

УДК 004.42:629.735
DOI 10.17513/snt.40532

ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕМ РАБОТОСПОСОБНОСТИ САМОЛЕТА В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

Стручкова А.М.

*Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова,
Россия, Якутск, e-mail: annyakutsk@mail.ru*

В статье рассматривается эксплуатационная технологичность авиационных систем, охватывающая ключевые аспекты их жизненного цикла: ремонтопригодность, удобство технического обслуживания, возможности модернизации и оптимизация эксплуатационных затрат. Подчеркивается важность внедрения автоматизированной системы управления повышения эффективности восстановления авиационной техники. Анализируются проблемы, возникающие при эксплуатации и ремонте воздушных судов, такие как случайные конструктивные изменения, жесткие временные ограничения и необходимость сложных инженерных расчетов. Предлагается решение в виде разработки современной автоматизированной системы управления технологическими процессами, объединяющей в единой платформе специализированные базы данных, математические модели оценки износа и алгоритмы выбора оптимальных методов восстановления. Описаны методы исследования, включая экспертные оценки, матричный анализ, среду Adobe Dreamweaver CS и язык программирования PHP и создание реляционной базы данных на основе системы управления базы данных MySQL. Разрабатываемая система обладает рядом конкурентных преимуществ: модульной архитектурой, адаптивностью к изменяющимся условиям эксплуатации, возможностью удаленного доступа и перспективами функционального расширения. Реализация предложенного подхода позволит существенно сократить эксплуатационные расходы, повысить конкурентоспособность отечественных авиационных предприятий и снизить технологическую зависимость от иностранных разработок в области авиастроения.

Ключевые слова: эксплуатационная технологичность, авиационная техника, автоматизированная система управления технологическими процессами, ремонтопригодность, экспертные системы, восстановление, базы данных

OPTIMAL DESIGN AND MANAGEMENT OF AIRCRAFT RECOVERY IN THE FAR NORTH

Struchkova A.M.

*North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov,
Russia, Yakutsk, e-mail: annyakutsk@mail.ru*

This article examines the operational manufacturability of aircraft systems, covering key aspects of their lifecycle: maintainability, ease of maintenance, upgradeability, and optimization of operating costs. The importance of implementing an automated management system to improve the efficiency of aircraft refurbishment is emphasized. Problems arising during aircraft operation and repair, such as random design changes, tight time constraints, and the need for complex engineering calculations, are analyzed. A solution is proposed in the form of a modern automated process control system that integrates specialized databases, mathematical models for wear assessment, and algorithms for selecting optimal refurbishment methods into a single platform. Research methods are described, including expert assessments, matrix analysis, the Adobe Dreamweaver CS environment, the PHP programming language, and the creation of a relational database based on the MySQL database management system. The developed system offers a number of competitive advantages: a modular architecture, adaptability to changing operating conditions, remote access, and the potential for functional expansion. Implementation of the proposed approach will significantly reduce operating costs, increase the competitiveness of domestic aviation enterprises, and reduce technological dependence on foreign developments in the aircraft industry.

Keywords: operational manufacturability, automated process control system, aviation equipment, recovery, expert systems, maintainability, databases

Введение

Эксплуатационная технологичность летательного аппарата – это совокупность его свойств, обеспечивающая минимальные затраты труда, времени и ресурсов на техническое обслуживание и ремонт при сохранении заданных эксплуатационных характеристик в течение всего жизненного цикла [1, с. 8]. Современное авиастроение сталкивается с возрастающими требовани-

ями к эксплуатационной технологичности летательных аппаратов, которая включает такие ключевые аспекты, как ремонтопригодность, удобство технического обслуживания, возможность быстрой модернизации и минимизация затрат на протяжении всего жизненного цикла изделия [2]. Особую актуальность эта проблема приобретает для регионов с экстремальными климатическими условиями, таких как Крайний Север.

В настоящее время техническое обслуживание и ремонт воздушных судов осуществляются в строгом соответствии с утвержденной эксплуатационно-технической документацией, включающей:

- типовые технологии ремонта;
- регламенты технического обслуживания;
- нормативные требования разработчика ВС;
- стандарты Авиационной администрации.

Однако нередко встречаются случаи, когда в процессе эксплуатации из-за интенсивного износа выявляются конструктивные изменения в воздушных судах. Эти изменения возникают случайно, что делает невозможным их учет в ремонтной технологии.

