобразительное искусство, Дополнительное образование», можно выделить дисциплину «Анализ и интерпретация произведения искусства», в рамках которой происходит формирование компетенции ОПК-8, которая подразумевает овладение методами, формами и средствами обучения и навыками организации различных видов внеурочной деятельности с учетом возможностей и историко-культурного своеобразия региона. Данная компетенция формируется при адаптации комплекса заданий для педагогических программ и непосредственно связана с патриотическим воспитанием, так как предполагает трансляцию ценностей отечественной культуры.

Заключение

Православная храмовая архитектура Санкт-Петербурга обладает значительным методическим потенциалом для патриотического воспитания будущих специалистов в области культуры и образования, поскольку сочетает в себе художественную, историческую и ценностную составляющие. Институт художественного образования РГПУ им. А. И. Герцена располагает существенным ресурсом для интеграции тематики храмовой архитектуры в процесс профессиональной подготовки, что обусловлено как содержанием учебных программ (в частности, дисциплины «Основы архитектуры и дизайна»), так и уникальной архитектурной средой города.

Проведенный теоретический анализ и моделирование учебных заданий позволяют квалифицировать православную храмовую архитектуру Санкт-Петербурга в качестве эффективного средства патриотического воспитания и формирования гражданской идентичности будущих специалистов в области культуры и образования. Разработанный комплекс заданий по дисциплине «Основы архитектуры и дизайна» (темы 5, 6, 8) выстраивается в логически связанную систему, обеспечивающую переход от историко-культурного осмысления памятника через профессиональное натурное обследование к синтезу формальных и смысловых характеристик. Предложенный механизм подразумевает активную исследовательскую и практическую деятельность, реализующуюся посредством профессионального инструментария, что позволяет глубже осмыслить отечественную культурную традицию.

Предложенный комплекс заданий может быть адаптирован для программ педагогического образования (направление 44.03.05), в частности для дисциплины «Анализ и интерпретация произведения искусства», где он будет работать на формирование компетенции ОПК-8. При этом важно подчеркнуть, что формирование гражданской идентичности и профессиональных компетенций не являются взаимоисключающими задачами: они взаимодополняют друг друга, поскольку профессиональная деятельность будущего педагога и искусствоведа неразрывно связана с трансляцией ценностей отечественной культуры.

Практическая значимость исследования заключается в предоставлении преподавателям конкретных методических материалов, которые могут быть использованы как в искусствоведческом, так и в педагогическом образовании. Перспективы дальнейших исследований связаны с эмпирической проверкой эффективности адаптации комплекса заданий для программ педагогического образования.

Список литературы

1. Указ Президента Российской Федерации от 09 ноября 2022 г. № 809 «Об утверждении Основ государственной политики по сохранению и укреплению традиционных рос-

сийских духовно-нравственных ценностей» // Президент России. Москва, 2022. [Электронный ресурс]. URL: http://www.kremlin.ru/acts/bank/48502 (дата обращения: 16.07.2026).

2. Лукаш С. Н., Герлах И. В. Концептуальные основы и педагогическая модель гражданско-патриотического воспитания студентов с учетом исторических и традиционных ценностей российского казачества // Перспективы науки и образования. 2026. № 1. С. 127–146. URL: https://pnojournal.wordpress.com/2026/02/28/lukash-2/ (дата обращения: 22.09.2026). DOI: 10.32744/pse.2026.1.8.

3. Вырщиков А. Н., Кусмарцев М. Б. Теоретические основания инновационного развития патриотического воспитания в регионе // Известия Волгоградского государственного педагогического университета. 2015. № 3 (98). С. 4–10. EDN: TSCEFB.

4. Новоселова В. П. Организация проектной деятельности по изучению православной храмовой архитектуры Кузбасса на уроках изобразительного искусства и во внеурочной деятельности // Вестник Кузбасской православной духовной семинарии». 2022. № 4 (11). С. 89–95. DOI: 10.56859/29490847_2022_4_89. EDN: JXWBUN.

5. Затямина Т. А., Пожарская А. В. Ценностные ориентиры профессиональной деятельности учителя изобразительного искусства // Известия Волгоградского государственного педагогического университета. 2016. № 5 (109). С. 33–37. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=26556260 (дата обращения: 22.09.2026). EDN: WJDKCD.

6. Рахимбаева И. Э. Художественное образование и пути его развития в эпоху цифровизации // Грани познания. 2022. № 2 (79). С. 30–33. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=48270213 (дата обращения: 22.09.2026). EDN: CQLLDQ.

7. Савлучинская Н. В., Лыкова Е. С., Морозкина Е. А. Художественное образование в период цифровой глобализации // Современные наукоемкие технологии. 2022. № 11. С. 193–197. URL: https://top-technologies.ru/article/view?id=39420 (дата обращения: 20.08.2026). DOI: 10.17513/snt.39420. EDN: TEVNXR.

8. Чернышова Э. П., Гильдина Т. А., Ткаченко Д. А. Формирование ценностных ориентаций иностранных студентов через изучение архитектурного наследия Санкт-Петербурга // Современные наукоемкие технологии. 2025. № 4. С. 151–159. URL: https://top-technologies.ru/article/view?id=40380 (дата обращения: 20.08.2026). DOI: 10.17513/snt.40380. EDN: RUMMPY.

9. Скрипченкова С. Ю., Сатарова Л. А. Патриотическое воспитание будущих архитекторов на примере сохранения историко-культурного наследия Нижневолжского региона России // Педагогическое образование в России. 2020. № 6. С. 140–145. DOI: 10.26170/po20-06-16.

10. Измайлова Н. Н. Приобщение старших дошкольников к национальной культуре через православное храмовое зодчество // Дошкольник.РФ: публикации для аттестации: всероссийский сетевой журнал. Красноярск, 2025. № 46 (408), 25 декабря. С. 68. URL: http://doshkolnik.ru/nravstvennost/priobschenie-starshih-doshkolnikov-k-nacionalnoiy-kulture-cherez-pravoslavnoe-hramovoe-zodchestvo.html (дата обращения: 07.07.2026).

11. Hein C., van Dooren E. Teaching history for design at TU Delft: exploring types of student learning and perceived relevance of history for the architecture profession // International Journal of Technology and Design Education. 2020. Vol. 30. P. 849–865. URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s10798-019-09533-5 (дата обращения: 20.08.2026). DOI: https://doi.org/10.1007/s10798-019-09533-5.

12. Kabir F. Architecture Pedagogy – Architecture for Kids: Workshop for School Kids // International Journal of Research in Civil Engineering, Architecture & Design. 2017. Vol. 5, Is. 2. P. 41–49. URL: https://www.academia.edu/52298470/Architecture_Pedagogy_Architecture_for_Kids (дата обращения: 07.07.2026).

