

ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ «АКАДЕМИЯ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ»

СОВРЕМЕННЫЕ НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

№2, 2015

ISSN 1812–7320

Импакт фактор (пятилетний)
РИНЦ = 0,845

Журнал издается с 2003 г.
12 выпусков в год

Электронная версия журнала <http://www.rae.ru/snt>
Правила для авторов: www.rae.ru/snt/rules/
Подписной индекс по каталогу «Роспечать» – 70062

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Ледванов Михаил Юрьевич д.м.н., профессор

ЗАМ. ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Бичурин Мирза Иммамович д.ф.-м.н., профессор

Ответственный секретарь редакции

Шнуровозова Татьяна Владимировна

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Бизенкова Мария Николаевна	(к.м.н.)
Бичурин Мирза Имамович	(д.ф.-м.н., профессор)
Бошенятов Борис Владимирович	(д.т.н.)
Гайсин Ильгизар Тимергалиевич	(д.п.н., профессор)
Гилев Анатолий Владимирович	(д.т.н., профессор)
Гладилина Ирина Петровна	(д.п.н., профессор)
Гоц Александр Николаевич	(д.т.н., профессор)
Грызлов Владимир Сергеевич	(д.т.н., профессор)
Елагина Вера Сергеевна	(д.п.н., профессор)
Завьялов Александр Иванович	(д.п.н., профессор)
Захарченко Владимир Дмитриевич	(д.т.н., профессор)
Лубенцов Валерий Федорович	(д.т.н., профессор)
Лукьянова Маргарита Ивановна	(д.п.н., профессор)
Мадера Александр Георгиевич	(д.т.н., профессор)
Микерова Галина Жоршовна	(д.п.н., профессор)
Пачурин Герман Васильевич	(д.т.н., профессор)
Пен Роберт Зусьевич	(д.т.н., профессор)
Романцов Михаил Григорьевич	(д.м.н., к.п.н., профессор)
Стукова Наталия Юрьевна	(к.м.н.)
Тутолмин Александр Викторович	(д.п.н., профессор)

СОВРЕМЕННЫЕ НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Журнал «СОВРЕМЕННЫЕ НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ» зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия. **Свидетельство – ПИ №77-15597.**

Все публикации рецензируются. Доступ к журналу бесплатен.

Журнал представлен в Научной электронной библиотеке (НЭБ) - головном исполнителе проекта по созданию Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Импакт-фактор РИНЦ (пятилетний) = 0,843 (по данным на 23.02.2015)

Импакт-фактор РИНЦ (двухлетний) = 0,944 (по данным на 23.02.2015)

Индекс Хирша (десятилетний) = 16 (по данным РИНЦ на 23.02.2015)

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНТИ

Учредитель: **МОО «Академия Естествознания»**

Издательство и редакция: Издательский Дом «Академия Естествознания»

Почтовый адрес –

г. Москва, 105037, а/я 47,

АКАДЕМИЯ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ,

редакция журнала «СОВРЕМЕННЫЕ НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ»

Ответственный секретарь редакции –

Шнуровозова Татьяна Владимировна -

тел. +7 (499) 705-72-30

E-mail: edu@rae.ru

Подписано в печать 06.02.2015

Формат 60x90 1/8

Типография

ИД «Академия Естествознания»

г. Саратов, ул. Мамантовой, 5

Техническая редакция и верстка

Нестерова С.Г.

Корректор

Галенкина Е.С.

Способ печати – оперативный.

Усл. печ. л. 21,88

Тираж 1000 экз. Заказ СНТ 2015/2

Подписной индекс 70062

© ИД «Академия Естествознания»

СОДЕРЖАНИЕ

ОЦЕНКА МЕТОДОВ ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИЯ ОБОРОТНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ	
<i>Амангусова Л.А., Захарова В.С., Калугин Ю.А.</i>	7
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА С ХИМИЧЕСКИМИ ПРЕВРАЩЕНИЯМИ НА ПРИМЕРЕ ВЕРХОВЫХ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ	
<i>Андреева Н.Ю., Квартальнова С.Е.</i>	10
ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ВТОРИЧНОГО ПОЛИМЕРНОГО СЫРЬЯ	
<i>Бодьян Л.А., Варламова И.А., Гиревая Х.Я., Калугина Н.Л., Гиревой Т.А.</i>	15
РАЗРАБОТКА НЕЧЕТКОЙ МОДЕЛИ В СРЕДЕ MATLAB FUZZY LOGIC TOOLBOX ДЛЯ ОЦЕНКИ УСЛОВИЙ ТРУДА НА РАБОЧИХ МЕСТАХ РАБОТНИКОВ ГОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ	
<i>Великанов В.С., Сафин Г.Г., Абдрахманов А.А., Шабанов А.А., Махмудова С.Н., Абдуллин Р.А., Тугузов А.С.</i>	19
ПОЛУЧЕНИЕ КОМПОЗИТНОЙ СМЕСИ ПОРОШКОВ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ	
<i>Волончук С.К., Мотовилов К.Я., Ломовский И.О.</i>	25
МИКРО-БЛА С ВИБРОПРЕДКРЫЛКОМ	
<i>Воронков Ю.С., Воронков О.Ю.</i>	29
УТИЛИЗАЦИЯ ПЛАСТИКОВЫХ ОТХОДОВ В ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ	
<i>Воротынцев А.В., Чернышов Е.А., Батталов С.В., Романов А.Д.</i>	40
РАЙОНИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИЙ ПРИ ВЫЯВЛЕНИИ КРИОГЕННЫХ СТРУКТУР, ПЕРСПЕКТИВНЫХ ДЛЯ ЗАКАЧКИ ДРЕНАЖНЫХ РАССОЛОВ (НА ПРИМЕРЕ ЯКУТИИ)	
<i>Дроздов А.В., Мельников А.И.</i>	45
РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КОНТАКТНО-ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ	
<i>Жиркин Ю.В., Мироненков Е.И., Султанов Н.Л., Тютеряков Н.Ш., Пащенко К.Г.</i>	52
ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК РАЗЛИЧНОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ НАГРЕВАНИИ	
<i>Захарова М.А., Кудрявцева В.Л., Чудинова Е.А., Ерофеева Г.В.</i>	58
ВЛИЯНИЕ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ГАЗОВОГО ПОТОКА НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТАННЫХ ДЕТАЛЕЙ	
<i>Иванов Д.А.</i>	64
ТРЕНИЕ И ИЗНОС ЭЛЕМЕНТОВ ВАКУУМНЫХ ВОЛНОВЫХ ПЕРЕДАЧ	
<i>Ивашов Е.Н., Константинов Ю.А., Панфилова Е.С., Шихов А.И.</i>	68
ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И МИКРОСТРУКТУРЫ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ СТАЛИ 12Х18Н10Т, ВЫПОЛНЕННЫХ ПО РАЗЛИЧНЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ СХЕМАМ	
<i>Ильященко Д.П.</i>	73

ОБЗОР ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ ТИПА «ЭЛЕКТРОННЫЙ НОС» ДЛЯ АНАЛИЗА КАЧЕСТВА ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ	
<i>Кечкина Н.И., Попов А.А., Баранова Д.И., Ловдар Ю.А., Кулигина Н.О., Токарев С.В., Наумова Е.Г., Зубков И.Л., Бессонов С.Г., Орлов Е.С.</i>	77
ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КРУТОНАКЛОННОГО КОНВЕЙЕРА В УСЛОВИЯХ ТОО «БОГАТЫРЬ КОМИР»	
<i>Малыбаев С.К., Балгабеков Т.К., Жанатов И.М., Хайбуллин Р.Р., Рожков А.В.</i>	82
ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ВЕРТИКАЛЬНОМ СОСРЕДОТОЧЕННОМ ВЗРЫВНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НАБЕРЕЖНОЙ РЕЧНОГО ПОРТА С НЕЗАПОЛНЕННЫМ ВОДНЫМ ОБЪЕКТОМ	
<i>Мусаев В.К.</i>	88
ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О РАСПРОСТРАНЕНИИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ УПРУГИХ ВОЛН НАПРЯЖЕНИЙ В ПОДКРЕПЛЕННОМ КРУГЛОМ ОТВЕРСТИИ	
<i>Мусаев В.К.</i>	93
ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ С ВОЛОЧЕНИЕМ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРЯЧЕКАТАНОЙ СТАЛИ 40Х	
<i>Пачурин Г.В., Филиппов А.А., Пачурин В.Г.</i>	98
СРАВНИТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ПРОВОЛОКИ В СОВМЕЩЕННОМ ПРОЦЕССЕ БЕСФИЛЬЕРНОГО ВОЛОЧЕНИЯ И ОЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТИ	
<i>Пащенко К.Г., Бахматов Ю.Ф., Кальченко А.А., Рузанов В.В., Михайлицин С.В., Ярославцев А.В., Ярославцева К.К., Терентьев Д.В., Шекшеев М.А., Тютеряков Н.Ш., Шашкин Д.А., Кальченко А.А.</i>	107
СОВРЕМЕННЫЕ ГРУППОВЫЕ ПОДВОДНЫЕ СРЕДСТВА ДВИЖЕНИЯ	
<i>Романов А.Д., Чернышов Е.А., Романова Е.А.</i>	112

CONTENTS

ESTIMATION OF METHODS OF DEFERRIZATION FOR CIRCULATING TECHNOLOGICAL SOLUTIONS	
<i>Amangusova L.A., Zakharova V.S., Kalugin Y.A.</i>	7
METHODS OF EVALUATION OF TIME AND ACCURACY CHARACTERISTICS OF AIR ASSETS AND AIR DEFENSE ON EFFICIENCY OF THEIR USE	
<i>Andreeva N.Y., Kvartalnova S.E.</i>	10
STUDY OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON RECYCLED POLYMERIC RAW MATERIALS	
<i>Bodyan L.A., Varlamova I.A., Girevaya K.Y., Kalugina N.L., Girevoy T.A.</i>	15
DEVELOPMENT OF FUZZY MODELS IN THE MATLAB FUZZY LOGIC TOOLBOX FOR ASSESSMENT OF WORKING CONDITIONS AT WORKPLACES OF WORKERS OF THE MINING INDUSTRY	
<i>Velikanov V.S., Safin G.G., Abdrakhmanov A.A., Shabanov A.A., Makhmudova S.N., Abdullin R.A., Tuguzov A.S.</i>	19
THE METHOD OF GETTING COMPOSITE FOOD POWDER WITH FUNCTIONAL PURPOSE	
<i>Volonchuk S.K., Motovilov K.Y., Lomovskiy I.O.</i>	25
MICRO-UAV WITH VIBRO SLAT	
<i>Voronkov Y.S., Voronkov O.Y.</i>	29
UTILIZATION OF PLASTIC WASTE IN THE ZHIDKOMETALLICHESKY HEAT CARRIER	
<i>Vorotyntsev A.V., Chernyshov E.A., Battalov S.V., Romanov A.D.</i>	40
DIVISION INTO DISTRICTS OF TERRITORIES AT REVEALING OF CRYOGENIC STRUCTURES, PERSPECTIVE FOR PUMPING DRAINAGE BRINES (ON THE EXAMPLE OF YAKUTIA)	
<i>Drozdov A.V., Melnikov A.I.</i>	45
DEVELOPMENT OF ROLLING BEARINGS CONTACT HYDRODYNAMIC MATH MODEL CALCULATION	
<i>Zhirkin Y.V., Mironenkov E.I., Sultanov N.L., Tyuteryakov N.S., Pashchenko K.G.</i>	52
THERMAL BEHAVIOR OF GOLD THIN FILMS OF DIFFERENT STRUCTURE WHILE HEATING	
<i>Zakharova M.A., Kudryavtseva V.L., Chudinova E.A., Erofeeva G.V.</i>	58
INFLUENCE OF THE PULSATORY GAS FLOW ON THE STRESSED STATE OF THE HEAT-TREATED COMPONENTS	
<i>Ivanov D.A.</i>	64
FRICTION AND WEAR OF THE ELEMENTS OF THE VACUUM WAVE TRANSMISSION	
<i>Ivashov E.N., Konstantinov Y.A., Panfilova E.S., Shikhov A.I.</i>	68
INVESTIGATION OF CHEMICAL COMPOSITION AND MICROSTRUCTURE OF WELDED JOINTS ON STEEL 12CRNITI18-10, EXECUTED BY VARIOUS TECHNOLOGICAL SCHEMES	
<i>Ilyaschenko D.P.</i>	73

REVIEW OF THE APPLICATION OF MODERN SYSTEM TYPE «ELECTRONIC NOSE» TO ANALYZE THE QUALITY FOOD	
<i>Kechkina N.I., Popov A.A., Baranova D.I., Lovdar Y.A., Kuligina N.O., Tokarev S.V., Naumova E.G., Zubkov I.L., Bessonov S.G., Orlov E.S.</i>	77
FEATURES OF USING OF THE HIGH INCLINATION CONVEYOR OF THE KNK-2000 MODEL IN THE CONDITIONS OF «BOGATYR KOMIR» LLP	
<i>Malybaev S.K., Balgabekov T.K., Zhanatov I.M., Khaybullin R.R., Rozhkov A.V.</i>	82
THE DEFINITION OF A NON-STATIONARY STATE OF STRESS AT A VERTICAL CONCENTRATED EXPLOSIVE IMPACT ON THE EMBANKMENT OF THE RIVER PORT WITH EMPTY WATER OBJECT	
<i>Musaev V.K.</i>	88
NUMERICAL SOLUTION OF THE PROBLEM OF PROPAGATION OF NON-STATIONARY ELASTIC WAVES STRESSES IN REINFORCED ROUND HOLE	
<i>Musaev V.K.</i>	93
INFLUENCE OF TEMPERATURE ISOTHERMAL TREATMENT WITH DRAWING ON MECHANICAL PROPERTIES OF HOT-ROLLED 40X	
<i>Pachurin G.V., Filippov A.A., Pachurin V.G.</i>	98
COMPARATIVE PROPERTIES OF THE WIRE IN THE INTEGRATED PROCESS OF DRAWING WITHOUT DIE PLATES AND ROD SURFACE DESCALING	
<i>Paschenko K.G., Bakhmatov Y.F., Kalchenko A.A., Ruzanov V.V., Mikhaylitsyn S.V., Yaroslavtsev A.V., Yaroslavtseva K.K., Terentev D.V., Sheksheev M.A., Tyuteryakov N.S., Shashkin D.A., Kalchenko A.A.</i>	107
MODERN GROUP UNDERWATER MEANS OF THE MOVEMENT	
<i>Romanov A.D., Chernyshov E.A., Romanova E.A.</i>	112

УДК 669.054.8

ОЦЕНКА МЕТОДОВ ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИЯ ОБОРОТНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ

Амангусова Л.А., Захарова В.С., Калугин Ю.А.

ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,
Магнитогорск, e-mail: nlk455@mail.ru

Проведен анализ методов обезжелезивания, которые могут быть применимы к щелочным технологическим растворам, образующимся в процессе цианидного выщелачивания. Оценено влияние pH, ионного состава на скорость окисления Fe (II) в Fe (III) и на снижение концентрации железа в растворах. Предложен перспективный метод удаления железа из технологических растворов золотоизвлекательного участка.

Ключевые слова: оборотные технологические растворы, обезжелезивание, AVR-метод

ESTIMATION OF METHODS OF DEFERRIZATION FOR CIRCULATING TECHNOLOGICAL SOLUTIONS

Amangusova L.A., Zakharova V.S., Kalugin Y.A.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, e-mail: nlk455@mail.ru

We have done the analysis of the methods for iron removal which can be applied to alkaline solutions which formed during the cyanide leaching. The influence of pH, ionic composition on the oxidation rate of oxidation Fe (II) to Fe (III) and reducing the concentration of iron in solution have estimated. The promising method for the removal of iron from technological solutions of gold extraction plant have proposed.

Keywords: circulating technological solutions, deferrization, AVR-method

Одним из недостатков кучного выщелачивания золота цианидами является сложность обработки образующихся технологических растворов [2, 3], так как при использовании оборотных вод на золотоизвлекательных участках медных месторождений должно быть обеспечено получение таких технологических показателей извлечения, которые не уступали бы достигаемым при использовании свежей воды. Следовательно, кондиционирование оборотных вод необходимо проводить комплексно.

В настоящее время для снижения концентрации всех ионов, находящихся в технологических растворах, применяются такие методы обессоливания воды, как термические (перегонка, дистилляция, нагревание воды сверх критической температуры 350°C, замораживание), электродиализ, мембранные методы (обратный осмос, нанофильтрация), а также ионный обмен и сорбция [4, 5]. Если есть возможность, используют опреснение, включающее разбавление засоленных технологических вод пресной водой.

Особенностью очистки щелочных технологических растворов, образующихся в процессе цианидного выщелачивания, является то, что растворенное железо

представлено цианидными комплексными анионами железа (II) и железа (III). Двухвалентное железо более активно вступает в реакцию образования цианидного комплекса. Трехвалентное железо, образуя в водной среде гидроксид трехвалентного железа, становится более пассивным. Для снижения концентрации железа в технологических растворах стремятся, после предварительного подкисления при помощи химического или биохимического (при участии железобактерий) окисления, Fe (II) перевести в Fe (III), которое, гидролизуясь, легко выпадает в осадок в виде Fe(OH)₃ [4].

Произведение растворимости гидроксида железа (III) равно $3,8 \cdot 10^{-38}$, поэтому, как установлено экспериментально и подтверждено теоретическими расчетами, уже при pH 3,60 степень его осаждения составляет не менее 90,0% [1].

Гидроксиды меди (II), железа (II), цинка и других элементов осаждаются в более щелочной области. Это связано с тем, что они имеют более высокие значения произведения растворимости, чем $\text{Pr}(\text{Fe}(\text{OH})_3)$ (табл.бwf). Как следствие, двухвалентное железо более активно вступает в реакцию образования цианидного комплекса.

Рассчитанные значения pH начала осаждения ионов в технологических растворах

Аналит	Произведение растворимости гидроксида [87]	pH начала осаждения
Cu^{2+}	$2,2 \cdot 10^{-20}$	5,27
Fe^{3+}	$3,8 \cdot 10^{-38}$	2,10
Fe^{2+}	$1 \cdot 10^{-15}$	7,37

Образующийся гидроксид железа (III) представляет собой аморфный осадок с большой активной поверхностью. Ионная природа, неравномерность распределения зарядов по поверхности из-за наличия поверхностных дефектов обуславливают возможность его использования в качестве коллектора – естественного сорбента, осаждающего образующиеся в кислых растворах гидроксиды меди (II), железа (II) и других элементов.

Скорость окисления Fe (II) в Fe (III) зависит от значения pH, щелочности, содержания органических веществ и окислительных агентов. С повышением pH возрастает как скорость окисления железа (II) в железо (III), так и скорость коагуляции гидроксида железа (III), поэтому освобождение растворов от железа ведут при pH 7.

Кроме того, для извлечения ионов железа из подкисленных технологических растворов важны следующие факторы [6]:

- При $\text{pH} \leq 4,5$ железо находится в воде в виде ионов Fe^{3+} , Fe^{2+} , $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$. При $\text{pH} \geq 4,5$ ионы Fe^{2+} окисляются в ионы Fe^{3+} , которые и связываются в осадок.

- В восстановительной среде в присутствии карбонатов и при $\text{pH} \geq 8,4$ возможно выделение FeCO_3 , а при $\text{pH} \geq 10,3$ $\text{Fe}(\text{OH})_2$.

- При наличии в обрабатываемой воде катализаторов – ионов Cu^{2+} , Mn^{2+} , PO_4^{3-} , а также при контакте ее с оксидами марганца или ранее выпавшим $\text{Fe}(\text{OH})_3$, скорость окисления кислородом ионов Fe^{2+} значительно возрастает [6].

Возможно применение безреагентных методов удаления железа, таких как аэрирование с последующим фильтрованием; аэрирование с последующим отстаиванием и фильтрованием; электрокоагуляция [4]. Например, применяется метод обезжелезивания воды фильтрованием, основанный на способности воды, содержащей двухвалентное железо и кислород, при фильтрации через зернистый слой выделять железо на поверхности зерен, образуя каталитическую пленку, состоящую в основном из гидроксида железа (III). Эта пленка активно влияет на процесс окисления и выделения железа из воды и значительно его интенсифицирует. Необходимым условием образования и действия пленки является наличие в воде кислорода. Описанный метод не требует специальных аэрационных условий (обрабатываемая вода обогащается кислородом при поступлении на фильтр)

и контактных емкостей. Установки для обезжелезивания воды методом аэрации могут быть открытыми (самотечными) и закрытыми (напорными). Установки открытого типа включают устройства для аэрации воды (градирни, брызгальные бассейны, отстойники, а при концентрации в воде железа ≥ 5 мг/л – песчаные фильтры).

Одним из перспективных вариантов обезжелезивания воды является насыщение ее воздухом в напорных резервуарах со струйной аэрацией. Работа таких резервуаров основана на взаимодействии струй насыщаемой жидкости (с вовлекаемым ими воздухом) с поверхностью слоя воды внутри напорного резервуара. Эти два фактора составляют существо струйной аэрации. Воздух для растворения в воде может подаваться от компрессора либо технологической сети непосредственно в напорный резервуар, а также с помощью эжектора, расположенного на напорном трубопроводе перед соплами [10].

А.Д. Раимбеков (СП «Кумтор Голд Компани») [9] сообщает, что предварительная аэрация перед выщелачиванием уменьшает образование цианидных комплексов железа. Следствие этого – уменьшение содержания ионов железа и цианидов в хвостовых водах. Одновременно повысилась кинетика выщелачивания без потери извлечения золота.

Эффект преаэрации, описанный А.Д. Раимбековым, также заключается в предварительном окислении двухвалентного железа кислородом воздуха и в переводе его в трехвалентное железо. Таким образом, количество двухвалентного железа в хвостовых водах уменьшается, минимизируя образование цианидных комплексов железа, а следовательно, уменьшая их содержание в оборотных водах, одновременно уменьшая общее потребление цианида.

Таким образом, исходя из особенностей состава щелочных технологических растворов, образующихся в процессе цианидного выщелачивания, и на основе проведенных расчетов, перспективным представляется удаление железа из технологических растворов золотоизвлекательного участка AVR-методом («подкисление – отдувка – нейтрализация»), включающим следующие стадии:

- подкисление технологических растворов соляной кислотой, сопровождающееся разрушением комплексов и образованием легколетучей токсичной цианистоводородной кислоты HCN;

- барботирование подкисленного раствора воздухом для перевода образующейся кислоты в газовую фазу;
- поглощение выделившегося газообразного цианистого водорода щелочным раствором гидроксида натрия;
- нейтрализация кислого раствора щелочным реагентом.

При использовании AVR-метода необходимо использовать достаточно мощную вытяжную вентиляцию или герметичные аппараты. Эффективность и скорость процесса при применении AVR-метода повышается, если отдувку цианистого водорода и его поглощение проводить в центробежно-барботажных аппаратах в непрерывном режиме. Кислоту дозируют в подводящую магистраль к центробежно-барботажному аппарату.

Список литературы

1. Варламова И.А., Гиревая Х.Я., Калугина Н.Л., Куликова Т.М., Медяник Н.Л. Физико-химические закономерности извлечения тяжелых металлов из техногенных гидроминеральных месторождений: монография. – Магнитогорск: МиниТип, 2010. – 246 с.
2. Варламова И.А., Чурляева Н.А. Изучение условий кондиционирования оборотных растворов кучного выщелачивания и извлечения из них меди // Общество, наука и инновации: сборник статей Международной научно-практической конференции: в 4-х частях.; отв. ред. А.А. Сукиасян. – Уфа, 2013. – С. 242–245.
3. Калугин Д.А., Калугина Н.Л. Определение оптимальных параметров цементации меди из оборотных технологических растворов золотоизвлекательного участка // Общество, наука и инновации: сборник статей Международной научно-практической конференции: в 4-х частях.; отв. ред. А.А. Сукиасян. – Уфа, 2013. – С. 54–58.
4. Калугина Н.Л., Варламова И.А., Калугин Д.А. Современные способы снижения содержания ионов меди (II), железа и хлора при обессоливании растворов // Химия. Технология. Качество. Состояние, проблемы и перспективы развития: сборник материалов Международной заочной научно-технической конференции; под ред. Медяник Н.Л. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2012. – С. 20–33.
5. Калугина Н.Л., Варламова И.А., Калугин Д.А., Варламова Н.А. Цементационное извлечение меди из растворов и различных материалов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2013. – Т. 1. № 71. – С. 323–326.
6. Коршунов В.В., Шестовец В.З., Черных С.И. К вопросу кондиционирования вод в схемах оборотного водоснабжения // Цветные металлы. – 2002. – № 6. – С. 17–19.
7. Кульский Л.А., Строкач П.П. Технология очистки природных вод. – Киев: Вища школа, 1986. – 299 с.
8. Медяник Н.Л., Калугина Н.Л., Варламова И.А., Строкань А.М. Методология создания ресурсовоспроизводящих технологий переработки техногенного гидроминерального

сырья // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2011. – № 1. – С. 5–9.

9. Раимбеков А.Д. Нововведение в технологический процесс в 2002 году. Эффект преаэрации (СП «Кумтор Голд Компани») // Исследование геоэкологических особенностей взаимодействия техногенных систем. – URL: <http://www.minproc.ru/thes/2003/section8/thes2003sVIII-3101.doc> (дата обращения: 27.05.2012).

10. Усольцева Г.А., Байконурова А.О., Конаратбекова С.С. Исследование сорбции ионов цветных металлов аминифенольными ионами. Цветные металлы. – 2003. – № 8–9. – С. 65–67.

References

1. Varlamova I.A., Girevaya X.Y., Kalugina N.L., Kulikova T.M., Medyanik N.L. Fiziko-khimicheskie zakonomernosti izvlecheniya tyazhelykh metallov iz tehnogennykh gidromineralnykh mestorozhdenij: monografiya. – Magnitogorsk: MiniTip, 2010. – 246 p.
2. Varlamova I.A., Churlyayeva N.A. Izuchenie uslovij kondicionirovaniya oborotnykh rastvorov kuchnogo vyshhelachivaniya i izvlecheniya iz nix medi // Obshhestvo, nauka i innovacii: sbornik statej Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii: v 4-x chastyax; otv. red. A.A. Sukiasyan. – Ufa, 2013. – pp. 242–245.
3. Kalugin D.A., Kalugina N.L. Opredelenie optimalnykh parametrov cementacii medi iz oborotnykh tehnologicheskix rastvorov zolotoizvlekatelnogo uchastka // Obshhestvo, nauka i innovacii: sbornik statej Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii: v 4-x chastyax; otv. red. A.A. Sukiasyan. – Ufa, 2013. – pp. 54–58.
4. Kalugina N.L., Varlamova I.A., Kalugin D.A. Sovremennyye sposoby snizheniya soderzhaniya ionov medi (II), zheleza i xloro pri obessolivanii rastvorov // Khimiya. Tekhnologiya. Kachestvo. Sostoyanie, problemy i perspektivy razvitiya: sbornik materialov mezhdunarodnoj zaочноj nauchno-tekhnicheskoy konferencii, pod redakciej Medyanik N.L. Magnitogorsk: MGTU im. G.I. Nosova, 2012. – pp. 20–33.
5. Kalugina N.L., Varlamova I.A., Kalugin D.A., Varlamova N.A. Cementacionnoe izvlechenie medi iz rastvorov i razlichnykh materialov // Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya. – 2013. – T. 1. № 71. – pp. 323–326.
6. Korshunov V.V., Shestovec V.Z., Chernyx S.I. K voprosu kondicionirovaniya vod v sxemax oborotnogo vodosnabzheniya // Cvetnye metally. 2002. № 6. pp. 17–19.
7. Kul'skij L.A., Strokach P.P. Tekhnologiya ochistki prirodnix vod. – Kiev: Vishha shkola, 1986. – 299 p.
8. Medyanik N.L., Kalugina N.L., Varlamova I.A., Stokan A.M. Metodologiya sozdaniya resursovoproizvodyashix tekhnologij pererabotki tehnogennogo gidromineralnogo syrya // Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova. – 2011. – № 1. – pp. 5–9.
9. Raimbekov A.D. Novovvedenie v tekhnologicheskij process v 2002 godu. Effekt preaeracii (SP «Kumtor Gold Kompani») // Issledovanie geoeologicheskix osobennostej vzaimodejstviya tehnogennykh sistem. – URL: <http://www.minproc.ru/thes/2003/section8/thes2003sVIII-3101.doc> (data obrashheniya: 27.05.2012).
10. Usolceva G.A., Bajkonurova A.O., Konyratbekova S.S. Issledovanie sorbcii ionov cvetnykh metallov aminofenol'nymi ionitami. Cvetnye metally. – 2003. – № 8–9. – pp. 65–67.

УДК 519.6

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА С ХИМИЧЕСКИМИ ПРЕВРАЩЕНИЯМИ НА ПРИМЕРЕ ВЕРХОВЫХ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Андреева Н.Ю., Квартальнова С.Е.

*Филиал ФГБОУ ВПО «Московский государственный индустриальный университет»**Сергиев Посад, e-mail: gukova33@rambler.ru*

Разработка математических моделей, описывающих распространение лесных пожаров, имеет большое прикладное значение. В частности, такие модели являются важным звеном для создаваемых автоматизированных командных пунктов по борьбе с лесными пожарами. К настоящему времени накопленные наблюдения позволяют строить так называемые феноменологические (формальные) модели, пригодные для целей прогнозирования. Цель данной работы состоит в оценке того, насколько имеющийся уровень знаний о природе лесных пожаров и существующие методы моделирования достаточны для практического прогнозирования поведения верхового лесного пожара. Актуальность работы определяется важностью разработки и созданием простых и надежных программных продуктов для численного моделирования процессов распространения верховых лесных пожаров.

Ключевые слова: лесной пожар, лесной массив, контрольный объем, нижний ярус, верхний ярус

METHODS OF EVALUATION OF TIME AND ACCURACY CHARACTERISTICS OF AIR ASSETS AND AIR DEFENSE ON EFFICIENCY OF THEIR USE

Andreeva N.Y., Kvartalnova S.E.

Branch «Moscow State Industrial University», Sergiev Posad, e-mail: gukova33@rambler.ru

Development of mathematical models describing the spread of forest fires is of great practical importance. In particular, these models are an important link for the automated command and control centers to combat forest fires. To date, the accumulated observations to build so-called phenomenological (formal model) suitable for forecasting purposes. The aim of this work is to evaluate how the current level of knowledge about the nature of forest fires and the existing modeling techniques are sufficient to predict the behavior of practical crown forest fire. Relevance of the work is determined by the importance of developing and creating simple and reliable pro-software products for the numerical simulation of the propagation of upland forest in fires.

Keywords: forest fire, forest, control volume, the lower tier, upper tier

К наиболее распространенным экологическим катастрофам относятся лесные пожары, приводящие к выгоранию больших лесных массивов и загрязнению атмосферы частицами сажи. Исчезновение лесов может существенно повлиять на жизнедеятельность человека вплоть до появления мутаций. Поэтому внимание ученых, занятых экологическими проблемами, сосредоточено на учете природных балансов, определяющих содержание в воздухе газов и влаги. В целом сохранение лесов представляет глобальную задачу.

Реальные масштабы горимости лесов России и размеры наносимого огнем ущерба до настоящего времени не установлены. Регулярные наблюдения за лесными пожарами ведутся только в зоне активной охраны лесов, охватывающей 2/3 общей площади лесного фонда. В северных районах Сибири и Дальнего Востока, охватывающих 1/3 лесного фонда, активная борьба с огнем и учет пожаров практически отсутствуют. В зоне активной охраны лесов ежегодно регистрируется от 10 до 30 тысяч лесных пожаров, охватывающих площадь от 0,5 до 2,1 млн га. Число пожаров, прихо-

дящихся на 1 млн га лесного фонда России, в несколько раз меньше, а средняя площадь одного пожара в несколько раз больше, чем в Европе и Северной Америке. Указанное обстоятельство, а также наличие больших неохранных территорий свидетельствует о сравнительно низком уровне противопожарной защиты лесов в нашей стране.

Математическая модель верхового лесного пожара

Пусть в бесконечном лесном массиве имеется плоский очаг повышенной температуры, расположенный перпендикулярно направлению ветра. Начало отсчета системы координат поместим на поверхности земли, ось x свяжем с направлением ветра, ось z направим вертикально вверх.

В области высоты h , расположенной выше уровня нижнего яруса леса z_0 и ниже уровня верхней границы полога леса в плоскости xz , имеем уравнения, выражающие законы сохранения для многофазной многокомпонентной реагирующей среды:

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \frac{\partial \rho_s u}{\partial x} + \frac{\partial \rho_s w}{\partial z} = 0; \quad (1)$$

$$\rho_5 \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} - \rho_5 s c_d u \sqrt{u^2 + w^2} + \frac{\partial}{\partial x} (-\rho_5 \overline{u'^2}) + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho_5 \overline{u'w'}); \quad (2)$$

$$\rho_5 \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho_5 s c_d w \sqrt{u^2 + w^2} - \rho_5 g + \frac{\partial}{\partial x} (-\rho_5 \overline{u'w'}) + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho_5 \overline{w'^2}); \quad (3)$$

$$\rho_5 \left(\frac{\partial \tilde{n}_\alpha}{\partial t} + \frac{u \partial c_\alpha}{\partial x} + \frac{w \partial c_\alpha}{\partial z} \right) = R_{5\alpha} - c_\alpha Q + \frac{\partial}{\partial x} (-\rho_5 \overline{u'c'_\alpha}) + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho_5 \overline{w'c'_\alpha}); \alpha = \overline{1, 3}; \quad (4)$$

$$\left(\sum_{i=1}^4 \rho_i \Phi_i c_{pi} + \rho_5 c_{p5} \right) \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_5 c_{p5} \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = q_3 R_3 - q_2 R_2 + q_5 R_5 + \chi c U_R - 4\chi \sigma T^4 + \frac{\partial}{\partial x} (-\rho_5 \overline{u'T'}) + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho_5 \overline{w'T'}); \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{c}{3\chi} \frac{\partial U_R}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{c}{3\chi} \frac{\partial U_R}{\partial z} \right) - \chi c U_R + 4\chi \sigma T^4 = 0; \quad (6)$$

$$p_\infty = \rho_5 RT \sum_{\alpha=1}^4 \frac{c_\alpha}{M_\alpha}; \quad \sum_{\alpha=1}^4 c_\alpha = 1; \quad Q = (1 - \alpha_c) R_1 + R_2 + \frac{M_c}{M_1} R_3; \quad (7)$$

$$\rho_1 \frac{\partial \Phi_1}{\partial t} = -R_1; \quad \rho_2 \frac{\partial \Phi_2}{\partial t} = -R_2; \quad \rho_3 \frac{\partial \Phi_3}{\partial t} = \alpha_c R_1 - \frac{M_c}{M_1} R_3; \quad \rho_4 \frac{\partial \Phi_4}{\partial t} = 0. \quad (8)$$

Для приземного слоя атмосферы при $z \geq h$ имеем следующую систему уравнений:

$$\frac{\partial \rho_5}{\partial t} + \frac{\partial \rho_5 u}{\partial x} + \frac{\partial \rho_5 w}{\partial z} = 0; \quad (9)$$

$$\rho_5 \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (-\rho_5 \overline{u'^2}) + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho_5 \overline{u'w'}); \quad (10)$$

$$\rho_5 \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho_5 g + \frac{\partial}{\partial x} (-\rho_5 \overline{u'w'}) + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho_5 \overline{w'^2}); \quad (11)$$

$$\rho_5 \left(\frac{\partial c_\alpha}{\partial t} + \frac{u \partial c_\alpha}{\partial x} + \frac{w \partial c_\alpha}{\partial z} \right) = R_{5\alpha} + \frac{\partial}{\partial x} (-\rho_5 \overline{u'c'_\alpha}) + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho_5 \overline{w'c'_\alpha}); \alpha = \overline{1, 3}; \quad (12)$$

$$\rho_5 c_{p5} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = q_5 R_5 + \frac{\partial}{\partial x} (-\rho_5 c_{p5} \overline{u'T'}) + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho_5 c_{p5} \overline{w'T'}); \quad (13)$$

$$p_\infty = \rho_5 RT \sum_{\alpha=1}^4 \frac{c_\alpha}{M_\alpha}; \quad \sum_{\alpha=1}^4 c_\alpha = 1; \quad (14)$$

здесь $R_1 = k_{01} \rho_1 \Phi_1 \exp(-E_1 / RT)$; $R_2 = k_{02} T^{-1/2} \rho_2 \Phi_2 \exp(-E_2 / RT)$;

$$R_3 = k_{03} s_\sigma \rho_5 c_1 \exp(-E_3 / RT); \quad R_{51} = -R_3 - R_5 M_1 / (2M_2); \quad R_{53} = 0;$$

$$R_5 = M_2 k_{05} (c_1 M / M_1)^{0,25} (c_2 M / M_2) T^{-2,25} \exp(-E_5 / RT); \quad R_{52} = (1 - \alpha_d) v \quad R_1 - R_5.$$

Система уравнений (1)–(14) должна быть дополнена соответствующими начальными и граничными условиями.