Кроме того, при выходе авиационной техники (АТ) из строя попытки её восстановления сопровождаются рядом трудностей:

- жесткие временные ограничения на возврат изделий к требуемым показателям качества;
- экономическая обусловленность необходимости сокращенных сроков ремонта;
- значительный объем инженерных расчетов для определения базовых условий восстановления АТ.

Несмотря на эти сложности, подобные задачи имеют ключевое значение, поскольку от оптимального выбора методов восстановления напрямую зависит эффективность работы.

В своем исследовании автор отмечал [3], что применение автоматизированной системы управления процессами восстановления авиационной техники позволит существенно сократить временные и финансовые затраты на обслуживание воздушных судов. Актуальность данного исследования подчеркивается необходимостью внедрения передовых цифровых технологий для обеспечения конкурентоспособности отечественного авиастроения в условиях глобализации рынка.

Анализ литературных источников [4-6] показывает, что существующие автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУТП) обладают рядом ограничений:

- 1) недостаточная адаптация к случайным конструктивным изменениям;
- 2) жесткие временные ограничения на принятие решений;
- 3) сложность интеграции разнородных технологий восстановления.

Целью данного исследования является разработка способа оптимального проектирования и управления технологическими процессами восстановления работоспособности и технического обслуживания авиационной техники на авиаремонтном пред-

приятии с ориентацией на специфику эксплуатации в условиях Крайнего Севера.

Материалы и методы исследования

Исследование проводилось на базе АО «Авиакомпания «Якутия», эксплуатирующего воздушные суда (ВС) в условиях Крайнего Севера и Арктики (Республика Саха (Якутия)). Основные данные получены в ходе мониторинга технического состояния авионики самолетов Ан-24 и других моделей, используемых в экстремальных климатических условиях [7].

При выполнении сложных ремонтных работ на авиационной технике, особенно в условиях недостаточной информации, наиболее эффективным подходом к выбору метода восстановления становится метод анализа на основе экспертной оценки. Методологические аспекты анализа детально изучены в исследованиях С.Г. Парафесь и О.Г. Феоктистовой [8]. Однако их методики требуют модернизации с учетом современных возможностей обработки больших данных.

Согласно предложенному в работе [9] алгоритму, при выборе рационального восстановления АТ необходимо сформировать цель, критерии и альтернативные решения по восстановлению АТ. После этого проверяются условия для сопоставления относительной важности по отношению к цели и по отношению каждому из критериев. Затем производится расчет метода анализа, опирающийся на теорию матриц. Таким образом, имея полученные результаты расчета метода анализа уже предпринимаются соответствующие меры восстановления АТ.

В рамках создания АСУТП для восстановления авиационной техники (АТ) была разработана архитектура системы, которая основывается на модели «клиент – сервер» (рис. 1). Данная архитектура, наиболее известная как трехуровневая (или three-tier в англоязычной терминологии), позволяет разделить функции хранения, обработки и представления данных для более эффективного использования возможностей серверов и клиентов.

То есть специалист авиационно-ремонтного предприятия (АРП) использует веб-браузер для доступа к данным через Интернет. При этом происходит следующий процесс:

- 1) запрос направляется на веб-сервер;
- 2) сервер взаимодействует с базой данных MySQL, где хранится необходимая информация;
- 3) в ответ формируется динамическая веб-страница с запрошенными данными;
- 4) информация отображается специалисту в браузере.