13. Рабочая программа дисциплины «Основы архитектуры и дизайна». СПб.: РГПУ им. А. И. Герцена, Институт художественного образования. 2026. 35 с. [Электронный ресурс]. URL: https://opop.herzen.spb.ru/program/10797 (дата обращения: 05.07.2026).

14. Анализ и интерпретация произведения искусства. Художественное сотворчество: учебное пособие / Н. А. Яковлева, Т. П. Чаговец, В. В. Бабияк [и др.]. 10-е изд., стер. СПб.: Планета музыки, 2026. 722 с. ISBN 978-5-507-54151-5. Электрон. версия печатного издания: СПб.: Лань, URL: https://e.lanbook.com/book/510977 (дата обращения: 14.07.2026). Режим доступа: для авториз. пользователей.

15. Московцева Е. А. Методическая подготовка учителя к профессиональной деятельности в системе общего и дополнительного образования // Материалы Ивановских чтений. 2023. № 1 (40). С. 41–43. URL: https://gum-nauki.ru/wp-content/uploads/2023/04/%E2%84%961-40-2023.pdf (дата обращения: 01.07.2026). EDN: KUJHZS.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Исследование выполнено за счет внутреннего гранта РГПУ им. А. И. Герцена (проект № ВГ-135).

Financing: The research was supported by the grant of the Herzen State Pedagogical University of Russia (project No. VG-135).

УДК 371.121
DOI

CC BY 4.0

РАЗВИТИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ГЕОМЕТРО-ГРАФИЧЕСКИХ СПОСОБНОСТЕЙ БУДУЩИХ ИНЖЕНЕРОВ-КОНСТРУКТОРОВ

[1]Юматова Э. Г., [2]Юматов В. А.

[1]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет», Нижний Новгород, Российская Федерация, e-mail: yumatova.evelina@gmal.com;
[2]Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет имени Н. И. Лобачевского», Нижний Новгород, Российская Федерация

Цель исследования – разработать содержание дополнительного модуля «Проективная геометрия» для формирования фундаментальных геометро-графических способностей будущих инженеров-конструкторов, обучающихся по специальности 08.05.01 Строительство уникальных зданий и сооружений. Согласно образовательному стандарту будущие специалисты должны владеть общепрофессиональными компетенциями для решения прикладных инженерных задач с привлечением методов фундаментальных наук. Это обуславливает необходимость разработки образовательных модулей, расширяющих традиционное прикладное содержание геометро-графической подготовки разделами из высшей геометрии. По результатам анализа профессиональных требований к специалистам выделены задачи, требующие знаний по проективной геометрии. Однако вопросы расширения геометро-графического содержания разделами проективной геометрии остаются недостаточно изученными. С учетом специфики специальности выделены взаимосвязанные с содержанием текущей геометро-графической подготовки разделы и темы дополнительного модуля. В исследовании уточнены компоненты фундаментальных геометро-графических способностей будущего специалиста. Актуализирован алгоритм решения учебных проблемных задач. Определены характеристики модуля и цифровые средства обучения. Выделены и уточнены рекомендации к применению на занятиях цифровых средств и проведению оценки модуля. Приведены примеры междисциплинарных проблемных задач. Результаты эффективности разработанного проекта модуля в статье не представлены, проект модуля требует эмпирической апробации и экспертной оценки.

Ключевые слова: общетехнические дисциплины, интеграция разделов высшей и прикладной геометрии, проективная геометрия, графика

DEVELOPMENT OF FUNDAMENTAL GEOMETRIC AND GRAPHIC ABILITIES OF FUTURE STRUCTURAL ENGINEERS

[1]Yumatova E. G., [2]Yumatov V. A.

[1]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering", Nizhny Novgorod, Russian Federation, e-mail: yumatova.evelina@gmal.com;
[2]Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Nizhny Novgorod National Research State University named after N. I. Lobachevsky", Nizhny Novgorod, Russian Federation

The purpose of the study is to develop the content of a supplementary module titled «Projective geometry» to foster the fundamental geometric-graphic capabilities of future structural engineers specializing in «Construction of Unique Buildings and Structures» (code 08.05.01). According to the educational standard, future specialists must possess general professional competencies for solving applied engineering problems by employing methods from the fundamental sciences. This necessitates the development of educational modules that expand the traditional applied content of geometric-graphic training to include topics from higher geometry. Based on an analysis of professional requirements for specialists, tasks requiring knowledge of projective geometry have been identified. However, the issues of expanding the geometric-graphic content to include sections of projective geometry remain insufficiently studied. Taking into account the specifics of the specialization, sections and topics for an additional module have been identified that are interconnected with the content of the current geometric-graphic training. The components of the fundamental geometric-graphic abilities of the future specialist have been specified in the study. The algorithm for solving problem tasks has been updated. The characteristics of the module and the digital learning tools have been defined. Recommendations regarding the use of digital tools in class and the assessment of student performance have been identified and refined. Examples of interdisciplinary problem-based tasks are presented. The article does not present results regarding the effectiveness of the developed module content; the draft module content requires empirical validation and expert assessment.

Keywords: general technical disciplines, integration of higher and applied geometry, projective geometry, graphics

Введение

В ходе проведения проектных и производственных работ будущему инженеру-конструктору необходимы фундаментальные знания в геометро-графической области. Особую значимость теоретическая фундаментальная подготовка имеет для будущих специалистов по строительству уникальных по сложности объектов (08.05.01 Строительство уникальных зданий и сооружений). В настоящее время геометро-графическая подготовка таких специалистов имеет прикладной характер. Для фундаментализации подготовки необходима интеграция с разделами из высшей геометрии. Непосредственно взаимосвязанность знаний по высшей и прикладной геометрии позволила инженеру В. Г. Шухову рассчитывать и конструировать сложные формы, линии пересечения поверхностей четвертого порядка и металлические конструкции по образующим гиперболоида. При этом для разработки архитектурно-строительных и конструктивных решений необходима интеграция с таким разделом из высшей геометрии, как проективная геометрия [1; 2]. Отметим, проективное пространство может быть применено в вузе и для изучения основ топологии [1, с. 112]. Освоение тем проективной геометрии должно осуществляться с применением таких профессионально значимых цифровых средств, как технологии автоматизации проектирования CAD (Computer-aided design) [3] и технологии информационного моделирования в строительстве BIM (Building Information Modeling) [4].

Проблема реализации принципа междисциплинарности в техническом вузе при интеграции геометро-графических дисциплин с линейной алгеброй, аналитической геометрией, вычислительной математикой исследована в работах ряда ученых [5–7]. В ряде работ рассмотрены учебные задачи, решаемые при интеграции начертательной геометрии, компьютерной графики и отдельных разделов проективной геометрии [2; 8; 9]. Однако вопросы расширения геометро-графического содержания разделами проективной геометрии для формирования фундаментальных способностей у будущих инженеров-конструкторов остаются недостаточно изученными.