В начальный момент времени во всем контрольном объеме заданы распределения искомых функций

$$t = 0: u = u_H(z); w = 0; T = T_H(z);$$

$$c_\alpha = c_{\alpha H}(z); c_\alpha = c_{\alpha H}(x, z);$$

$$\varphi_i = \varphi_{iH}(x, z). \quad (15)$$

На левой границе расчетной области $x = x_{-\infty}$ известны параметры набегающего потока

$$x = x_{-\infty}: u = u_H(z); w = 0; T = T_H(z);$$

$$c_\alpha = c_{\alpha H}(z);$$

$$U_R = \frac{4\sigma}{c} T_H^4; z \ll h. \quad (16)$$

На правой границе контрольного объема ставятся «мягкие» граничные условия:

$$\rho_5 w \Big|_{z=z_0} = -z_0 \frac{\partial \rho_5^0 \varphi_5^0}{\partial t} + z_0 Q^0 - \rho_5 \overline{w' T'} \Big|_{z=z_0} = \left(\sum_{i=1}^5 \rho_i^0 c_{pi}^0 \varphi_i^0 \right) z_0 \frac{\partial T}{\partial t} + z_0 (q_3 R_3 - q_2 R_2 + q_5 R_5 +$$

$$+ Q_T + \chi^0 c U_R - 4 \chi^0 \sigma T^4) \Big|_{z=z_0};$$

$$-\rho_5 w' c'_\alpha \Big|_{z=z_0} = z_0 \rho_5^0 \varphi_5^0 \frac{\partial c_\alpha}{\partial t} \Big|_{z=z_0} + z_0 c_\alpha Q^0 - z_0 R_{5\alpha}^0; \quad (19)$$

$$\left(\frac{c}{3\chi} \frac{\partial U_R}{\partial z} \Big|_{z=z_0} = z_0 (\chi^0 c U_R \Big|_{z=z_0} - 4 \chi^0 \sigma T^4 \Big|_{z=z_0}). \right.$$

При записи граничных условий (19) для нижнего яруса леса в отличие от системы уравнений (1)–(8) для полого леса учитывается собственный объем конденсированной фазы ($\varphi_5^0 \neq 1$).

При определении уровня шероховатости z_0 там выполняется равенство $u \Big|_{z=z_0} = 0$. На границе раздела сред полог леса – приземный слой атмосферы должны выполняться следующие условия:

$$\rho_5 w \Big|_{z=h_-} = \rho_5 w \Big|_{z=h+};$$

$$-\rho_5 \overline{u' w'} \Big|_{z=h_-} = -\rho_5 \overline{u' w'} \Big|_{z=h+};$$

$$u \Big|_{z=h_-} = u \Big|_{z=h+};$$

$$-\rho_5 \overline{w'^2} \Big|_{z=h_-} = -\rho_5 \overline{w'^2} \Big|_{z=h+};$$

$$w \Big|_{z=h_-} = w \Big|_{z=h+};$$

$$x = x_\infty: \frac{\partial u}{\partial x} = 0; \frac{\partial w}{\partial x} = 0; \frac{\partial c_\alpha}{\partial x} = 0;$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0; \frac{\partial U_R}{\partial x} = 0. \quad (17)$$

На верхней границе значения искомых функций считаются известными и равными значениям функций в набегающем потоке на этой высоте:

$$z = z_\infty; u = u_H(z_\infty); w = 0; T = T_H(z_\infty);$$

$$c_\alpha = c_{\alpha H}(z_\infty). \quad (18)$$

Считается, что границы контрольного объема могут быть выбраны на достаточном удалении от фронта пожара, так что возмущения, вносимые ограниченностью рассматриваемого объема, слабо искажают характеристики вблизи фронта.

Граничные условия на уровне z_0 (нижний ярус леса) получены в следующем виде:

$$-\rho_5 \overline{w' c'_\alpha} \Big|_{z=h_-} = -\rho_5 \overline{w' c'_\alpha} \Big|_{z=h+};$$

$$c_\alpha \Big|_{z=h_-} = c_\alpha \Big|_{z=h+};$$

$$-\rho_5 c_{p5} \overline{w' T'} \Big|_{z=h_-} = -\rho_5 c_{p5} \overline{w' T'} \Big|_{z=h+};$$

$$T \Big|_{z=h_-} = T \Big|_{z=h+};$$

$$\frac{c}{3\chi} \frac{\partial U_R}{\partial z} \Big|_{z=h_-} = Q_R^+ - q_R^-.$$

Исследование влияния условий горения

При инициализации верхового лесного пожара в атмосфере развивается сложное поле течения газа. Динамический напор струи оттекающих продуктов горения, всплывание горячего газового объема приводят к тому, что в атмосфере возникают крупномасштабные вихревые структуры.

Управляя подачей кислорода и тепла в зону горения, эти структуры, порожденные горением, сами оказывают определяющее влияние на скорость и критические условия горения.

Начальная стадия эволюции крупномасштабного вихревого движения в атмосфере играет главенствующую роль в процессе горения, поскольку на этой стадии формируется определенная интенсивность вихревого движения, происходит естественный отбор устойчивых вихревых структур и выясняется существенный вопрос – будет ли горение распространяться дальше или произойдет затухание. С точки зрения борьбы с пожарами понимание закономерностей начальной стадии пожара важно

для принятия необходимых противопожарных мер.

Нестационарная задача о развитии очага горения в атмосфере решается численно. Прослеживается инициирование реакции на поверхности твердого топлива примыкающим к ней горячим газовым объемом, образование струи оттекающих продуктов горения, формирование вихревого движения, возникновение конвективной колонки и другие стороны явления.

Расчеты показали, что над очагом горения зарождается всплывающая струя горячих продуктов. Область приобретает «грибообразную» форму. Развитие очага горения показано на рис. 1, 2, где представлены изотермы, где T_0 – начальная температура.

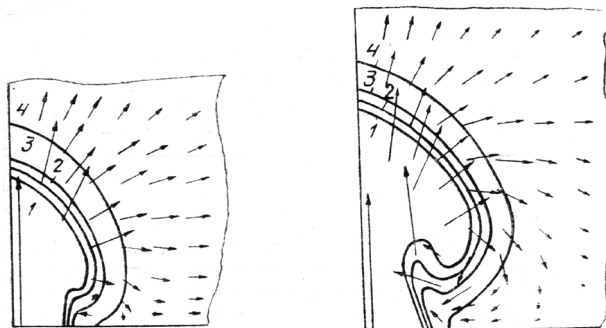


Рис. 1. Развитие очага горения. $T=4T_0$ (1); $3T_0$ (2); $2T_0$ (3); $1,1T_0$ (4) (T_0 – начальная температура)

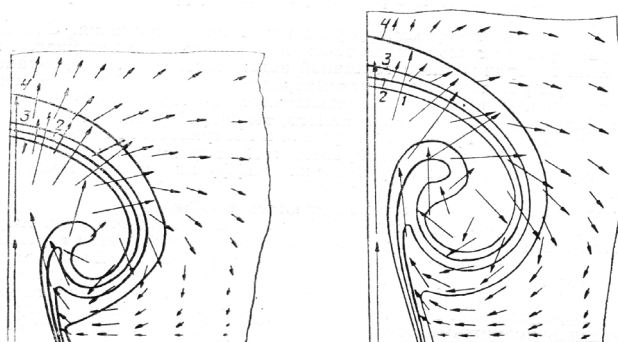


Рис. 2. Развитие очага горения (Обозначения см. на рис. 1)

Результаты

В процессе моделирования в среде программирования Delphi пользователю предоставляется следующая информация о моделируемом процессе и работе программы:

- возможность выбора древесных материалов;
- распределение значений концентрации кислорода во время всего процесса пожара;
- распределение значений концентрации топлива;

- распределение температуры;
- соответствующие для трех распределений шкалы, отображающие соответствие между значением визуализируемого параметра и цветом, соответствующим этому значению.

Рассматриваемое приложение использовалось для проведения ряда расчетов, в которых были использованы имеющиеся экспериментальные данные. Рассмотрим некоторые из полученных результатов работы.

Рассмотрим, как будет развиваться верховой лесной пожар при составляющих скорости ветра по оси x и y , равных 5 м/с, и при минимальном параметре реакции термического окисления, что соответствует выбору древес-

ного материала – сосна. При моделировании процесса горения через 60 и 120 секунд были получены следующие распределения температуры, концентрации кислорода и концентрации топлива (рис. 3).

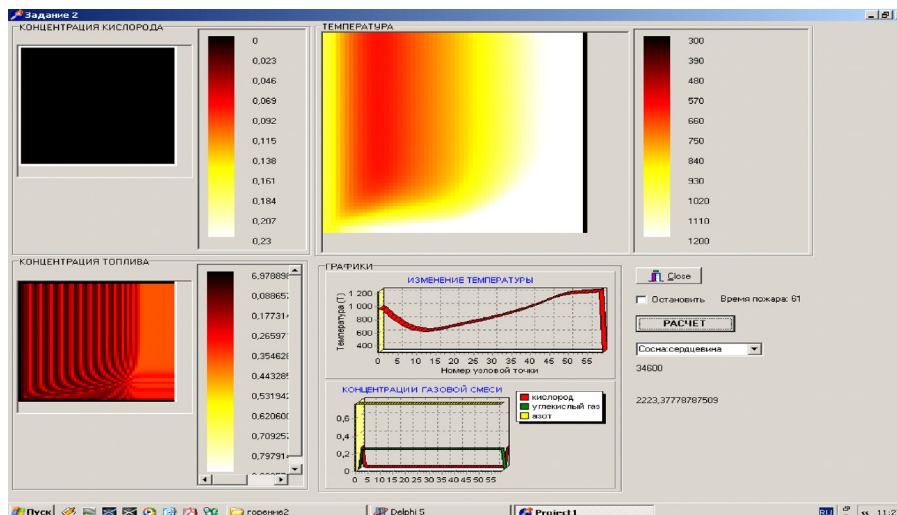


Рис. 3. Распределения температуры, концентрации кислорода и концентрации топлива

Заключение

Разработанная математическая модель приводит к эффективным численным алгоритмам и позволяет проводить количественный и качественный анализ распространения верхового лесного пожара.

На основе подходов, описанных выше, было разработано Delphi-приложение, моделирующее теплофизику механизма горения лесных пожаров. При работе с приложением пользователь может моделировать процесс горения леса. Воздействие на механизмы, определяющие горение, позволит выработать рекомендации экономических способов тушения лесных пожаров. Разработанное приложение позволяет проанализировать, как изменится характер горения при моделировании различных параметров.

Список литературы

1. Перминов В.А. Математическое моделирование распространения плоского фронта верхового лесного пожара // Вычислительные технологии. – 2006. – Т. 11. – С. 108-115.
2. Гришин А.М., Перминов В.А. Переход низового лесного пожара в верховой // Физика горения и взрыва. – 1990. – Т.26, № 6. – С. 27-35.
3. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. – Новосибирск: Наука, 1992. – 407 с.

References

1. Perminov V.A. Matematicheskoe modelirovanie rasprostraneniye ploskogo fronta verkhovogo lesnogo pozhara // Vychislitel'nye tekhnologii. – 2006. – T. 11. – pp. 108-115.
2. Grishin A.M., Perminov V.A. Perexod nizovogo lesnogo pozhara v verxovoj // Fizika goreniya i vzryva. – 1990. – T.26, № 6. – pp. 27-35.
3. Grishin A.M. Matematicheskoe modelirovanie lesnyx pozharov i novye sposoby borby s nimi. – Novosibirsk: Nauka, 1992. – 407 p.

УДК 674.812.2

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ВТОРИЧНОГО ПОЛИМЕРНОГО СЫРЬЯ

Бодьян Л.А., Варламова И.А., Гиревая Х.Я., Калугина Н.Л., Гиревой Т.А.

*ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,
Магнитогорск, e-mail: Varlamova156@gmail.com*

Рассмотрена возможность применения отходов пластмасс для получения древесно-наполненных полимерных композиционных материалов (ДПК). Установлено, что вторичные полимеры (полиэтилен высокого давления, полиэтилен низкого давления, полипропилен) могут быть использованы в качестве связующего в композитах с наполнителем – хвойной целлюлозой фракций 2 мм и 3 мм. Соотношение наполнителя и связующего вещества – 1:1. В качестве связующего ДПК возможно также использование смеси отходов двух и трех полимеров, а также некоторых сополимеров. Наилучшие результаты получены при использовании смеси ПЭ, ПП, ПЭТФ в массовом соотношении 1:1:1. Производство ДПК позволит найти пути рационального применения полимерных отходов и неликвидных отходов деревообработки для изготовления опалубки, мебели, упаковки, стеллажей, ограждений, разборных конструкций.

Ключевые слова: композиционные материалы, полимерные отходы, связующее, полиэтилен высокого давления, полиэтилен низкого давления, полипропилен, полиэтилентерефталат

STUDY OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON RECYCLED POLYMERIC RAW MATERIALS

Bodyan L.A., Varlamova I.A., Girevaya K.Y., Kalugina N.L., Girevoy T.A.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, e-mail: Varlamova156@gmail.com

The possibility of using waste plastics to produce wood-filled polymer composites (WPC) was considered. Recycled polymers (LDPE, high density polyethylene and polypropylene) can be used as a binder in composites with softwood pulp fractions 2 mm and 3 mm as a filler was found. It is necessary to have the ratio of the filler and the binder as 1:1 was evaluated. Some mixes which consist of waste products after manufacturing of two or three polymers and certain copolymers are also possible to use as a binder of WPC was determined. The best results will be if using the waste products of PE, PP, PET in a weight ratio of 1: 1: 1 were calculated. The WPC production will help to find ways of rational using as for polymer waste products as for wood waste products. WPC will be able to use for the manufacture of formwork, furniture, packaging, racks, fences, folding designs.

Keywords: composite materials, plastics waste products, binder, high-pressure polyethylene, high density polyethylene, polypropylene, polyethylene terephthalate

Вторичная переработка является одним из приоритетных направлений утилизации отходов полимерных упаковочных материалов с экономической и экологической точек зрения. Используют различные способы утилизации полимерных отходов: рециклинг, сжигание, пиролиз, захоронение. Получение композиционных материалов различного назначения на основе вторичного полимерного сырья является одним из видов рециклинга [1–3, 6, 8, 10]. К таким композитам можно отнести древесно-наполненные полимерные композиционные материалы (ДПК), которые производятся на основе отходов полимерной и деревообрабатывающей промышленности. ДПК предназначены для замены экологически небезопасных древесностружечных плит (ДСП), содержащих в качестве связующего фенолформальдегидные смолы. В России довольно часто производители выпускают низкосортные дешевые плиты, выделение токсичного для человека формальдегида из которых значительно превышает ПДК (до 40 раз).

Достоинствами ДПК являются: экологичность; внешний вид, напоминающий натуральную древесину; низкое водопоглощение; высокая прочность при растяжении, сжатии и изгибе; огнестойкость; высокое сопротивление микробному воздействию; а также возможность вторичной переработки [7].

Цель исследования: изучение возможности использования древесно-наполненных полимерных композиционных материалов для замены экологически небезопасных древесностружечных плит.

Материалы и методы исследования

В качестве исходных материалов для производства ДПК использовались следующие вторичные полимеры: полиэтилен высокого давления (ПЭВД), полиэтилен низкого давления (ПЭНД), полипропилен (ПП), полиэтилентерефталат (ПЭТФ). В качестве древесного наполнителя применялась хвойная целлюлоза фракций 2 и 3 мм. Соотношение наполнителя и связующего вещества во всех образцах одинаково – 1:1. Содержание древесного наполнителя в количестве 50% необходимо и достаточно для сохранения механических свойств композиционного материала [9]. Исследования проводились по мето-

дикам в соответствии с ГОСТ 10632-2007 «Плиты древесностружечные. Технические условия» и ГОСТ 10634-88 «Плиты древесностружечные. Методы определения физических свойств» [4, 5].

Результаты исследования и их обсуждение

Для изготовления опытных образцов ДПК использовалась нагревательная печь, представляющая собой вертикальную цилиндрическую шахту, и специально изготовленная пресс-форма с камерой для исследуемого материала. Спекание образцов в печи производилось при температуре 240 °С. Все образцы, полученные с использованием в качестве связующего ПЭВД, ПЭНД, ПП, имели гладкую, ровную поверхность и размеры 100×100,8 мм. При изготовлении образцов с ПЭТФ установлено, что при температуре до

240 °С ПЭТФ не обладает связующими свойствами по отношению к хвойной целлюлозе, а при более высокой температуре происходит обугливание целлюлозы. Поэтому образцы с ПЭТФ в дальнейших исследованиях не использовались. Для сравнения физико-механических свойств ДПК и ДСП в ходе эксперимента использовались образцы ДСП марок П-А и П-Б.

Состав исследованных образцов: 1 – ПЭВД + хвойная целлюлоза фракции 3 мм; 2 – ПП + хвойная целлюлоза фракции 3 мм; 3 – ПЭНД + хвойная целлюлоза фракции 3 мм; 4 – ПЭВД + хвойная целлюлоза фракции 2 мм; 5 – ПП + хвойная целлюлоза фракции 2 мм; 6 – ПЭНД + хвойная целлюлоза фракции 2 мм; 7 – ДСП марки П-А; 8 – ДСП марки П-Б. Результаты определения физических свойств образцов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Физические свойства образцов

№ образца	Влажность, %	Водопоглощение, %	Плотность, кг/м ³
1	2,04	7,94	1283
2	2,33	6,01	1265
3	0,73	10,08	1407
4	2,02	8,68	1350
5	1,03	3,85	1306
6	0,51	4,17	1295
7	5,08	11,55	753
8	5,12	12,61	714

Полученные образцы ДПК по физическим свойствам не уступают образцам ДСП. Их влажность не превышает 2,33 %; водопоглощение – 10,08 %, что значительно ниже допустимых по ГОСТ 10632-2007 значений (влажность – 5–13 %, водопоглощение – не более 12 %) [5]. Плотность образцов ДПК – 1265–1407 кг/м³, образцов ДСП – 753 и 714 кг/м³ (550–820 кг/м³ по ГОСТ 10632-2007). Влажность, водопоглощение и плотность композиционных материалов обусловлены их пористостью. Чем выше пористость, тем ниже плотность материала и тем выше поглощение воды. Поры в ДСП, образованные за счет пространственной структуры фенолформальдегидной смолы, обычно открытые и образуют каналы, пронизывающие всю матрицу. Вода проникает внутрь матрицы ДСП, обуславливая высокое водопоглощение и разбухание. Замена фенолформальдегидной смолы полиэтиленом высокого давления, полиэтиленом низ-

кого давления, полипропиленом приводит к уменьшению пористости образцов и, как следствие, к увеличению плотности, уменьшению водопоглощения. Водопоглощение образцов ДПК ниже в 1,15–3,00 раза, чем у образцов ДСП. Следовательно, полученный материал может применяться для изготовления опалубки, мебели, упаковки, стеллажей, ограждений, разборных конструкций и т.д. [7].

Кроме того, для образцов ДПК были определены стойкость по отношению к кислотам (20 % раствор H₂SO₄) и щелочам (20 % раствор KOH), воспламеняемость и влияние на изменение pH среды. У всех образцов, выдержанных в кислоте и щелочи, в течение 2 часов не изменялись размеры, жесткость и цвет. Набухание не превышало 7,6 %. В тех же условиях у образцов ДСП набухание составило 15,4 %, наблюдались покоробленность и увеличение шероховатости поверхности. Таким образом,

полученные образцы ДПК по сравнению с образцами ДСП имеют хорошую устойчивость к агрессивным средам.

Воспламеняемость полученных образцов ДПК определяли их выдерживанием над открытым пламенем спиртовки (800 °С) до воспламенения образцов. Среднее значение этого показателя для всех образцов составило 25 с, в то время как образцы

ДСП воспламеняются уже при температуре 270 °С.

рН водной среды после двухчасовой выдержки образцов ДПК в ней устанавливали с помощью иономера АНИОН 4100. Изменения рН не наблюдалось.

Результаты определения показателей механических свойств образцов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Показатели механических свойств образцов

№ образца	Удельное сопротивление выдергиванию шурупов, Н/мм	Предел прочности при растяжении, МПа	Твердость по Виккерсу, МПа
1	54,75	0,51	20,00
2	186,75	1,26	46,50
3	133,51	1,02	50,67
4	62,25	0,50	21,57
5	161,25	1,30	70,64
6	180,25	0,90	44,33
7	60,00	0,35	27,18
8	55,30	0,30	29,66

У образцов ДПК удельное сопротивление выдергиванию шурупов находится в пределах 54,75–186,75 Н/мм. Наименьшие значения данного показателя характерны для образцов с ПЭВД, которые примерно равны удельному сопротивлению образцов ДСП.

Предел прочности при растяжении – 0,5–1,3 МПа; твердость – 20–70,64 МПа. По физико-механическим свойствам полученные опытные образцы ДПК всех составов соответствуют техническим требованиям и требованиям безопасности ГОСТ 10632-2007. Однако образцы ДПК, в состав которых входит ПЭВД, по техническим характеристикам уступают образцам с ПП и ПЭНД. Так, композиты с ПЭВД по значениям механических характеристик уступают композитам с ПЭНД больше чем в два раза, что, возможно, обусловлено более вы-

сокой кристалличностью и размерами кристаллов полиэтилена низкого давления.

Дальнейшие исследования по улучшению свойств древесно-наполненных полимерных композиционных материалов проводились в направлении комбинирования компонентного состава связующего ДПК. Были исследованы ДПК, в состав связующего которых входили два полимера (например, ПЭНД и ПП, ПП и ПЭТФ, ПЭНД и ПЭТФ) и три полимера (ПП, ПЭНД и ПЭТФ). Наилучшие механические и физические свойства показали четырехкомпонентные образцы ПП, ПЭНД и ПЭТФ с массовым соотношением 1:1:1 и использованием в качестве наполнителя хвойной целлюлозы фракции 3 мм. Результаты по определению показателей полученного ДПК представлены в табл. 3.

Таблица 3

Показатели физико-механических свойств образца состава ПЭНД – ПП – ПЭТФ – хвойная целлюлоза фракции 3 мм

Влажность, %	Водопоглощение, %	Плотность, кг/м ³	Удельное сопротивление выдергиванию шурупов, Н/мм	Предел прочности при растяжении, МПа	Твердость по Виккерсу, МПа
0,38	10,91	1852	126,75	1,05	44,3

Данные табл. 3 свидетельствуют о том, что четырехкомпонентный образец ДПК, в состав связующего которого входят от-

ходы ПЭ, ПП, ПЭТФ в массовом соотношении 1:1:1, по физико-механическим показателям удовлетворяет всем требованиям

ГОСТ 10632-2007, практически не уступает двухкомпонентным образцам, по многим показателям превосходит ДСП.

Заключение

Проведенные исследования физико-механических показателей ДПК позволили установить, что вторичные полимеры (полиэтилен высокого давления, полиэтилен низкого давления, полипропилен) могут быть использованы в качестве связующего в композитах с наполнителем хвойной целлюлозой фракций 2 и 3 мм. Соотношение наполнителя и связующего вещества – 1:1.

В качестве связующего ДПК возможно использование отходов двух и трех полимеров, а также некоторых сополимеров. Наилучшие результаты получены с использованием смеси ПЭ, ПП, ПЭТФ в массовом соотношении 1:1:1.

Производство ДПК позволит найти пути рационального применения полимерных отходов и неликвидных отходов деревообработки. ДПК предназначены для замены древесностружечных плит (ДСП), связующее которых при эксплуатации выделяет токсичный формальдегид.

Список литературы

1. Бодьян Л.А., Варламова И.А., Гирева Х.Я., Калугина Н.Л., Медяник Н.Л. Продукт химической деструкции полиэтилентерефталата как комплексный реагент для извлечения органической массы угля // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 2. – С. 700.
2. Гирева Х.Я., Гиревой Т.А. Изучение свойств продуктов химической деструкции ПЭТ // Общество, наука и инновации: сборник статей Международной научно-практической конференции: в 4-х частях.; отв. ред. А.А. Сукиасян. – Уфа, 2013. – С. 27-30.
3. Гирева Х.Я., Куликова Т.М., Шубина Н.И. Исследование возможности получения древесно-полимерного композита из полимерных отходов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2012. – Т. 1., № 70. – С. 324-326.
4. ГОСТ 10632-2007. Плиты древесностружечные. Технические условия. Введ. 01.01.09. – М.: Стандартинформ, 2007. – 12 с.
5. ГОСТ 10634-88. Плиты древесностружечные. Методы определения физических свойств. Введ. 01.05.91. – М.: Стандартинформ, 1990. – 6 с.
6. Медяник Н.Л., Калугина Н.Л., Варламова И.А., Гирева Х.Я., Бодьян Л.А. Получение смеси сложных эфиров терефталевой кислоты методом химической деструкции полиэтиленгликольтерефталата // Депонированная рукопись ВИНТИ № 223-B2013 01.08.2013.
7. Спрос на декинг будет расти. – URL: http://drevoplast.ru/110324_deking_rinok11-14.html (дата обращения 19.10.11).
8. Шубина Н.И., Гирева Х.Я. Композиционные материалы на основе вторичного полимерного сырья // Актуальные проблемы современной науки, техники, образования. – 2013. – Т. 1. № 71. – С. 282-285.
9. Шубина Н.И., Гирева Х.Я. Получение древесно-полимерного композиционного материала из вторичных полимеров и исследование его свойств // Техногенная и природная безопасность ТПБ – 2013: материалы II Всероссийской научно-практической конференции; под ред. Д.А. Соловьева. – Саратов, 2013. – С. 283-286.
10. Шубина Н.И., Гирева Х.Я. Утилизация полимерных отходов путем получения древесно-полимерного композиционного материала и исследование его свойств // Теория и технология металлургического производства. – 2012. № 12. – С. 156-161.

References

1. Bodyan L.A., Varlamova I.A., Girevaya X.Y., Kalugina N.L., Medyanik N.L. Produkt ximicheskoy destrukcii polietilentereftalata kak kompleksnyj reagent dlya izvlecheniya organicheskoy massy uglya // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. – 2014. № 2. – p. 700.
2. Girevaya X.Y., Girevoj T.A. Izuchenie svojstv produktov ximicheskoy destrukcii PET // Obshhestvo, nauka i innovacii: sbornik statej Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii: v 4-x chastyax; otv. red. A.A. Sukiasyan. – Ufa, 2013. – pp. 27-30.
3. Girevaya X.Y., Kulikova T.M., Shubina N.I. Issledovanie vozmozhnosti polucheniya drevesno-polimernogo kompozita iz polimernyx otxodov // Aktualnye problemy sovremennoj nauki, tekhniki i obrazovaniya. – 2012. – Т. 1. № 70. – pp. 324-326.
4. GOST 10632-2007. Plity drevesnostruzhechnye. Texnicheskie usloviya. Vved. 01.01.09. – М.: Standartinform, 2007. – 12 p.
5. GOST 10634-88. Plity drevesnostruzhechnye. Metody opredeleniya fizicheskix svojstv. Vved. 01.05.91. – М.: Standartinform, 1990. – 12 p.
6. Medyanik N.L., Kalugina N.L., Varlamova I.A., Girevaya X.Y., Bodyan L.A. Poluchenie smesi slozhnyx efirov tereftalevoj kisloty metodom ximicheskoy destrukcii polietilenglikoltereftalata // Deponirovannaya rukopis VINITI № 223-V2013 01.08.2013.
7. Spros na deking budet rasti. [Elektronnyj resurs] – Rezhim dostupa: http://drevoplast.ru/110324_deking_rinok11-14.html (data obrashheniya 19.10.11).
8. Shubina N.I., Girevaya X.Y. Kompozicionnye materialy na osnove vtorichnogo polimernogo syrya // Aktualnye problemy sovremennoj nauki, tekhniki, obrazovaniya. – 2013. – Т. 1. № 71. – pp. 282-285.
9. Shubina N.I., Girevaya X.Y. Poluchenie drevesno-polimernogo kompozicionnogo materiala iz vtorichnyx polimerov i issledovanie ego svojstv // Texnogennaya i prirodная bezopasnost TPB – 2013: materialy II Vserossiyskoj nauchno-prakticheskoy konferencii; pod red. D.A. Soloveva. – Saratov, 2013. – pp. 283-286.
10. Shubina N.I., Girevaya X.Ya. Utilizaciya polimernyx otxodov putem polucheniya drevesno-polimernogo kompozicionnogo materiala i issledovanie ego svojstv // Teoriya i texnologiya metallurgicheskogo proizvodstva. – 2012. № 12. – pp. 156-161.

УДК [331.4:622.271]:004.428.4

РАЗРАБОТКА НЕЧЕТКОЙ МОДЕЛИ В СРЕДЕ MATLAB FUZZY LOGIC TOOLBOX ДЛЯ ОЦЕНКИ УСЛОВИЙ ТРУДА НА РАБОЧИХ МЕСТАХ РАБОТНИКОВ ГОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Великанов В.С., Сафин Г.Г., Абдрахманов А.А., Шабанов А.А., Махмудова С.Н.,
Абдуллин Р.А., Тугузov А.С.

ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,
Магнитогорск, e-mail: rizhik_00@mail.ru

В статье выявлены вредные производственные факторы на рабочих местах операторов горных машин, занятых на открытой и подземной добыче полезных ископаемых, представлены методики по определению интегрального показателя условий труда. Реализована возможность практического использования возможностей нечеткого моделирования в среде MATLAB для оценки вредных условий труда на рабочих местах работников горной промышленности.

Ключевые слова: тяжесть труда, производственная среда, оператор, работоспособность, микроклимат, показатель, лингвистическая переменная

DEVELOPMENT OF FUZZY MODELS IN THE MATLAB FUZZY LOGIC TOOLBOX FOR ASSESSMENT OF WORKING CONDITIONS AT WORKPLACES OF WORKERS OF THE MINING INDUSTRY

Velikanov V.S., Safin G.G., Abdrakhmanov A.A., Shabanov A.A., Makhmudova S.N.,
Abdullin R.A., Tuguzov A.S.

Magnitogorsk State Technical University n.a. G.I. Nosov, Magnitogorsk, e-mail: rizhik_00@mail.ru

The article identified occupational hazards at the workplace operators mining machines employed in open pit and underground mining, presents the methodology to determine the integral indicator of working conditions. The possibility of practical use of the capabilities of fuzzy modeling in MATLAB to evaluate hazardous conditions at the workplace of workers of the mining industry.

Keywords: gravity, occupational environment, operator, availability, microclimate, metric, a linguistic variable

Условия труда как совокупность санитарно-гигиенических, психофизиологических элементов производственной среды оказывают непосредственное воздействие на здоровье и работоспособность человека. Наряду с производственными процессами и работами, характеризующимися относительным комфортом, есть еще и такие, где человеку приходится работать в неблагоприятных условиях.

Чтобы уменьшить воздействие вредных факторов производственной среды, необходима разработка комплекса мероприятий, позволяющих предотвратить резкое снижение работоспособности, возникновения профессиональных заболеваний и случаев производственного травматизма, с объективной оценкой влияния условий труда на человека. Наиболее полно характеризует это влияние категория тяжести работы, которая отражает совокупное воздействие всех элементов, составляющих условия труда, на работоспособность человека, его здоровье, жизнедеятельность. Понятие тяжести труда и напряженности одинаково применимо как к умственному, так и к физическому труду.

О степени тяжести труда можно судить по реакциям и изменениям в организме человека, которые служат показателями качества условий труда [1–3].

В табл. 1 приведены категории оценки условий труда на рабочих местах.

При определении интегрального показателя в расчет принимаются биологически значимые элементы условий труда, вызывающие пограничные и патологические изменения и реакции организма работающего. Интегральный показатель категории тяжести труда определяется по формуле

$$I_m(K_{\Sigma_{KT}}) = 10 \left[K_{on} + \left(L \frac{6 - K_{on}}{6} \right) \right], \quad (1)$$

где $I_m(K_{\Sigma_{KT}})$ – интегральный показатель категории тяжести труда; K_{on} – определяющий («ведущий», имеющий наибольший балл) элемент условий труда на рабочем месте; L – средняя арифметическая из суммы всех биологически значимых элементов условий труда, исключая определяющий.