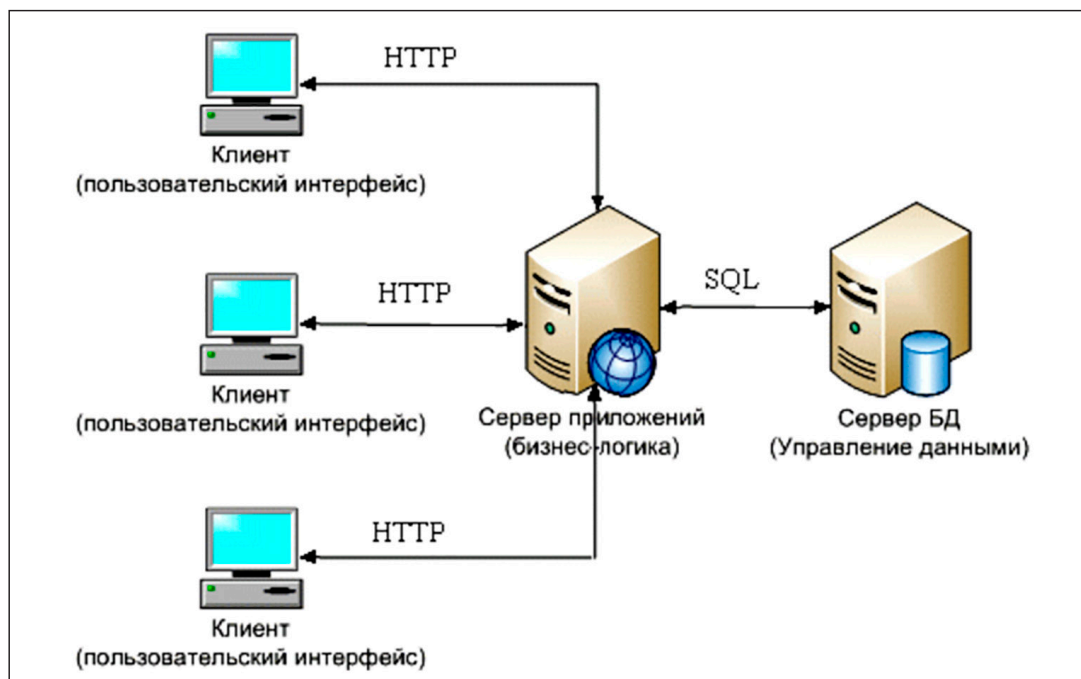
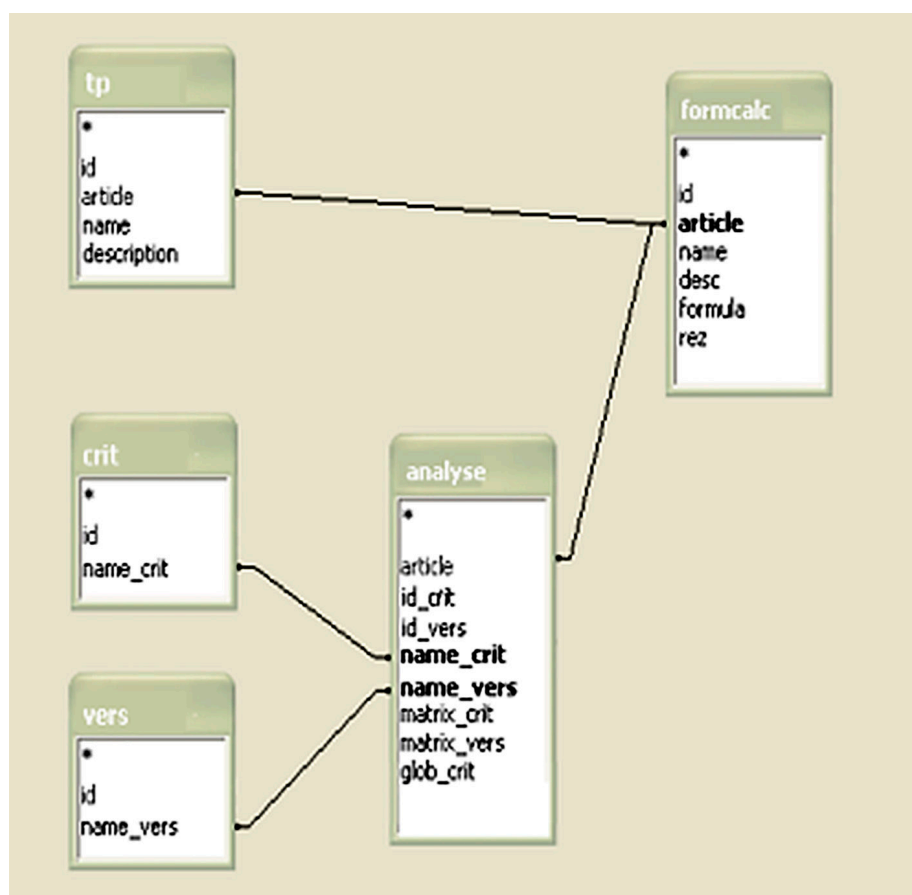


Рис. 1. Архитектура «клиент – сервер»

Рис. 2. Структура базы данных АСУТП
Источник: составлено автором

Также разработана структура реляционной базы данных на основе MySQL (рис. 2). Ключевым преимуществом данной системы является ее модульность и расширяемость, позволяющая интегрировать:

- математические модели оценки износа и остаточного ресурса компонентов АТ;
- алгоритмы выбора оптимальных методов восстановления;
- нормативно-справочную информацию по ремонтным технологиям.