Цель исследования – разработать содержание дополнительного модуля «Проективная геометрия» для формирования фундаментальных геометро-графических способностей будущих инженеров-конструкторов, обучающихся по специальности 08.05.01 Строительство уникальных зданий и сооружений.

Материалы и методы исследования

Проведен анализ нормативных документов и теоретико-педагогических исследований в сфере инженерной, математической подготовки и информатике. Применены методы исследования: устное собеседование с инженерами проектных организаций и преподавателями технических вузов, анализ, синтез, моделирование.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ базовой части подготовки специалистов в различных вузах (МГСУ, СПбГАСУ, ННГАСУ) определил, что традиционно дисциплина «Инженерная и компьютерная графика», отвечающая за геометро-графическую подготовку, состоит из двух прикладных разделов для изучения: 1) начертательной геометрии; 2) стандартов и технологии CAD.

Ввиду потребности разработки в строительстве цифровых двойников при сдаче проектно-конструкторской документации органам Госэкспертизы введена связанная по содержанию в части прикладной геометрии дисциплина «Информационное моделирование в строительстве» для освоения технологии BIM. Освоение данных дисциплин направлено на развитие у будущих специалистов аналитических и пространственно-объемных способностей для решения прикладных задач, определенными общепрофессиональными компетенциями ОПК-2, ОПК-3, ОПК-4.

При этом, ввиду архитектурно-пространственной и конструктивной сложности будущих инженерных задач в области строительства уникальных объектов, будущий специалист для их решения «должен обладать фундаментальными знаниями» [10, с. 98], что отражено в компетенции ОПК-1. На основе анализа Профессиональных стандартов специалиста в области архитектуры и проектирования (10.003, 10.004) выделен перечень таких задач, решение которых предполагает знания не только по начертательной, но и по проективной геометрии. Перечень включает разработку: 1) вариантов архитектурно-строительных решений объекта строительства; 2) концепции конструктивной схемы; 3) графической части рабочей документации; 4) документов по результатам экспертно-аналитической оценки; 5) информационных моделей. Примерами современных геометрически уникальных и сложных конструктивных решений на основе топологической поверхности Мебиуса являются прогулочная зона и пешеходный мост (г. Москва, г. Чанша).

Разделы и темы дополнительного модуля «Проективная геометрия»

Разделы	Темы по разделам
Построение перспективных проекций	Методы проективной геометрии в архитектуре. Законы перспективы. Свойства центрального проектирования. Теорема Дезарга
Геометрические преобразования	Теория групп. Аксиомы принадлежности, порядка и непрерывности. Свойства и инварианты аффинных преобразований. Принцип двойственности. Инварианты проективных преобразований
Основы топологии в проективной геометрии	Реконструкция евклидова пространства. Несобственные элементы. Топологические свойства геометрических объектов. Модель проективного пространства. Однородные координаты
Гармонические свойства. Задачи второй степени	Непрерывные деформации. Перспективные коллинеации. Определение Штейнера. Построение модели проективной прямой и плоскости. Кривые второго порядка
Преобразование гомологии	Построение плоских сечений пространственных объектов. Взаимосвязь с элементарной и начертательной геометрией. Проективные свойства конических сечений. Преобразование кривых второго порядка

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

В итоге с учетом специфики специальности выделены взаимосвязанные с традиционной геометро-графической подготовкой разделы проективной геометрии, что стало основой разработки тематического плана дополнительного модуля. Выделенные разделы модуля и темы по разделам представлены в таблице.

Фундаментальные геометро-графические знания, входящие в состав фундаментальных способностей, должны развиваться в комплексе с такими компонентами, как аналитические и пространственно-объемные способности будущего специалиста. Сущности, операционные компоненты и методики развития понятий «аналитические и пространственно-объемные способности» будущих инженеров исследованы рядом ученых. Аналитические способности – это, прежде всего, логические и комбинаторные способности. Пространственно-объемные способности – это, прежде всего, развитость способностей моделирования, опирающихся на междисциплинарное знание геометрических и инженерных законов формирования объектов в виде объектно-знаковых систем [12; 13]. Необходима также развитость умений мысленного оперирования двумерными и трехмерными образами, структурного и пространственного конструирования, построения разверток, реализации решений графическими «ручными» и цифровыми средствами на практике [4; 14].

Для освоения тем модуля акцент делается на ведущих в инженерном образовании подходах – деятельностном, личностно-ориентированном и междисциплинарном. Поэтому аналитические и пространственно-объемные способности будущего специалиста формируются при решении разного типа задач: понятийных (знание теории); шаблонных (алгоритмические); эвристических и исследовательских (в условиях частичной неопределенности) [10; 11]. При этом список развивающих задач по Дж. Гилфорту должен сочетать конвергентный и дивергентный виды решений. Уточнен обобщенный алгоритм их решения: 1) мотив (техническое задание – ТЗ); 2) выдвижение и комбинаторный отбор перспективных идей (проект); 3) практическая реализация (рабочая стадия – построение моделей); 4) рефлексия или логическая верификация конструктивного решения (экспертиза); 5) внесение корректировок. Отметим, что в ходе прикладной геометро-графической подготовки не удается в полном объеме определить способность студентов переходить от одного раздела геометрии к другому или от одного пространства идей к другому.

По результатам анализа учебного плана для специалитета 08.05.01, реализуемого на базе ФГБОУ ВО ННГАСУ, определены основные характеристики модуля для составления рабочей программы: 1) относится к дисциплинам по выбору вариативной части, проведение запланировано в 5-м семестре; 2) опирается на знания, полученные при изучении дисциплин «Инженерная и компьютерная графика», «Информационное моделирование в строительстве», «Высшая математика»; 3) форма промежуточной аттестации – зачет с оценкой; 4) планируемые результаты – формирование индикаторов компетенций ОПК-1, ОПК-2, ОПК-3, ОПК-4 в геометро-графической области знания.

Трудоемкость и цифровые средства обучения, запланированные в модуле: 1) объем – 2 зачетные единицы (72 ч); 2) лекции – 16 ч; 3) практические занятия – 4 ч; 4) лабораторные занятия с применением технологий CAD (NanoCAD 26) и BIM (Renga версии 9.2 и выше) – 12 ч; 5) работа самостоятельно – 40 ч. На практических и лабораторных занятиях студенты в течение семестра выполняют предметные и междисциплинарные задачи по общим примерам и вариантам.

Отметим, что применение обозначенных цифровых технологий при решении проблемных задач за счет скорости перебора вариантов, наглядной визуализации предполагаемых архитектурно-строительных и конструктивных решений, элементов геймификации и возможности облета моделей может иметь как положительные результаты на формирование мотивации и рефлексии, комбинаторных и практических умений, так и отрицательные [3; 13; 15]. Выделены и уточнены рекомендации к применению данных цифровых технологий для освоения тем проективной геометрии. Рекомендации включают: 1) учет индивидуальных и возрастных особенностей студента; 2) предпочтение проблемному типу задач; 3) непрерывное обновление электронного банка вариантов заданий для самостоятельного выполнения во избежание копирования их результатов в цифровом виде; 4) сочетание традиционных графических «ручных» и цифровых средств; 5) реализация при решении задач логической цепочки «понятие – знак – образ».