Таблица 1

Категории оценки условий труда на рабочих местах по санитарно-гигиеническим факторам

Оценка факторов условий труда, баллы	Температура воздуха, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с	Токсичные вещества (кратность превышения ПДК)	Промышленная пыль (кратность превышения ПДК)	Вибрация, уровень колебательной скорости (кратность превышения ПДУ)	Шум, уровень звука, дБА
1	18–20	40–54	<0,2	<0,8	<0,8	<1,0	<68
2	21–22	55–60	0,2–0,5	0,8–1,0	0,8–1,0	1,00–1,075	68–85
3	23–28	61–75	0,6–0,7	1,0–2,5	до 5	1,075–1,17	86–90
4	29–32	76–85	0,8–1,2	2,5–4,0	до 10	1,170–1,23	91–99
5	33–35	>85	1,3–1,7	4,0–6,0	до 50 (вкл.)	1,230–1,44	100–110
6	>35	–	>1,7	>6,0	>50	>1,440	>110

При работе операторов горных машин сочетаются виды деятельности различной степени тяжести и напряженности трудового процесса. В работе [4] произведена оценка показателей условий труда машинистов экскаваторов с учетом особенностей условий труда на постоянном рабочем месте в кабине экскаватора (табл. 2). Предлагаемая система оценок не является нормативной.

Категория тяжести труда машиниста экскаватора определяется в зависимости от величины интегральной количественной оценки U_T , которая рассчитывается по формуле

$$U_T = 19,7\bar{x}_j - 1,6\bar{x}^2, \quad (2)$$

где $\bar{x}$ – средняя арифметическая балльная оценка единичных показателей, формирующих тяжесть труда.

$$x_j = \sum_{j=1}^n x_{j\sigma} k_{j\sigma} / n, \quad (3)$$

где $x_{j\sigma}$, $k_{j\sigma}$ – оценка в баллах и коэффициент весомости j -го биологически значимого показателя условий труда соответственно; n – число показателей. За биологически значимые показатели принимаем те, у которых произведение $x_{j\sigma} k_{j\sigma} \geq 1,5$.

По величине интегрального показателя условиям труда (работе) присваивается та или иная категория тяжести труда (табл. 3).

Таблица 2

Карта аттестации рабочего места машиниста экскаватора

Показатели	Оценка в баллах					
	1	2	3	4	5	6
Микроклимат: ППНМ, %	≤5	6–17	18–36	37–62	63–80	>80
Температура воздуха, °С:						
теплый	18–20	21–22	23–28	20–32	33–35	>35
холодный	20–22	17–19	15–16	7–14	–	–
Запыленность (кратность превышения ПДК)	<ПДК	ПДК	≤5	6–10	11–30	>30
Эквивалентный уровень звука, дБА	<75	75–80	81–85	86–95	>95	>95+ вбр
Освещенность забоя карьерных экскаваторов, лк	75	30	10	10	<5	<2

Таблица 3

Показатели условия труда

Интегрально количественная оценка	≤18	18–33	34–45	46–53	54–59	60
Индекс категорий тяжести труда	I	II	III	IV	V	VI

В работе [5] проведены исследования по оценке влияния вредных производственных факторов на профессиональную заболеваемость в угольной отрасли. Условия труда в угольных шахтах характеризуются целым рядом факторов, оказывающих вредное влияние на организм человека. К ним относятся: рудничная пыль, шум, вибрация, резкие перепады температур, повышенная влажность воздуха и другие. В угольной промышленности 61 % рабочих мест по условиям труда не соответствуют санитарным нормам по одному или нескольким факторам. Отмечено превышение санитарных норм на рабочих местах по запыленности (58,4 %), шуму (55,7 %), вибрации (28,5 %), влажности (14,9) и температуре воздуха (15,0 %). Процедура установления профессионального заболевания сопряжена с большими техническими сложностями в случае, когда влияние вредного производственного фактора было продолжительным и не существует документальной возможности получить достоверную картину условий труда, подтверждающих производственную вред-

ность и степень ее влияния на организм работника.

Исследования по оценке состояния условий труда по степени вредности и опасности осуществлялись в соответствии с Руководством Р 2.2.755-99 на основе сопоставления результатов измерений вредных и опасных факторов производственной среды, тяжести и напряженности трудового процесса с установленными для них гигиеническими нормативами (табл. 4). На базе таких сопоставлений сначала определялся класс условий труда для каждого фактора, затем для их комбинаций и сочетаний и далее устанавливалась общая гигиеническая оценка условий труда на данном рабочем месте. Для идентификации опасных и вредных факторов и оценки рисков возникновения профзаболеваний автором в работе [5] разработаны и предложены экспресс-методика оценки напряженности и тяжести трудового процесса, Каталог условий труда работников подземной группы угольных шахт и Каталог показателей значимости основных вредных и опасных производственных факторов.

Таблица 4

Опасные и вредные производственные факторы на рабочих местах в угольной отрасли

Наименование ВОПФ	Горнорабочий очистного забоя	Машинист выемочных машин (в очистном забое)	Горнорабочий подземный	Проходчик	Машинист выемочных машин (в проходческом забое)
Тяжесть трудового процесса	3.1–3.3	3.2	3.1–3.3	3.2–3.3	3.2–3.3
Микроклимат, С	3.1–3.3 18–26/10–16**	3.1–3.3 18–26/10–16	3.1–3.3 18–25/10–16	3.1–3.3 19–25/10–17	3.1–3.3 19–26/10–18
Искусственное освещение, лк	2–3.1 2–10/2–20	2 5/6–12	3.1–3.2 1–10/1–15	2–3.1 (2–5)/1–8	3.1 5–10/2–5
Шум (рассчитанный эквивалентный уровень), дБА	3.2 80/89–93	3.2 80/90–95	2–3.2 80/72–87	3.2 80/87–94	3.2 80/88–92
АПДФ, средне-сменная концентрация, мг/м³	3.3–3.4 10/59,2–305,8	3.3–3.4 10/61,5–17,8	3.1–3.3 (4;6; 10)/2,5–32,9	3.3–3.4 (2;4; 10)/55,6–240,8	3.3–3.4 (2;4; 10)/52,3–162,6
Вибрация локальная, дБ	–	–	–	3.3 (112/112)/(118–121/118–120)	2 (112/112)/104–110/102–109)
Общий класс условий труда	3.4	3.3–3.4	3.3	3.3–3.4	3.3–3.4

*здесь и далее диапазон значений классов условий труда по данному фактору;

**в числителе приведен диапазон изменения классов условий труда по вредному производственному фактору; в знаменателе – значения ПДК(ПДУ) / фактический диапазон значений фактора.

Классы условий труда определяются исходя из гигиенических критериев, условия труда подразделяются на четыре класса: оптимальные, допустимые, вредные и опасные [3]:

- оптимальные условия труда (1 класс);
- допустимые условия труда (2 класс);
- вредные условия труда (3 класс) – характеризуются наличием вредных факторов, подразделяются на 4 подкласса;
- опасные (экстремальные) условия труда (4 класс) – характеризуются уровнями факторов рабочей среды, воздействие которых в течение рабочей смены (или ее части) создает угрозу для жизни, высокий риск развития острых профессиональных поражений, в т.ч. и тяжелых форм.

В представленных методиках оценка условий труда выполняется поэтапно.

На конкретном рабочем месте устанавливается перечень всех факторов формирующих условия труда.

По справочному приложению фактору присваивается соответствующий балл с учетом времени его воздействия.

Рассчитывается по формуле интегральная оценка элементов условий труда и определяется категория тяжести труда.

Определяется прогнозируемый рост работоспособности и производительности труда до и после внедрения мероприятий по улучшению условий труда.

Определяется динамика изменения производственного травматизма за счет внедрения мероприятий по улучшению условий труда.

Для упрощения процедуры по оценке показателей условий труда и влияния вредных факторов нами предлагается использование нечетко-множественного подхода, базирующегося на конкретных количественных и качественных характеристиках показателей, реально воздействующих на работника на конкретном рабочем месте (на примере ЭКГ) [6–10].

В соответствии с представленными в табл. 1, 2 санитарно-гигиеническими факторами за основу в разработке системы нечеткого вывода были определены – температура воздуха, влажность воздуха, скорость движения воздуха и уровень шума (звука). Разработка системы производилась в математической системе *MATLAB* с использованием *Fuzzy Logic Toolbox* (пакет нечеткой логики). Процесс построения функций принадлежности термов лингви-

стических переменных, характеризующих санитарно-гигиенические факторы, основан на их количественных значениях, определенных нормативной документацией. Нами использован алгоритм нечеткого вывода, предложенный английским математиком Е. Мамдани, который определен следующим образом:

1. Формирование базы правил систем нечеткого вывода.
2. Фаззификация входных переменных.
3. Агрегирование подусловий в нечетких правилах продукций.
4. Активизация подзаключений в нечетких правилах продукций.
5. Аккумуляция заключений в нечетких правилах продукций.
6. Дефаззификация выходных переменных.

Для параметра «температура воздуха» лингвистическая переменная представлена в виде:

$$\xi_1 - \text{«температура»} = (<\text{оптимальная, средняя, высокая}> [18 - 38^\circ\text{C}], G, M),$$

где *G* – процедура образования новых термов с использованием связок «и», «или» модификаторов типа «очень», «не», «более» и других, а *M* – процедура задания на области определения $X = [18 - 38^\circ\text{C}]$ нечетких переменных; =<оптимальная>, =<средняя>, =<высокая>, а также соответствующих нечетких множеств термов из *G* (*T*) в соответствии с порядком трансляции нечетких связок и модификаторов (рис. 1).

Вторая входная лингвистическая переменная «влажность воздуха» задается аналогично (рис. 2) и имеет вид

$$\xi_2 - \text{«влажность»} = (<\text{низкая, средняя, высокая}>, [30 - 100\%]).$$

Третья входная лингвистическая переменная «скорость движения воздуха» (рис. 3) формализуется в виде

$$\xi_3 - \text{«скорость движения воздуха»} = (<\text{малая, средняя, высокая}>, [0 - 2 \text{ м/с}]).$$

Четвертая входная лингвистическая переменная «уровень шума (звука) в кабине машиниста ЭКГ» (рис. 4) формализуется в виде:

$$\xi_4 - \text{«уровень шума»} = (<\text{малый, средний, высокий}>, [0 - 120 \text{ дБА}]).$$

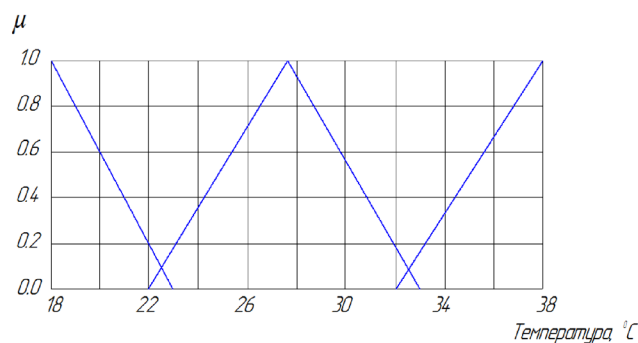


Рис. 1. График функций принадлежности соответствующих термов входной лингвистической переменной «температура воздуха»

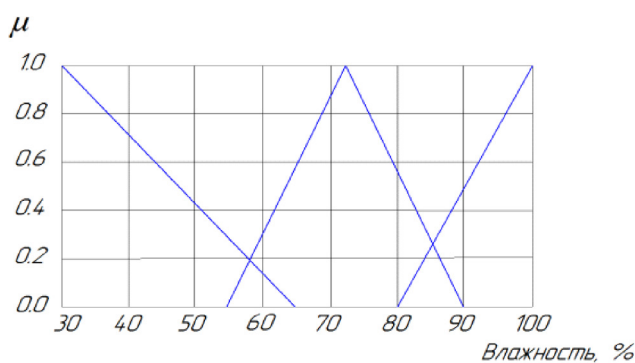


Рис. 2. График функций принадлежности соответствующих термов входной лингвистической переменной «влажность воздуха»

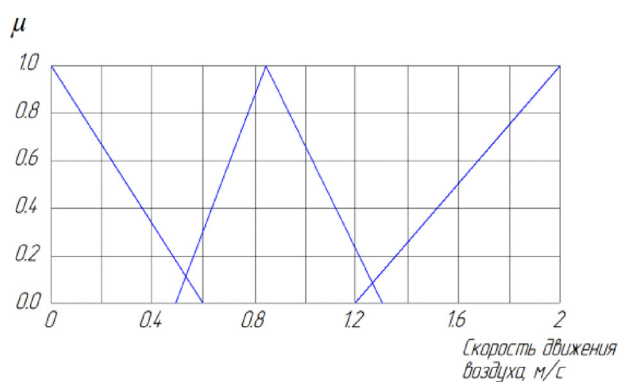


Рис. 3. График функций принадлежности соответствующих термов входной лингвистической переменной «скорость движения воздуха»

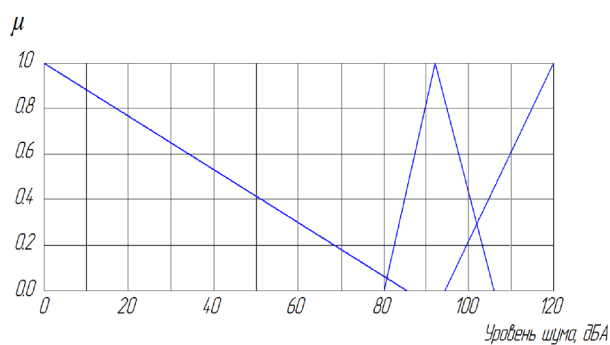


Рис. 4. График функций принадлежности соответствующих термов входной лингвистической переменной «уровень шума»

Для задания выходной лингвистической переменной необходимо дать следующее пояснение. На основе работ Всесоюзного научно-исследовательского института технической эстетики (ВНИИТЭ) установлена концепция структурной схемы эргономических показателей карьерных экскаваторов. Обитаемость на рабочем месте является одним из основных показателей, входящим в данную схему. Она характеризуется – запыленностью; уровнем шума; уровнем вибрации на сиденье машиниста; параметрами микроклимата; освещенностью забоя; санитарно-бытовым обеспечением и т.п.

Поэтому считаем целесообразным в качестве обобщенной характеристики по оценке состояния условий труда использование в качестве выходной лингвистической переменной – «обитаемость», которая может быть задана в виде

ω – «обитаемость» = (<плохая, средняя, хорошая>, [0 – 100 %]).

Оценка адекватности построенной системы нечеткого вывода для определения уровня обитаемости в кабине машиниста экскаватора, для частного случая, когда текущая температура воздуха в кабине будет составлять 24 °C, влажность воздуха – 60 %, скорость движения воздуха равна 0,8 м/с и уровень шума равен 80 дБА. В результате процедуры нечеткого вывода значение выходной переменной «обитаемость» составит 56,4 %. Полученное значение обитаемости говорит о средней комфортности работы машиниста в кабине экскаватора.

Вывод

Таким образом, в созданной модели упрощена процедура по оценке показателей условий труда и влияния вредных факторов на рабочих местах операторов горных машин. Использование в нечеткой модели действительных значений факторов, оказывающих вредное влияние на конкретном рабочем месте, позволит оперативно разработать и внедрить комплекс мероприятий по улучшению условий труда, а также сократить время при обеспечении сопоставимости результатам, полученным при проведении аттестации рабочих мест по условиям труда.

Список литературы

1. Эргономика: учеб. пособие для вузов / под общ. ред. В.В. Адамчука. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 1999. – 254 с.
2. Безопасность жизнедеятельности: Учебник для вузов / под общ. ред. С.В. Белова. 2-е изд., испр. и доп. – М.: Высш. шк., 1999. – 448 с.
3. Воронова В.М., Егел А.Э. Определение категории тяжести труда: Методические указания к дипломному проектированию. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2004. – 18 с.
4. Головин В.С. Эргономика горнорудного оборудования. – М.: Недра, 1990. – 183 с.
5. Фомин А.И. Методологические принципы управления риском профессиональных заболеваний на угольных шахтах Кемеровской области: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Кемерово: КузГТУ, 2008. – 41 с.
6. Великанов В.С. Использование нечеткой логики и теории нечетких множеств для управления эргономическими показателями качества карьерных экскаваторов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: Горная книга, 2010. – № 9. – С. 57-62.
7. Шабанов А.А., Великанов В.С. Разработка нечеткой системы управления функциональным комфортом на рабочем месте оператора горной машины // Промышленная безопасность и охрана труда: Сборник статей. Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня. – М.: Горная книга, 2012. – ОВ №6. – С. 64-70.
8. Великанов В.С. Разработка алгоритмов нечеткого моделирования для интеллектуальной поддержки принятия решений по определению уровня эргономичности карьерных экскаваторов // Горная промышленность. 2011. – № 5. – С. 64-70.
9. Великанов В.С., Шабанов А.А. Эргономическая экспертиза элементов системы «человек – карьерный экскаватор – среда» // Промышленная безопасность и охрана труда на предприятиях топливно-энергетического комплекса: Сборник статей. Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня. – М.: Горная книга, 2011. – ОВ №9. – С. 148-155.
10. Velikanov V.S. Evaluation and management ergonomic mining machines and complexes based on fuzzy-set approach // European Science and Technology: 4th International scientific conference. – Munich 2013. – pp. 370-377.

References

1. Bezopasnost zhiznedeyatel'nosti: Uchebnik dlya vuzov / pod obshch. red. S.V. Belova. 2-e izd., ispr. i dop. – M.: Vyssh. shk., 1999. – 448 p.
2. Voronova V.M., Egel A.E. Opredelenie kategorii tyazhesti truda: Metodicheskie ukazaniya k diplomnomu proektirovaniyu. – Orenburg: GOU OGU, 2004. – 18 p.
3. Velikanov V.S. Ispolzovanie nechetkoy logiki i teorii nechetkikh mnozhestv dlya upravleniya ergonomicheskimi pokazatelyami kachestva karernykh ekskavatorov // Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten. – M.: Gornaya kniga, 2010. – № 9. – pp. 57-62.
4. Velikanov V.S., Shabanov A.A. Ergonomicheskaya ekspertiza elementov sistemy «chelovek – karernyy ekskavator – sreda» // Promyshlennaya bezopasnost i okhrana truda na predpriyatiyakh toplivno-energeticheskogo kompleksa: Sbornik statey. Otdelnyy vypusk Gornogo informatsionno-analiticheskogo byulletenya. – M.: Gornaya kniga, 2011. – ОВ №9. – pp. 148-155.
5. Golovin V.S. Ergonomika gornorudnogo oborudovaniya. – M.: Nedra, 1990. – 183 p.
6. Velikanov V.S. Razrabotka algoritmov nechetkogo modelirovaniya dlya intellektualnoy podderzhki prinyatiya resheniy po opredeleniyu urovnya ergonomichnosti karernykh ekskavatorov // Gornaya promyshlennost. 2011. – № 5. – pp. 64-70.
7. Fomin A.I. Metodologicheskie printsipy upravleniya riskom professional'nykh zabolevaniy na ugolnykh shakhtakh Kemerovskoy oblasti: Avtoref. dis. doktora tekhn. nauk. – Kemerovo: KuzGTU, 2008. – 41 p.
8. Shabanov A.A., Velikanov V.S. Razrabotka nechetkoy sistemy upravleniya funktsionalnym komfortom na rabochem meste operatora gornoy mashiny // Promyshlennaya bezopasnost i okhrana truda: Sbornik statey. Otdelnyy vypusk Gornogo informatsionno-analiticheskogo byulletenya. – M.: Gornaya kniga, 2012. – ОВ №6. – pp. 64-70.
9. Ergonomika: ucheb. posobie dlya vuzov / pod obshch. red. V.V. Adamchuka. – M.: YUNITI-DANA, 1999. – 254 p.
10. Velikanov V.S. Evaluation and management ergonomic mining machines and complexes based on fuzzy-set approach // European Science and Technology: 4th International scientific conference. – Munich, 2013. – pp. 370-377.

УДК 631.664.8.039.51

ПОЛУЧЕНИЕ КОМПОЗИТНОЙ СМЕСИ ПОРОШКОВ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

¹Волончук С.К., ¹Мотовилов К.Я., ²Ломовский И.О.¹Сибирский научно-исследовательский и технологический институт переработки сельскохозяйственной продукции РАН, Новосибирск, e-mail: volonchuk 2015@yandex.ru;²Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск, e-mail: lomovsky@solid.nsc.ru

Неблагоприятные экологические факторы, изменение образа жизни и работы, рост заболеваемости людей на этом фоне, диктуют необходимость коррекции состава пищевых продуктов, в первую очередь повседневного пользования. В статье приведены результаты теоретических исследований получения композитной смеси мелкодисперсных порошков для обогащения биологически активными веществами пищевых продуктов ежедневного употребления, переходящих в категорию продуктов функционального назначения. Приводится принцип отбора ингредиентов смеси порошков и физико-механический способ их получения. Для расчета состава композитной смеси использована компьютерная программа linprog для MATLAB. Ограничением при расчете является суточная норма потребления физиологически активных веществ.

Ключевые слова: свекла, функциональные пищевые продукты, бетани, порошковые продукты, инфракрасное излучение (ИК), мельница, компьютерная программа

THE METHOD OF GETTING COMPOSITE FOOD POWDER WITH FUNCTIONAL PURPOSE

¹Volonchuk S.K., ¹Motovilov K.Y., ²Lomovskiy I.O.¹Siberian research and technology institute of agricultural production processing, Novosibirsk, e-mail: volonchuk 2015@yandex.ru;²Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry, Novosibirsk, e-mail: lomov@solid.nsc.ru

Adverse environmental factors, lifestyle changes and work, increase disease rates people on this background, dictate the necessity of correction of the composition of the food, first and foremost, everyday use. In the article the results of theoretical researches of getting composite finedispersed powders mixes for enrichment of food products of everyday consumption with biologically active substances are represented. Therefore, the developed food products will serve as functional. Provides a selection of ingredients of a mixture of powders and physico-mechanical the way they are received. For the calculation of composition of composite mixture the computer program of linprog is used for MATLAB. Limitations at a calculation is day s norm of consumption physiologically of active substances.

Keywords: beta, functional food products, betaine, powder products, infrared (IR) radianon, mill, computer program

В последние десятилетия технологии производства пищевых продуктов повседневного пользования позволяют получать их большой ассортимент, но погоня за количеством, безопасностью при длительном хранении и прибылью привела к обеднению этих продуктов некоторыми биологически активными веществами. Утрачен главный принцип пищевых продуктов – они должны содержать естественный набор ингредиентов, данных природой, к которым человеческий организм приспособился за тысячи лет своего существования.

Неблагоприятные экологические факторы, изменение образа жизни и работы, рост заболеваемости людей на этом фоне, диктуют необходимость коррекции состава пищевых продуктов, в первую очередь повседневного пользования. Это достигается известными приемами путем обогащения их недостающими витаминами, макро- и микроэлементами и другими, вновь

открываемыми биологически активными веществами.

В настоящее время пищевыми продуктами функционального питания считаются продукты, обогащенные физиологически функциональными пищевыми ингредиентами, способствующими улучшению здоровья человека. Пищевые волокна, липиды, содержащие полиненасыщенные жирные кислоты, полезные виды живых молочнокислых бактерий, в частности бифидобактерии и необходимые для их питания олигосахариды, также относятся к этим ингредиентам [5].

Основные принципы повышения пищевой ценности продуктов питания были сформулированы зарубежными и отечественными учеными на основе многолетнего опыта по разработке, производству, использованию и оценке эффективности обогащения пищевых продуктов в нашей стране и за рубежом [1]:

– использовать те микронутриенты, дефицит которых реально имеет место, достаточно широко распространен и безопасен для здоровья;

– количество витаминов и минеральных веществ, вносимых в обогащаемые продукты, должно быть рассчитано с учетом их возможного естественного содержания в исходном продукте или сырье, используемом для его изготовления, а также с учетом потерь в процессе производства и хранения с тем, чтобы обеспечить содержание этих витаминов и минеральных веществ на уровне не ниже регламентируемого в течение всего срока годности;

– регламентируемое или гарантируемое содержание витаминов и минеральных веществ в обогащенном ими продукте питания должно быть достаточным для удовлетворения 30–50 % средней суточной потребности в этих микронутриентах при обычном уровне потребления.

Так как все требования учесть в одном продукте невозможно, то нужно выделить основные. Прежде всего, это синергизм ингредиентов, позволяющий усилить действие главного компонента для достижения поставленной цели. Так же необходимо принимать во внимание возможный антагонизм ингредиентов.

В результате изучения научно-технической литературы и данных собственных исследований выявлено следующее.

1. Для улучшения гомоцистеина крови и усвояемости животных белков большое значение в питании человека имеет бетаин, содержащийся в больших количествах в свекле столовой и рекомендуемый в России по нормам для взрослого здорового человека в количестве 3–6 г в сутки [3].

2. Сушка овощей методом обезвоживания с помощью инфракрасного излучения обеспечивает при снижении энергозатрат, по сравнению с другими видами сушки, получение качественных, с высоким содержанием БАВ (до 60–100 %) сухих растительных продуктов. Обсемененность таких продуктов санитарно-показательными микроорганизмами и плесневыми грибами значительно ниже установленных СанПиН. Это позволяет данный вид сушки использовать для разработки способа получения из растительного сырья пищевых порошкообразных добавок функционального назначения – ингредиентов композитной смеси.

3. Установлена возможность повышения концентрации полезных природных веществ в тонкоизмельченных растительных порошках, используемых для создания новых видов комбинированных продуктов, которым можно придать желаемые функциональные свойства.

4. Получать тонкоизмельченные порошки без химической деградации растительного сырья можно измельчением в мельнице с регулируемой интенсивностью ударного воздействия [6].

Цель исследования. Целью исследования является разработка рецептуры смеси с максимальной физиологической активностью, способствующей улучшению гомоцистеина крови.

В настоящее время существуют различные способы создания комбинированных продуктов питания, основанные на принципах, позволяющих достигать поставленной цели. Разработаны различные методики создания алгоритмов для линейного программирования рассматриваемого процесса, с последующим компьютерным моделированием смеси с выделением значимых факторов (ингредиентов) [4]. При этом неизменно общим для всех является экспертная оценка ингредиентов, входящих в смесь.

Наиболее простым, малозатратным и отвечающим всем вышеописанным требованиям, на наш взгляд, является метод автоматизированного проектирования сложных многокомпонентных продуктов питания [2].

Материалы и методы исследования

В соответствии с изложенными выше требованиями были отобраны ингредиенты смеси с ограничениями: свекла, отруби пшеничные, семя льна с суточной нормой потребления физиологически активных веществ не менее: бетаина – 1000 мг, витамина B6 – 5 мг, магния – 400 мг. Витамин B6 и магний усиливают действие бетаина в улучшении гомоцистеина крови и профилактике сердечно-сосудистых заболеваний.

Ингредиенты перед смешиванием прошли подготовку. Из корнеплодов свеклы после мойки и грубого измельчения была удалена влага методом инфракрасной сушки. Из семени льна также методом инфракрасной сушки была удалена влага. Затем все три компонента были измельчены в центробежной роликовой мельнице проточного типа с регулируемой интенсивностью ударного воздействия, разработанной и изготовленной в ИХТТМ, которая позволяет получать мелкодисперсный порошок без химической деградации растительного сырья.

Для автоматизированного компьютерного моделирования смеси провели соответствующую подготовку вводных данных.

Задаем ограничения диапазона возможного варьирования (%) выбранных компонентов смеси – свёклы, пшеничных отрубей, льняного семени с указанием содержания сухих веществ порошко-

образных компонентов смеси (%). Варианты сводим в табл. 1.

Составляем табл. 2 с указанием количества физиологически ценных БАВ [3] в выбранных компонентах смеси.

Таблица 1
Содержание сухих веществ компонентов смеси с физиологической ценностью

Рецептурные компоненты	Возможный диапазон варьирования компонентов, %	Содержание сухих веществ, %
Свёкла	30–80	90
Пшеничные отруби	42–80	85
Семя льна	10–20	93

Таблица 2
Физиологическая ценность рецептурных компонентов

Перечень витаминов, микроэлементов, пищевых веществ (БАВ)	Количество витаминов, микроэлементов, пищевых веществ, мг/100 г		
	Порошок свёклы	Порошок пшеничных отрубей	Порошок семени льна
Бетаин	945	1336	0
Витамин В6	0,45	2,0	0,61
Магний	132,0	400	431
Итого	1077,45	1738,0	431,61

Требуется найти искомые значения X_1 – массовой доли порошка свёклы, X_2 – массовой доли порошка пшеничных отрубей, X_3 – массовой доли порошка семени льна, при которых $F(x) = \max \{1077,45 X_1 + 1738,0 X_2 + 431,61 X_3\}$ при соблюдении ограничений, указанных в табл. 1, и требований методики рационального питания [3].

Результаты исследования и их обсуждение

Температура ИК обработки сырья не более 65 °С, что обеспечивает сохранность БАВ. Путем измельчения сушеных кусочков свеклы, пшеничных отрубей и льняного семени получили порошки с размером частиц 120–140 мкм, т.е. большее число частиц имеет тонкое и сверхтонкое измельчение.

В результате решения задачи с помощью *linprog* для пакета МАТЛАВ находим численные значения $X_1 = 80\%$, $X_2 = 11,5\%$, $X_3 = 8,5\%$, в сумме $\Sigma X = 100\%$, что подтверждает правильность решения задачи.

Полученные процентные соотношения компонентов смеси легко переводятся в массовые доли порошков в граммах, необходимых и достаточных для суточного их потребления. Таким образом, в результате приведенных расчетов получены теорети-

ческие численные значения процентного содержания порошков свеклы, пшеничных отрубей и семени льна в проектируемой композитной смеси, которую планируется использовать для улучшения гомоцистеина крови.

Выводы

Результаты исследования показывают, что предложенный метод отличается простотой, дает достоверный результат и может быть использован для разработки композитных смесей, содержащих физиологически функциональные компоненты в составе рецептур новых функциональных пищевых продуктов, способствующих улучшению здоровья человека.

Список литературы

1. Кухаренко А.А., Богатырев А.Н., Короткий В.М., Дадашев М.Н. Научные принципы обогащения пищевых продуктов микронутриентами // Пищевая промышленность. – 2008. – №5. – С.7.
2. Муратова Е.И., Толстых С.Г., Дворецкий С.И. и др. Автоматизированное проектирование сложных многокомпонентных продуктов питания: учеб. для вузов. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2011. – 80 с.
3. Рациональное питание. Рекомендуемые уровни потребления пищевых и биологически активных веществ. Ме-

тодика N MP 2.3.1.1915-04. Главный государственный санитарный врач РФ. 2.07.2004 г.

4. Стабровский С.А. Разработка и товароведная оценка многокомпонентных смесей для хлебопекарного производства: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Кемерово, 2006. – 21 с.

5. Тутельян В.А. Биологически активные добавки к пище – реальный путь улучшения здоровья // Медицинский курьер. – 1998. – № 3-4. – С. 48–51.

6. Lomovsky O., Lomovsky I. Mechanochemically Assisted Extraction / Enhancing Extraction Processes in the Food Industry, ed. by N. Lebovka, E. Vorobiev, F. Chemat, NY – London: CRC Press. 2011. – P. 361–398.

References

1. Kuxarenko A.A., Bogatyrev A.N., Korotkij V.M., Dadashev M.N. Nauchnye principy obogashheniya pishhevyykh produktov mikronutrientami // Pishhevaya promyshlennost. – 2008. №5. – p. 7.

2. Muratova E.I., Tolstykh S.G., Dvoreckij S.I. i dr. Avtomatizirovannoe proektirovanie slozhnykh mnogokomponentnykh produktov pitaniya: ucheb. dlya vuzov. – Tambov: Izd-vo FGBOU VPO «TGTU», 2011. – 80 p.

3. Racionalnoe pitanie. Rekomenduemye urovni potrebleniya pishhevyykh i biologicheskii aktivnykh veshchestv. Metodika N MP 2.3.1.1915-04. Glavnyj gosudarstvennyj sanitarnyj vrach RF. 2.07.2004.

4. Stabrovskij S.A. Razrabotka i tovarovednaya ocenka mnogokomponentnykh smesey dlya xlebopekarnogo proizvodstva: avtoref. dis. ... kand. texn. nauk. – Кемерово, 2006. – 21 p.

5. Tutelyan V.A. Biologicheskii aktivnye dobavki k pishhe – realnyj put uluchsheniya zdorovya // Medicinskij kurer. – 1998. – № 3-4. – pp. 48–51.

6. Lomovsky O., Lomovsky I. Mechanochemically Assisted Extraction / Enhancing Extraction Processes in the Food Industry, ed. by N. Lebovka, E. Vorobiev, F. Chemat. – NY – London: CRC Press. 2011. – pp. 361–398.

УДК 629.7

МИКРО-БЛА С ВИБРОПРЕДКРЫЛКОМ**Воронков Ю.С., Воронков О.Ю.***ОНТТЭ «Ювенал», Таганрог, e-mail: yuven@mail.ru*

Как известно, ряд научно-исследовательских учреждений и конструкторских организаций США и других стран, совершенствуя БЛА, подошли к решению задач их создания на новой элементной базе с повышением их тактико-технических возможностей, что позволило существенно уменьшить их размеры. Таким образом, был совершен революционный прорыв в вопросах создания беспилотных летательных аппаратов нового класса – микро-беспилотных летательных аппаратов (Micro Air Vehicles, MAVs), или микро-БЛА, в которых заложены новые принципы организации связи, навигации и управления, а также создана качественно новая миниатюрная целевая нагрузка, поставляющая необходимую информацию для потребителей. По мнению западных специалистов, микро-БЛА прежде всего должны служить военной сфере применения и входить в амуницию бойца. При необходимости проведения разведки аппарат должен запускаться с помощью несложной пусковой установки и передавать изображение на дисплей, находящийся в руках бойца, в том числе демонстрируя обстановку внутри зданий и сооружений, куда они способны проникать.

Ключевые слова: микро-беспилотные летательные аппараты, вооруженные силы, разведка, аэродинамические характеристики

MICRO-UAV WITH VIBRO SLAT**Voronkov Y.S., Voronkov O.Y.***ONTTE «Juvenal», Taganrog, e-mail: yuven@mail.ru*

As we know, a number of research institutions and design organizations in the US and other countries, improving UAV came to solving problems of their creation on new element base with an increase in their tactical and technical capabilities, which will significantly reduce their size. Thus, the breakthrough was made in the establishment of UAVs new class – the micro-UAVs (Micro Air Vehicles, MAVs), or micro-UAVs, which are laid in the new principles of communication, navigation and control, as well as to create a quality new miniature target load, which supplies the necessary information to consumers. According to Western experts, micro-UAVs primarily to serve military applications and enter the ammunition fighter. When the need for intelligence apparatus must be run using a simple launcher and transmit the image on the display, which is in the hands of a soldier, including showing the situation inside the buildings, where they are able to penetrate.

Keywords: micro-drones, military, intelligence, aerodynamic characteristics

В настоящее время беспилотные летательные аппараты (БЛА) активно используются практически во всех вооруженных конфликтах с участием армий развитых стран. Широкое внедрение таких летательных аппаратов отвечает концепциям повышения автоматизации управления подразделениями и частями с целью сокращения потерь личного состава.