Такая архитектура обеспечивает гибкость системы и возможность ее поэтапного совершенствования за счет добавления новых расчетных модулей и аналитических инструментов без необходимости кардинального изменения структуры базы данных.

Для создания пользовательского интерфейса автоматизированной системы управления технологическими процессами восстановления АТ была использована среда Adobe Dreamweaver CS – для создания и редактирования HTML/CSS/JS-кода; язык программирования PHP – для обработки данных на стороне сервера, для взаимодействия с базой данных; CSS – для оформления визуального представления [10-12].

Система разработана с учетом потребностей конечных пользователей – инженеров-технологов авиаремонтных предприятий, что обеспечивает комфортную работу даже при длительной эксплуатации.

Также для каждого метода восстановления авиатехники были разработаны моделирующие алгоритмы на основе математических моделей, позволяющие реализовать модель на ЭВМ [13].

Созданные программные алгоритмы для расчета параметров системы автоматизированного управления включают: последовательность вычислительных операций, соответствующую математической модели, процедуру преобразования и вывода полученных результатов.

Результаты исследования и их обсуждение

Как отмечается в исследовании Горбунова В.П. и соавторов [14], эксплуатация авиационной техники в Республике Саха (Якутия) и на Дальнем Востоке требует особого подхода в связи с комплексом природных и инфраструктурных факторов. Как показано в работе [15], эти характеристики делают Ан-24 оптимальным выбором для региональных перевозок в Арктической зоне, несмотря на постепенное устаревание парка данных воздушных судов. Особое значение имеет способность

самолета сохранять работоспособность при экстремально низких температурах, что критически важно для обеспечения транспортной доступности отдаленных северных территорий.

В ходе исследования технического состояния воздушного судна Ан-24 было обнаружено незначительное углубление на рабочей поверхности замка створки шасси, изготовленного из магниевых сплавов МЛ-5 (рис. 3).



*Рис. 3. Рабочая поверхность
замка створки шасси
с незначительным углублением*

С учетом конструктивных особенностей и прочностных характеристик возможно применение следующих технологий наплавки: лазерной; плазменной; электродуговой.

Для оперативного принятия решений специалистом был создан простой и интуитивно понятный интерфейс. Автоматизация процесса восстановления АТ исключает необходимость бумажных расчетов параметров и анализов, что повышает скорость и удобство работы сотрудников предприятия (рис. 4).

Следует отметить, что оптимальный выбор восстановительных технологий требует эффективного применения профессиональных знаний и практического опыта. Особую ценность в этом процессе представляет многолетний практический опыт специалистов авиаремонтных предприятий. Поэтому для повышения профессионального уровня специалистов авиаремонтного производства в эпоху цифровой трансформации необходимо: регулярно организовывать программы переподготовки персонала, обеспечивать непрерывное обучение сотрудников, развитие знания через цифровые инструменты [15].