По завершении прохождения модуля выделены [13; 14] и уточнены методические рекомендации оценки сформированности фундаментальных геометро-графических способностей студента по трем уровням: 1) низкий – фрагментарность знаний при решении понятийных предметных задач, отсутствие самостоятельности; 2) средний – умения находить решение в алгоритмических предметных задачах под руководством преподавателя, участие в конференциях по дисциплине; 3) высокий – умения находить решения в алгоритмических и исследовательских предметных и междисциплинарных задачах, обосновывать выбор метода решения и цифровых средств, а также наличие достижений в олимпиадах разного уровня.

Соответственно, показатели для составления схемы экспертной оценки (0, 1, 2 балла) включают: 1) знания по разделам проективной геометрии; 2) умения сформулировать ТЗ; 3) умения выполнять алгоритмические предметные задачи; 3) умения выполнять алгоритмические и исследовательские междисциплинарные задачи; 4) умения обосновать оптимальность решения; 5) степень самостоятельности при решении задач; 6) коэффициент участия в конференциях; 7) достижения в олимпиадах. Оценка за формулировку ТЗ и выполнение задач проставляется по правилу: неверный ответ – 0 баллов, решение неоптимальное – 1 балл, оптимальное решение – 2 балла. Коэффициент участия в конференциях по темам геометро-графических дисциплин: 1 конференция – 1 балл, 2 конференции и более – 2 балла. Достижения в предметной олимпиаде: диплом призера – 1 балл; диплом победителя – 2 балла.

Приведем примеры содержания проблемных задач алгоритмического и исследовательского уровней, дополненных междисциплинарной деятельностью на уровне содержания и средств. Направленность выполняемых в аудитории приведенных задач – развитие связей между разделами начертательной и высшей геометрии, а также логических, комбинаторных способностей и моделирования. При решении задач самостоятельно студенты реализуют варианты построения моделей, отличные от работы в аудитории.

Задача 1. Построить топологическую модель проективной прямой RP^1, наглядно отражающую свойство ее замкнутости. Для решения сформулировать и показать цифровыми средствами CAD правило взаимно однозначного соответствия точек RP^1 и не пересекающей ее окружности m. Применить метод центрального проектирования. Центр проектирования – произвольная точка S, принадлежащая m.

Задача 2. Построить топологическую модель проективной плоскости RP^2, наглядно отражающую свойство ее замкнутости. Применить поверхность полусферы, расположенную ниже горизонтальной плоскости, проходящей через ее центр S. Полусфера касается RP^2 в нижней точке. Для решения сформулировать и наглядно показать правило взаимно однозначного соответствия точек RP^2 с точками поверхности полусферы. Отождествить диаметрально противоположные точки экватора. Для построения проекций точек и прямых плоскости RP^2 на полусферу применить метод центрального проектирования из центра S. При построении модели RP^2 использовать также метод дополнительных построений, инструменты трехмерного моделирования и визуализации технологии BIM.

Заключение

Сложность архитектурно-строительных задач определила необходимость усиления фундаментальной части геометро-графической подготовки будущих инженеров-конструкторов в сфере возведения уникальных объектов за счет расширения прикладных модулей дополнительным модулем из высшей геометрии «Проективная геометрия». Разработан проект содержания модуля. Для получения результатов его эффективности необходимо в дальнейшем проведение эмпирической апробации и экспертной оценки.

Список литературы

1. Тадеев В. А. От живописи к проективной геометрии. К.: Высшая школа, 1988. 232 с. ISBN 5-11-000119-7.

2. Иващенко А. В., Знаменская Е. П. Варианты последовательностей построения конфигурации Дезарга // Вестник МГСУ. 2016. № 9. С. 130–139. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.9.130-139. EDN: WMLAYZ.

3. Гиль В. И., Исаченков В. С. Перспективы изучения дисциплины «Начертательная геометрия и инженерная графика» в современном образовательном процессе // Высшее техническое образование. 2019. Т. 3. № 1. С. 40–42. URL: https://elib.belstu.by/handle/123456789/30997?ysclid=mu6v904w3344799254 (дата обращения: 01.07.2026). EDN: KQUINH.

4. Назарова Ж. А. Геометро-графическая подготовка студентов технических специальностей в современных условиях // Геометрия и графика. 2024. Т. 12. № 1. С. 41–49. URL: https://naukaru.ru/ru/nauka/article/86037/view (дата обращения: 17.07.2026). DOI: 10.12737/2308-4898-2024-12-1-41-49. EDN: EULJRU.

5. Бойков А. А., Егиазарян К. Т., Ефремов А. В., Кадыкова Н. С. Проблемы геометро-графической подготовки студентов вузов // Геометрия и графика. 2023. Т. 11. № 1. С. 4–22. URL: https://naukaru.ru/ru/nauka/article/58180/view (дата обращения: 01.07.2026). DOI: 10.12737/2308-4898-2023-11-1-4-22. EDN: DQRRMT.

6. Савельев Ю. А., Черкасова Е. Ю. Вычислительная графика в решении нетрадиционных инженерных задач // Геометрия и графика. 2020. Т. 8. № 1. С. 33–44. URL: https://naukaru.ru/ru/nauka/article/37114/view (дата обращения: 17.08.2026). DOI: 10.12737/2308-4898-2020-33-44.

7. Мучкаева С. С. Методологические аспекты формирования пространственного мышления у студентов через интеграцию задач линейной алгебры и компьютерного моделирования // Академический исследовательский журнал. 2024. Т. 2. № 1. С. 24–38. URL: https://aereview.ru/index.php/ae/article/view/31?articlesBySimilarityPage=2 (дата обращения: 17.08.2026). DOI: 10.25726/m9151-3791-6640-c. EDN: CYNUQU.

8. Крум Е. В. Проективная геометрия: учеб. пособие для вузов. СПб.: Лань, 2023. 160 с. ISBN 978-5-507-47804-0.

9. Бородулина С. В., Зайцев Ю. А. Теоретические основы построения нелинейных перспективных изображений // Вестник СГТУ. 2006. № 4 (17). Вып. 2. С. 66–76. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/teoreticheskie-osnovy-postroeniya-nelineynyh-perspektivnyh-izobrazheniy (дата обращения: 20.08.2026). EDN: ZVKHVZ.

10. Чарикова И. Н. Концепция развития образовательной проектности будущих инженеров-строителей // Вестник Оренбургского государственного университета. 2021. № 4 (232). С. 98–103. URL: http://vestnik.osu.ru/doc/1033/article/9680/lang/0 (дата обращения: 01.09.2026). DOI: 10.25198/1814-6457-232-98. EDN: KAOOXW.