Опыт боевых действий в локальных конфликтах последних лет, а также условия их ведения показали потребности повышения информационного обеспечения наземных войск тактического уровня. Исследования, проведенные в ряде стран, показывают важность обладания информацией для войсковых соединений, в том числе тактических единиц уровня взвода. Средствами, поставляющими информацию такого рода, в отличие от средств разведки с более высоким уровнем характеристик, подобно спутникам и высотным БЛА, будут являться микро-БЛА.

Микро-БЛА позволят во многих операциях исключить или значительно уменьшить боевые потери. Разведывательный

комплекс, построенный на использовании микро-БЛА, будет служить для обеспечения командира на поле боя воздушной разведывательной информацией о текущей обстановке в его зоне ответственности. Использование таких комплексов позволит обходиться без заявок на разведку в вышестоящий штаб, связанный с авиационными полками, оснащенными пилотируемыми самолетами-разведчиками.

Возможное использование микро-БЛА

Таким образом, можно прогнозировать для микро-БЛА дальнейшее их использование в качестве малоуязвимого, малозаметного и малозаметного средства ведения разведки. Это средство особенно эффективно при ведении боевых действий в городских условиях. Оно, помимо наблюдения обстановки, может применяться для целеуказания, обнаружения элементов химического и биологического оружия, ретрансляции сигналов радиосвязи, минирования труднодоступных объектов. Не исключена возможность группового применения микро-БЛА

для подготовки операций десантирования с воздуха и морского десантирования. Возможно использование микро-БЛА в ВВС для корректировки точечных ударов с воздуха по объектам ликвидации. При этом не исключена групповая доставка микро-БЛА в зону боевых действий в специальных скоростных носителях с последующим их отделением от носителей на малых скоростях для рассредоточения над зоной нанесения воздушного удара.

Применение микро-БЛА в гражданском секторе экономики возможно для контроля радиационной обстановки в зонах АЭС, мониторинга лесных, степных массивов, труднодоступных зон земледелия, для обнаружения пожаров и содействия в их ликвидации и т.д.

Особенности аэродинамики микро-БЛА

Теория полета управляемых объектов с размерами птиц или больших насекомых, каковыми являются микро-БЛА, значительно сложнее теории пилотируемого самолета. Это является результатом того, что микро-БЛА летают в так называемой области критических чисел Рейнольдса (Re_k) (рис. 1). Указанный диапазон чисел Re соответствует диапазону чисел Re авиамodelей, что позволяет использовать ряд положений теории полета летающих моделей, в том числе основы физики кризисных явлений при обтекании воздушной средой агрегатов летающих моделей.

Эта область характерна тем, что в ней все аэродинамические характеристики претерпевают резкие, малоизученные скачки, которые зависят от направления изменения скорости и угла потока. Поляра при этом перестает быть постоянной. Большинство самолетных теорий становятся неприменимыми к микрообъектам или нуждаются в серьезной корректировке. Полет управляемого микрообъекта можно сравнить с полетом самолета при скорости звука, причем микро-БЛА в критической области приходится летать постоянно.

На рис. 1 показаны кривые, отражающие зависимость коэффициента лобового сопротивления C_x от числа Re для некоторых тел. Кривые показывают, что именно в области чисел Re , характерных для летающих моделей ($10\,000 \div 200\,000$), происходят самые большие и резкие изменения значений C_x . Зоны критических чисел Re ,

соответствующие резкому увеличению C_x , и называются кризисными. Кризис сопротивления объясняется переходом пограничного слоя воздуха на поверхности тела из ламинарного состояния в турбулентное. При малых числах Re пограничный слой – ламинарный. Этот слой неустойчив и с дальнейшим ростом Re переходит в турбулентное состояние.

На рис. 1 также показан спектр обтекания шара в докризисной и закризисной зонах и соответствующее изменение коэффициента C_x . Опыт показывает, что переход ламинарного пограничного слоя в турбулентный для одного и того же тела может происходить при разных значениях чисел Re в зависимости от начальной турбулентности потока. Чем выше начальная турбулентность, тем раньше наступает кризис, тем меньше Re критическое.

Так, при ламинарном пограничном слое (рис. 1) его отрыв от поверхности тела начинается рано, обычно в месте наибольшего поперечного сечения тела, вследствие чего за ним образуется широкая завихренная полоса с пониженным давлением.

После перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентный точка отрыва пограничного слоя отодвигается назад, к хвостовой части тела, завихренная сорванная полоса за телом становится уже, и сопротивление уменьшается.

Можно ускорить наступление кризиса, искусственно турбулизируя поток вблизи поверхности тела. Такая турбулизация пограничного слоя на крыле летательного аппарата может быть обеспечена заранее при его проектировании с учетом следующих особенностей компоновки аппарата.

Воздушные винты турбулизируют поток в области крыла, обдуваемого ими, и сильно снижают Re_k , что улучшает характеристики крыла.

В летательных аппаратах, выполненных по аэродинамической схеме «утка», горизонтальное оперение, расположенное впереди крыла, турбулизирует поток на значительной части крыла, уменьшая Re_k .

Свист определенной тональности и интенсивности турбулизирует поток на крыле, уменьшая Re_k .

В летательных аппаратах, выполненных с использованием колеблющегося предкрылка Болдырева, предкрылок турбулизирует поток на значительной части крыла, уменьшая Re_k .

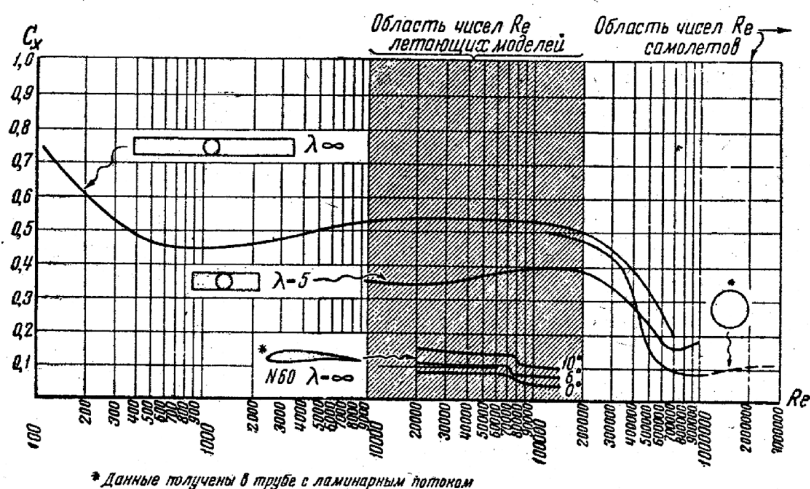
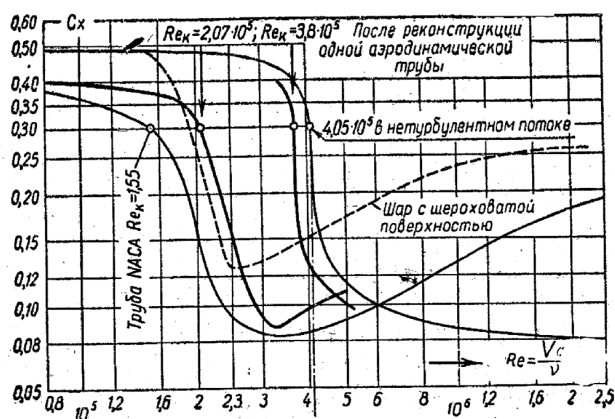
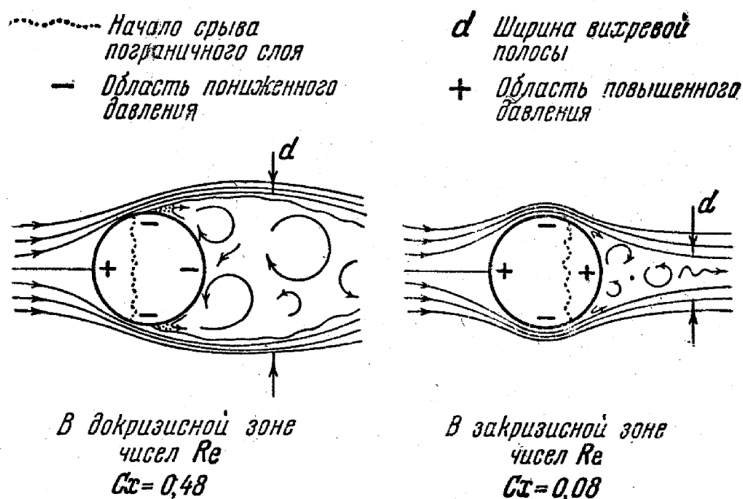


График зависимости коэффициента лобового сопротивления C_x тел различной формы от числа Re



Спектр обтекания шара при различных числах Re ; зависимости $C_x = f(Re)$ шара в различных трубах и спокойном воздухе

Рис. 1

Из теории полета летающих моделей известно, что уменьшение числа Re приводит к падению аэродинамического качества K фиксированных несущих поверхностей. А с уменьшением габаритных размеров летательного аппарата, равно как и чисел Re , а также его массы, подтверждается общая тенденция в авиации и природе – стремление к уменьшению удельной нагрузки на несущие поверхности, т.е. на крыло. Это уменьшение приводит к уменьшению скорости полета, а следовательно, к падению эффективности фиксированной несущей поверхности, росту удельной мощности силовой установки. Это в конечном счете приводит к необходимости отказа от фиксированных несущих поверхностей и применению подвижных несущих поверхностей, какими являются воздушный винт или комбинация подвижных поверхностей с неподвижными. В качестве такой комбинации может быть представлен предкрылок А.И. Болдырева. Эта комбинация позволяет индуцировать течение воздушного потока подвижной (колеблющейся) аэродинамической поверхностью относительно неподвижной несущей аэродинамической поверхности даже при скорости набегающего потока $V = 0$.

Следует заметить, что полет микро-БЛА будет протекать в основном в возмущенной атмосфере, а природа для борьбы с этим явлением использует другой источник неустановившейся аэродинамики – машущие крылья.

Таким образом, не только энергетические соображения полета микро-БЛА при малых числах Рейнольдса заставляют переоценить роль подвижных аэродинамических поверхностей для создания подъемной силы, но и состояние окружающих условий воздушной среды. Это такие условия, где аэродинамические аспекты в комплексе с миниатюрными системами навигации и управления способны адекватно реагировать на порывы ветра или турбулентности. Оперативное управление микро-БЛА возможно в таком случае только на самой простой траектории в зоне, свободной от препятствий.

Предкрылок А.И. Болдырева

Работы отечественных ученых-аэродинамиков МАИ, ХАИ, ЦАГИ, проводившиеся в довоенное время, отличались своей новизной и зачастую опережали время.

Так, А.И. Болдыревым на летающих моделях, а также во время продувок моделей в аэродинамической трубе был обнаружен новый интересный аэродинамический эффект. Установленный чуть впереди и выше носка крыла предкрылок приводился в быстрое колебательное движение, и при этом возникала сила тяги и увеличивалась подъемная сила крыла (рис. 2). Предкрылок колебался относительно своего носка вниз и вверх на углы порядка $\pm 15^\circ$. Автором с помощниками была выполнена и продута в аэродинамической трубе модель самолета в половину натуральной величины. По полученным результатам выполнен аэродинамический расчет.

В 1946 году А.И. Болдырев завершил проект оригинального самолета с колеблющимся предкрылком. Проект рассматривался в ЦАГИ, и после положительных отзывов был заключен договор на разработку самолета в МАИ при финансовой поддержке ЦАГИ. В конце 1947 года самолет был построен в учебно-производственных мастерских (УПМ) МАИ и передан на испытания.

Самолет прошел лишь первый – стендовый этап испытаний, так как сломалась коническая шестерня привода предкрылка, и в конце 1947 года испытания прекратили.

В ходе незавершенных испытаний были получены максимальная тяга на месте около 90 кг и подтверждение, что колеблющийся предкрылок создает тягу и подъемную силу. Были выявлены большие динамические нагрузки на привод. Для окончательных натурных продувок в аэродинамической трубе с работающим предкрылком самолет был передан в ЦАГИ.

Очевидно, самолет с колеблющимся предкрылком опережал свое время и на фоне стремительного освоения реактивной техники не вызвал особого интереса в промышленности.

Последователями А.И. Болдырева в этом направлении были Б.С. Блинов, который разработал и испытал в МАИ ряд моделей с предкрылком А.И. Болдырева, а также Л. Дунц и А. Васильев.

Опыты на моделях показали, что скорость струи воздуха за предкрылком на всех режимах работы в 2,5 раза выше средней линейной скорости движения задней кромки предкрылка. Скорость полета в зависимости от нагрузки на крыло составляла $30 \div 80\%$ от скорости воздушного потока за

предкрылком. Модель массой 0,82 кг отрывалась от земли при достижении двигателем мощности 0,07 л.с. при оборотах двига-

теля 2 900 об/мин. При мощности 0,12 л.с. модель шла в набор высоты под углом 47° к горизонту.

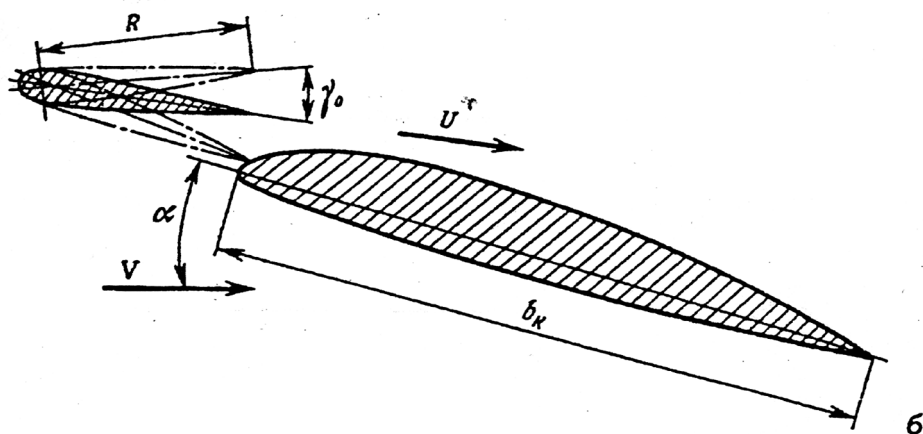
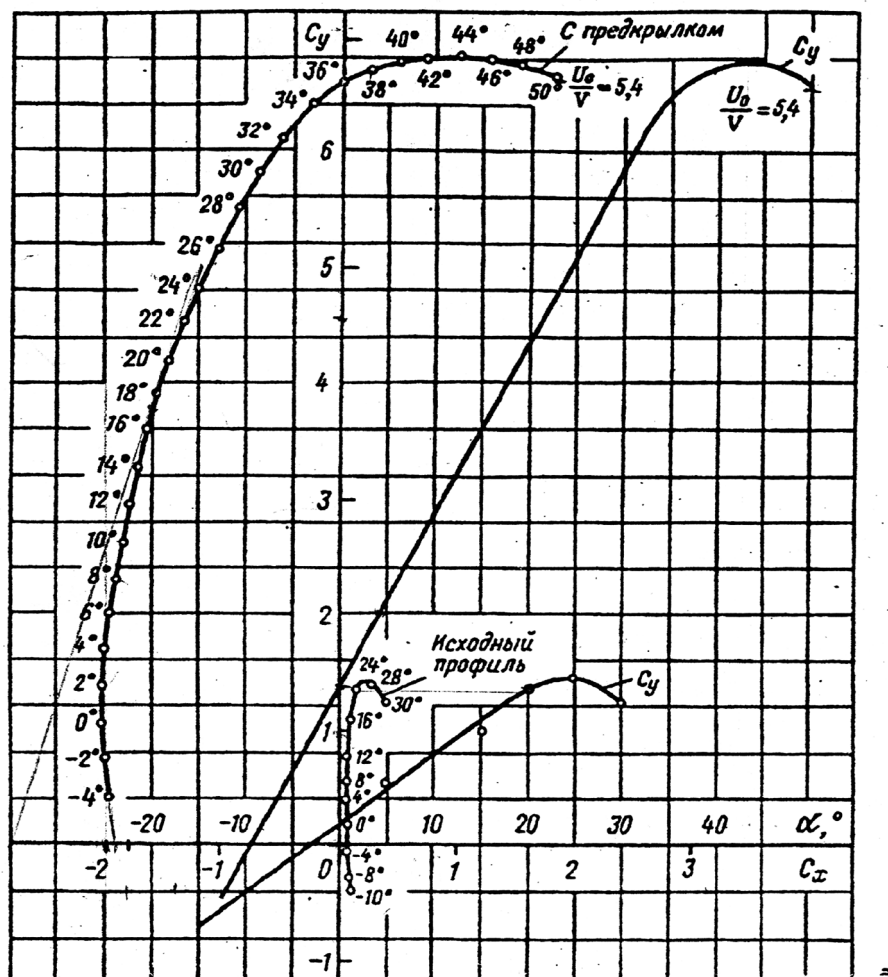


Рис. 2

Позднее за рубежом появился целый ряд интересных теоретических и экспериментальных работ, подтверждающих, что колебание аэродинамических элементов поверхности крыла, например интерцепторов, элеронов или закрылков, с частотой $60 \div 80$ Гц приводит к значительному снижению индуктивного сопротивления, уменьшению интенсивности концевых вихрей и увеличению аэродинамического качества.

Самолет и микро-БЛА в воздушной среде

Отличия обтекания воздушной средой микро-БЛА и полноразмерного (пилотируемого) самолета выглядят следующим образом:

Обтекание крыла самолета происходит на закритическом режиме, поэтому желательно, чтобы ламинарность пограничного слоя сохранялась как можно дольше с целью использования малого трения при ламинарном обтекании, при этом желательно, чтобы турбулентный срыв, вызванный потерями на трение, в турбулентном потоке происходил на возможно больших углах атаки.

При ламинарном обтекании крыла микро-БЛА с числом Рейнольдса $Re < 10\,000$ в пограничном слое может наблюдаться нежелательное докритическое состояние потока с резким увеличением аэродинамического сопротивления.

Для нескоростного полноразмерного самолета выбирают толстый профиль крыла с тупым носом.

Для микро-БЛА выбирают тонкий профиль с острым носиком.

Для скоростного полноразмерного самолета используют тонкий ламинарный профиль с очень незначительной вогнутостью средней линии, но с большим расстоянием до максимальной толщины профиля по хорде от передней кромки крыла.

Для микро-БЛА рекомендуется использовать турбулентный профиль со значительной вогнутостью средней линии профиля и малым расстоянием максимальной вогнутости профиля по хорде.

Крыло самолета должно быть по возможности гладким для уменьшения поверхностного трения, особенно на носке крыла.

На носике микро-БЛА необходима незначительная шероховатость и, в некоторых случаях, даже выступ. Таким образом, по-

верхностное трение играет меньшую роль для микро-БЛА.

При числах Re , меньших по величине, чем числа закритической полностью турбулентной зоны, все мероприятия искусственной турбулентности крыла (шероховатость его верхней поверхности, острая передняя кромка, выступ на носике крыла и особенно турбулизатор перед носиком крыла) полезны для микро-БЛА.

Для полноразмерного самолета данные мероприятия – всегда нежелательны.

Для самолета выгодны эллиптическая и суживающаяся форма крыла в плане и форма лопасти воздушного винта, так как указанная геометрия снижает индуктивное сопротивление.

Для микро-БЛА выгоднее прямоугольная форма крыла, чтобы избежать докритического режима обтекания концов крыла и получить по возможности закритическую область чисел Re на всем крыле. При этом путем закрутки прямоугольного крыла можно получить эллиптическое распределение подъемной силы.

Современные планеры имеют максимальное аэродинамическое качество $K = 25 \div 40$, а летающие модели-парители из-за малых чисел Re на закритических режимах $K = 15 \div 20$.

Аэродинамическое качество полноразмерного планера или самолета не может быть достигнуто микро-БЛА без специальных средств механизации крыла.

На основании теоретических сведений и опыта по колеблющимся элементам несущих поверхностей в Благотворительном обществе научно-технического творчества и экологии «Ювенал» города Таганрога были построены несколько летающих моделей – прототипов микро-БЛА. Элементы колеблющегося предкрылка, как и его привод в микро-БЛА, по сравнению с самолетными агрегатами имеют минимальные инерционные массы, что открывает определенные перспективы создания и использования такого движителя для микро-БЛА. Необходимый ресурс вибропредкрылка и его привода обеспечивается использованием новых высокомодульных композитных материалов. Один из микро-БЛА рассматривается в данной работе.

Краткое описание аппарата

Техническое решение поясняется чертежами:

рис. 3 – вид аппарата сбоку;
рис. 4 – вид аппарата сверху;
рис. 5 – вид аппарата спереди;
рис. 6 – компоновка оборудования аппарата.

В соответствии с представленными чертежами аппарат состоит из следующих элементов и оборудования:

1. Крыло.
2. Колеблющийся предкрылок.
3. Обтекатель внешней оси предкрылка.
4. Обтекатель оборудования.
5. Элероны.
6. «^»-образное оперение.
7. Руль высоты и направления.
8. Траектория колебания предкрылка.
9. Видеокамера.
10. Генератор колебаний.
11. Приемник воздушного давления.
12. Датчик давления.
13. Приемник спутниковой радионавигационной системы (СРНС).
14. Бортовая миниатюрная инерциальная интегрированная навигационная система (МИИНС).
15. Аккумуляторная батарея.
16. Магнитометр.
17. Микросервопривод.
18. Передатчик.
19. Распределитель электропитания.
20. Микроавтопилот.
21. Передняя кромка крыла.
22. Бортовой вычислитель.

Микро-БЛА (рис. 3, 4, 5, 6) спроектирован по схеме «летающее крыло» трапецевидной формы 1 с вибропредкрылком 2, с «^»-образным оперением 6, установленным на верхней поверхности крыла 1. Данная аэродинамическая схема позволяет всем поверхностям управления аппаратом 5, 7, размещенным в обдуваемой потоком воздуха зоне от вибропредкрылка 2, быть эффективными на минимальных скоростях. По концам левой и правой консолей крыла установлены обтекатели 3, в которых шарнирно закреплены внешние оси вибропредкрылка 2. Внутренние оси вибропредкрылка 2 соединены с генератором колебаний 10 и закрыты обтекателем 4 оборудования.

Вибропредкрылок 2, установленный сверху и спереди передней кромки 21 крыла 1, приводится в колебательное движение генератором колебаний 10. Генератор колебаний 10 вибропредкрылка 2 может быть выполнен в виде механизма, преобразующего вращение вала привода в колебания спе-

циального рычага, соединенного с вибропредкрылком, или в виде электромагнитно-вибрационного привода, непосредственно воздействующего на вибропредкрылок 2. Колебания вибропредкрылка 2 индуцируют возникновение не только подъемной силы на крыле 1, но и одновременно создают тягу.

По тангажу аппарат управляется одновременным отклонением поверхностей управления 7 «вверх-вниз», по курсу – дифференциальным отклонением тех же управляющих поверхностей 7. По крену аппарат управляется элеронами 5.

Диапазон 8 колебаний вибропредкрылка находится в пределах $\pm 16^\circ$, а частота колебаний $60 \div 85$ Гц.

Технология изготовления оболочки аппарата основана на формировании органоткани в матрице с пропиткой в двухкомпонентном связующем с последующей укладкой до отверждения проводящих электрический ток линий, шин и соединений.

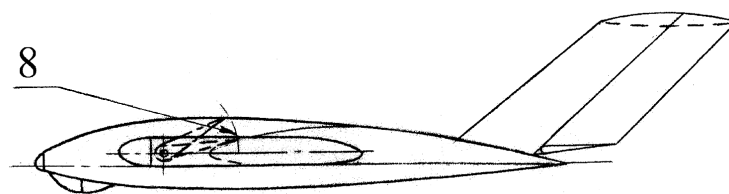
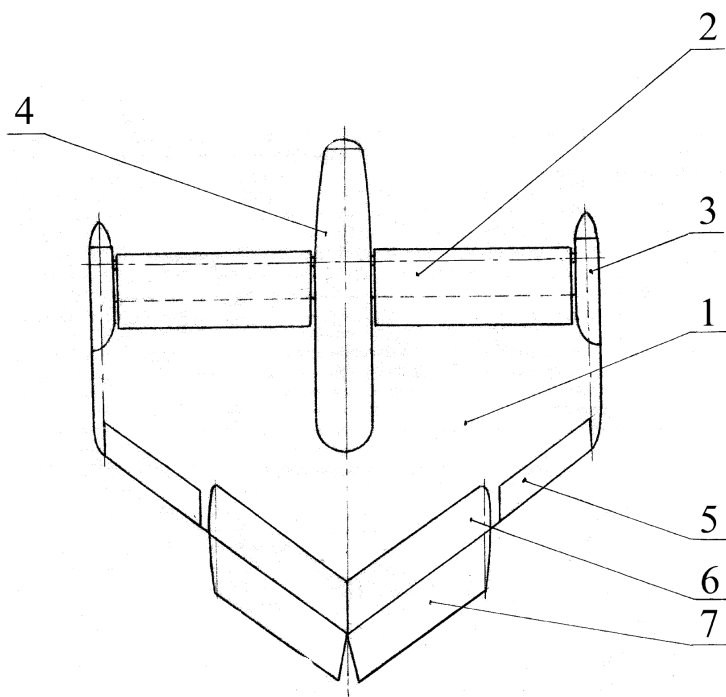
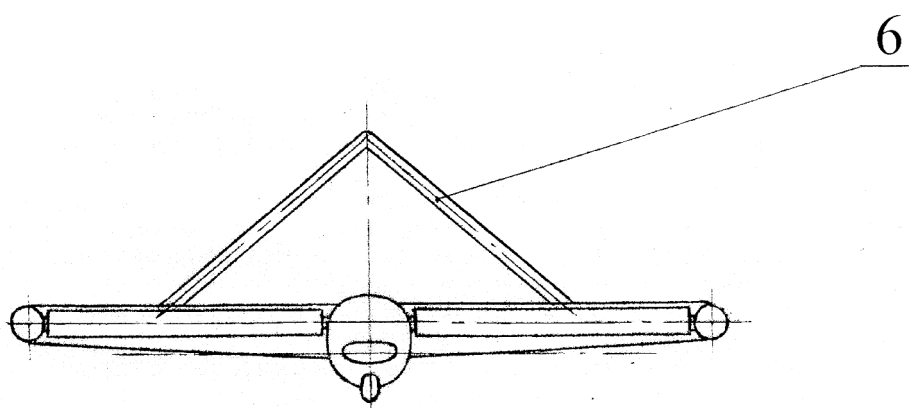
Функцию навигации и управления микро-БЛА выполняет система, в которой реализован алгоритм бесплатформенной инерциальной навигационной системы, интегрированной с приемником спутниковой радионавигационной системы.

Приемник спутниковой радионавигационной системы (СРНС) 13 выдает данные широты, долготы, высоты, скорости, путевого угла и текущего времени полета аппарата.

Бортовая миниатюрная инерциальная интегрированная навигационная система (МИИНС) 14, имея в своем составе триады инерциальных датчиков в виде микромеханических гироскопов и акселерометров, а также барометрический высотомер и трехосный магнитометр 16, выдает данные широты, долготы, высоты, баровысоты, горизонтальной скорости, вертикальной скорости, курса, крена, тангажа, угловой скорости, линейного ускорения.

Путем объединения данных МИИНС с данными приемника СРНС вырабатывается полное навигационное решение по координатам и углам ориентации полета аппарата и направляется в микроавтопилот 20.

Микроавтопилот 20 осуществляет выработку управляющих команд в соответствии с законами управления, заложенными в его вычислитель, и обеспечивает управление сервоприводами 17, контроллером силовой установки, бортовой аппаратурой 12, 13, 14, 16, 17, 18, 19, 20.

*Рис. 3**Рис. 4**Рис. 5*

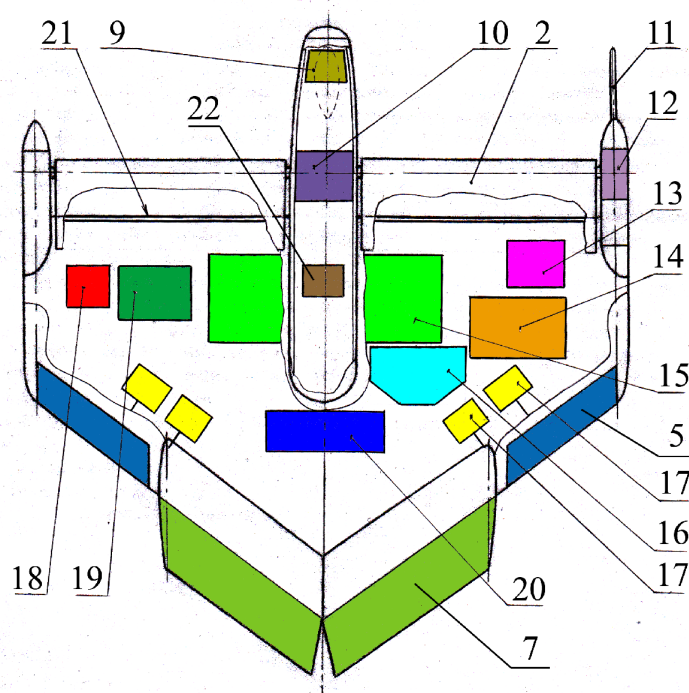


Рис. 6

В память микроавтопилота 20 заносятся поворотные пункты маршрутов полета. Каждая точка характеризуется координатами, высотой прохождения и скоростью полета. В полете микроавтопилот 20 обеспечивает выдачу в канал передачи телеметрической информации для слежения за полетом микро-БЛА.

Питание бортового оборудования 12, 13, 14, 16, 17, 18, 19, 20, целевой нагрузки и силовой установки обеспечивается аккумуляторной батареей 15.

В качестве целевой нагрузки используется миниатюрная видеокамера 9, установленная в носовой части аппарата.

Необходимые условия реализации проекта

Для реализации данного проекта и ему подобных, связанных с проектированием и строительством микро-БЛА с колеблющимися поверхностями, целесообразно провести комплекс научно-исследовательских работ следующего содержания:

1. Теоретические исследования вопросов аэродинамики полета микро-БЛА с вибропредкрылком и формирование базы программно-математического обеспечения, описывающего создание подъемной силы и тяги микро-БЛА:

- аэродинамические силы и моменты, их величина и методы определения;
- динамика полета микро-БЛА с вибрирующими несущими поверхностями;
- принципы механизации и управления полетом микро-БЛА с вибропредкрылком, зависящие от их скорости, массы, частоты и амплитуды колебаний предкрылка.

2. Экспериментально-исследовательские работы по созданию динамически подобных моделей микро-БЛА с вибрирующими несущими поверхностями различных аэродинамических компоновок.

3. Экспериментально-исследовательские работы по определению возможностей существующих силовых установок сверхмалой мощности и энергопотребления, их технологических компонентов, источников энергии применительно к микро-БЛА. Исследования вопросов использования принципиально новых силовых установок, источников энергии и компонентов.

4. Разработка общей концепции построения систем навигации и управления полетом микро-БЛА:

- принципы построения и новые методы синтеза высокоточных миниатюрных систем управления микро-БЛА;
- алгоритмы беспилотной навигации и управления полетом микрообъектов;

- программное обеспечение для проектирования и исследования систем управления и навигации микро-БЛА;

- исследование и разработка электронных, электромеханических, пневматических и других элементов микроуправления и навигации микро-БЛА;

- оценка предельных характеристик и показателей качества систем микроуправления и навигации микро-БЛА.

- 5. Разработка и исследование принципов организации систем связи с микро-БЛА, способов съема информации с его борта и поставки её потребителю:

- принципы построения систем связи с микро-БЛА;

- методы выбора каналов связи, систем кодирования;

- методы оценки предельных характеристик систем связи и съема информации с борта микро-БЛА;

- оценка надежности, помехозащищенности и информационной эффективности каналов связи с микро-БЛА.

- 6. Исследование свойств новых материалов и выработка рекомендаций по их применению для микро-БЛА.

- 7. Экспериментально-исследовательские работы по созданию и отработке управляемых прототипов микро-БЛА с вибрирующими несущими поверхностями оптимальных аэродинамических схем и компоновок.

Выводы

Результатом выполнения вышеназванных НИР должен стать микро-БЛА с колеблющимся предкрылком, являющийся высокоинтегрированной системой в интеллектуальной оболочке с минимизацией габаритно-массовых параметров, с обеспечением максимально возможных характеристик соответствия дальности, маневренности, управляемости, скрытности, надежности, с возможностями поставки необходимого объема и качества информации с его борта потребителю, с возможностями обеспечения ею операций в стесненных городских условиях.



Рис. 7

Список литературы

1. Гайдачук В.Е., Гречка В.Д. и др. Технология производства летательных аппаратов из композиционных материалов. – Харьков: ХАИ, 1989.
2. Васильев В.В. Основы проектирования и изготовления конструкций летательных аппаратов из композиционных материалов. – М.: МАИ, 1985.
3. Тарасов Е.В., Балык В.М. Метода проектирования летательных аппаратов. – М.: Изд-во МАИ, 2000.
4. Тарасов Е.В., Балык В.М. Методы принятия решений при проектировании технических систем. – М.: Изд-во МАИ, 2000.
5. Воронков Ю.С., Елманов И.М., Лежнев В.Г., Лежнев М.В., Карсян А.Ж., Потетюнко Э.Н.; Задачи обтекания тел. – Ростовский государственный университет путей сообщения. – Ростов-на-Дону, 2011.
6. Макаров Ю.В. Летательные аппараты МАИ – М.: Изд. МАИ, 1994 г.
7. Шмитц В. И. Аэродинамика малых скоростей / пер. с нем. – Изд. ДОСААФ, 1963.
8. Стасенко А.Л. Физика полета. – М.: Наука, 1988.
9. Гаевский О.К. Летающие модели планеров. – Изд. ДОСААФ, 1955.
10. Мировая компьютерная сеть Интернет, информация 1999 – 2014.
11. Материалы Благотворительного общества научно-технического творчества и экологии «Ювенал» города Таганрога.