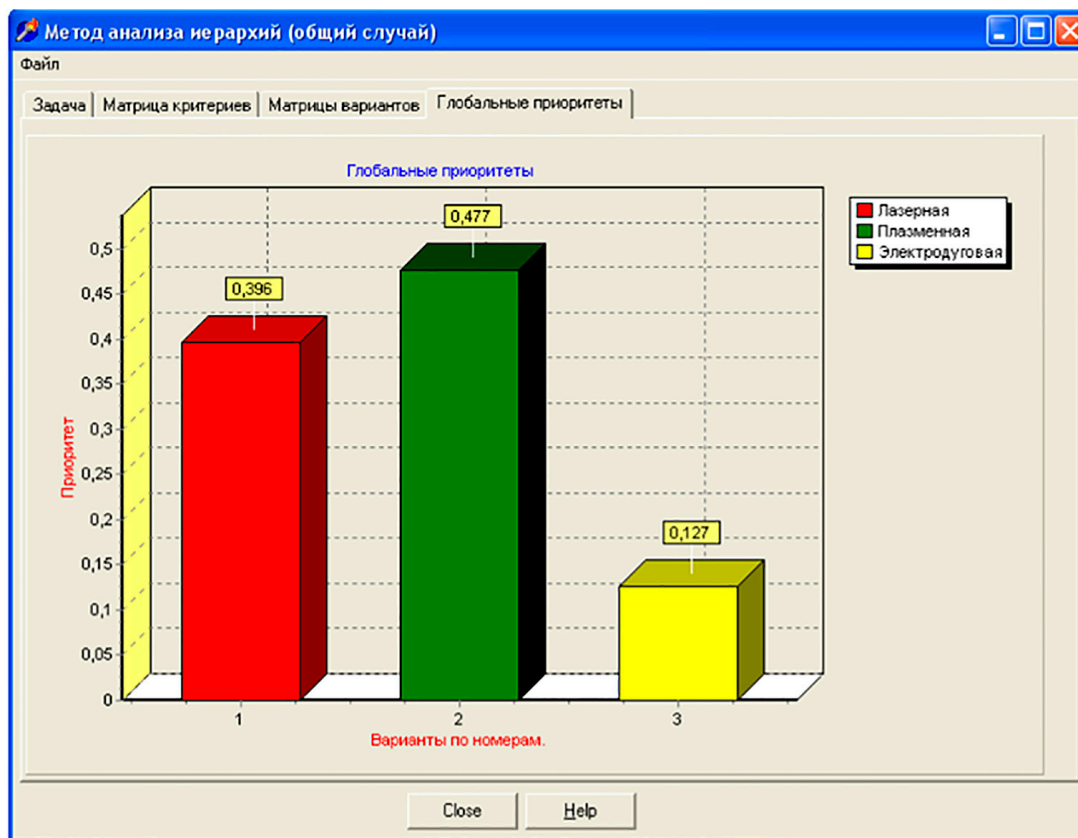


Рис. 4. Результаты расчетов глобальных приоритетов
 Источник: составлено автором по результатам данного исследования

Затем, имея полученные результаты вычислений методом анализа, специалист авиаремонтного предприятия может приступить к определению ключевых параметров процесса восстановления авиационной техники. Эти параметры формируют комплекс технологических и конструктивных требований, которым должен соответствовать процесс для обеспечения качества и надежности ремонта.

Ключевыми параметрами, определяющими возможность, эффективность и конечный результат процесса восстановления, являются следующие условия (рис. 5):

- усталостной прочности;
- существования процесса;
- прочности сцепления покрытия;
- предварительной подготовки поверхности;
- стабильности свойств покрытия;
- конструктивности;
- температуры;
- возможности устранения эксплуатационных повреждений.

В отличие от исследований авторов [4; 5; 8], предложенная АСУТП включает адаптивные алгоритмы для работы в условиях Крайнего Севера. Адаптивность раз-

работанных алгоритмов заключается в следующем.

1. Динамическая коррекция решений на эксплуатационных данных. В отличие от жестких детерминированных систем, алгоритмы способны анализировать фактические данные о состоянии ВС, поступающие в ходе мониторинга (например, интенсивность износа в конкретных климатических условиях Якутии), и корректировать предлагаемые технологии восстановления.

2. Адаптация к ресурсным и инфраструктурным ограничениям северных регионов. Алгоритмы оптимизируют выбор метода восстановления не только по техническим критериям, но и по экономическим и логистическим параметрам, характерным для Крайнего Севера (например, минимизация времени простоя ВС из-за сложности доставки запчастей).

3. Интеграция экспертного опыта для условий неопределенности. Система реализует метод анализа иерархий, который позволяет формализовать и использовать практический опыт специалистов, работающих с конкретными типами ВС в условиях Крайнего Севера.

Заключение

Разработанный АСУТП показывает, что использование современных методов проектирования и научного подхода позволяет интегрировать различные технологии восстановления, основанные на разных принципах, в единый процесс, обеспечивая достижение требуемых выходных характеристик.

Ключевое преимущество данной АСУТП восстановления АТ заключается в ее экспертной природе: система допускает оперативное вмешательство специалиста для корректировки работы программы. Она адаптируется под индивидуальные задачи пользователя и может включать специфические данные (критерии, альтернативные решения) в зависимости от требований предприятия, где применяется.

Кроме того, систему можно расширить за счет добавления новых математических моделей и алгоритмов восстановления АТ, а также внедрить искусственный интеллект для прогнозирования износа на основе big data.