11. Смирнов В. В., Стефанова Г. П., Тюлюпова С. С. Проблема профессионально-ориентированной подготовки будущего инженера-строителя // Современные наукоемкие технологии. 2026. № 5. С. 255–261. URL: https://top-technologies.ru/article/view?id=40802 (дата обращения: 20.07.2026). DOI: 10.17513/snt.40802.

12. Горбачев В. И., Пузырева Е. Н. Представление геометрического пространства и его наглядно-образной модели в учебной деятельности // Вестник Красноярского педагогического университета им. В. П. Астафьева. 2024. № 3 (69). С. 5–20. URL: https://vestnik.kspu.ru/index.php/vestnik/article/view/568 (дата обращения: 20.07.2026). EDN: BORIFD.

13. Дейнега С. А., Сотникова О. А. Особенности формирования математико-графической компетенции при изучении начертательной геометрии // Вестник Сыктывкарского университета. Серия 1: Математика. Механика. Информатика. 2022. № 4 (45). С. 46–51. DOI: 10.34130/1992-2752_2022_4_46. EDN: IDYXOV.

14. Бауэр Н. В., Красовская Н. И., Шушарина И. В., Романова А. А., Сычева А. В. Интерактивные методы формирования пространственного мышления будущих инженеров // Высшее образование сегодня. 2020. № 8. С. 25–29. DOI: 10.25586/RNU.HET.20.08.P.25. EDN: KHBZRO.

15. Белавина Т. В. Пространственное мышление будущих инженеров // Педагогический журнал. 2023. Т. 13. № 4А. С. 414–421. URL: https://publishing-vak.ru/file/archive-pedagogy-2023-4/c2-belavina.pdf (дата обращения: 20.08.2026). DOI: 10.34670/AR.2023.74.88.050.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.

УДК 373:37.01
DOI

CC BY 4.0

ИГРЫ НАРОДОВ СЕВЕРА В ЗДОРОВЬЕСБЕРЕЖЕНИИ ДОШКОЛЬНИКОВ

Яркова Г. А. ORCID ID 0000-0001-6324-7674,
Токарева Е. Ю. ORCID ID 0000-0002-7164-9574

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский государственный университет», Тюмень, Российская Федерация,
e-mail: g.a.yarkova@utmn.ru

В статье раскрывается роль игр народов Севера как инструмента здоровьесбережения детей дошкольного возраста. Важным направлением современного дошкольного образования является формирование у ребенка ценностного отношения к здоровью. Целью проведенного исследования явилось обоснование использования народных игр в здоровьесбережении дошкольников, так как они оказывают воздействие на их физическое развитие, способствуют психологической разгрузке и приобщают к культурным традициям своего народа. Игры имеют древнюю историю, они присутствуют в культурах всех народов, отражая их жизнь, традиционные занятия, способствуют физическому и духовному здоровью ребят. С древних времен народы северного региона в воспитании большое значение придавали развитию ловкости, силовых качеств и физических способностей личности: это вызвано суровым климатом региона и трудными условиями жизнедеятельности и организации социальной сферы. Все это в совокупности в северных городах и поселках отражается на общем развитии детей и их здоровье. В статье описано, как с помощью народных игр в условиях дошкольной образовательной организации при планировании двигательного режима дошкольников организовать развитие детей и сохранить здоровье. Особое внимание уделено применению игр народов Севера в дошкольном образовательном учреждении: составлены рекомендации для педагогов для методически грамотного применения таких игр и активизации физического и личностного развития дошкольников.

Ключевые слова: народные игры, здоровьесбережение, развитие физических качеств, требования к проведению народных игр

THE GAMES OF THE NORTH'S PEOPLES IN PRESERVING THE HEALTH OF PRESCHOOLERS

Yarkova G. A. ORCID ID 0000-0001-6324-7674,
Tokareva E. Yu. ORCID ID 0000-0002-7164-9574

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Tyumen State University", Tyumen, Russian Federation,
e-mail: e.y.tokareva@utmn.ru

The article reveals the role of traditional games of the Northern indigenous peoples as a health-preserving tool for preschool children. An important area of modern preschool education is the formation of a child's value-based attitude toward health. The aim of the study was to substantiate the use of folk games in promoting the health of preschool children, as they influence their physical development, contribute to psychological relief, and introduce them to the cultural traditions of their people. The games of the Northern peoples have an ancient history; they are present in the cultures of all ethnic groups, reflecting their way of life and traditional activities, and contributing to the physical and spiritual health of children. Since ancient times, the peoples of the Northern region have attached great importance to the development of agility, strength, and physical abilities in upbringing: this is due to the harsh climate of the region, difficult living conditions, and the organization of the social sphere. All these factors combined affect the overall development of children and their health in northern cities and towns. The article describes an approach to organizing children's development and preserving their health through traditional games within the framework of a preschool educational organization when planning the motor activity regime for preschoolers. Special attention is paid to the use of games of the Northern peoples in a preschool educational institution: recommendations for educators have been developed to ensure the methodologically competent use of such games and to stimulate the physical and personal development of preschoolers.

Keywords: folk games, health preservation (or health-saving), requirements for conducting folk games, development of physical qualities

Введение

Важным направлением современного дошкольного образования является формирование у детей ценностного отношения к собственному здоровью. В основе здоровьесбережения у взрослого человека лежит осознанная и ответственная жизненная позиция человека, требующая высокого уровня понимания и заинтересованности. Она рассматривается как интегративная и динамически развивающаяся характеристика личности. У детей дошкольного возраста наблюдается начальная элементарная здоровьесберегающая компетентность, которая формируется при поддержке значимых взрослых, постепенно переходя в субъективную позицию дошкольника. Ребенок в старшем дошкольном возрасте проявляет

интерес и желание участвовать в деятельности, направленной на сохранение здоровья, у него вырабатываются представления о режиме дня, гигиене, пользе движений [1]. На уровне дошкольной образовательной организации системный подход здоровьесбережения предполагает взаимосвязь всех направлений и компонентов здоровья, реализуется по взаимосвязанным блокам: здоровьесберегающая инфраструктура, рациональная организация образовательного процесса, организация физкультурно-оздоровительной работы, просветительско-воспитательная работа с детьми, работа с педагогами и родителями [2].

Исследователи Э. М. Казин, Н. И. Липс и др. рассматривают здоровьесбережение как системную характеристику образовательной среды и подчеркивают необходимость комплексного мониторинга нагрузки и качества физкультурно-оздоровительной работы. В исследовании Ю. И. Семенова и соавт. показано, что для сохранения здоровья необходимо целенаправленное применение подвижных игр, чтобы преодолеть дефицит двигательно-координационных способностей у дошкольников, из-за гиподинамии и замещения спонтанной активности гаджетами [3].