References

1. Gaydachuk V.E., Grechka V.D. i dr. Tekhnologiya proizvodstva letatelnykh apparatov iz kompozitsionnykh materialov. – Khar'kov, KhAI, 1989.
2. Vasilev V.V. Osnovy proektirovaniya i izgotovleniya konstruktsey letatelnykh apparatov iz kompozitsionnykh materialov. – M.: MAI, 1985.
3. Tarasov E.V., Balyk V.M. Metoda proektirovaniya letatelnykh apparatov. – M.: Izd-vo MAI, 2000.
4. Tarasov E.V., Balyk V.M. Metody prinyatiya resheniy pri proektirovanii tekhnicheskikh sistem. – M.: Izd-vo MAI, 2000.
5. Voronkov Y.S., Elmanov I.M., Lezhnev V.G., Lezhnev M.V., Karsyan A.Z., Potetyunko E.N.; Zadachi obtekaniya tel. – Rostovskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya. – Rostov-na-Donu, 2011.
6. Makarov Y.V. Letatelnye apparaty MAI. – M.: Izd. MAI, 1994.
7. Shmitts V.I. Aerodinamika malykh skorostey / per. s nem. – Izd. DOSAAF, 1963.
8. Stasenko A.L. Fizika poleta. – M.: Nauka, 1988.
9. Gaevskiy O.K. Letayushchie modeli planerov. – Izd. DOSAAF, 1955.
10. Mirovaya kompyuternaya set Internet, informatsiya 1999 – 2014.
11. Materialy Blagotvoritelnogo obshchestva nauchno-tekhnicheskogo tvorchestva i ekologii «Yuvenal» goroda Taganroga.

УДК 543

УТИЛИЗАЦИЯ ПЛАСТИКОВЫХ ОТХОДОВ В ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ

Воротынцев А.В., Чернышов Е.А., Батталов С.В., Романов А.Д.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,

Нижний Новгород, e-mail: nil_st@nntu.nnov.ru

В статье рассматривается способ высокотемпературной переработки твердых бытовых отходов, состоящих из пластика. Рассмотрены вопросы утилизации полимерных отходов и использования их в производстве материалов широкого ассортимента. Выполнен анализ выбора технологических параметров переработки полимерных отходов. Представлены результаты проведенной экспериментальной работы по переработке отходов, включая хромато-массспектрометрический анализ продуктов реакции.

Ключевые слова: высокотемпературный пиролиз, переработка твердых бытовых отходов, пластиковые отходы, хромато-массспектрометрический анализ

UTILIZATION OF PLASTIC WASTE IN THE ZHIDKOMETALLICHESKY HEAT CARRIER

Vorotyntsev A.V., Chernyshov E.A., Battalov S.V., Romanov A.D.

The Nizhny Novgorod state technical university of R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod,

e-mail: nil_st@nntu.nnov.ru

In article the way of high-temperature processing of the municipal solid waste consisting of plastics is considered. Questions of utilization of polymeric waste and their use in production of materials of the wide range are considered. The analysis of a choice of technological parameters of processing of polymeric waste is made. Results of the carried-out experimental work on processing of waste are presented, including hromato-masses the spectrometer analysis of products of reaction.

Keywords: high-temperature pyrolysis, processing of municipal solid waste, plastic waste, hromato-masses spectrometer analysis

Утилизация отходов деятельности человека является актуальной в нашей жизни. По оценкам специалистов, каждый человек в среднем «производит» в год до 250 кг бытовых отходов. Важную часть также занимает утилизация автомобилей, где доля пластиковых деталей растет. Около 25 % занимают пищевые отходы, 5–10 % – бумага, 50 % – полимеры, остальное приходится на металл, текстиль, резину, стекло и др. Классический путь удаления отходов (контейнер – мусоровоз – свалка – рекультивация) сегодня неэффективен и, кроме того, потенциально опасен, поскольку один из самых «трудноперевариваемых» видов отходов – это пластиковые отходы, которые имеют различное поведение при переработке и утилизации (табл. 1). Существующая проблема захоронения твердых бытовых отходов решается путем переработки отходов полимерных материалов.

В настоящее время активно предлагаются и разрабатываются различные стратегии вторичной переработки [1]. Механическая переработка обеспечивает вторичное использование материалов с учетом некоторых потерь в их свойствах. Однако не все пластики можно безопасно перерабатывать либо стоимость систем очистки при этом становится экономически не оправданной.

Кроме того, одними из наиболее опасных отходов являются отходы здравоохранения, которые по степени эпидемиологической, токсикологической и радиационной опасности делятся на пять классов: отходы класса А (неопасные отходы) вывозятся на полигоны ТБО без ограничений, класса Б (опасные отходы: материалы, инструменты, патологические отходы), класса В (чрезвычайно опасные: материалы, контактирующие с больными особо опасными инфекциями, отходы фтизиатрических и микологических больниц) уничтожаются на специальных установках по обезвреживанию отходов, обращение с отходами классов Г и Д регулируется нормативами для токсичных и радиоактивных отходов.

Принципиальной положительной особенностью бескислородных пиролизных технологий уничтожения материалов, позволяющих обеспечить экологическую безопасность выбросов, в том числе и хлорсодержащих, является то, что выделяющийся при пиролизе хлорсодержащих материалов активный хлор уже в камере термического разложения немедленно реагирует с обязательным продуктом пиролиза любой органики – водородом, образуя стойкое соединение HCl, которое далее легко нейтрализуется на стадии доочистки. Тем самым предотвращается образование диоксинов и фуранов.

Таблица 1

Типы пластиковых материалов

Символ	Название полимера и обозначение по ГОСТ 24888-81	Использование
	Полиэтилентерефталат (ПЭТФ)	Нетканые волокна, бутылки для напитков и подсолнечного масла, технических жидкостей, одежда, спортивная обувь, упаковочная лента, детали автомобилей и др. Хорошо поддается переработке. Материал выделяет вредные вещества – фталаты
	Полиэтилен высокого давления (ПЭВД)	Пленки, черепица, прокладочный материал, мебель, мусорные баки, кружки, пакеты и т.д. Хорошо поддается переработке. Материал может выделять канцерогенный формальдегид
	Поливинилхлорид (ПВХ)	Настил пола, облицовочные панели, брызговики, водосточные желоба, половые доски, кабели, плитка, банки для упаковки и др. Практически не поддается переработке. Процесс утилизации ПВХ сопровождается образованием большого количества диоксинов (самых опасных ядов) и других крайне токсичных химических веществ
	Полиэтилен низкого давления (ПЭНД)	Трубы, ящики, бутылки для жидкостей, ручки, скамейки, мусорные контейнеры, заборы, строительные доски, упаковка, бутылки и т.д. Хорошо поддается переработке. Материал может выделять канцерогенный формальдегид
	Полипропилен (ПП)	Мешки, биг-бэги, одноразовая посуда, фары, расчески, зубные щетки, аккумуляторы, вешалки, паллеты, крышки для бутылок, стаканы и контейнеры для продуктов и т.д. Материал может выделять канцерогенный формальдегид
	Полистирол (ПС)	Упаковка для яиц, линейки, контейнеры для хранения вещей, теплоизоляция, клапаны, упаковка, стаканы и т.д. Может выделять стирол, являющийся канцерогеном, и химический эстроген
	Другие (чаще всего в данном случае используется поликарбонат)	Смесь различных пластиков или полимеров. Упаковка, маркированная этой цифрой, не может быть переработана и заканчивает свой жизненный цикл на свалке или в печи мусоросжигательного завода. Может выделять бисфенол А

Термическая переработка твердых отходов предусматривает предварительное разложение органической составляющей отходов в бескислородной атмосфере (пиролиз), после чего образовавшаяся концентрированная парогазовая смесь направляется в камеру дожигания, где в режиме управляемого горения газообразных продуктов происходит перевод токсичных веществ в менее или полностью безопасные. Высокотемпературный пиролиз отходов позволяет значительно изменить кинетику протекания процессов пиролиза углеродсодержащего сырья, ускорить массообменные и термодинамические характеристики процесса.

Идеализированный процесс пиролиза можно условно представить себе следующим образом. Частица попадает на вход ре-

актора с низкой температурой, затем она попадает в область нагрева – температура ее растет, состав меняется, далее частица попадает в зону охлаждения – температура падает, и на выходе мы имеем продукты пиролиза. Если процесс изменения температуры частицы является медленным по сравнению со временем установления квазиравновесия, то состав частицы можно везде считать квазиравновесным. Из этой упрощенной модели можно сделать важный вывод: величина отклонения конверсии и селективностей продуктов от своих равновесных значений определяется временами релаксации; плавностью зависимости равновесных значений от температуры; скоростью нагрева или охлаждения (заковки) продуктов. В медленных процессах отклонение от равновесия не

велико, в быстрых – отклонение может быть значительным. Кроме того, при уменьшении температуры время релаксации стремится к бесконечности, поэтому при температуре ниже некоторой состав продуктов пиролиза можно считать «замороженным», т.е. в безразличном состоянии равновесия, которое может существовать практически неограниченно долго.

Процесс (во времени) перехода к равновесию описывается системой уравнений химической кинетики. Однако зачастую кинетическая стадия перехода к равновесию может обладать некоторыми особенностями, например, одна из газовых компонент значительно медленнее других стремится к своему термодинамическому пределу. В этом случае по отношению к оставшимся

компонентам можно говорить о квазиравновесии между ними. Модель высокотемпературного пиролиза описана в [2], кинетический анализ описан в работе [3].

С точки зрения практической применимости данной технологии одной из основных задач является прогрев исходного сырья до заданных температур и обеспечение полноты прохождения реакции.

На рис. 1 приведены зависимости изменения коэффициента теплоотдачи от потоков расплава в зависимости от его скорости при различных значениях перегрева с учетом размеров и теплофизических параметров частиц. Коэффициенты теплоотдачи от потока расплава к твердым частицам определялись в зависимости от режима движения и скорости потока расплава [4].

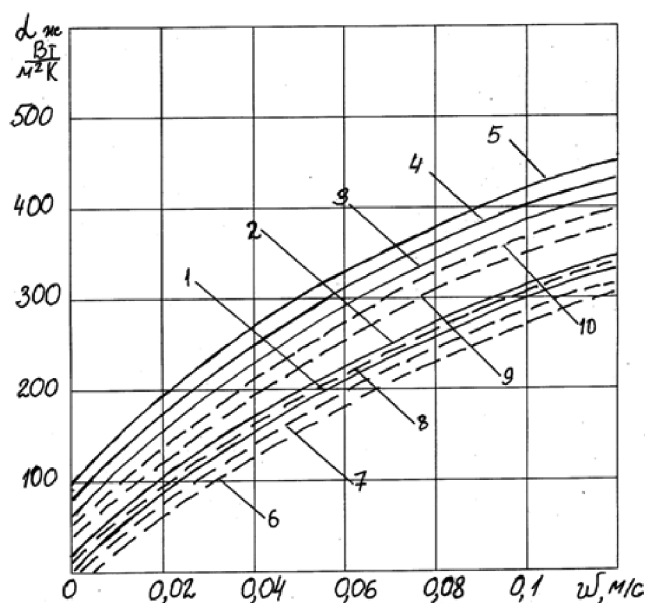


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплоотдачи $\alpha_{\text{ж}}$ от расплава к твердым частицам (перегрев расплава $\Delta t_{\text{пер}} = 100^\circ\text{C}$) в зависимости от скорости потока ω :

1, 2, 3, 4, 5 – древесные отходы с диаметром частиц 2, 5, 10, 15, 20 мм [5];
6, 7, 8, 9, 10 – измельченные пластиковые отходы с диаметром частиц 2, 5, 10, 15, 20 мм, соответственно

Для решения задачи прогрева твердых частиц можно использовать уравнения теплового баланса:

$$q F_{\text{эф}} d\tau = M c dT, \quad (1)$$

где q – плотность теплового потока на поверхность твердой частицы, Вт/м²; $F_{\text{эф}}$ – эффективная тепловоспринимающая по-

верхность, м²; c – удельная теплоемкость, кДж/(кг·К); τ – время, с; T – температура, К; M – масса частицы, кг.

Выражая плотность теплового потока через эффективный коэффициент теплоотдачи от расплава к всплывающей частице $\alpha_{\text{ж}}$, интегрируя уравнение (1) и решая относительно $T_{\text{п.к}}$, получим

$$T_{\text{п.к}} = (T_{\text{р}} - T_{\text{п.н}}) [1 - \exp(-\alpha_{\text{ж}} F_{\text{эф}} \tau / M c)] + T_{\text{п.н}}, \quad (2)$$

где T_p , $T_{п.н}$ и $T_{п.к}$ – температура расплава, начальная и конечная температуры частиц.

Решая это уравнение относительно времени, будем иметь

$$\tau = (Mc / \alpha_{ж} F_{эф}) \ln[(T_p - T_{п.н}) / (T_p - T_{п.к})].$$

Если обозначить массу нагреваемой частицы $M = V\rho$ (V – объем частицы, ρ – плотность), то получим

$$\tau = (V\rho c / \alpha_{л+к} F_{эф}) \ln[(T_p - T_{п.н}) / (T_p - T_{п.к})] \quad (3)$$

Это уравнение показывает, что продолжительность нагрева пропорциональна размеру частиц ($V/F_{эф}$), объемной теплоемкости gc , логарифму отношения начальной и конечной разности температур расплава и частицы и обратно пропорциональна коэффициенту теплоотдачи на её поверхности.

Проведение испытаний на установке высокотемпературного пиролиза

Для подтверждения теоретических выкладок были проведены экспериментальные работы. В частности, был разработан и создан экспериментальный стенд, состоящий из реактора с жидкометаллическим теплоносителем, системы подачи исходного сырья, отвода полученных продуктов пиролиза, с возможностью пробоотбора газообразной и жидкой фракции [6].

Для анализа продуктов реакции был проведен газохроматографический анализ по методу пиролитической хромато-масс-спектрометрии (ПХМС) на приборе Shimadzu GCMS QP-2010 Plus. Пиролизер марки Frontier Py-2010iD – двухстадийный

пиролизер с двумя режимами – нагрев и охлаждение. Диапазон температур 40– 800 °С, шаг задания 1 °С. Время охлаждения от 800 до 50 °С составляло 30 мин. В процессе работы на первой стадии реализовали термодесорбцию, а на второй – пиролиз (метод «Double-Shot Analysis»). Пиролизер позволял программировать температуры в диапазоне скоростей 0 – 100 °С/мин с шагом 1 °С/мин.

На первой стадии (термодесорбция в диапазоне температуры от 40 до 320 °С) образец помещался в микropечь, разогретую до 40 °С, и нагревался далее по заданной программе. При температуре свыше 320 °С в паровой фазе появлялось небольшое количество летучей фракции. Как показал хромато-массспектрометрический анализ, она состояла из смеси нормальных алканов C10–C30.

Для установления покомпонентного состава этой фракции была проведена их идентификация с использованием библиотеки NIST-08.

Сравнение показало, что с высокой вероятностью (более 99 %) первый компонент соответствует 1,19-эйкозациену с общей формулой $C_{20}H_{38}$, второй – 1-нонадецену с общей формулой $C_{19}H_{38}$ (основной компонент), а третий – нормальному октадекану с общей формулой $C_{18}H_{38}$.

На второй стадии работы были проведены хромато-массспектрометрические исследования образцов газов, полученных при переработке, без системы дожигания, с использованием вакуумной системы напуска пробы. Результаты анализа представлены на рис. 2.

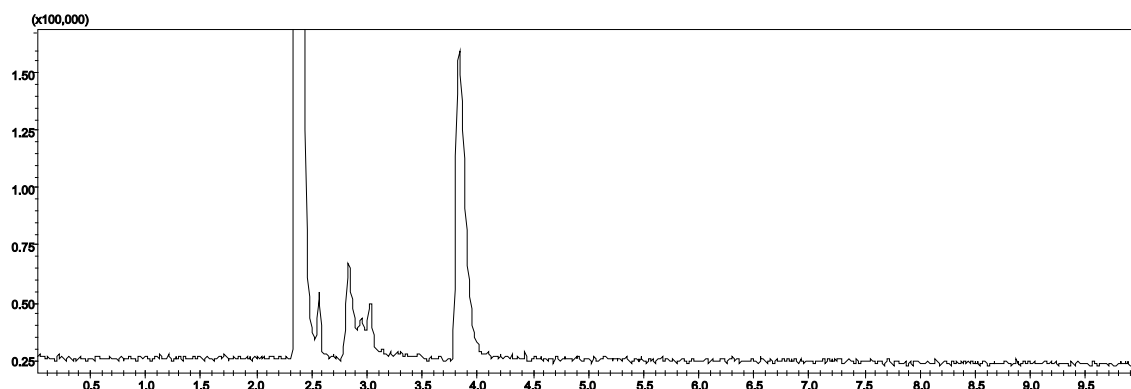


Рис. 2. Характерная хроматограмма продуктов реакции после пиролиза

Для установления покомпонентного состава этой фракции была проведена их идентификация с использованием библиотеки NIST-08. Сравнение показало, что с высокой вероятностью (более 99%) первый компонент соответствует пропену (C_3H_6), второй – углекислому газу (CO_2) с примесями воды (H_2O), третий – бутен-1 (C_4H_8), четвертый – бутен-1,3 (C_4H_6), пятый (наиболее интенсивный) – ацетальдегиду (C_2H_4O). Из полученных хроматограмм видно, что состав продуктов после пиролиза является смесью углеводородов, которые могут быть использованы в качестве моторного топлива. Важно отметить отсутствие в них отравляющих веществ.

Выводы

Высокотемпературный пиролиз отходов позволяет значительно изменить кинетику протекания процессов переработки сырья, ускорить массообменные и термодинамические характеристики процесса, создавать технологию контролируемого и управляемого процесса. Разрабатываемая технология позволяет безопасно утилизировать пластиковые отходы, в том числе пластиковые медицинские отходы. Преимуществом является возможность создания компактной, экологически безопасной установки высокой производительности.

Разработка экологически безопасной технологии, а также простой в обслуживании и компактной установки позволит занять значительную долю рынка утилизации отходов, в том числе в перспективе и на международном уровне.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках проекта по договору № 02.G25.31.006 от 12.02.2013 (постановление Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 года № 218).

Список литературы

1. Вторичная переработка пластмасс / Ф. Ла. Мантия (ред.); пер. с англ. под ред. Г.Е. Заикова – СПб.: Профессия, 2006. – 400 с.
2. Воротынцев В.М., Воротынцев А.В., Воротынцев И.В., Петухов А.Н., Шарыгина О.Н. Получение генераторного газа пиролизом горючих смесей // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – № 1 (102). – С. 236–242.
3. Гушин В.Н., Васильев В.А., Чернышов В.А., Романов И.Д., Романова Е.А., Романов А.Д. Утилизация отходов методом высокотемпературного пиролиза в жидкометаллическом теплоносителе // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2012. – № 1 (94). – С. 230–236.
4. Кожевников, И.Г. Теплофизические свойства материалов: Справочник / И.Г. Кожевников, Л.А. Новицкий. – М.: Машиностроение, 1982. – 437 с.
5. Романов А.Д., Мартыанов М.А., Мартыанов А.Р. Высокотемпературный оксипиролиз и углекислотная конверсия метана // Альтернативная энергетика и экология. – 2011. – № 5. – с. 12–13.
6. Романов А.Д., Романов И.Д., Мартыанов М.А., Мартыанов А.Р. Метод нахождения равновесного состояния в химической системе и его приложение к вопросам получения водорода высокотемпературным пиролизом метана // Альтернативная энергетика и экология. – 2011. – № 7. – С. 16–17.

References

1. Vtorichnaya pererabotka plastmass / F. La. Mantiya (red.); per. s angl. pod red. G.E. Zaikova – SPb.: Professiya, 2006. – 400 p.
2. Vorotyntsev V.M., Vorotyntsev A.V., Vorotyntsev I.V., Petukhov A.N., Sharygina O.N. Poluchenie generatornogo gaza pirolizom goryuchikh smesey // Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva. – 2014. – № 1 (102). – pp. 236–242.
3. Gushchin V.N., Vasilev V.A., Chernyshov V.A., Romanov I.D., Romanova E.A., Romanov A.D. Utilizatsiya otkhodov metodom vysokotemperaturnogo piroliza v zhidkometallicheskom teplonositele // Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva. – 2012. – № 1 (94). – pp. 230–236.
4. Kozhevnikov, I.G. Teplofizicheskie svoystva materialov: Spravochnik/ I.G. Kozhevnikov, L.A. Novitskiy. – M.: Mashinostroenie. 1982, 437 p.
5. Romanov A.D., Martyanov M.A., Martyanov A.R. Vysokotemperaturnyy oksipiroлиз i uglekislottaya konversiya metana // Alternativnaya energetika i ekologiya. – 2011. – № 5. – pp. 12–13.
6. Romanov A.D., Romanov I.D., Martyanov M.A., Martyanov A.R. Metod nakhozhdeniya ravnovesnogo sostoyaniya v khimicheskoy sisteme i ego prilozhenie k voprosam polucheniya vodoroda vysokotemperaturnym pirolizom metana // Alternativnaya energetika i ekologiya. – 2011. – № 7. – pp. 16–17.

УДК 622.012:556.3

РАЙОНИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИЙ ПРИ ВЫЯВЛЕНИИ КРИОГЕННЫХ СТРУКТУР, ПЕРСПЕКТИВНЫХ ДЛЯ ЗАКАЧКИ ДРЕНАЖНЫХ РАССОЛОВ (НА ПРИМЕРЕ ЯКУТИИ)

¹Дроздов А.В., ²Мельников А.И.¹Институт «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА», Мирный, e-mail: drosdovav@list.ru;²Институт земной коры СО РАН, Иркутск, e-mail: mel@crust.irk.ru

В настоящей статье представлен анализ используемых подходов при выборе участков под захоронение токсичных промышленных стоков с их количественным выражением. Предложена и рассмотрена методика районирования территорий Якутии вблизи горнодобывающих предприятий АК «АЛРОСА» по перспективности криогенных структур для закачки дренажных рассолов по используемым критериям с количественным выражением значимости каждого признака.

Ключевые слова: подземные воды, мерзлые породы, захоронение, тектонические структуры, критерии

DIVISION INTO DISTRICTS OF TERRITORIES AT REVEALING OF CRYOGENIC STRUCTURES, PERSPECTIVE FOR PUMPING DRAINAGE BRINES (ON THE EXAMPLE OF YAKUTIA)

¹Drozdov A.V., ²Melnikov A.I.¹Institute «Jakutnioproalmaz» AC «ALROSA», Mirny, e-mail: drosdovav@list.ru;²Institute of the Earth Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Irkutsk,
e-mail: mel@crust.irk.ru

In the present article, the analysis of used approaches is presented at a choice of sites under a burial place of toxic industrial drains with their quantitative expression. The technique of division into districts of territories of Yakutia near to mining enterprises AC «ALROSA» for perspective of cryogenic structures for pumping drainage brines by used criteria with quantitative expression of the importance of each sign is offered and considered.

Keywords: underground waters, frozen breeds, a burial place, tectonic structures, criteria

Специфика выбора участков для захоронения промстоков в ходе освоения месторождений алмазов Якутии определяется не только затратами на процесс удаления дренажных рассолов, но и ответственностью за сохранение благоприятной геоэкологической обстановки в регионе. Поэтому разработке методологии оценки и способам обнаружения перспективных геологических структур в многолетнемерзлых породах (ММП) для захоронения экологически опасных стоков в АК «АЛРОСА» придается особое значение. Следует отметить специфику ММП как среды для закачки дренажных вод, которая имеет существенные отличия, по сравнению с другими природными геологическими объектами, используемыми в качестве резервуаров для складирования жидких промышленных отходов [2, 3]. В целом подземное захоронение сточных вод в недра Земли основано в первую очередь на поглощающих способностях породных массивов

или их участков вмещать и удерживать жидкие отходы. До принятия решения по удалению промышленных растворов требуется обосновать геологические условия приемлемой для этих целей среды, произвести выбор места и технологию закачки предназначенных к утилизации или захоронению стоков.

Результаты исследований

Основные требования к геологической среде, используемой для удаления сточных вод, включают:

– высокие коллекторские и поглощающие свойства горных пород, водоносных зон, горизонтов или участков геосферы;

– наличие перекрывающего (в некоторых случаях и подстилающего) непроницаемого или слабопроницаемого экрана, или буферного водоносного горизонта, комплекса, зоны;

– отсутствие прямой гидравлической связи с зоной интенсивного водообмена;

– отсутствие в пределах объекта под закачку пресных, соленых подземных вод и рассолов, используемых для водоснабжения, извлечения полезных компонентов или применения в бальнеологических целях и при смешении с которыми ухудшается их качество;

– совместимость подземных флюидов и удаляемых промстоков;

– отсутствие воздействия закачки на гидродинамические и другие показатели подземной гидросферы, сказывающейся на эффективности отработки прилегающих месторождений (главным образом нефтегазовых).

Вместе с тем, в природной обстановке трудно выбрать идеальный объект, отвечающий по своим свойствам всем выше перечисленным требованиям, особенно в условиях стохастически неоднородных сред с их разнообразными гидрогеохимическими и криогидрогеологическими системами. Из этого следует, что обоснование выбора природного резервуара и принятие решения на захоронение стоков должно опираться на определенную региональную систему признаков, построенную путем оптимизации выше обозначенных требований к геологической среде, желательно с количественным выражением. К примеру, в США при рассмотрении перспективности объекта для удаления промстоков нижним пределом минерализации воды, распространенной в пласте-коллекторе, считается 10 г/дм^3 [4]. В то же время отечественный опыт использования полигонов с аналогичными или более экстремальными гидрохимическими показателями свидетельствует о неправомерности таких требований к природной криогидрогеологической среде на территории России.

Сведения об используемых компонентах геосистем той или иной территории могут быть представлены в качественной и количественной форме. При районировании и выборе благоприятных участков для удаления различных промстоков в геологическую среду многие исследователи рекомендуют чаще применять критерии (признаки) оценки с их количественными показателями. Так, для захоронения высокорadioактивных отходов Б.Т. Кочкин [4] рекомендует использовать граничные значения признака, включая численные показатели. По его методике комплексная оценка полигона состоит из суммы балльных отметок по 16 геоло-

гическим критериям. Степень пригодности объекта по каждому критерию варьирует в пределах балльных шкал четырех размеров. Эта степень зависит от вероятности проявления негативного геологического фактора, который может оказать влияние на показатель загрязнения окружающей среды, его интенсивность, а также на достоверность поступающей информации. При данном подходе выбор наиболее безопасного места захоронения устанавливается по суммированию оценок с максимальными баллами.

Для решения проблемы многокритериальности при выборе пригодной геологической среды рекомендуется использовать агрегированный критерий оценки риска загрязнения окружающей обстановки. В.Н. Морозов и В.Н. Татаринов [7] предложили интегрированную методику, основанную на рейтинге блока, который складывается из суммы произведений экспертных оценок по 27 факторам в баллах (от 1 до 3) на их цену (от 0 до 1). Экспертная оценка отражает степень пригодности блока по данному фактору, а цена – ранг значимости. Критерии соответствия геологической среды требованиям безопасного захоронения РАО рассмотрены в работах и других исследователей [5, 6, 8].

А.К. Лисицин и А.Н. Сысоев [6] рекомендуют выделять пласты-коллекторы и блоки пород при отсутствии у исследуемой формации массообмена с дневной поверхностью. К дополнительным критериям выбора мест захоронения, в частности, жидких РАО и токсичных промышленных отходов в осадочном чехле, по мнению авторов, следует относить: невысокую мобильность земной коры; длительную унаследованность процессов развития структуры; высокую степень консолидации пород фундамента; отсутствие масштабных геотермических аномалий; низкую сейсмичность (0–3 балла) или ее отсутствие. Этим особым критериям при стабильном тектоническом режиме в большей мере соответствуют толщи чехла древних платформ с докембрийским фундаментом, а также большая мощность осадочных пород. По их представлениям, во всех районах криолитозоны Сибирской платформы можно производить захоронение радиоактивных и токсичных промышленных отходов ниже яруса ММП.

В то же время набор большого количества разработанных и предлагаемых даже

геологических критериев, в условиях криолитозоны не несет необходимой конкретной информации по оцениваемому объекту. Имеются в виду такие факторы, как глубинные аномалии силы тяжести, плотностная дифференциация корово-мантийных блоков, уровень естественных напряжений и т.д. Поэтому при районировании и выделении перспективных объектов в криолитозоне необходим индивидуальный подход к выбору мест захоронения дренажных стоков с учетом экологической безопасности предполагаемого способа удаления.

Следует отметить, что ранее выделенные и применяемые поисковые критерии выбора криогидрогеологического объекта под захоронение дренажных стоков в основном имели качественные показатели, основанные на сравнении разных участков криолитозоны по каким-либо свойствам природной среды. Оптимизация показателей криогидрогеологической (криогидрогеологической) среды часто сопряжена с субъективным характером рассмотрения. Однако окончательная оценка перспективности объекта зависит от прогнозных объемов природных резервуаров, основанных на поглощающих свойствах толщ пород, масштабности их распространения на полигоне и по району, а также мощности перекрывающего мерзлого экрана в экологически опасных направлениях. По нашему мнению, обоснованным отступлением от вышеперечисленных и общепринятых требований к геологическим объектам под закачку можно считать обратную закачку дренажных вод или заводнение пластов однородными по качеству и составу флюидами (рассолами), поступающими в горные выработки из одних и тех же горизонтов подземной гидросферы. Характерным примером такого отступления от установленных требований можно считать обратную закачку дренажных стоков карьера «Мир» или рудника «Интернациональный» в подмерзлотный водоносный комплекс.

При использовании ММП для удаления дренажных рассолов основным условием и требованием, считается наличие поглощающего горизонта (зоны), участка и перекрытого слабо- или непроницаемым экраном, которым является толща ММП. Следует подчеркнуть, что роль остальных свойств среды для захоронения жидких промышленных отходов в криолитозоне при

использовании разных методов и объектов под закачку нельзя преуменьшать, а необходимо также рассматривать их как основополагающие, особенно показатели совместности растворов, температуры мерзлых пород и свойств техногенных стоков.

Использование тектонически нарушенных участков (зон) осадочного чехла в разных интервалах криогенных областей для захоронения промстоков считается несколько противоречащим основным требованиям, предъявляемым к геологической среде. Но как показывает многолетний положительный опыт на разных месторождениях, использование таких участков для удаления дренажных вод вполне приемлемое и перспективное направление [2, 3]. К примеру, выбор участков геологической среды в Якутии при поисковых и разведочных работах и последующее строительство полигонов захоронения АК «АЛРОСА» с высокой приемистостью скважин связаны, главным образом с существующей трещинной пустотностью и проницаемостью пород, которые зависят в первую очередь от структурно-тектонических условий криогенных массивов и подмерзлотных водоносных горизонтов.

Следует подчеркнуть, что в условиях осадочного чехла древних платформ редко встречаются достаточно однородные литолого-фациальные комплексы с характерным составом и коллекторскими свойствами пород. Разнонаправленные исследования показывают, что осадочные толщи неоднородны в фильтрационно-емкостном плане, как правило, по латерали и вертикали на всех уровнях, начиная от микроучастка, заканчивая крупным флюидонасыщенным бассейном. В осадочных комплексах пород могут существовать благоприятные природные резервуары следующих типов: структурно-литологические, структурно-стратиграфические, структурные, литологические. Каждый генетический тип потенциального резервуара отличается закономерностями размещения в подземном пространстве, развитием пород-коллекторов и экранирующих толщ. В чистом виде эти типы практически не встречаются и взаимодействуют комплексно, формируя свойственные им фильтрационно-емкостные показатели подземной крио- или гидросферы. Следует отметить, что не для каждого региона (района) перспективной может быть любая из выделяемых геологических (криогидрогеологических) структур и не всегда применим

метод аналогии. Поэтому подход к выбору объекта, используемого для захоронения промстоков в криолитозоне, должен быть индивидуальным, как по показателям природной среды, так и по закачиваемым промстокам.

Как ранее отмечено, факторы, определяющие перспективность природного объекта, разнообразны и могут быть объединены в соответствующие группы. Для условий криолитозоны существующие геологические признаки благоприятных участков были дифференцированы по качественным показателям [2, 3]. Для выбора перспективных криогенных структур разработан и успешно применен на практике комплекс поисковых критериев, включающий структурные, тектонические, геоморфологические, газодинамические, температурные, гидрогеологические, геофизические, геохимические и прямые признаки. Каждый из этих критериев имеет свою физическую основу, т.е. напрямую или косвенно связан с фильтрационно-емкостными свойствами определенной криогеологической среды на отдельном объекте.

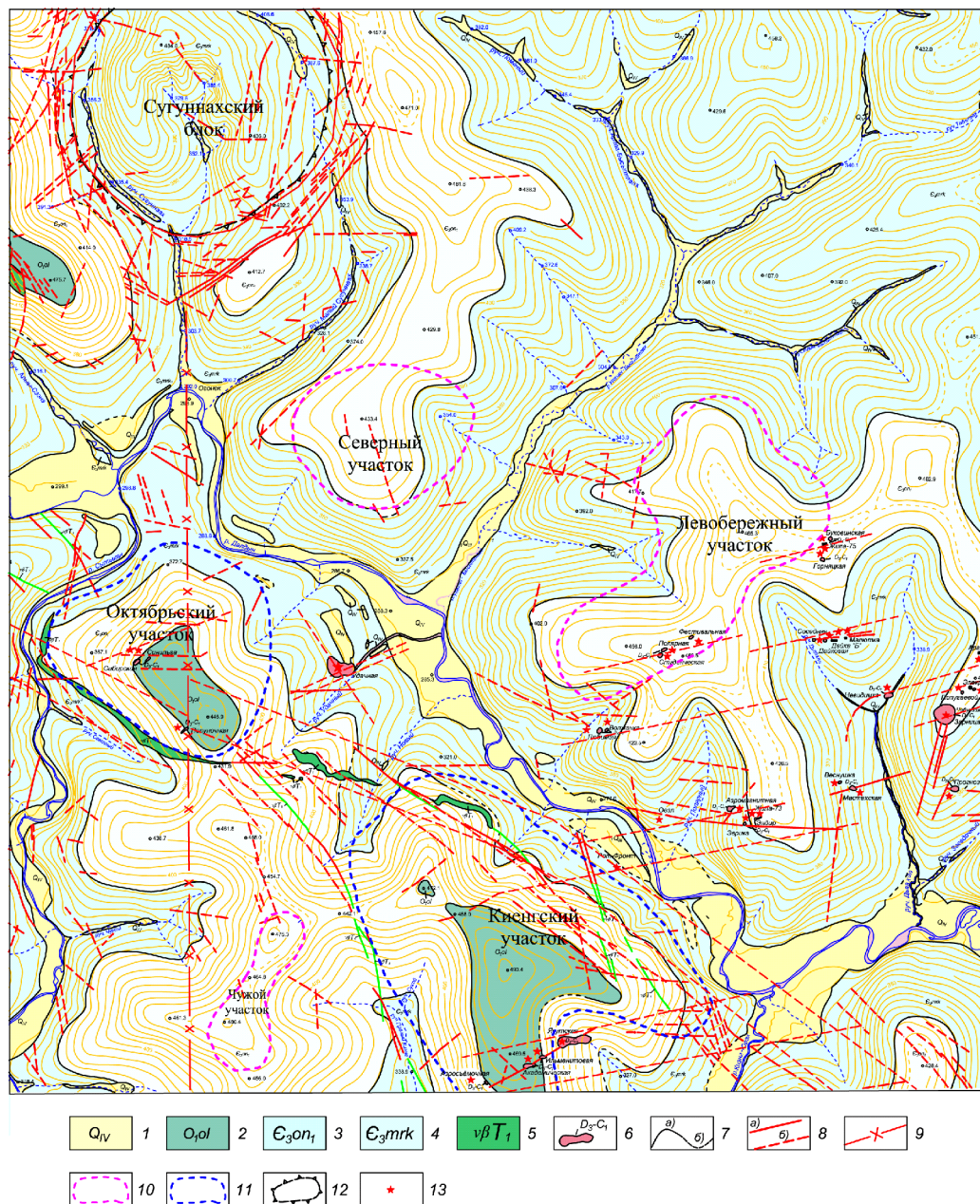
На основе анализа имеющихся материалов по полигонам захоронения дренажных рассолов АК «АЛРОСА» и перспективным участкам, которые могут в дальнейшем использоваться для удаления промстоков, проведена систематизация (ранжирование) и представлена более подробная характеристика существующих и выделяемых критериев с их количественной оценкой. Рассмотрим особенности выполненного разделения, в котором характерные элементы представленной системы обобщенных показателей приведены с их количественным представлением по значимости. Набор используемых геологических критериев (признаков) определяет перспективность того или иного природного объекта на рассматриваемой территории и позволяет осуществлять ее районирование по каждому признаку с последующим картографическим отображением. Этот подход к районированию с разделением по значимости и последующим установлением границ участков для каждого критерия и далее по обобщенному показателю существенно снижает трудозатраты поисковых работ и увеличивает эффективность предлагаемой методики оценки криогеологических структур. Пример районирования и апробации предложенной методики оценки

перспективности участков в ММП выполнен для Западной Якутии вблизи Удачинского ГОКа (рисунок) и представлен в таблице.