Список литературы

1. Петрова Т.В., Иванов Д.А. Эксплуатационная технологичность воздушных судов гражданской авиации: учебное пособие. СПб., 2021. 107 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/179215> (дата обращения: 20.08.2025). ISBN: 978-5-907354-08-1.
2. Саввина А.М. Повышение уровня эксплуатационной технологичности самолетов в условиях АО «Авиакомпания «Якутия» // Информационные технологии и инновации на транспорте: Материалы VII Международной научно-практической конференции. В 2-х томах. Орел, 2021. С. 437-447. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47900849> (дата обращения: 25.08.2025).
3. Саввина А.М. Управление процессами восстановления авиационной техники с использованием системы автоматизированного проектирования в условиях авиапредприятия: автореф. ... канд. тех. наук. Москва, 2016. 22 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30431482> (дата обращения: 25.08.2025).
4. Макин Ю.Н. Об историческом приоритете МГТУ ГА в разработке общей теории авиаремонтного производства // Научный Вестник МГТУ ГА. Серия: История, философия, социология. 2008. № 129. С. 30-36. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ob-istoricheskom-prioritete-mgtu-ga-v-razrabotke-obschey-teorii-aviaremontnogo-proizvodstva> (дата обращения: 25.08.2025).
5. Кректулева Р.А., Сараев Ю.Н., Семенчук В.М., Черепанов Р.О., Безгинов Р.О. Разработка алгоритма формализации технологических процессов сварки плавлением и создания системы автоматизированного проектирования // Сварка в России – 2019: современное состояние и перспективы. Тезисы докладов Международной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Б.Е. Патона. Институт физики прочности и материаловедения СО РАН. Томск. 2019. С. 165. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42561783> (дата обращения: 25.08.2025).
6. Назаров А.Ю., Езерская Е.М., Карамсаков А.А. САПР в авиастроении, проблемы и перспективы развития // Компьютерная интеграция производства и ИПИ-технологии: Сборник материалов X Всероссийской конференции. Оренбург, 2021. С. 55-58. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47363950> (дата обращения: 02.09.2025).
7. Gorbunov V., Kuznetsov S., Savvina A., Poleshkina I. Methodological aspects of avionics reliability at low temperatures during aircraft operation in the Far North and the Arctic // Transportation Research Procedia Vol. 57. 2021. P. 220–229. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47516602> (дата обращения: 02.09.2025). DOI: 10.1016/j.trpro.2021.09.045.
8. Феоктистова О.Г. Теоретические основы повышения эффективности управления системой экологической безопасности при техническом обслуживании и ремонте АТ: автореф. ... докт. тех. наук. Москва: МГТУ ГА, 2009. 38 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15934631> (дата обращения: 02.09.2025).
9. Феоктистова О.Г., Саввина А.М. Критериальный выбор на этапе принятия решений при проектировании ремонтных технологий // Научный вестник МГТУ ГА. 2014. № 204. С. 69-73. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21808247> (дата обращения: 02.09.2025).
10. Роббинс Д.Н. Веб-дизайн для начинающих. HTML, CSS, JavaScript и веб-графика. СПб., 2021. 943 с. ISBN: 978-5-9775-4050-6. URL: <https://www.litres.ru/book/niderst-robbins-dzhe/veb-dizayn-dlya-nachinauschih-html-css-javascript-i-v-67728018/> (дата обращения: 02.09.2025).
11. Дронов В.А. PHP, MySQL, HTML5 и CSS 3. Разработка современных динамических Web-сайтов. СПб., 2016. 677 с. ISBN: 978-5-9775-3529-8. URL: <https://www.litres.ru/book/vladimir-dronov/php-mysql-html5-i-css-3-razrabotka-sovremennyh-dinamichesk-19213333/> (дата обращения: 13.09.2025).
12. Никсон Р. Создаем динамические веб-сайты с помощью PHP, MySQL, JavaScript, CSS и HTML / пер. с англ. СПб., 2021. 832 с. ISBN: 978-5-4461-1970-7. URL: <https://litres.ru/8920342> (дата обращения: 20.08.2025).
13. Саввина А.М. Алгоритм технологического процесса ремонта АТ клепкой // Научный вестник МГТУ ГА. 2013. № 192. С. 118-123. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20219841> (дата обращения: 20.08.2025).
14. Горбунов В.П., Рухлинский В.М., Саввина А.М. Роль природных и антропогенных факторов в современном состоянии региональной авиации Арктики и Крайнего Севера // Наука и бизнес: пути развития. 2020. № 6 (108). С. 32-37. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43997796> (дата обращения: 20.08.2025).
15. Кучина Е.В., Просвирина И.И., Ляковская Е.А., Яковлев Ю.В. Цифровые образовательные платформы как инструмент повышения эффективности труда персонала промышленных предприятий // Вестник ЮУрГУ. Серия «Экономика и менеджмент». 2023. Т. 17. № 2. С. 109-119. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovye-obrazovatelnye-platformy-kak-instrument-povysheniya-effektivnosti-truda-personala-promyshlennyh-predpriyatiy/viewer> (дата обращения: 04.09.2025).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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