Народные игры являются эффективным средством здоровьесбережения дошкольников, так как они оказывают воздействие на физическое развитие ребенка, способствуют психологической разгрузке и приобщают к культурным традициям своего народа. Они естественны для детей, соответствуют их анатомо-физиологическим особенностям и создают эмоционально положительную основу для приобщения к здоровому образу жизни. Педагоги, психологи в своих научных исследованиях обозначают важную роль в применении народных игр не только в развитии детей дошкольного возраста, но и в сохранении физического здоровья. Так, немецкий поэт Фридрих Шиллер писал о значении игры: «Человек играет только тогда, когда он в полном значении слова – человек, и он бывает вполне человеком тогда, когда играет» [4, с. 317].

Многие исследователи, рассматривая функции народной игры, выделяют компенсаторную, то есть, участвуя в игре, дошкольники получают необходимую эмоциональную разрядку и восполняют объем двигательной активности [5]. Кроме того, указывают на их роль в будущей адаптации детей в обществе посредством освоения ими социальных и профессиональных ролей.

В этнопедагогике игру считают средством экологического развития ребенка, способствующим изучению родного края и его истории [6].

Как одно из важных средств развития личностных и физических качеств и сохранения здоровье поколений П. Ф. Лесгафт, выдающийся врач и педагог, рассматривал национальную игру. Ученый указывал на то, что народные игры у детей формируют нравственные качества, знакомят с обычаями своего народа [7].

Другой российский педагог К. Д. Ушинский в работе «О народности в общественном воспитании» (1857 г.) также писал о том, что народные игры являются эффективным средством гармоничного развития ребенка [8, с. 308].

Игры народов Севера имеют старую историю. С древних времен народы северного региона в воспитании придают большое значение развитию физических качеств личности. Это порождено суровыми социальными условиями и климатом. Отображая жизнь людей, разные виды активной двигательной деятельности и занятия, игры формируют у детей осознанное отношение к своему здоровью и оказывают положительное влияние на физическое и духовное состояние детей.

В научной литературе и исследованиях последних лет имеется описание накопленного опыта о физкультурно-оздоровительных технологиях и народных подвижных играх по развитию физических качеств. Методические разработки содержат подвижные и спортивные игры, фитбол-гимнастику, дыхательную и пальчиковую гимнастику, закаливание, динамические паузы, релаксационные и арт-терапевтические техники, а также включают интеграцию здоровьесбережения с другими видами детской деятельности. Однако исследований, которые рассматривали бы игры народов Севера как инструмент здоровьесбережения дошкольников, явно недостаточно.

Цель исследования – обосновать необходимость внедрения в образовательный процесс дошкольной организации подвижные игры народов Севера для формирования ценностей здорового образа жизни и общего физического развития детей старшего дошкольного возраста.

Материалы и методы исследования

Исследование проводилось на базе МБОУ «Ярсалинский детский сад «Солнышко», с участием детей 6–7 лет.

Дошкольный возраст является сензитивным для осознанного усвоения правил и норм поведения, сохранения здоровья. Диагностический комплекс включал: челночный бег, статическое равновесие, подбрасывание и ловлю мяча, отбивание мяча от пола, прыжки через скакалку. Применя-

лись педагогическое наблюдение, анализ продуктов деятельности дошкольников, социологический опрос родителей.

Результаты исследования и их обсуждение

На играх народов Севера исследователи сосредоточили внимание еще в XVIII в., об этом свидетельствует этнографическая работа академика В. Ф. Зуева «Описание живущих Сибирской Губернии в Березовском уезде иноверческих народов остяков и самоедов» [9]. В ней представлен богатейший материал, собранный в течение экспедиции 1771–1772 гг. Будущий академик описал ряд игр с использованием лука, ловушек или капканов, состязания по борьбе и прыжкам в длину. Ученый первым предложил классификацию игр народов Севера, ученый выделял игры, имитирующие быт или производство продуктов, спортивные игры или упражнения [10, с. 79].

Сложные природно-климатические условия Севера, отдельные недостатки в организации социальной сферы в северных городах и поселках отражаются на развитии детей и их здоровье [11, с. 127–129]. Профилактика заболеваний, вызванных негативными условиями жизни, требует включения народных игр в современную практику воспитания дошкольников. С их помощью у детей вырабатываются стойкий характер, сила воли, упорство и ловкость, формируются лидерские качества характера и способность к сплоченности и взаимовыручке, укрепляется здоровье [12].

Посредством народных игр устанавливаются неразрывные связи с родным народом. С раннего детства народы Севера подготавливают своих детей к деятельности во взрослой жизни: например обучение промыслам проходит при проведении игр «Салки под снегом», «Прыжки на одной ноге», «Метание диска», «Игра с кольцами», «Поиграем в ямки», «Борьба оленей», «Стрельба из лука» и др. [13].

Применение народных игр Севера в программе воспитания и развития в дошкольном образовательном учреждении не представляет трудности. Народные игры имеют разнообразное содержание, достаточно просты, в них отсутствует сложная атрибутика, правила игр несложные и легко запоминаются дошкольниками [14].

Особо выделяют ученые двигательные народные игры. В них учитываются возрастные психофизиологические особенности детей, их физическое развитие, особенности социализации. Спортивные игры ориентированы на развитие всех естественных движений, свойственных людям. Как считают педагоги, их применение решает проблему малоподвижного образа жизни детей, они восполняют у детей недостаток движения, повышают активность всех мышечных групп, развивают опорно-двигательный аппарат, в целом укрепляют организм [15]. Самыми распространенными среди них являются игры-состязания: в беге, прыжках, метании, перетягивании каната и борьбе.

Кроме того, игры имеют воспитательное значение: с их помощью регулируются действия детей, они обеспечивают проявление у детей формируемых качеств, например таких, как ловкость, находчивость, ответственность и др. [16].

Дети, как правило, знакомы с деятельностью взрослых, которую имитируют народные игры: на народных праздниках они могут наблюдать за национальными соревнованиями: гонками на оленях, метанием тынзея (аркана) или топора, прыжками через нарты, перетягиванием каната или палки, стрельбой из лука и др. У детей можно увидеть игрушки, которые приучают их к традиционному труду и занятиям: маленькие луки, нарды, капканы, лодочки и маленькие сети – для мальчиков, люльки и чумы, игольницы и др.– для девочек.

Дошкольники, играя, повторяют разные моменты из деятельности взрослых, демонстрируя сформированные у них навыки. Так, дошкольники могут метать петлю, ухаживать за животными и др.

Игры народов Севера интересны детям. Им свойственны подражание животным, птицам и другим народным персонажам, например, в играх «Сокол и лиса», «Куропатки и охотник» и др.

Исследование показало, что игры народов Севера хорошо известны педагогам дошкольных образовательных учреждений [17], среди игр, применяемых педагогами, выделяются следующие группы:

1. Спортивные игры и упражнения, направленные на совершенствование двигательных способностей детей: бег («Волки и зайцы», «Догонялки» и др.); прыжки («Прыжки ворона», «Прыжки через нарты»); стрельба и метание («Лучший охотник» и др.), борьба и силовые упражнения («Перетягивание каната»); моторика («Колечко»).