Рассмотрим детали выполненной количественной оценки существующих критериев. В предложенном варианте разделения комплексной поисковой системы каждому установленному признаку присваивается ранг. Ранее проведенными исследованиями установлено, что выделенные признаки неодинаково характеризуют эффективность (значимость) существующего критерия. Поэтому для более детального разделения им присваиваются индексы в виде чисел (1, 2, ... n) с установлением обобщенного индекса (P_n). Известно, что отмеченные и рассматриваемые признаки в разной степени отображают и эффективность критерия, поэтому для соответствия проводимого ранжирования территории исследований вводим характеризующий балл (коэффициент) по прерогативе и весомости используемого признака (от 1 до 10). Далее рассчитывается обобщенный показатель (K_p) перспективности природного объекта в ММП для удаления дренажных рассолов, который выражен суммой всех признаков (P_n), усиленных соответствующим коэффициентом (баллом) (i_n), и представляется в следующем виде:

$$K_p = \sum P_n i_n.$$

По результатам оценки рассматриваемой территории получаем, что чем выше обобщенный показатель, тем перспективнее природный объект (геологическая структура) для решения проблемы по закачке дренажных рассолов в ММП. Это подтверждено натурными данными при использовании участков для закачки рассолов в Удачинском ГОКе. Аналогичное районирование с ранжированием по значимости и количественными оценками было проведено в Айхальском и Нюрбинском ГОКах АК «АЛРОСА». Данный подход к выбору перспективных площадей для захоронения дренажных рассолов рудника «Айхал», карьеров «Юбилейный», «Комсомольский», «Нюрбинский» был применен на практике и оценен как положительный. Рассмотренные количественные показатели поисковых критериев при оценке криогеологических структур под захоронение дренажных вод в ММП могут быть использованы на других территориях Якутии.



Районирование территории, перспективной для закачки дренажных рассолов:
 1 – современные отложения; 2 – ордовикская система, олдондинская свита; 3 – кембрийская система, верхний отдел, онхойюряхская свита, нижняя пачка; 4 – кембрийская система, верхний отдел, моркокинская свита; 5 – недифференцированные и слабо дифференцированные пластовые и секущие интрузии долеритов; 6 – кимберлитовые трубки, дайки, жилы; 7 – границы между разновозрастными образованиями: (а) достоверные; б) предполагаемые; 8 – линии тектонических нарушений: (а) достоверные; б) выделенные по дешифрированию; 9 – Силигино-Мархинский разлом фундамента; 10 – перспективные участки; 11 – эксплуатационные участки; 12 – Сугуннахский блок; 13 – алмазоносные трубки.

Распределение поисковых признаков и обобщенного показателя по перспективным участкам вблизи Удачинского ГОКа

№ п/п	Поисковые признаки (P_n)	Участки					
		Северный	Левобереж- ный	Чужой	Киенский	Октябрьский	Сугуннахский
1	Региональные тектонические нарушения: – кимберлитоконтролирующие северо-восточного простирания; – базитовмещающие северо-западного простирания; – субмеридиональные зоны нарушений; – субширотные зоны нарушений.	–	5	–	5	5	–
2	Структурные: отрицательные, неравномерно опущенные структуры; положительные, неравномерно поднятые структуры	–	–	–	5	5	–
3	Геофизические: отрицательные гравитационные аномалии; линейные аномалии электрического сопротивления; локальные магнитные аномалии трубчатого и дайкового типов	–	–	–	2	2	2
4	Газодинамические: разнонаправленные движения воздуха в скважинах (л/сек): до 1; более 1	–	–	–	4	4	–
5	Геоморфологические: возвышенные, водораздельные участки с мощностью ММП (м): до 100; более 100	–	–	–	–	–	–
6	Геохимические линейные аномалии: по разным химическим элементам; газовых компонентов по He , H_2 , УВГ	4	4	4	4	4	4
7	Гидрогеологические: повышенные показатели фильтрационно-емкостные показатели подмерзлотного горизонта (T , $m^2/сут$): до 1; более 1	1	1	1	1	1	1
8	Распределение температур внутри ММП: – закономерное; – аномальное	–	–	–	3	3	3
9	Коэффициент приемистости скважин ($m^3/ч/м$): $< 0,1$; $0,1-1,0$; $> 1,0$	–	–	–	–	–	–
	Обобщенный показатель перспективности (K_p)	17	31	17	56	56	36

Заключение

Резюмируя вышеизложенное, можно констатировать, что наиболее благоприятный участок (полигон) под захоронение дренажных рассолов в ярус ММП для условий криолитозоны Сибирской платформы должен, как правило, находиться вблизи трапповых тел и обладать полным комплексом показателей, включающих сложное структурно-тектоническое строение, отрицательные (сбросовые) или положительные структуры

с сопутствующими аномалиями геофизических (гравитационных, магнитных, температурных и др.) и химических (геохимических, гидрохимических, атмохимических) полей, а также иметь максимальные мощности ММП. Предложенная количественная оценка криогеологических структур позволяет осуществлять детальное районирование территории и выделять наиболее значимые объекты по перспективности их использования для закачки дренажных рассолов.

Список литературы

1. Гольдберг В.М., Скворцов Н.П., Лукьянчикова Л.Г. Подземное захоронение промышленных сточных вод. – М.: Недра, 1994. – 282 с.
2. Дроздов А.В. Захоронение дренажных рассолов в многолетнемерзлых породах (на примере криолитозоны Сибирской платформы). – Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2007. – 296 с.
3. Дроздов А.В. Природные и техноприродные резервуары промышленных стоков в криолитозоне (на примере Якутской части Сибирской платформы). – Якутск: Изд-во СВФУ, 2011. – 416 с.
4. Кочкин Б.Т. Геоэкологический подход к выбору районов захоронения радиоактивных отходов. – М.: Наука, 2005. – 115 с.
5. Лаверов Н.П., Омеляненко Б.И., Величкин В.И. Геоэкологические аспекты проблемы захоронения радиоактивных отходов // Геоэкология. – 1994. – № 6. – С. 3-20.
6. Лисицин А.К., Сысоев А.Н. Критерии выбора мест захоронения жидких радиоактивных и токсичных промышленных отходов в осадочном чехле // Геоэкология. – 1996. – № 1. – С. 3-16.
7. Морозов В.Н., Татаринов В.Н. Методика выбора участков земной коры для размещения экологически опасных отходов // Геоэкология. – 1996. – № 6. – С. 109-119.
8. Омеляненко Б.И., Петров В.А., Юдинцев С.В. и др. Петрографические критерии выбора геологической среды для захоронения высокоактивных отходов // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. Обзор. информ. – 1994. – № 1. – С. 17-27.

References

1. Goldberg V.M., Skvorcov N.P., Lukyanchikova L.G. Podzemnoe zaxoronenie promyshlennyx stochnyx vod. – M.: Nedra, 1994. – 282 p.
2. Drozdov A.V. Zaxoronenie drenaznyx rassolov v mnogoletnemerzlyx porodax (na pri-mere kriolitozony Sibirskoj platformy). – Irkutsk: Izd-vo IGTU, 2007. – 296 p.
3. Drozdov A.V. Prirodnye i texnoprirodnye rezervuary promyshlennyx stokov v kriolitozone (na primere Yakutskoj chasti Sibirskoj platformy). – Yakutsk: Izd-vo SVFU, 2011. – 416 p.
4. Kochkin B.T. Geoekologicheskij podxod k vyboru rajonov zaxoroneniya radioaktivnyx ot-xodov. – M.: Nauka, 2005. – 115 p.
5. Laverov N.P., Omelyanenko B.I., Velichkin V.I. Geologicheskie aspekty problemy zaxo-roneniya radioaktivnyx otxodov // Geoekologiya. – 1994. – № 6. – pp. 3-20.
6. Lisicin A.K., Sysoev A.N. Kriterii vybora mest zaxoroneniya zhidkix radioaktivnyx i toksichnyx promyshlennyx otxodov v osadochnom chexle // Geoekologiya. – 1996. – № 1. – pp. 3-16.
7. Morozov V.N., Tatarinov V.N. Metodika vybora uchastkov zemnoj kory dlya razmeshheniya ekologicheski opasnyx otxodov // Geoekologiya. – 1996. – № 6. – pp. 109-119.
8. Omelyanenko B.I., Petrov V.A., Yudincev S.V. i dr. Petrograficheskie kriterii vybora geologicheskoy sredy dlya zaxoroneniya vysokoaktivnyx otxodov // Problemy okruzhayushhej sredy i prirodnyx resursov. Obzorn. inform. – 1994. – № 1. – pp. 17-27.

УДК 669.01:621.7/2.002

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КОНТАКТНО-ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ

Жиркин Ю.В., Мироненков Е.И., Султанов Н.Л., Тютеряков Н.Ш., Пашенко К.Г.
ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,
Магнитогорск, e-mail: mgtu@magtu.ru

В работе рассмотрены решения по определению параметров для разработки математической модели контактно-гидродинамического расчета подшипников качения для станов холодной прокатки. Были проведены лабораторные и промышленные эксперименты. Таким образом, учитывая полученные экспериментальные, лабораторные исследования и обобщенные положения при определении толщины масляной пленки, была разработана программа для ЭВМ по контактно-гидродинамическому расчету подшипников качения, при различных режимах эксплуатации станов холодной прокатки, позволяющая выявлять отклонения от заданных параметров и своевременно изменять режимы смазки.

Ключевые слова: контактная гидродинамика, вязкость, механика, подшипники качения

DEVELOPMENT OF ROLLING BEARINGS CONTACT HYDRODYNAMIC MATH MODEL CALCULATION

Zhirkin Y.V., Mironenkov E.I., Sultanov N.L., Tyuteryakov N.S., Pashchenko K.G.
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, e-mail: mgtu@magtu.ru

In work on the characterization of solutions for the development of a mathematical model of contact-hydrodynamic calculation of bearings for cold rolling mills. Experiments were made laboratory and industrial. Thus, considering the received pilot, laboratory studies and the generalized provisions at determination of oil film thickness, the computer program for contact hydrodynamic calculation of rolling bearings was developed, at various modes of operation of cold rolling mills, allowing to reveal deviations from the given parameters and to change greasing modes in time.

Keywords: contact hydrodynamics, oiliness, mechanics, bearings

Изучение гидродинамики и значение гидродинамической теории смазки для современного производства актуально, так как она дает возможность рационального проектирования и использования подшипников качения, которые в данное время широко используются в различных механизмах и агрегатах.

Первые попытки по развитию и изучению методик по определению теории контактно-гидродинамики были сформулированы в 1883 – 1886 гг. профессором Н.П. Петровым. В то время явления движения вязких жидкостей были мало исследованы, так как работы Осборна Рейнольдса, которые разъяснили сущность ламинарного и турбулентного режимов течения жидкости, были тогда еще мало известны, а следовательно, не было известно, когда возможно, применение уравнений движения вязкой жидкости Навье – Стокса. Ввиду этого Н.П. Петров посвятил значительную часть своей работы доказательству самой возможности применения упомянутых уравнений к вопросу о движении жидкости.

Одним из таких уравнений является определение параметра контактной гидро-

динамики ε [11], который по В.П. Петрову рассчитывается по зависимости

$$\varepsilon = \frac{\mu U}{fP}, \quad (1)$$

где μ – динамическая вязкость смазочной жидкости, Па·с; U – скорость, м/с; f – коэффициент трения; P – давление на единицу поверхности, Па.

В зависимости В.П. Петрова степени скорости U коэффициента трения f , давления на единицу поверхности P равны единице, а пьезокэффициент вязкости и коэффициент изменения толщины масляной пленки не учитывались.

Существует ещё несколько общеизвестных положений [4, 5] для определения толщины масляной пленки, рассмотренные в работах Эртеля – Грубина, Хиггинсона, Хэмрок-Джекобсон, Доусона, Ратнера, где учтены вышеуказанные параметры и коэффициенты. На основании обобщения их работ предложена зависимость толщины масляной пленки, выраженная в безразмерных параметрах:

$$H = \overline{\kappa U^a G^b q_H^c}, \quad (2)$$

где k – константа, включающая модуль упругости; U – суммарная скорость качения; a – коэффициент, характеризующий суммарную скорость качения; G – приведенный радиус кривизны поверхностей; b – коэффициент, характеризующий радиусы кривизны поверхностей; q_H – эквивалентная статическая нагрузка на единицу длины

контакта; c – коэффициент, характеризующий параметр нагрузки.

На рис. 1 представлен контакт ролика с дорожкой в динамике совместно со смазочным материалом.

При экспериментальных исследованиях данных ученых были получены коэффициенты, представленные в табл. 1.

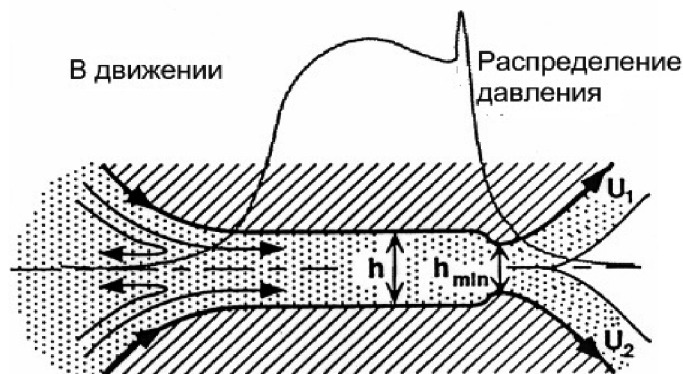


Рис. 1. Контакт ролика с дорожкой в динамике совместно со смазочным материалом

Таблица 1
Коэффициенты показателей для определения толщины масляной пленки при экспериментальных исследованиях

Авторы	K	a	b	c
Эртель – Грубин	1,95	0,727	0,727	– 0,091
Хиггинсон	1,6	0,7	0,6	– 0,13
Хэмрок-Джекобсон	3,07	0,71	0,57	– 0,11
Доусон	2,65	0,7	0,54	– 0,13
Ратнер	3,17	0,75	0,6	– 0,15

Вследствие того, что рабочие условия редко бывают идеальными и на практике не всегда удается записать в явном виде полную систему уравнений, достаточно точно отражающую свойства объекта, и определить из нее критерии подобия, возникает необходимость использования соотношений сил, действующих в объекте, так называемый метод подобия [2, 12, 15].

При использовании теории подобия и проведении экспериментальных исследований, для определения моментов сопротивления в подшипниках качения применяются различные подходы. Например, при определении коэффициента по толщине пленки смазочного материала m_{h0} и контактных напряжений m_{σ} использовалась формула Ратнера (3), с коэффициентом, характеризующим суммарную скорость

качения, равным 0,75, коэффициентом, характеризующим радиусы кривизны поверхностей, 0,4 и коэффициентом, характеризующим параметр нагрузки, – 0,15:

$$h_0 = 3.17(\eta U_{\Sigma})^{0.75} \alpha^{0.6} \rho_{np}^{0.4} q_H^{-0.15}, \quad (3)$$

где η – динамическая вязкость масла при атмосферном давлении и рабочей температуре, Па·с; U_{Σ} – суммарная скорость качения на контакте, м/с; α – пьезокоэффициент вязкости, Па⁻¹; ρ_{np} – приведенный радиус кривизны поверхностей трения, м; q_H – нагрузка на единицу длины контакта, Н/м.

Для более корректного описания изменения толщины масляной пленки в зависимости от скорости и усилий прокатки на стане 2000 холодной прокатки были проведены лабораторные исследования. Используя экспериментальную установку для

моделирования процессов смазки в подшипниковых узлах рабочих и опорных валков, выявлены закономерности.

В соответствии с теорией подобия, используя зависимость (3), заменим все величины через их масштабные коэффициенты:

$$m_{h0} = (m_{\eta} m_{U_{\Sigma}})^{0.75} m_{\alpha}^{0.6} m_{\rho_{\text{пр}}}^{0.4} m_{qH}^{-0.15}. \quad (4)$$

При использовании одного и того же смазочного материала на реальных объектах и экспериментальных установках

можно определить, что масштабные коэффициенты динамической вязкости при атмосферном давлении и рабочей температуре $m_{\eta} = 1$ и пьезокоэффициента вязкости $m_{\alpha} = 1$. В связи с принятыми выше допущениями получим зависимость:

Тогда зависимость (4) примет вид

$$m_{U_{\Sigma}}^{0.75} m_{\rho_{\text{пр}}}^{0.4} m_{qH}^{-0.15} = 1. \quad (5)$$

Технические характеристики подшипников представлены в табл. 2.

Таблица 2

Технические характеристики подшипников

Параметры	Обозначение	Коуо	№ 97516
		Величины	
Внутренний диаметр, мм	d	317	80
Средний диаметр, мм	D_0	369,5	110
Диаметр ролика, мм	D_p	23	14,7
Длина ролика, мм	l	40	23,4
Число тел качения, шт.	Z	39	19
Количество рядов роликов, шт.	i	4	2
Угол контакта, град	β	15	15

Для заданных условий найдём масштабный коэффициент приведенного радиуса кривизны поверхностей трения $m_{\rho_{\text{пр}}}$ [3, 6, 18]:

$$\rho_{\text{пр}} = \frac{D_W}{2} (1 + \gamma); \quad (6)$$

$$\gamma = \frac{D_W}{d} \cos \alpha_0; \quad (7)$$

$$m_{\rho_{\text{пр}}} = \frac{D_W^B}{D_W^M} \frac{(1 + \gamma^B)}{(1 + \gamma^M)}. \quad (8)$$

Из вышеперечисленных формул определим

$$\gamma^B = \frac{23}{369,5} 0,96596 = 0,062;$$

$$\gamma^M = \frac{14,7}{110} 0,96596 = 0,13;$$

$$m_{\rho_{\text{пр}}} = \frac{23(1 + 0,062)}{14,7(1 + 0,13)} = 1,47.$$

Для определения масштабного коэффициента нагрузки на единицу длины контакта m_{qH} воспользуемся зависимостью [3, 6, 18]:

$$q_H = \frac{4,6 P}{Zil}. \quad (9)$$

Соответственно

$$m_{qH} = \frac{m_p}{m_z m_i m_e}. \quad (10)$$

Из решения вышеперечисленных зависимостей получаем

$$m_z = \frac{39}{19} = 2,05;$$

$$m_i = \frac{4}{2} = 2;$$

$$m_e = \frac{40}{23,4} = 1,71.$$

$$m_z m_i m_e = 2,05 \cdot 2 \cdot 1,71 = 7,01.$$

Нагрузку на подшипник P_B найдём с учётом горизонтальной составляющей давления металла на валки $P = 35$ МН и усилия противоизгиба $P_{\text{пр}} = 500$ кН [14]:

$$P_B = \sqrt{\left(\frac{Pa}{2A}\right)^2 + P_{\text{пр}}^2}, \quad (11)$$

где P – давление металла на валки, Н; a – величина смещения оси рабочего валка относительно оси опорного валка, м; A – межосевое расстояние, $P_{\text{пр}}$ – усилие противоизгиба, Н;

$$P_B = \sqrt{\left(\frac{35 \cdot 10^3 \cdot 0,005}{2 \cdot 0,695}\right)^2 + 500^2} = 515 \text{ (кН)}.$$

Нагрузка на подшипник ЭУ задаётся равной 6 кН, тогда

$$m_p = \frac{515}{6} = 88, \text{ а } m_{qH} = \frac{88}{7,01} = 12,55.$$

Используя зависимость (5), определим значение масштабного коэффициента суммарной скорости качения m_{U_Σ} :

$$m_{U_\Sigma} = \frac{1}{m_{\text{рпр}}^{0,53} m_{qH}^{-0,15}}; \quad (12)$$

$$m_{U_\Sigma} = \frac{1}{1,47^{0,53} \cdot 12,55^{-0,15}} = 1,35.$$

Взаимосвязь между суммарной скоростью качения U_Σ и числом оборотов n определяется зависимостью [5]

$$U_\Sigma = \frac{\pi D_0 n}{60} (1 + \gamma). \quad (13)$$

Тогда масштабный коэффициент числа оборотов n найдём из зависимости

$$m_{U_\Sigma} = m_{D_0} m_n m_{(1+\gamma)}. \quad (14)$$

Для

$$m_{D_0} = \frac{369,5}{110} = 3,35, \quad m_{(1+\gamma)} = \frac{1+0,062}{1+0,13} = 0,939$$

получаем

$$m_n = \frac{1,35}{3,36 \cdot 0,94} = 0,43.$$

Тогда частота вращения вала на ЭУ должна быть равна:

$$n_m = 2,32 n_B.$$

Из технологической инструкции [14] частота вращения по всем клетям для стана 2000 холодной прокатки приведена в табл. 3.

Таблица 3

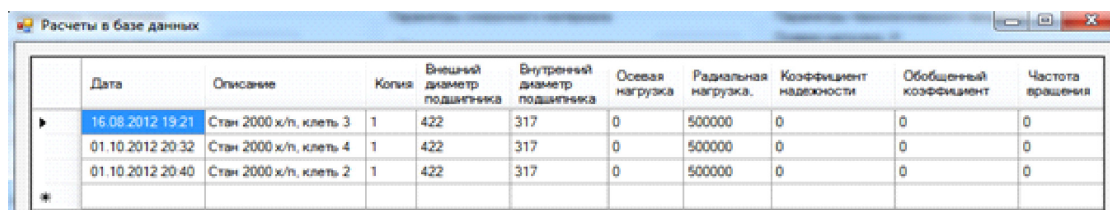
Частота вращения рабочих валков по всем клетям

Номер клетки	1	2	3	4	5
n_s (рабочих валков), об./мин	0–345	0–50	0–756	0–962	0–995

Таким образом, частота вращения вала на ЭУ должна составлять 1200 об./мин для условий 2-й рабочей клетки и 1700 об./мин – для условий 3-й рабочей клетки стана. В дальнейшем с использованием приведенных зависимостей была проведена серия лабораторных экспериментов на экспериментальной установке моделирования процессов смазывания в подшипниковых узлах [7], с различными классами вязкости (КВ) смазочного материала (мм/с²), такими как: И 40 с КВ 68, И 100 РС, с КВ 100, Mobil 600 XP 220 с КВ 220, ТНК 460 с КВ 460.

Используя вышеперечисленные зависимости и проведенные лабораторные исследования, разработали программу для ЭВМ в среде Visual Basic по контактно-гидродинамическому расчету подшипников качения для станов холодной прокатки при скорости прокатки до 2000 м/мин и нагрузках до 40 МН. Интерфейс программы с показаниями входных данных представлен на рис. 2, интерфейс программы с сохраненным расчетом в базе данных изображен на рис. 3 [13].

Рис. 2. Интерфейс программы с показаниями входных данных



	Дата	Описание	Копия	Внешний диаметр подшипника	Внутренний диаметр подшипника	Осевая нагрузка	Радиальная нагрузка	Коэффициент надежности	Обобщенный коэффициент	Частота вращения
▶	16.08.2012 19:21	Стан 2000 х/п, клеть 3	1	422	317	0	500000	0	0	0
	01.10.2012 20:32	Стан 2000 х/п, клеть 4	1	422	317	0	500000	0	0	0
	01.10.2012 20:40	Стан 2000 х/п, клеть 2	1	422	317	0	500000	0	0	0
*										

Рис. 3. Интерфейс программы с сохраненным расчетом в базе данных

Таким образом, учитывая полученные экспериментальные, лабораторные исследования и обобщенные положения при определении толщины масляной пленки, была разработана программа для ЭВМ в среде *Visual Basic* по контактно-гидродинамическому расчету подшипников качения при выбранных технологических условиях работы стана холодной прокатки, позволяющая выявлять отклонения от заданных параметров и своевременно изменять режимы смазки. В программе имеется возможность сохранения исходных условий и результатов расчета в базе данных, может быть использована как в учебном процессе, так и на практике при решении вопросов продления ресурса подшипников качения.

Модель контактно-гидродинамического расчета подшипников качения, реализованная в программе, актуальна для узлов трения машин бесфильтрного волочения проволоки [1, 8, 19, 20], а также для узлов трения алмазно-канатных машин и другого оборудования, задействованного при добыче блочного высокопрочного камня [9, 10, 16, 17].

Список литературы

- Бахматов Ю.Ф., Пащенко К.Г., Кальченко А.А., Белов А.С., Тютяряков Н.Ш. Совмещенный процесс бесфильтрного волочения и очистки поверхности катанки // *Металлург*, 2014. – № 4. – С. 88-91.
- Веников, В.А. Теория подобия и моделирования / В.А. Веников, Г.А. Веников. – М.: Высш. шк., 1984. – 439 с.
- Дудоров, Е.А. Комплексное конструирование тяжелонагруженных узлов трения металлургических машин с повышенными ресурсными характеристиками при масляно-воздушном смазывании: дис. ... канд. техн. наук / Е.А. Дудоров. – Магнитогорск, 2013. – 171 с.
- Коднир Д.С. Контактная гидродинамика смазки деталей машин. – М.: Машиностроение, 1976. – 304 с.
- Коднир Д.С., Жильников Е.П., Байбородов Ю.И. Эластогидродинамический расчёт деталей машин. – М.: Машиностроение, 1988. – 160 с.: ил.
- Мироненков Е.И. Повышение ресурса подшипников качения рабочих валков широкополосовых станов созданием режима эластогидродинамической смазки: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13. – М., 2007. – 109 с.
- Пат.55130 РФ, МПК G01M 13/04. Установка для измерения момента сопротивления в подшипниках качения / Жиркин Ю.В., Железков О.С., Мироненков Е.И., Юрченко Г.Н., Дудоров Е.А. – Опубл. 27.07.2006, Бюл. № 21. – 2 с.
- Пащенко К.Г., Бахматов Ю.Ф., Голубчик Э.М. Влияние пластического растяжения – изгиба в совмещенном процессе удаления окалина – волочения на свойства проволоки // *Сталь*. – 2011. – № 3. – С. 47-49.
- Першин Г.Д., Уляков М.С. Анализ влияния режимов работы канатных пил на себестоимость отделения монолитов камня от породного массива // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2014. – № 2. – С. 125-135.
- Першин Г.Д., Уляков М.С. Повышение эффективности разработки месторождений блочного высокопрочного камня // *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. – 2014. – № 7. – С. 10-18.
- Петров Н.П. Гидродинамическая теория смазки. [Текст] / Петров Н.П. Издательство академии наук СССР, 1948. – 160 с.
- Першин Г.Д., Караулов Н.Г., Уляков М.С. The research of high-strength dimension stone mining technological schemes in Russia and abroad // *Сборник научных трудов Sworld*. Вып. 2. Том 11. – Одесса: КУПРИЕНКО, 2013. – С. 64-73.
- Першин Г.Д., Караулов Н.Г., Уляков М.С., Шаров В.Н. Features of diamond-wire saws application for rock overburden removal at marble quarry construction // *Сборник научных трудов Sworld*. Выпуск 3. Том 14. Одесса: КУПРИЕНКО, 2013. С. 39-42.
- Султанов Н. Л. Использование теории подобия при разработке параметров механической модели для определения моментов сопротивления в подшипниках качения / Н.Л. Султанов, Ю.В. Жиркин, Е.И. Мироненков и др. // *Materiály viii mezinárodní vědecko-praktická konference: сб. докл.* – Прага, Чехия, 2012. – С. 30-35.
- Седов Л.М. Методы подобия и размерности в механике. – М.: Наука, 1987. – 432 с.
- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013611708. Математическая модель контактно-гидродинамического расчета подшипников качения / Султанов Н.Л., Жиркин Ю.В., Мироненков Е.И. и др.; ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».
- Технологическая инструкция / ЛПЦ №11. – Магнитогорск, 2011.
- Эйгенсон, Л.С. Моделирование. – М.: 1952. – 230 с.
- Bakhmatov Y.F., Pashchenko K.G. Plastic Machining of Wire Rod in Die-Free Drawing, in the Presence of Ultrasound // *Steel in Translation*, 2014, Vol. 44, № 8, pp. 607–609.
- Pashchenko K.G., Bakhmatov Y.F., Golubchik E.M. Influence of plastic tension-flexure on the wire properties in scale removal and drawing // *Steel in Translation*, 2011, Vol. 41, № 3, pp. 246–249.

References

1. Baxmatov Y.F., Pashchenko K.G., Kalchenko A.A., Belov A.S., Tyutyryakov N.S. Sovmeshennyj process besfilernogo volocheniya i ochistki poverxnosti katanki // *Metallurg*. – 2014. – № 4. – pp. 88-91.
2. Venikov V.A. Teoriya podobiya i modelirovaniya [Tekst] / V.A. Venikov., G.A. Venikov. – M.: Vyssh. shk., 1984. – 439 p.
3. Dudorov E.A. Kompleksnoe konstruirovaniye tyazhe-lonagruzhennykh uzlov treniya metallurgicheskikh mashin s povyshennymi resursnymi karakteristikami pri maslo-vozdushnom smazyvani: dis. ... kand. texn. nauk. – Magnitogorsk, 2013. – 171 p.
4. Kodnir, D.S. Kontaktnaya gidrodinamika smazki detalej mashin [Tekst] / D.S. Kodnir. – M.: Mashinostroenie, 1976. – 304 p.
5. Kodnir D.S., Zhilnikov E.P., Bajborodov Y.I. Elastogidrodinamicheskij raschyot detalej mashin. – M.: Mashinostroenie, 1988. – 160 p.: il.
6. Mironenkov E.I. Povysenie resursa podshipnikov kacheniya rabochix valkov shirokopolosovykh stanov sozdaniem rezhima elastogidrodinamicheskoy smazki: dis. ... kand. texn. nauk: 05.02.13. – M., 2007. – 109 p.
7. Pat.55130 RF, MPK GO1M 13/04. Ustanovka dlya izmereniya momenta soprotivleniya v podshipnikax kacheniya / Y.V. Zhirkin, O.S. Zhelezkov, E.I. Mironenkov, G.N. Yurchenko, E.A. Dudorov. – Opubl. 27.07.2006, Byul. № 21. – 2 p.: il.
8. Pashchenko K.G., Baxmatov Y.F., Golubchik E.M. Vliyanie plasticheskogo rastyazheniya – izgiba v sovmeshennom processe udaleniya okaliny – volocheniya na svojstva provoloki // *Stal*. 2011. № 3. pp. 47-49.
9. Pershin G.D., Ulyakov M.S. Analiz vliyaniya rezhimov raboty kanatnyx pil na sebestoimost' otdeleniya monolitov kamnya ot porodnogo massiva // *Fiziko-texnicheskie problemy razrabotki poleznyx iskopaemyx*. – 2014. – № 2. – pp. 125-135.
10. Pershin G.D., Ulyakov M.S. Povysenie effektivnosti razrabotki mestorozhdenij blochnogo vysokoprochnogo kamnya // *Izvestiya vysshix uchebnyx zavedenij. Gornyj zhurnal*. – 2014. – № 7. – pp. 10-18.
11. Petrov N.P. Gidrodinamicheskaya teoriya smazki. – Izd-vo akademii nauk SSSR, 1948. – 160 pp.
12. Pershin G.D., Karaulov N.G., Ulyakov M.S. The research of high-strength dimension stone mining technological schemes in Russia and abroad // *Sbornik nauchnyx trudov Sworld*. Vypusk 2. Tom 11. – Odessa: KUPRIENKO, 2013. – pp. 64-73.
13. Pershin G.D., Karaulov N.G., Ulyakov M.S., Sharov V.N. Features of diamond-wire saws application for rock overburden removal at marble quarry construction // *Sbornik nauchnyx trudov Sworld*. Vyp. 3. Tom 14. – Odessa: KUPRIENKO, 2013. – pp. 39-42.
14. Sultanov N.L. Ispolzovanie teorii podobiya pri razrabotke parametrov mexanicheskoy modeli dlya opredeleniya momentov soprotivleniya v podshipnikax kacheniya / N.L. Sultanov Y.V. Zhirkin, E.I. Mironenkov i dr. // *Materiály VIII mezinárodní vědecko-praktická konference: sb. dokl.* – Praha, Chexiya, 2012. – pp. 30-35.
15. Sedov L.M. Metody podobiya i razmernosti v mexanike [Tekst] / L.M. Sedov. – M.: Nauka, 1987. – 432 p.
16. Svidetelstvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM № 2013611708. Matematicheskaya model kontaktno-gidrodinamicheskogo rascheta podshipnikov kacheniya / Sultanov N.L., Zhirkin Y.V., Mironenkov E.I. i dr. – FGBOU VPO «Magnitogorskij gosudarstvennyj texnicheskij universitet im. G.I. Nosova».
17. *Texnologicheskaya instrukciya* / LPC № 11. – Magnitogorsk, 2011.
18. Ejgenson, L.S. Modelirovanie / L.S. Ejgenson. – M.: 1952. – 230 p.
19. Bakhmatov Y.F., Pashchenko K.G. Plastic Machining of Wire Rod in Die-Free Drawing, in the Presence of Ultrasound // *Steel in Translation*. – 2014. – Vol. 44, № 8. – pp. 607-609.
20. Pashchenko K.G., Bakhmatov Y.F., Golubchik E.M. Influence of plastic tension-flexure on the wire properties in scale removal and drawing // *Steel in Translation*. – 2011. – Vol. 41, № 3. – pp. 246-249.