2. Трудовые игры: скотоводческие («Ловкий оленевод», «Каюр и собаки»); охотничьи («Куропатки и охотники», «Ловкий охотник»); рыболовные («Рыбаки»); игры по ведению домашнего хозяйства («Очаг»).

3. Интеллектуальные игры («Журавль», «Игра оленьими косточками»).

4. Досуговые игры («Полярная сова и евражки», «Болотная женщина»).

5. Орнаментальные игры («Ручейки и озера»).

В календарно-тематическом планировании в образовательном учреждении включены игры, направленные на развитие разнообразных двигательных способностей дошкольников, такие игры, как «Здравствуй, догони» «Каюр и собаки», «Ловля оленей», «Рыбаки и рыбка», а также на совершенствование бега, ловкости, быстроты. Такие игры можно проводить как на детской площадке, так и в спортивном зале. Кроме того, эти народные игры связаны с профессиональной деятельностью оленевода и рыболова, они формируют у детей необходимые в будущем социальные навыки.

Развитие физических и психофизических качеств детей происходит также в игровой деятельности [18]. В процессе игр естественным образом развиваются:

– Ловкость, быстрота, выносливость, сила, меткость, координация движений, равновесие, ориентировка в пространстве.

– Глазомер, быстрота реакции, выносливость и смелость.

– Психические процессы: внимание, память, мышление, умение быстро принимать решения в меняющихся условиях.

– Волевые качества: выдержка, решительность, умение действовать по сигналу

– Приобщение к культуре и нравственное развитие.

Игры отражают особенности труда и быта коренных северян (охоты, рыболовства, оленеводства). Через них дети знакомятся с традициями, усваивают нравственные ценности: чувство товарищества, взаимовыручки, доброжелательность, уважение к правилам

Игры «Прыжок лахтака» и «Прыжки ворона» предполагают совершенствование умения прыгать. Игра «Прыжки ворона» представляет собой прыжки на корточках, дети опускаются на корточки и, подражая прыжкам ворона, прыгают. Победителем в игре будет тот, кто окажется более выносливым – дольше всех будет прыгать.

В содержание планирования включены игры на развитие меткости и силы. Одной из популярных среди детей игр является «Перетягивание каната».

Игра «Ловкий морзверобой» требует специальных предметов: оленьи рога, чурбачки, диски, ремень и др. Такого рода игры лучше проводить на детской площадке. Кроме меткости, игры развивают ловкость, терпение, стойкость характера.

В содержание занятий включены малоподвижные игры, направленные на развитие у детей внимательности и терпения, например «Игра с палочками», «Полярная сова и евражки», взаимоподдержки – «Ручейки и озера». Игры должны отбираться по критерию двигательной эффективности и с учетом их вклада в мотивационно-ценностный и когнитивный компоненты здоровьесбережения.

Примеры игр народов Севера приведены в таблице, где показана направленность игр народов Севера на физическое развитие детей дошкольного возраст и их здоровьесбережение.

В ходе исследования выявлено, что у большинства дошкольников в возрасте 6 лет преобладали низкий и средний уровни развития координации, отмечены трудности в динамическом равновесии и ритмичности движений, а также в зрительно-моторной координации. К возрасту 7 лет у дошкольников отмечается положительное движение. Высокие уровни показывают чуть большее количество детей. Обсуждение полученных результатов подтверждает, что использование разнообразных игр народов Севера обеспечивает комплексное физическое развитие и способствует укреплению здоровья. В ходе исследования определены педагогические условия и требования, которые необходимо выполнять.

Примеры игр народов Севера и их направленность на здоровьесбережение дошкольников

Название игры	Направленность на общее развитие дошкольников и их здоровьесбережение
«Каюр и собаки», «Ловля оленей», «Важенка и оленята», «Волк и олени»	Физическое развитие: бег, ловкость, умение действовать по сигналу. Социальные навыки
«Нарты – сани», «Охота на куропаток»	Физическое развитие: прыжки, ловкость. Социальные навыки
«Сюлы» (ледяные палочки), «Отбивка оленей», «Ловкий оленевод»	Физическое развитие: метание, меткость
«Хейро» (Солнце), «Успей поймать», «Полярная сова и евражки»	Физическое развитие: ловкость, силовая выдержка, находчивость, воображение
«Вывко» (детская гуделка), «Меткий охотник», «Колечко»	Развитие мелкой моторики, ориентирование на местности

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Успешная реализация физического развития и здоровьесбережения детей с включением в образовательный процесс дошкольной организации народных игр Севера от педагогического коллектива требует соблюдения важных педагогических условий и требований. При проведении игр требуется:

– обогащение представлений об игре, традициях коренных народов Севера;

– понимание разнообразия и многоплановости игр, их содержания;

– знание методики проведения народных игр, формирование у детей инициативности и активности при их проведении;

– контроль физической нагрузки детей во время игр; обучение детей взаимопомощи и доброжелательному отношению;

– привлечение разнообразных форм работы для формирования интереса у детей к культуре коренных народов (экскурсии, выставки и др.);

– учет индивидуального подхода и уровня сформированности двигательных способностей детей;

– создание условий для организации игр народов Севера.

Подбирая игру, педагог должен учитывать их многообразие и различие по характеру движений. Применение разнообразных игр направлено на развитие у дошкольников разных двигательных качеств, таких как ловкость, быстрота, равновесие, глазомер, гибкость, сила, выносливость и т. д., поэтому важно с помощью народной игры развивать их равномерно. Кроме того, применение однотипных игр снижает интерес детей к играм. Игры народов Севера ценны тем, что не требуют сложного оборудования: достаточно веревки, шапочек-масок, палки, мяча, санок. Это позволяет массово использовать их в ДОУ.

Для организации и проведения игр, чтобы игры действительно работали на здоровьесбережение, педагогам даются методические рекомендации:

1. Учесть возраст и уровень физической подготовленности дошкольников: для детей младшего дошкольного возраста необходимо выбирать игры с простым сюжетом и небольшим количеством правил, для старших дошкольников задания можно усложнить.

2. Общую нагрузку необходимо регулировать и тщательно продумывать. Важно чередовать высокую активность и энергозатраты дошкольников с периодами кратковременного отдыха.

3. Для повышения интереса и понимания смысла игры дошкольников надо познакомить с культурой и бытом народов Севера.

4. Соблюдать и обеспечивать безопасность детей во время проведения игр. Необходимо следить за правильностью выполнения всех движений, не допускать переутомления дошкольников.

5. Возможна вариативность и интеграция игры с режимными моментами при планировании. Игры хорошо включаются в музыкальные и физкультурные занятия, в прогулки на свежем воздухе и организацию досуговой деятельности, в том числе тематические мероприятия.