УДК 547

ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК РАЗЛИЧНОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ НАГРЕВАНИИ**Захарова М.А., Кудрявцева В.Л., Чудинова Е.А., Ерофеева Г.В.***Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск,
e-mail: maz1@tpu.ru*

Проведено теоретическое изучение строения кристаллической решетки золота и экспериментальное исследование поведения золотых тонких пленок разной структуры и толщины при их нагреве от комнатной температуры до температур порядка 500 К в камере. Показано, что нагрев до таких температур провоцирует начало процесса отжига для пленок толщиной 30 нм, в то время как пленки из наночастиц с размерами порядка 50 нм, нанесенных на подложку с использованием органического раствора, не претерпевают значительных изменений и расширяются согласно механизму теплового расширения объемного образца. Изучены теоретические модели теплового расширения тонких пленок и выбрана модель, соответствующая полученным экспериментальным данным. Исследование теплового расширения проводилось методами рентгеноструктурного анализа с использованием параллельного пучка.

Ключевые слова: тепловое расширение, тонкие пленки, золото, нагревание, наноструктура**THERMAL BEHAVIOR OF GOLD THIN FILMS OF DIFFERENT STRUCTURE WHILE HEATING****Zakharova M.A., Kudryavtseva V.L., Chudinova E.A., Erofeeva G.V.***National research Tomsk polytechnic university, Tomsk, e-mail: maz1@tpu.ru*

Theoretical study of expansion process and experimental study of gold thin films thermal behavior while heating from room temperature up to approximately 500 K in the heating chamber were made. It was revealed that heating up to such temperatures provoke the start of annealing process for thin film of 30 nm thickness. The nanoparticles thin films thermal behavior follow the pattern for thermal expansion of bulk material and fits theoretical curve of bulk thermal expansion. Different approaches to describe thermal behavior of thin films were analyzed and the one fits experimental data was defined. Determination of lattice parameters was made using XRD with parallel beam configuration.

Keywords: thermal expansion, thin films, gold, heating, nanostructure

Ввиду уменьшения размеров используемых девайсов исследование тепловых процессов на наноуровне становится все более перспективной областью науки [1, 2]. Однако физические характеристики вещества в виде тонкой пленки могут существенно отличаться от свойств этого же вещества в массивном состоянии. Знание основных закономерностей изменения свойств при переходе от массивных образцов к тонким пленкам необходимо для создания пленочных материалов с заданными свойствами.

На сегодняшний день широкое применение получило использование золота в качестве материала для тонких пленок. Оно имеет кубическую гранецентрированную решетку типа Cu с параметром решетки $a=4,0781 \text{ \AA}$. Расположение атомов в структурном типе меди соответствует кубической (трёхслойной) плотнейшей шаровой упаковке одинаковых атомов. Координационное число каждого атома – 12, координационный полиэдр – кубооктаэдр.

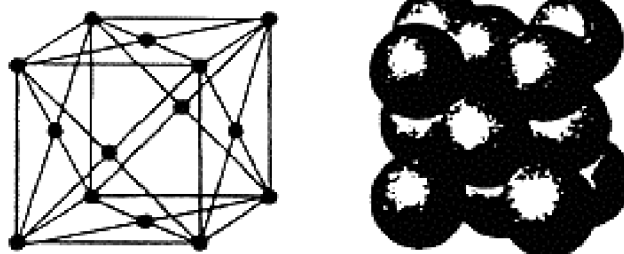
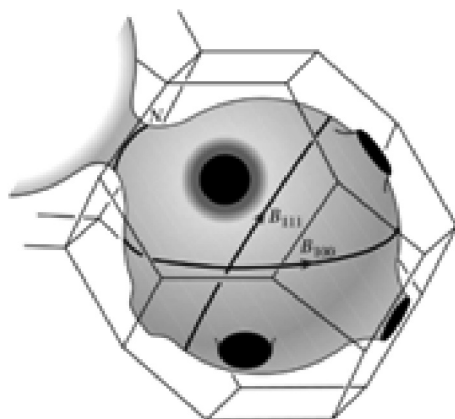


Рис. 1. Гранецентрированная кубическая (ГЦК) элементарная ячейка кристаллической решетки золота и схема упаковки атомов [1]

Одной из важных характеристик материала является поверхность Ферми. Она объясняет такие свойства металлов, как блеск, ковкость, электропроводимость и теплопроводность, а также отделяет заполненные электронные состояния в металлах от незаполненных при абсолютном нуле температуры [3]. Топология поверхности Ферми для меди, серебра и золота прибли-

зительно одинаковая и представляет собой гофрированный сфероид с восьмью узкими трубками, через которые он соединяется со сфероидами соседних первых зон Бриллюэна. Поверхность Ферми золота и соединение двух сфероидов золота в плоскости гексагональной грани представлена на рис. 2а, общая картина соединения нескольких ферми-сфероидов дана на рис. 2б.

а



б

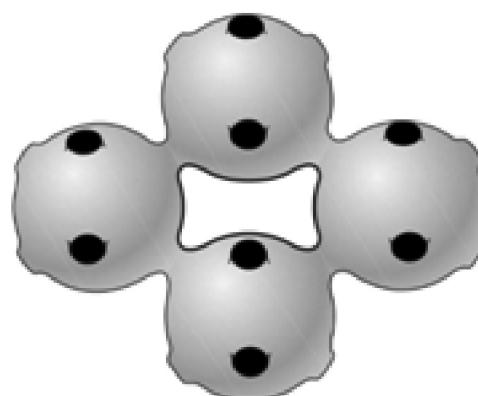


Рис. 2. Поверхность Ферми золота и зоны Бриллюэна [3]

Тонкие пленки широко используются для хранения данных, кроме того, использование тонких пленок распространено и в других направлениях микроэлектроники, где используется механизм изменения размеров наночастиц с помощью тепла [1, 4]. Теплопроводность металлов подробно изучена в терминах макропараметров, однако на наноуровне могут возникать новые явления. При нанесении тонкой пленки на подложку возможны некоторые проблемы, обусловленные спецификой эффекта теплового расширения для нанокристаллических структур. На свойства пленки значительное воздействие оказывает подложка, в особенности это касается коэффициента теплового расширения. Термоупругое поведение тонких пленок является предметом исследования многих работ [5, 6].

Одним из перспективных и точных методов определения параметра элементарной ячейки является метод рентгеноструктурного анализа (РСА), который широко применяется для измерения пространственной ориентации на атомном уровне, т.к. длина волны рентгеновских лучей невелика.

Таким образом, целью данной работы является проведение экспериментального измерения коэффициента теплового расширения тонких пленок из золота на силиконовой подложке методами РСА и теоретическое обоснование полученного результата.

Материалы и методы исследования

В данном исследовании на силиконовую пластину (ориентация (100)) была нанесена золотая тонкая пленка посредством термического напыления. Покрытие из золота осаждено на предварительно нанесенный слой хрома толщиной 2,2 нм для увеличения адгезии. Толщина покрытия составила 30 нм (далее 30AuCr). Золотая пластинка толщиной 30 мм была использована в качестве исходного образца. Все слои структуры были выращены вертикально и демонстрируют преимущественную ориентацию вдоль кристаллической плоскости (111) гранецентрированной элементарной ячейки золота перпендикулярно к поверхности. Кроме того, были исследованы образцы с покрытием из наночастиц для изучения вопроса о влиянии подложки на термическое расширение пленки. Диаметр частиц пленки составил 100 нм (коммерческий коллоидный раствор от VBIInternational), частицы также обладали преимущественной (111) ориентацией [3].

Для определения параметров кристаллических решеток широко используется формула, вытекающая из условия Вульфа – Брегга и устанавливающая

взаимосвязь между положением рефлекса и межплоскостным расстоянием [8]:

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{\sin \theta_i - \sin \theta_f}{\sin \theta_f}, \quad (1)$$

где d – межплоскостное расстояние, Δd – изменение межплоскостного расстояния при расширении, θ_i – угол, характеризующий положения исходного рефлекса, θ_f – угол, характеризующий положения рефлекса после нагрева. Следует отметить, что данные, полученные с использованием симметричной схемы рентгеновских съемок, будут характеризовать изменение межплоскостного расстояния именно в этом направлении, т.к. проводился анализ рефлекса от семейства плоскостей с индексами (111), параллельно поверхности образца.

Для исходного образца коэффициент линейного теплового расширения определяется формулой

$$\frac{da}{a} = \frac{a - a_0}{a_0} = \alpha dT, \quad (2)$$

где a – параметр решетки золота при текущей температуре, a_0 – параметр решетки золота при комнатной температуре, α – линейный коэффициент теплового расширения, dT – изменение температуры при нагреве.

Из формулы (2) видно, что линейный КТР может быть определен как угол наклона кривой, характеризующей зависимость относительного расширения кристаллической решетки от изменения температуры.

Подобный характер расширения свойственен образцам с крупным зерном, однако в некоторых работах [8] указывается, что КТР является функцией температуры и аппроксимация экспериментальных кривых, полученных в большом диапазоне температур, наиболее удачна полиномом

$$\frac{\Delta a}{a} = A_1(T - 293) + A_2(T - 293)^2, \quad (3)$$

где a – параметр решетки при температуре 293 К, Δa – разница между параметрами решетки при текущей температуре и при 293 К, T – текущая температура, A_1 , A_2 – коэффициенты полинома, зависящие от материала и метода определения КТР. Для измерения КТР золота методами рентгеновской дифракции они равны соответственно $1,27 \cdot 10^{-5}$ и $4,25 \cdot 10^{-9}$.

Как показали исследования, коэффициент теплового расширения тонкой пленки во многом зависит от материала, на который она нанесена [9]. Так, если пленка нанесена на жесткую подложку, то при тепловом расширении она испытывает сжимающие напряжения возле границы раздела, потому что подложка удерживает пленку от дальнейшего расширения. Чем тоньше пленка, тем сильнее влияние сдерживающих напряжений, генерируемых подложкой.

Существует два подхода к способу определения параметра решетки в связи с влиянием подложки, как следствие упругой деформации. Первый подход выражается в рассмотрении тепловой деформации как добавочной:

$$\frac{\Delta a}{a} = \alpha T + \mu \alpha T = (\mu + 1) \alpha T, \quad (4)$$

где μ – коэффициент Пуассона, α – коэффициент теплового расширения тонкой пленки. Однако формула

(4) справедлива только для случая, когда подложка не претерпевает теплового расширения, что характерно для динамических экспериментов с лазерным нагревом. Для описания статического нагрева в температурной камере необходимо учесть влияние теплового расширения подложки:

$$\frac{\Delta a}{a} = (\mu + 1)(\alpha_f - \alpha_s)T, \quad (5)$$

где α_f – КТР тонкой пленки, α_s – КТР подложки, μ – коэффициент Пуассона, ΔT – разница между начальной и текущей температурой.

Другой подход к описанию зависимости параметра решетки от температуры нагрева проистекает из рассмотрения напряжений в соответствии с формулой Стоуни [10], включающей анализ изменения кривизны поверхности тонкой пленки и являющейся выражением для определения двухосного напряжения. В работах [7, 9] используется подобный способ расчета деформации тонкой пленки, что приводит к выражению

$$\left(\frac{da}{a} \right)_z = \frac{(\alpha_f - \alpha_s)}{1 - \mu} T, \quad (6)$$

где α_f – КТР тонкой пленки, α_s – КТР подложки, μ – коэффициент Пуассона, а знак оси z для относительного расширения кристаллической решетки указывает его направление.

Учет только вертикального расширения в теоретических моделях подтверждается экспериментальными данными с разрешением по времени с помощью нагрева лазером [9].

Еще одной моделью, описывающей тепловое расширение тонкой пленки, может служить работа исследовательской группы Томсена [10], трактующая эволюцию напряжений в тонкой пленке посредством распространения акустических волн под влиянием лазера. В своих работах Томсен придерживался феноменологического описания процесса и разделял напряжение на вклад от электрического и теплового воздействия. Если сопоставить приведенные в [10] определения для изотропного теплового напряжения, можно прийти к выражению для тепловой деформации

$$\sigma = 3B\alpha T = c^2 \rho \varepsilon; \quad (7)$$

$$\varepsilon = \frac{3B\alpha T}{c^2 \rho}, \quad (8)$$

где B – модуль всестороннего сжатия, c – продольная скорость звука в материале, ρ – плотность материала и $\varepsilon = \Delta a/a$ – деформация решетки.

Данный подход использовался в современном исследовании научной группы Матте Николая [9] в экспериментах с лазерным сверхбыстрым нагревом. Однако, как и выражение (4), формула (8) нуждается в учете расширения подложки для статического случая. Окончательно получаем

$$\varepsilon = \frac{3B(\alpha_f - \alpha_s)T}{c^2 \rho}. \quad (9)$$

Условия, геометрия съемок и обработка данных. В данной работе исследование золотых тонких

пленок проводилось с помощью дифрактометра Rigaku Smart Lab 9 kW Thin-Film Diffractometer (Karlsruhe Institute of technology (KIT), Institute for Photon Science and Synchrotron Radiation (IPS), г. Карлсруэ, Германия) с использованием Cu-K_α излучения ($\lambda=1,540\,59\text{ \AA}$) от вращающегося анода. Нагрев производился в температурной камере Anton Paar DHS1100, контролируемой приставкой TCU200 Temperature Control Unit в температурном интервале от 300 до 500 K с шагом от 1 до 5 K в зависимости от силы рассеяния (структуры образца и толщины покрытия). Нагревательная база температурной камеры состоит из нитрида кремния. Для измерения интенсивности дифракционных максимумов был использован линейный счетчик D/teX Ultra с размером точки 0,10 мм от компании Rigaku.

Ток и напряжение при измерении составили 45 кВ и 160-200 мА соответственно. Время одного измерения составило примерно 1,5 минуты.

Результаты исследования и их обсуждение

Экспериментальные результаты для исходного образца показали точное совпадение с теоретическим предсказанием в температурном интервале от 300 до 395 K. Дальнейшее нагревание вплоть до 480 K приводит к небольшим нелинейным отклонениям (рис. 3).

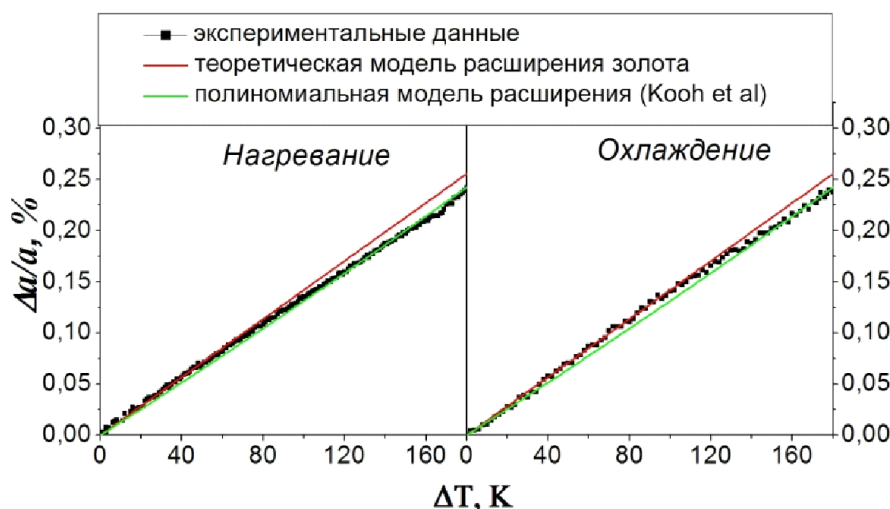


Рис. 3. Экспериментальные данные (черные точки) и теоретическое предсказание для линейной (красная линия) и полиномиальной (зеленая линия) теории поведения коэффициента теплового расширения для образца из золота, толщиной 30 мкм. Приведены данные для нагревания от комнатной температуры и последующего охлаждения до нее

Отклонение от теоретической прямой может свидетельствовать о нелинейности теплового расширения золота при нагреве до высоких температур. Кроме того, некоторые изменения структуры образца, частич-

ный отжиг или механический гистерезис могут возникать при нагреве. Для аппроксимации экспериментальной зависимости может быть использована полиномиальная функция.

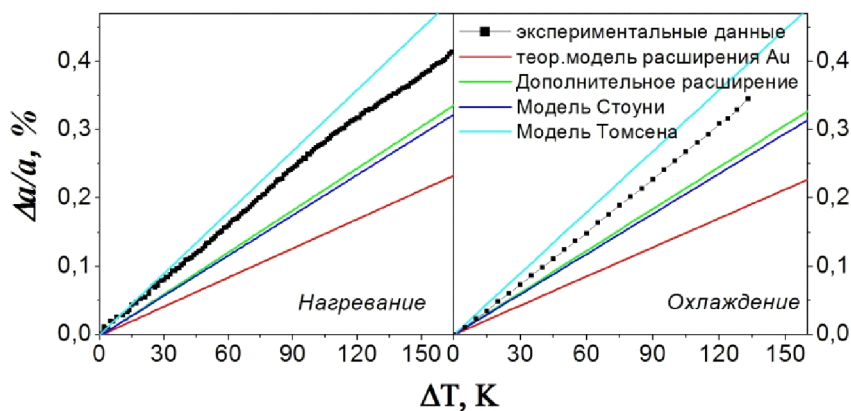


Рис. 4. Экспериментальные и теоретические кривые для образца 30AuCr при нагреве и охлаждении соответственно. На рисунке изображены теоретические линейные зависимости, описанные в методике

Нанесенная посредством термического напыления тонкая пленка образца 30AuCr демонстрирует широкую область линейности (рис. 4). Наклон кривой слегка изменяется только после 400 К, что может свидетельствовать о начале процесса отжига.

Наиболее близкой к экспериментальной кривой для 30AuCr является модель Томсена, однако она все же недостаточно хорошо аппроксимирует данные. Это может быть

следствием пренебрежения вкладом расширения в плоскости образца, потому что сама подложка немного расширяется. К тому же пленка не полностью однородна и кристаллическая решетка может расширяться параллельно подложке для заполнения пробелов между кристаллитами. Это расширение спровоцирует частичную релаксацию напряжений и сдвинет кривую в область более низких значений.

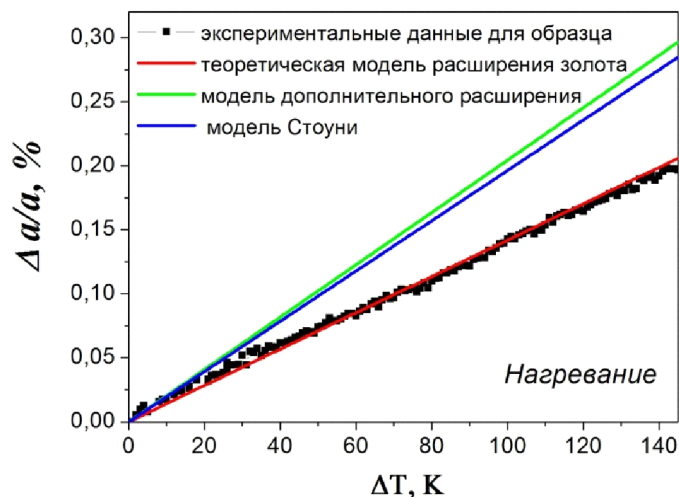


Рис. 5. Экспериментальная и теоретическая кривые для образца *bbl100layer* с покрытием из наночастиц; черные точки – экспериментальные данные, красная линия – расширение объемного образца

Термические свойства образцов из наночастиц в точности соответствуют поведению объемного образца. Это связано с тем, что наночастицы не ограничены подложкой и имеют пространство для расширения вокруг них. Эта теория хорошо согласуется с экспериментальными результатами (рис. 5).

Выводы

Тепловое расширение золотой пластины коррелирует с теоретическим предсказанием с небольшим отклонением, связанным нелинейной зависимостью с КТР, начинавшейся с 400 К и усиливающейся при дальнейшем нагревании. Термические свойства образцов из наночастиц в точности соответствуют поведению объемного образца.

Для нанесенной термическим напылением пленки толщиной 30 нм нагревание до 430 К не приводит к значительным изменениям, расширение происходит линейно в температурном диапазоне от 300 до 430 К, наблюдаются незначительные отклонения, косвенно свидетельствующие о на-

чале процесса отжига. Наклон кривой в линейном диапазоне почти одинаков и ближе всего к кривой Томсена, но все еще немного ниже. Это может быть следствием расширения кристаллической решетки в плоскости пленки за счет ее несовершенств и пустот между зернами.

Список литературы

1. Элементарная ячейка кристаллической решетки золота. – URL: <http://www.naukaspb.ru/spravochniki/Demo%20Metal/1.htm>.
2. Aviles F., Ceh O., Oliva A.I. Physical properties of Au and Al thin films measured by resistive heating. *Surface Review and Letters*, Vol. 12, No. 1 (2005) 101–106.
3. Bracht H.N., Wehmeier S., Eon A., Plech D., Issenmann et al. Reduced thermal conductivity of isotopically modulated silicon multilayer structures. *Appl. Phys. Lett.* 101, 064103 (2012).
4. Fermi Surfaces and Metals. – URL: http://www2.phy.ilstu.edu/~marx/ph355/Kittel_Solid%20State%20Physics/c09.pdf.
5. Stoney G.C., *Proc. R. Soc. London, Ser. A* 32, 172 (1909).
6. Kimling J., Maier M., Kotaidis V., Okenve B., Ballot H., Plech A. The Turkevich method for gold nanoparticles synthesis revisited, *J. Phys. Chem. B* 110 (2006) 15700.

7. Kotaidis V., Dekorsy T., Ibrahimkuty S., Issenmann D., Khakulin D., Plech A. Vibrational symmetry breaking of supported nanospheres, *Phys. Rev. B Rapids* 86 (2012) 100101.

8. Nicoul M., Shymanovich V., Tarasevitch A., von der Linde D., Sokolowski-Tinten K. *APL* 98, 191902 (2011).

9. Thomsen C., Grahn H.T., Maris H.J. and J. Tauc. Surface generation and detection of phonons by picosecond light pulses. *Phys Rev B* 34 (1986) 4129.

10. Yeongseok Zoo, Adams D., Mayer J.W., Alford T.L. Investigation of coefficient of thermal expansion of silver thin film on different substrates using X-ray diffraction *Thin Solid Films* 513 (2006) 170–174.

References

1. Elementarnaya yacheyka kristallicheskoj reshetki zolota. – URL: <http://www.naukaspb.ru/spravochniki/Demo%20Metall/1.htm>.

2. Aviles F., Ceh O., Oliva A.I. Physical properties of Au and Al thin films measured by resistive heating. *Surface Review and Letters*, Vol. 12, No. 1 (2005) 101–106.

3. Bracht H., Wehmeier N., Eon S., Plech A., Issenmann D. et al. Reduced thermal conductivity of isotopically modulated

silicon multilayer structures. *Appl. Phys. Lett.* 101, 064103 (2012).

4. Fermi Surfaces and Metals. – URL: http://www2.phy.ilstu.edu/~marx/ph355/Kittel_Solid%20State%20Physics/c09.pdf.

5. Stoney G.C., *Proc. R. Soc. London, Ser. A* 32, 172 (1909).

6. Kimling J., Maier M., Kotaidis V., Okenve B., Ballot H., Plech A.: The Turkevich method for gold nanoparticles synthesis revisited, *J. Phys. Chem. B* 110 (2006) 15700.

7. Kotaidis V., Dekorsy T., Ibrahimkuty S., Issenmann D., Khakulin D., Plech A. Vibrational symmetry breaking of supported nanospheres, *Phys. Rev. B Rapids* 86 (2012) 100101.

8. Nicoul M., Shymanovich V., Tarasevitch A., von der Linde D., Sokolowski-Tinten K. *APL* 98, 191902 (2011).

9. Thomsen C., Grahn H.T., Maris H.J., Tauc J. Surface generation and detection of phonons by picosecond light pulses. *Phys Rev B* 34 (1986) 4129.

10. Yeongseok Zoo, Adams D., Mayer J.W., Alford T.L. Investigation of coefficient of thermal expansion of silver thin film on different substrates using X-ray diffraction *Thin Solid Films* 513 (2006) 170–174.

УДК 62-1/-9

ВЛИЯНИЕ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ГАЗОВОГО ПОТОКА НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТАННЫХ ДЕТАЛЕЙ

Иванов Д.А.

*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова,
Санкт-Петербург, e-mail: tm_06@mail.ru*

Разработан метод повышения механических свойств металлических материалов в среде пульсирующего дозвукового газового потока. Экспериментально установлено, что воздействие пульсаций воздушного или водовоздушного потока позволяет снизить уровень остаточных напряжений в металлических изделиях и уменьшить их деформации.

Ключевые слова: пульсирующий газовый поток, термообработка, остаточные напряжения, конструкционные стали

INFLUENCE OF THE PULSATORY GAS FLOW ON THE STRESSED STATE OF THE HEAT-TREATED COMPONENTS

Ivanov D.A.

*Baltic state technical university «VOENMEH» named after D.F. Ustinov, Saint Petersburg,
e-mail: tm_06@mail.ru*

A method for enhancing the mechanical properties of metallic materials in the pulsating environment of subsonic gas flow. It was established experimentally that the effect of the pulsations of the air or water-air stream to reduce the level of residual stresses in the metal products and to reduce their deformation.

Keywords: the pulsatory gas flow, heat treatment, residual stresses, structural steels

В процессе как изготовления, так и ремонта металлических деталей могут применяться такие связанные с термическим воздействием методы, как сварка, наплавка, восстановление покрытий газотермическим напылением а также различные виды упрочняющей термической обработки, включая закалку стальных деталей с последующим отпуском.

Следствием неравномерности и неоднородности объёмных изменений в изделиях при охлаждении в них возникают термические, а в случае протекания структурных превращений – и фазовые остаточные напряжения, оказывающие существенное влияние на надёжность, долговечность и коррозионную стойкость. Поэтому вопрос оптимизации остаточных напряжений в металлических термообработанных деталях представляет значительный практический интерес.

Одним из современных методов повышения механических свойств металлических материалов является использование в качестве закалочной среды пульсирующего дозвукового водовоздушного потока. Закалка осуществляется с помощью установки, позволяющей генерировать дозвуковые пульсирующие воздушные или водовоздушные потоки. Установка (рисунок) состоит из системы подачи воздуха, устройства

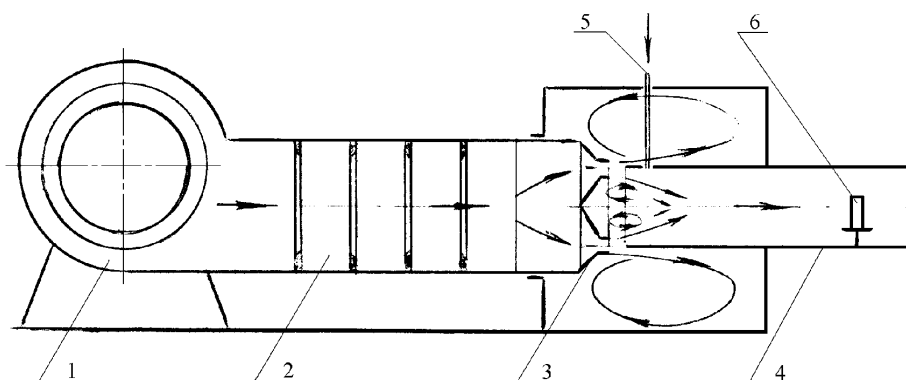
возбуждения пульсаций, рабочей камеры и магистрали подвода охлаждающей жидкости. В установке создается пульсирующий воздушный поток с частотой колебаний 400–1200 Гц, импульсным воздушным давлением около 10 КПа и переменным звуковым давлением до 100 дБ, оказывающий комплексное воздействие на помещённое в установку изделие. В воздушный поток может вводиться по магистрали охлаждающая жидкость, в качестве которой обычно используется вода.

Предварительно нагретое до температуры закалки изделие после требуемой выдержки в печи при заданной температуре помещается в рабочую камеру установки, куда подается пульсирующий воздушный или водовоздушный поток, прошедший через набор диафрагм, установленных в канале на пути движения воздуха, истекающий из кольцевого сопла и взаимодействующий с резонатором. Происходит охлаждение изделия с заданной скоростью за счет однофазного или двухфазного (воздушного или водовоздушного) пульсирующего потока.

Скорость охлаждения изделия регулируется увеличением или уменьшением расхода охлаждающей жидкости. Воздействие пульсаций закалочной среды в процессе охлаждения стали обеспечивает по сравнению с закалкой в традиционных средах

(вода, масло) более высокую дисперсность продуктов мартенситного превращения и продуктов распада мартенсита в ходе последующего отпуска. В результате закаленные с применением импульсного воз-

действия стальные изделия после окончательной термической обработки обладают повышенными механическими свойствами: прочностью, пластичностью, ударной вязкостью.



Установка для обдува термообрабатываемых изделий воздушным или водовоздушным пульсирующим потоком: 1 – воздуходувка ТВР-3; 2 – успокоительная камера; 3 – генератор пульсаций; 4 – рабочая камера; 5 – подвод воды; 6 – объект обдува

Совмещение с воздействием пульсирующего потока регулирования скорости охлаждения в процессе закалки позволяет управлять свойствами изделий, а также уровнем и знаком остаточных напряжений, которые способны оказывать значительное влияние на конструктивную прочность, как сочетание требуемого уровня значений показателей статической прочности, надежности и долговечности [1–10].

Было проведено исследование влияния дозвукового низкочастотного пульсирующего потока при закалочном охлаждении на уровень и знак остаточных напряжений в сталях.

Остаточные напряжения после закалки делятся на температурные и фазовые. Чтобы

исключить влияние последних, внутренние напряжения определялись на кольцевых образцах из стали аустенитного класса 12Х18Н9Т (С – 0,12%, Cr – 18%, Ni – 9%, Ti – 0,5%), в которой отсутствует мартенситное превращение в области положительных температур.

Уровень остаточных напряжений в зависимости от термической обработки оценивался с помощью колец Френча.

Кольцевые образцы подвергались нагреву до температуры 900 °С. Охлаждение образцов проводилось в воде и в пульсирующем дозвуковом водовоздушном потоке. Полученные значения величин остаточных напряжений приведены в таблице.

Значения остаточных напряжений в образцах из стали 12Х18Н9Т после закалки

Режим закалки	Свойства		
	Среда охлаждения	HRB	$\sigma_{ост}$, МПа
900	вода	70–80	37
	пульсирующая водовоздушная смесь	70–80	–25

Как видно из приведённых в таблице результатов, обработка пульсирующим потоком оказывает влияние не только на величину, но и на знак остаточных напряжений, при этом сама величина напряжений уменьшается.

В дальнейшем было изучено влияние пульсирующего дозвукового водовоздушного потока на напряженно-деформированное состояние стали 40Х при термообработке.

Для стали 40Х, как и для многих других конструкционных сталей, распространён-

ным способом придания требуемых механических и эксплуатационных свойств является закалка с последующим отпуском. Среди других видов термической обработки закалку выделяет высокая скорость охлаждения после нагрева, обеспечивающего аустенитное состояние, необходимая в большинстве случаев для переохлаждения аустенита до температуры начала мартенситного превращения. Критическая скорость охлаждения может составлять сотни градусов в секунду. В результате при охлаждении термические временные напряжения, возникающие за счёт градиента температур по объёму изделия, могут превосходить значение предела текучести (при данной температуре), вызывать пластическую деформацию, и после выравнивания температурного поля в наружных слоях изделия будут иметь место сжимающие (отрицательные), а во внутренних слоях – растягивающие (положительные) остаточные термические напряжения.

К пластической деформации материала приводят фазовые структурные напряжения, возникающие в ходе мартенситного превращения, сопровождающегося увеличением объёма. Остаточные фазовые напряжения в наружных слоях – положительные, во внутренних – отрицательные, и таким образом, имеют знаки, противоположные знакам остаточных термических напряжений.

Фазовые напряжения алгебраически складываются с термическими и в зависимости от соотношения их величин могут образовываться различные эпюры распределения напряжений по сечению. Остаточные напряжения, возникающие в процессе закалки, полностью не устраняются даже после высокого отпуска, поэтому перед современными способами термообработки, включая комбинированные, стоит задача по осуществлению эффективного управления напряжениями в изделиях.

Были проведены исследования влияния пульсирующего дозвукового водовоздушного потока на напряжения в стали 40X при закалке и уровня остаточных напряжений в стандартно закалённых изделиях после отпуска с импульсной обработкой. Исследования проводились на экспериментальной установке, генерирующей воздушные и водовоздушные пульсирующие потоки.

Нагретый до температуры закалки, составляющей для стали 40X 860 °C, образец помещался в установку. Скорость охлажде-

ния регулировалась изменением расхода охлаждающей жидкости, в качестве которой использовалась вода, диспергируемая пульсирующим газовым потоком.

В ходе оценки воздействия пульсирующего дозвукового водовоздушного потока на сталь в процессе закалочного охлаждения были проведены исследования её влияния на уровень напряжений и деформаций при закалке.

Сравнение величин напряжений при стандартной и экспериментальной обработках осуществлялось с помощью образцов из стали 40X длиной 52 мм и поперечным сечением 4,2×2,3 мм. Максимальный прогиб образцов под действием закалочных напряжений составил 0,06 мм при стандартной закалке в масле и 0,02 мм при закалке в пульсирующем дозвуковом водовоздушном потоке.

Среднее значение наибольших тангенциальных остаточных напряжений в образцах Френча, закалённых в масле, составило –90,5 МПа. Среднее значение максимальных тангенциальных остаточных напряжений в образцах, закалённых в установке под воздействием пульсирующего водовоздушного потока, составило 32,6 МПа, что свидетельствует о преобладании в них фазовых остаточных напряжений. Это может быть объяснено более полным превращением аустенит-мартенсит при закалке в пульсирующем водовоздушном потоке, о чём говорит повышение твёрдости с 53 единиц HRC после закалки в масле до 55 единиц HRC после закалки в установке.

Низкое значение фазовых остаточных напряжений является результатом значительной дисперсности продуктов мартенситного превращения по сравнению со стандартной закалкой и соответственно меньших напряжений и деформаций, вызванных структурными превращениями, а также релаксацией остаточных напряжений под действием пульсирующего водовоздушного потока: по всему объёму возникают колебательные напряжения, изменяющиеся в пределах амплитудных значений от $-\max$ до $+\max$ с частотой, пропорциональной частоте колебаний параметров газового потока. Максимальные суммарные значения напряжений возникают в местах концентраторов остаточных напряжений, что способствует наряду с общим уменьшением уровня остаточных напряжений и снижению их числа.