6. Игра должна не только работать на физическом уровне, но и затрагивать мотивационный (интерес и желание участия), когнитивный (элементарные представления о движениях, гигиене, традициях) и деятельностный (формирование двигательных привычек) компоненты.

Таким образом, подвижные игры народов Севера – это не просто развлечение, а продуманный педагогический инструмент, который гармонично сочетает физическое развитие детей дошкольного возраста, укрепление их здоровья и приобщение к культурному наследию. Соблюдая условия проведения игр, педагог оказывает психокоррекционное, психотерапевтическое воздействие на ребенка, а дети учатся ориентироваться в игре, формируют умения действовать сообща, вместе, договариваясь.

Игры народов Севера обеспечивают разнообразную двигательную активность и здоровьесбережение. Этому способствуют упражнения с включением бега, лазанья и метания петли, разных прыжков и перетягиваний. При этом:

– правильно развиваются скелет, изгибы позвоночника и свод стоп;

– укрепляется сердечная мышца, она адаптируется к изменяющимся нагрузкам;

– развивается дыхательная мускулатура;

– укрепляются все группы мышц;

– стимулируются терморегулирующие и защитные функции кожи.

В том случае, если игры проводятся на свежем воздухе, то эффект здоровьесбережения возрастает. Этнические народные игры помогают сформировать у детей дошкольного возраста, в их сенситивный период развития всех психических процессов, положительное отношение к прогулкам даже в прохладную погоду, поддерживают бодрое настроение и активность.

Заключение

Теоретический анализ исследования проблемы здоровьесбережения дошкольников и наблюдения позволили сделать

вывод о необходимости включения игр народов Севера в образовательный процесс дошкольной организации.

Таким образом, применение игр народов Севера направлено на формирование лучших черт личности детей и физических качеств и в целом на решение проблемы здоровьесбережения детского населения, проживающего в районах Крайнего Севера. Игры применяют как средство активизации двигательного режима детей дошкольного возраста и профилактики ряда заболеваний. Кроме того, народные игры демонстрируют детям модель реальной жизни северян с их культурными традициями.

Игры народов Севера имеют свои особенности, что следует учитывать при их выборе и составлении календарно-тематического планирования организации и проведения в дошкольном образовательном учреждении. Проведение игр народов Севера с учетом методики активизирует развитие детей, их индивидуальные способности, воспитывает детей здоровыми, готовыми в будущем реализовать себя в соответствии с культурными, социальными традициями своего народа.

Список литературы

1. Иванова О. В. Формирование здоровьесберегающей компетентности детей старшего дошкольного возраста: дис. … канд. пед. наук. Москва, 2019. 180 с.

2. Смирнов Н. К. Здоровьесберегающая педагогика: от теории к практике // Педагогика. 2019. № 5. С. 34–42.

3. Семенов Ю. И., Голиков А. И., Никифоров Н. В., Ким А. Н. Подвижные игры народов Севера как средство развития двигательно-координационных способностей детей старшего дошкольного возраста // Ученые записки университета им. П. Ф. Лесгафта. 2026. № 3 (2026). С. 51–58. DOI: 10.5930/1994-4683-2026-3-51-58.

4. Шиллер Ф. Письма об эстетическом воспитании человека к герцогу Гольштейн Аугустенбургскому // Собр. соч.: в 4 т. СПб., 1902. Т. 4. С. 293–343. [Электронный ресурс]. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_003967932_и_105373/?ysclid=musm0k0o7937676233 (дата обращения: 03.10.2026).

5. Здоровьесберегающая среда дошкольной образовательной организации: коллективная монография / под ред. Э. М. Казина. Кемерово: КРИПКиПРО, 2022. 210 с.

6. Этнопедагогические основы физического воспитания детей в условиях Севера: монография / под ред. А. П. Окошниковой. Якутск: Изд-во СВФУ, 2021. 164 с.

7. Лесгафт П. Ф. Руководство по физическому образованию детей школьного возраста: Ч. 1. 3-е изд. СПб.: Тип. А. Бенке, 1912. 384 с. [Электронный ресурс]. URL: http://tlib.gbs.spb.ru/dl/2/Лесгафт_П.Ф._Собрание сочинений_Том 2.pdf> (дата обращения: 03.10.2026).

8. Ушинский К. Д. Собрание сочинений в 11 т. Т. 1. Педагогические статьи 1857–1861 гг. М.: Академия педагогических наук, 1948. 655 с.

9. Цибизова Н. М. «Подвижные игры народов Севера как средство воспитания ценностного отношения к здоровью у детей старшего дошкольного возраста» // Вестник угроведения. 2017. № 2 (29). С. 134–141. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28818556 (дата обращения: 03.10.2026).

10. Зуев В. Ф. Материалы по этнографии Сибири XVIII века (1771–1772). М.: Издательство Академии наук СССР, 1947. 96 с.

11. Колесникова Н. Н., Лимаренко О. В. Физическое состояние детей старшего дошкольного возраста, проживающих в регионе, приравненном к районам Крайнего Севера // Педагогические науки. 2018. № 5. С. 127–129.

12. Севостьянова А. В., Куклина Л. Ю. Методическая разработка «Тюлень Крепыш ведет дошколят по тропинкам здоровья» // Вопросы дошкольной педагогики. 2024. № 2 (52). С. 38-43. URL: https://moluch.ru/th/1/archive/264/9012 (дата обращения: 15.10.2026).

13. Хатанзей Т. Г., Быстрова Л. С. Творческий проект «Подвижные игры народов Севера с детьми раннего возраста» // Дошкольное образование. 2020. № 12. URL: https://www.1urok.ru/categories/19/articles/22569 (дата обращения: 04.10.2026).

14. Грядкина Т. С. Образовательная область «Физическое развитие». Методический комплект программы «Детство». СПб.: Детство-Пресс, 2016. [Электронный ресурс]. URL: https://www.1urok.ru/categories/19/articles/22569 (дата обращения: 04.10.2026).

15. Бобрецова Е. И. Роль северных подвижных игр в системе физического воспитания в дошкольных образовательных организациях // Сборник научных трудов / Министерство образования и науки Российской Федерации, Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова; отв. ред. А. П. Лисицын и др. Архангельск, 2017. С. 11–14.

16. Попов В. И., Скоблина Н. А., Жуков О. Ф., Семенов Ю. И. Тенденции изменений физического развития дошкольников Республики Саха (Якутия) // Экология человека. 2024. Т. 31. № 7. С. 553–559. URL: https://elibrary.ru/GLAFDA (дата обращения: 03.10.2026). DOI: 10.17816/humeco643187.

17. Шебеко В. Н., Ермак Н. Н., Шишкина В. А. Физическое воспитание дошкольников: учебное пособие. 5-е изд., стер. М.: Академия, 2018. 208 с.

18. Родина Ю. И. Научные основы здоровьесбережения детей дошкольного возраста: учебное пособие. 2-е изд. М.: МГПУ, 2024. 300 с.

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest.

Финансирование: Автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.