В дальнейшем были проведены исследования воздействия пульсирующих воздушных струй в процессе охлаждения после отпуска стандартно закалённых в масле образцов из стали 40Х на уровень остаточных напряжений. Данные, полученные с помощью колец Френча, показывают, что остаточные напряжения после отпуска с импульсной обработкой в среднем на 35% меньше, чем остаточные напряжения в образцах, не подвергавшихся импульсному воздействию. Нагрев при отпуске уменьшает сопротивление движению дислокаций и облегчает их перемещение под воздействием пульсирующего воздушного потока, а значит, и релаксацию остаточных напряжений, а кроме того, происходит сглаживание неравномерности распределения остаточных напряжений, приводящей к поводкам и короблениям. В результате, распределение остаточных напряжений становится более плавным, поэтому релаксация с течением времени оставшихся равномерно распределённых остаточных напряжений не будет приводить к неравномерным деформациям, а изменение размеров изделия будет сведено к минимуму при сохранении его формы.

По результатам исследований можно сделать вывод о том, что воздействие пульсаций воздушного или водовоздушного потока позволяет снизить уровень напряжений в металлических изделиях и уменьшить деформации. При этом охлаждающая способность установки может варьироваться от скорости, превышающей скорость охлаждения в масле, до скорости охлаждения воздушным потоком.

Список литературы

1. Булычев А.В., Иванов Д.А. Воздействие газоимпульсной обработки на структуру, свойства и напряжённое состояние металлических изделий // *Технология металлов*. – 2013. – № 11. – С. 30–33.
2. Воробьева Г.А., Иванов Д.А., Сизов А.М. Упрочнение легированных сталей термоимпульсной обработкой // *Технология металлов*. – 1998. – № 2. – С. 6–8.
3. Иванов Д.А. Повышение конструктивной прочности машиностроительных сталей путем импульсного воздействия при отпускном охлаждении // *Двигателестроение*. – 2005. – № 4. – С. 30–32.
4. Иванов Д.А., Засухин О.Н. Газоимпульсная обработка машиностроительных материалов без предварительного нагрева // *Двигателестроение*. – 2010. – № 2. – С. 20–22.
5. Иванов Д.А., Засухин О.Н. Повышение конструктивной прочности машиностроительных материалов в результате сочетания термической и газоимпульсной обработки // *Двигателестроение*. – 2012. – № 3. – С. 12–15.
6. Иванов Д.А., Засухин О.Н. Обработка пульсирующим газовым потоком высокопрочных и пружинных сталей // *Двигателестроение*. – 2014. – № 3. – С. 34–36.
7. Иванов Д.А. Прокаливаемость сталей при закалке в пульсирующем звуковом воздушном и водовоздушном потоке // *Технико-технологические проблемы сервиса*. – 2010. – № 11. – С. 50–53.
8. Иванов Д.А. Повышение конструктивной прочности металлических материалов путём их обработки нестационарными газовыми потоками без предварительного нагрева // *Технико-технологические проблемы сервиса*. – 2011. – № 4. – С. 24–29.
9. Иванов Д.А., Засухин О.Н. Использование газоимпульсной обработки в процессе термического упрочнения деталей бытовых машин // *Технико-технологические проблемы сервиса*. – 2012. – № 4. – С. 33–37.
10. Иванов Д.А. Воздействие газоимпульсной обработки на структуру и механические свойства нормализуемых сталей // *Технико-технологические проблемы сервиса*. – 2013. – № 3. – С. 19–22.

References

1. Bulychev A.V., Ivanov D.A. Vozdejstvie gazoimpulsnoj obrabotki na strukturu, svojstva i napryazhennoe sostoyanie metallicheskich izdelij // *Texnologiya metallov*. – 2013. – № 11. – pp. 30–33.
2. Vorobeveva G.A., Ivanov D.A., Sizov A.M. Uprochnenie legirovannykh stalej termoimpulsnoj obrabotkoj // *Texnologiya metallov*. – 1998. – № 2. – pp. 6–8.
3. Ivanov D.A. Povyshenie konstruktivnoj prochnosti mashinostroitelnykh stalej putem impulsnogo vozdejstviya pri otpusknom oxlazhdenii // *Dvigatelistroenie*. – 2005. – № 4. – pp. 30–32.
4. Ivanov D.A., Zasuxin O.N. Gazoimpulsnaya obrabotka mashinostroitelnykh materialov bez predvaritelnogo nagreva // *Dvigatelistroenie*. – 2010. – № 2. – pp. 20–22.
5. Ivanov D.A., Zasuxin O.N. Povyshenie konstruktivnoj prochnosti mashinostroitelnykh materialov v rezultate sochetaniya termicheskoy i gazoimpulsnoj obrabotki // *Dvigatelistroenie*. – 2012. – № 3. – pp. 12–15.
6. Ivanov D.A., Zasuxin O.N. Obrabotka pulsiruyushhim gazovym potokom vysokoprochnyx i pruzhinnykh stalej // *Dvigatelistroenie*. – 2014. – № 3. – pp. 34–36.
7. Ivanov D.A. Prokalivaemost stalej pri zakalke v pulsiruyushhem dozvukovom vozduzhnom i vodovozduzhnom potoke // *Texniko-tekhnologicheskie problemy servisa*. – 2010. – № 11. – pp. 50–53.
8. Ivanov D.A. Povyshenie konstruktivnoj prochnosti metallicheskich materialov putyom ix obrabotki nestacionarnymi gazovymi potokami bez predvaritelnogo nagreva // *Texniko-tekhnologicheskie problemy servisa*. – 2011. – № 4. – pp. 24–29.
9. Ivanov D.A., Zasuxin O.N. Ispolzovanie gazoimpulsnoj obrabotki v processe termicheskogo uprochneniya detalej bytovyx mashin // *Texniko-tekhnologicheskie problemy servisa*. – 2012. – № 4. – pp. 33–37.
10. Ivanov D.A. Vozdejstvie gazoimpulsnoj obrabotki na strukturu i mexanicheskie svojstva normalizuemyx stalej // *Texniko-tekhnologicheskie problemy servisa*. – 2013. – № 3. – pp. 19–22.

УДК 621.891.031

ТРЕНИЕ И ИЗНОС ЭЛЕМЕНТОВ ВАКУУМНЫХ ВОЛНОВЫХ ПЕРЕДАЧ**Ивашов Е.Н., Константинов Ю.А., Панфилова Е.С., Шихов А.И.***ФГАОУ ВПО НИУ «Высшая школа экономики», Москва, e-mail: eivashov@hse.ru*

К механизмам и узлам, работающим в вакууме, в настоящее время предъявляются все возрастающие требования в отношении надежности и долговечности. Наряду с этим наблюдается тенденция к ужесточению условий эксплуатации – вакуум до 10^{-7} Па, температура от «космического холода» до 900°C , интенсивная радиация, вибрации и т.д. Для уменьшения в этих условиях явлений пластического сдвигообразования и адгезии в отечественной и зарубежной практике применяется ряд новых видов смазок, самосмазывающих материалов и металлопокрытий. Вакуумные смазывающие материалы делятся на следующие группы: твердые смазки слоистого кристаллического строения, самосмазывающиеся полимеры, металлические покрытия, различные композиционные материалы.

Ключевые слова: трение и износ, вакуумные волновые передачи, вакуумные смазывающие материалы

FRICTION AND WEAR OF THE ELEMENTS OF THE VACUUM WAVE TRANSMISSION**Ivashov E.N., Konstantinov Y.A., Panfilova E.S., Shikhov A.I.***National research university «High school of economics», Moscow, e-mail: eivashov@hse.ru*

The mechanisms and nodes operating in a vacuum, currently meet the increasing demands in terms of reliability and durability. Along with this, there is a trend towards tightening conditions – vacuum 10^{-7} PA, the temperature of the cosmic cold» to 900°C , intense radiation, vibration, etc. To reduce this phenomena plastic savegeometry and adhesion in domestic and foreign practice a number of new types of lubricants, samonazva materials and metal coatings. Vacuum lubricants are divided into the following groups: solid lubricants layered crystal structure, self-lubricating polymers, metal plating, various composite materials.

Keywords: friction and wear, vacuum wave transmission, vacuum lubricants

Изучение комплекса сил трения в элементах волновых передач должно опираться на фундаментальные исследования в области трения скольжения [1, 2, 3].

В настоящее время доминирует молекулярно-механическая теория трения. Из существующих теорий (адгезионной, адгезионно-деформационной, молекулярной, молекулярно-кинетической) она наиболее полно описывает процесс внешнего трения.

Согласно этой теории в контакте двух тел всегда присутствует «третье тело», которое представляет собой ослабленный слой – пленку, состоящую из смазок, окислов, адсорбированных газов, паров воды и различных загрязнений [4]. Эта тонкая пленка служит демпфером между обоими телами и локализует в своем объеме основные контактные деформации. В случае больших контактных усилий между трущимися поверхностями в деформацию вовлекаются нижележащие слои. Это определяется двойственным характером молекулярно-механической теории трения.

Интенсивность износа Jh определяется как объем материала ΔV , удаленный с единицы номинальной поверхности на единичном пути трения [4], т.е.

$$Jh = \frac{\Delta V}{AaL} = \frac{\Delta h}{L}, \quad (1)$$

где Aa – номинальная площадь касания; L – путь трения; Δh – средняя толщина изношенного слоя.

После преобразования формулы интенсивности износа для разных видов контакта таковы:

– упругий контакт

$$Jh = 0,7 \frac{Pa}{En}; \quad (2)$$

– пластический контакт

$$Jh = \frac{0,14}{n} \sqrt{\frac{h_m}{R}} \left(\frac{Pa}{C\sigma_s} \right)^{\frac{5}{4}}; \quad (3)$$

– абразивный износ в контакте (микро-резание)

$$Jh = \frac{0,14}{n} \sqrt{\frac{h_{\max}}{R}} \left(\frac{Pa}{C\sigma_s} \right)^{\frac{5}{4}}, \quad (4)$$

где Pa – номинальное давление; E – модуль упругости; n – число циклов, приводящих к разрушению; C – коэффициент пропорциональности; σ_s – предел текучести более мягкого материала; R – радиус моделируемой сферы; h_m – глубина внедрения; $h_{\max}$ – максимальная глубина внедрения.

Количество циклов нагружения, необходимое для разрушения, зависит от усталостной прочности исходного материала. Если число рабочих циклов велико, то наблюда-

ется фрикционно-контактный усталостный процесс. Если контактные напряжения достигают предела прочности материала, разрушение наступает после первых же циклов воздействия нагрузки. При этом характерны наиболее интенсивные виды износа: абразивный (микрорезание), когда внедрение выступов контртела велико, и когезионный процесс (схватывание), когда силы трения достигают значения предела прочности [4].

Согласно работам Елифанова Г.И., поверхности твердых тел, как бы тщательно они ни были изготовлены, всегда обладают шероховатостью и волнистостью. Внедрение микронеровностей одной поверхности в другую и зацепление неровностей сопряженных поверхностей сопровождается адгезией, возникающей на предельно чистых поверхностях, сближенных до расстояния порядка радиуса действия молекулярных сил. Поэтому «основным содержанием процесса трения предельно чистых поверхностей трения является пластическое сдвигообразование, развивающееся в тонких поверхностных слоях трущихся тел».

В то же время к механизмам и узлам, работающим в вакууме, в настоящее время предъявляются все возрастающие требования в отношении надежности и долговечности. Наряду с этим наблюдается тенденция к ужесточению условий эксплуатации – вакуум до 10^{-7} Па, температура от «космического холода» до 900°C , интенсивная радиация, вибрации и т.д. Для уменьшения в этих условиях явлений пластического сдвигообразования и адгезии в отечественной и зарубежной практике применяется ряд новых видов смазок, самосмазывающих материалов и металлопокрытий.

Вакуумные смазывающие материалы делятся на следующие группы:

1. Твердые смазки слоистого кристаллического строения – соединения тяжелых металлов.

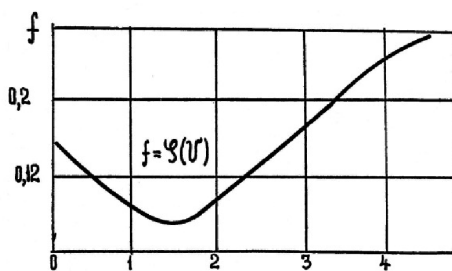


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения MoS_2 от температуры

2. Самосмазывающиеся полимеры – используемые как в чистом виде, так и с наполнителями.

3. Металлические покрытия (галлий, свинец, серебро, золото и др.).

4. Различные композиционные материалы на базе порошков металлов и смазок первых трех групп.

Твердые смазки обычно наносятся на поверхность трения в виде покрытий. В состав покрытия входит основная твердосмазочная компонента и связующее вещество, обеспечивающее прочность покрытия и имеющее хорошую адгезию с основным металлом, а также различные добавки. В качестве смазки используют синтетические смолы: фенольные, эпоксидные, ароматические полиэфирные и силиконовые соединения. Однако наиболее существенное значение имеют свойства основной твердой смазки, входящей в состав покрытия. Твердосмазочные покрытия на основе дисульфида молибдена (ВНИИ НП – 209, ВНИИ НП-213, ВНИИ НП-229, ВНИИ НП-230) целесообразно использовать для зубчатых венцов волновых вакуумных передач.

Для работы в глубоком вакууме порошки твердых смазок можно прессовать с порошками матричных материалов (медь, никель, серебро, золото) и из этих композиций изготавливать сепараторы для подшипников качения и планетарных генераторов волновых вакуумных передач.

Из всех твердых смазок наиболее изучен дисульфид молибдена, который широко применяется. Как показали испытания, проведенные в ИМАШе, смазка MoS_2 работоспособна в вакууме до 1100°C , при давлении до 10^{-5} Па. Экспериментальные результаты некоторых исследований смазки MoS_2 представлены на рисунках 1, 2. Работоспособность твердых смазок в условиях глубокого вакуума для пар трения скольжения изучалась Куриловым Г.В., Сентюрихиной Л.Н., Юхно Г.П., Любарским Н.М., Вайнштейн В.Э. [5].

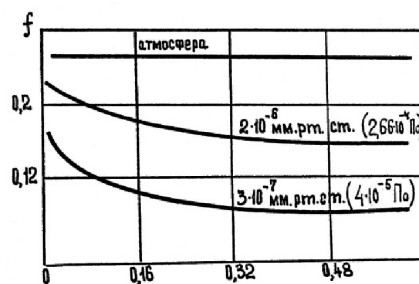


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения MoS_2 от скорости скольжения и глубины вакуума

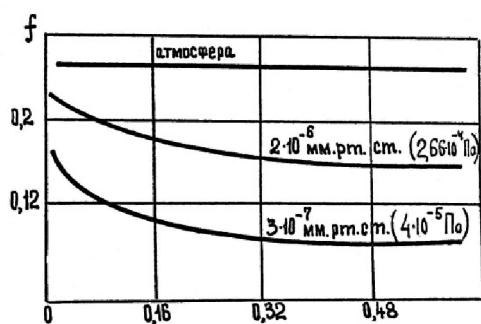


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения от скорости скольжения

Механизм работы твердосмазочного покрытия на основе MoS_2 рассмотрен в работе. В последние годы проводятся изыскания новых видов твердых смазок с более высокими эксплуатационными свойствами. Изучаются некоторые соединения тяжелых металлов: хрома, вольфрама, ванадия, тантала, рения, урана и т.д.

Вторая разновидность материалов, предназначенных для работы в вакууме, – это различные полимеры, обладающие малым коэффициентом трения в контакте с металлом.

Износ чистых полимерных материалов в контакте с металлами достаточно изучен. Причиной износа металла в этом случае является образование продуктов механического разрушения молекулярных цепей – свободных макрорадикалов, что влечет за собой активизацию разрушения поверхности металла [6]. Несмотря на наличие большого числа самосмазывающих полимерных материалов композиционного состава, до сих пор не существует теории, объясняющей смазочный эффект каждого из наполнителей. Большинство композиционных материалов в настоящее время создается эмпирическим путем, причем каждый новый материал необходимо тщательно исследовать не только на образцах, но и на реальных объектах. Однако лишь немногие из полимеров удовлетворяют требованиям, предъявленным к вакуумным самосмазывающим материалам. Эти требования: а) антифрикционность в широком диапазоне остаточных давлений и воздействий внешней среды; б) высокая износостойкость; в) способность к образованию устойчивой тонкой пленки на металле; г) широкий температурный интервал работы [6].

В большей или меньшей степени этим условиям удовлетворяют из ранее извест-

ных полимеров – нейлон, фторопласт, из новых – полиимид, дифлон, ацеталь и ряд других. Самосмазывающие полимеры относительно редко применяются в чистом виде, чаще всего они служат основой различных композиций, например АСП – пластики ИНЭОС АН СССР.

Тонкие пленки из мягких металлов – галлия, свинца, цинка, меди, алюминия, серебра, золота – наносятся на поверхности трения в качестве «третьего тела» для предотвращения схватывания и глубинного вырывания. Для волновых вакуумных зацепления могут применяться все выше упомянутые металлопокрытия. Металлические пленки обеспечивают широкий диапазон рабочих температур от -240 до 1100°C . Их основной недостаток – невосстанавливаемость во время работы и невысокая долговечность.

Вакуум определяет ход физико-химических процессов в зоне трения зубчатого зацепления волновой передачи. При установившемся процессе трения время воздействия среды на поверхность трения ограничено временем существования единичного пятка контакта [7] и критическим временем t_c в течение которого поверхность трения в вакууме существенно изменяет свои фрикционные свойства. Если отношение

$$\frac{t}{t_c} \ll 1, \text{ то влияние вакуума слабое;}$$

$$\frac{t}{t_c} \gg 1, \text{ то влияние вакуума значительное.}$$

С практической точки зрения важно определить предельное разрежение, начиная с которого влияние вакуума на процессы трения и износа становится наиболее интенсивным. Поэтому критическое давление, при котором параметр $\frac{t}{t_c} \gg 1$, равно

$$P_{\text{кр}} \leq \frac{12km}{\alpha t} \sqrt{\frac{MT}{3R}}, \quad (5)$$

где K – постоянная Больцмана; T – температура, К; $P_{\text{кр}}$ – давление в сосуде, Па; m – число молекул, необходимое для образования монослоя на площади 1 см^2 ($m=10^{14} \text{ см}^{-2}$); α – вероятность осаждения молекул на чистой поверхности при ударе ($\alpha=0,1$); M – молекулярный вес газа ($M=30$); R – универсальная газовая постоянная.

Важно знать также и отношение

$$\frac{t}{t_c} = \frac{\alpha P \Delta}{12 k m V J} \sqrt{\frac{3R}{MT}}, \quad (6)$$

которое позволяет теоретически оценить влияние вакуума на процессы трения износа.

Здесь Δ – толщина частиц износа; V – скорость скольжения; J – интенсивность линейного износа.

При выборе твердой смазки для волнового зубчатого зацепления и самосмазывающихся материалов для сепараторов планетарных генераторов волн следует учитывать газовыделение этих материалов, которое, с одной стороны, приводит к увеличению давления в камере, с другой стороны, – к «загрязнению» вакуумного технологического объема. К вакуумным объемам, в которых происходят технологические процессы напыления и сборки приборов, предъявляются жесткие требования к составу остаточных газов. В работе [4] приводятся характеристики газовыделения некоторых твердых смазок и самосмазывающихся материалов (рис. 4).

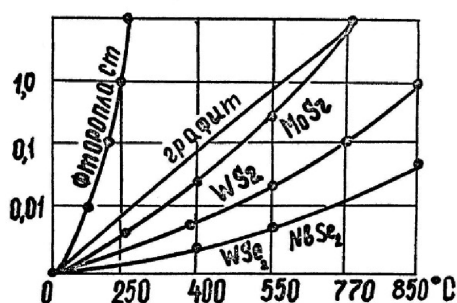


Рис. 4. Газовыделение некоторых твердых смазок и самосмазывающихся материалов в вакууме $P=1,33 \cdot 10^{-4}$ Па

Оценка кинетики газовыделения твердых слоистых смазок с изменением температуры рассмотрена в работе [4]. В Физико-техническом институте низких температур АН УССР Кириловым Г.В. и во ВНИИ НП Сентюрихиной Я.Е. [5] изучено газовыделение при трении твердосмазочных покрытий типа ВНИИ НП-209, 213, 229, 230, 250 в вакууме.

В Научно-исследовательском институте вакуумной техники под руководством Плещекко Е.К. проведены исследования по газовыделению и масс-спектрометрии фторопласта и композиционных материалов на

его основе. Термическое разложение этих материалов начиналось при температурах свыше 250 °C. Фтор и фтористый водород, являющиеся опасными соединениями для некоторых технологических процессов в производстве электронной техники, обнаружены при температурах 200–240 °C (рис. 5). Резкое увеличение количества фтора и фтористого водорода происходило при температурах 350–360 °C. Исследования показали, что предварительно обезгаженные образцы чистого фторопласта (при $t = 100$ °C в течение четырех часов) дают меньшие пики интенсивности фтора и фтористого водорода.

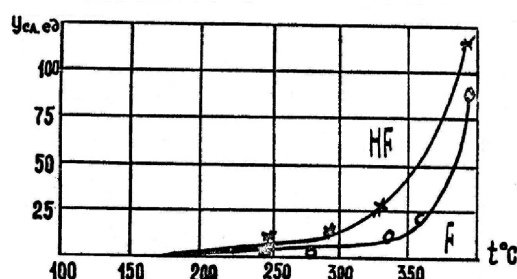


Рис. 5. Зависимость интенсивности пиков фтора F и фтористого водорода HF от температуры

При повышении рабочей температуры до 500 °C в спектре появляются тяжелые массы – C_2F_3 , C_2F_4 , C_3F_5 , C_3F_6 . Первые признаки разложения составляющей компоненты – дисульфида молибдена появлялись при температуре свыше 400 °C, что характеризовалось наличием в спектре массовых чисел для серы и SO_2 .

На основании вышеизложенного, можно сделать выводы и наметить следующие задачи исследования:

1. Волновые передачи можно использовать в качестве вводов вращения и путем непосредственной установки в вакуумный объем.

2. Вакуум оказывает существенное влияние на фрикционные характеристики взаимодействующих материалов. Поэтому представляет значительный интерес исследование износостойкости материалов вакуумных волновых передач, а также к.п.д. этих передач в целом.

3. Для уменьшения трения скольжения в вакууме можно применять:

а) твердые смазки и твердосмазочные покрытия на основе MoS_2 ;

б) самосмазывающие материалы на основе фторопласта-4 и полиимидов;

в) тонкие металлические пленки (Au, Ag, Pb и т.д.).

4. Недостаточно полно исследованы волновые передачи с планетарным генератором волн, особенно в вакуумном исполнении.

5. Изучение волновых передач с планетарным генератором, при одновременной оценке эффективности смазок, самосмазывающих материалов и металлопокрытий требует специальной вакуумной оснастки, обеспечивающей работу как генератора, так и зубчатых венцов непосредственно в вакууме.

6. Отсутствуют работы по исследованию кинематики зацепления волновой передачи с планетарным генератором волн.

7. Нет рекомендаций по выбору материалов для сепараторов планетарных генераторов волн, а также по влиянию геометрических параметров генератора на характер и интенсивность износа сепараторов.

Главной задачей исследования является создание инженерной методики расчета вакуумных волновых передач с планетарными генераторами волн (ПВГ).

Выполнение этой задачи возможно только при получении экспериментально подтвержденных теоретических формул, которые бы полностью учитывали геометрические, кинематические и прочностные зависимости для планетарных волновых генераторов.

В ряде НИИ России созданы новые самосмазывающие материалы для сепараторов подшипников, работающих в вакууме. К ним предъявляются жесткие требования по газовыделению и износостойкости. Поэтому только испытания в условиях, близких к эксплуатационным, могут решить вопрос об использовании их в качестве материалов для сепараторов вакуумных генераторов волн.

Список литературы

1. Белый В.А., Свириденко А.И., Петроковец М.И., Савкин В.Г. Трение и износ материалов на основе полимеров. – Минск: Наука и техника, 1976.
2. Васин В.А., Ивашов Е.Н., Кузнецов П.С., Степанчиков С.В. Системы приводов для работы в сверхчистой вакуумной технологической среде // Приводная техника. – М. – 2011. – №1. – С. 37–38.
3. Васин В.А., Ивашов Е.Н., Степанчиков С.В. Методы проектирования приводов и функциональных устройств вакуумного модульного оборудования // Приводная техника. – М. – 2011. – №3. – С. 23–33.
4. Васин В.А., Ивашов Е.Н., Кузнецов П.С., Степанчиков С.В. Проектирование внутрикамерных устройств вакуумного оборудования для экологически чистых и энергосберегающих технологий. Электромагнитные волны и электронные системы. – М., 2011. – Т.16. – С. 49–54.
5. Крагельский И.В. Трение и износ в вакууме – М.: Машиностроение, 1973.
6. Курилов Г.В., Сентюрихина Л.Н., Юхно Т.П., Любарский И.М. Исследование работоспособности твердых смазочных покрытий // Поведение материалов в условиях вакуума и низких температур. – Харьков, 1972.
7. Силин А.А. Методы оценки влияния окружающей среды на процессы внешнего трения и износ // Научные принципы и новые методы испытания материалов для узлов трения. – М.: Наука, 1972.

References

1. Belyj V.A., Sviridenok A.I., Petrokovec M.I., Savkin V.G. Trenie i iznos materialov na osnove polimerov. – Minsk: Nauka i texnika, 1976.
2. Vasin V.A., Ivashov E.N., Kuznecov P.S., Stepanchikov S.V. Sistemy privodov dlya raboty v sverchistoju vakuumnoj tehnologicheskoy srede // Privodnaya texnika. – M., 2011. – №1. – pp.37-38.
3. Vasin V.A., Ivashov E.N., Stepanchikov S.V. Metody proektirovaniya privodov i funktsionalnykh ustroystv vakuumnogo modul'nogo oborudovaniya // Privodnaya texnika. – M. – 2011. – №3. – pp. 23–33.
4. Vasin V.A., Ivashov E.N., Kuznecov P.S., Stepanchikov S.V. Proektirovanie vnutrikamernykh ustroystv vakuumnogo oborudovaniya dlya ekologicheskii chistykh i energosberegatelnykh tehnologij/ E'lektromagnitnye volny i e'lektronnye sistemy. – M. – 2011. – Т.16. – pp. 49–54.
5. Kragelskij I.V. Trenie i iznos v vakuume. – M.: Mashinostroenie, 1973.
6. Kurilov G.V., Sentyurixina L.N., Yuxno T.P., Lyubarskij I.M. Issledovanie rabotosposobnosti tverdykh smazochnykh pokrytij // Povedenie materialov v usloviyax vakuuma i nizkix temperatur Xarkov, 1972.
7. Silin A.A. Metody ocenki vliyaniya okruzhayushchey sredy na processy vneshnego treniya i iznos // Nauchnye principy i novye metody ispytaniya materialov dlya uzlov treniya. – M.: Nauka, 1972.

УДК 621.791.754

ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И МИКРОСТРУКТУРЫ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ СТАЛИ 12Х18Н10Т, ВЫПОЛНЕННЫХ ПО РАЗЛИЧНЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ СХЕМАМ

Ильященко Д.П.*Юргинский технологический институт, филиал ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет», Юрга, e-mail: mita8@rambler.ru*

Хромоникелевые аустенитные стали обладают исключительно ценными свойствами и, прежде всего очень высокой химической стойкостью в наиболее агрессивных средах. Они сочетают достаточную прочность и чрезвычайно высокую пластичность в широком диапазоне температур. К сварным швам аустенитных сталей, в зависимости от состава, свойств стали и специфических условий работы конструкций, предъявляются дополнительные требования помимо обычных для сварки требований прочности, пластичности, отсутствия трещин и пор. В работе рассмотрено влияние современных технологий (типа источника питания, защитного покрытия) на химический состав и микроструктуру сварных соединений из стали 12Х18Н10Т. Установлено, что использование современных технологий при ручной дуговой сварке покрытыми электродами увеличивает коэффициент перехода легирующих элементов и снижает протяженность зоны термического влияния сварного шва.

Ключевые слова: дуговая сварка, тип источника питания, защитные покрытия, микроструктура, покрытые электроды, химический состав

INVESTIGATION OF CHEMICAL COMPOSITION AND MICROSTRUCTURE OF WELDED JOINTS ON STEEL 12CRNIT18-10, EXECUTED BY VARIOUS TECHNOLOGICAL SCHEMES

Ilyaschenko D.P.*Yurga Technological Institute, branch of The National Research Tomsk Polytechnic University, Yurga,
e-mail: mita8@rambler.ru*

Chromium-Nickel austenitic steels possess valuable properties, and above all, very high chemical durability in the most aggressive environments. They combine sufficient strength and extremely high flexibility in a wide temperature range. To welded joints of austenitic steels, depending on the composition and properties of steel and the particular working conditions of the structures, additional demands, besides the usual welding requirements of strength, ductility, absence of cracks and pores. In this work the influence of modern technology (type of power source, protective coating) on the chemical composition and microstructure of welded joints of steel 12CrNiTi18-10. It is established that the use of modern technology for manual arc welding of pokrytie electrodes: increases the transition rate of the alloying elements and reduces the length of the heat-affected zone of the weld.

Keywords: arc welding, the type of power source, protective coatings, microstructure, covered electrodes, chemical composition

Хромоникелевые аустенитные стали обладают исключительно ценными свойствами и, прежде всего очень высокой химической стойкостью в наиболее агрессивных средах. Они сочетают достаточную прочность и чрезвычайно высокую пластичность в широком диапазоне температур. К сварным швам аустенитных сталей, в зависимости от состава, свойств стали и специфических условий работы конструкций, предъявляются дополнительные требования, помимо обычных для сварки требований прочности, пластичности, отсутствия трещин и пор [1].

В последнее время все более активно на рынок сварочных материалов и оборудования выходят новые технологии, которые воплощаются в виде:

- инверторных источников питания, применение которых позволяет уменьшить тепловложение в сварное соединение [2];

- защитных покрытий, позволяющих снизить набрызгивание на свариваемые поверхности [3].

Для проведения комплексного исследования были заварены образцы пластины (соединение С7 по ГОСТ 5264-80) толщиной 3 мм из стали 12Х18Н10Т, электродами марки ЦЛ 11 типа 08Х20Н9Г2Б ($d = 3$ мм), сварочный ток $I = 70-80$ А.

Схема 1 – источник питания ВД-306.

Схема 2 – источник питания ВД-306 + на поверхность сварного соединения наносили защитное покрытие [4].

Схема 3 – источник питания Nebula 315.

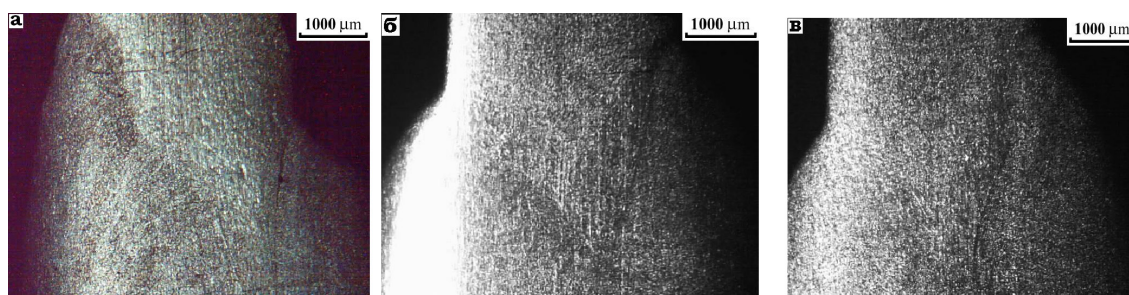
Анализ экспериментальных данных химического состава сварного шва (ГОСТ 18895-97 [3]) показал (таблица), что тип источника питания оказывает влияние на химический состав сварного шва. Это связано с тем, что Nebula 315 ограничивает ток короткого замыкания [5], тем самым происходит меньшее выгорание легирующих элементов [6].

Химический состав сварного шва выполненного из образцов из стали 12Х18Н10Т электродами марки ЦЛ 11 типа 08Х20Н9Г2Б

Тип источника питания	Химический состав, %							
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Nb
ВД-306 (схема 1)	0,12	0,80	1,04	0,008	0,018	18,08	9,23	0,70
ВД-306 (схема 2)	0,12	0,75	1,04	0,008	0,019	18,86	8,21	0,7
Nebula-315 (схема 3)	0,12	0,82	1,23	0,008	0,018	18,45	10,01	0,70
ВДМ-1601У		0,56	1,54			18,4	7,22	2,24
TIG 160 HF		0,60	1,67			18,46	7,55	2,36

Исследование полученных макро- и микроструктур проводили методом оптической металлографии на микроскопе Neophot-21 с записью изображений при помощи цифровой камеры Genius VileCam. При изготовлении шлифов использовались механическая шлифовка, механическая полировка на алмазной пасте АСМ 10/7 НВЛ и химическое травление в «царской водке» (40 % HCl + 40 % HNO₃ + 10 % C₂H₅OH).

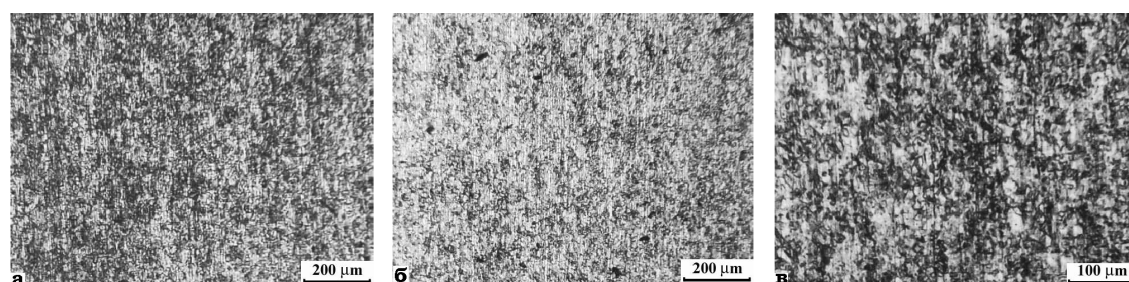
На рис. 1 видно, что макроизображения сварных соединений (' 40) мало отличаются друг от друга. На них хорошо выделяются: зоны наплавленного металла и широкие зоны термического влияния. Посредине валиков проплавление на всех трех схемах произошло насквозь. Основной металл между валиками выклинивается. Здесь структура его подверглась термическому преобразованию.



*Рис. 1. Общий вид сварных соединений:
а – схема 1; б – схема 2; в – схема 3*

Структура основного металла в местах, удаленных от сварного шва на 15...20 мм, соответствует типичной структуре горячекатаной стали 12Х18Н10Т (рис. 2). Схема сварки,

естественно, не оказала на нее влияние. Структура представлена полиэдрическими сдвоенными аустенитными зернами, характерные размеры которых не превышают 25 мкм.



*Рис. 2. Микроструктура основного металла:
а – схема 1, б – схема 2, в – схема 3*

Структура наплавленного металла также во всех схемах дендритная (рис. 3). Вблизи границы сплавления дендриты ориентированы нормально к ней, а в глубине напла-

вленного металла расположены беспорядочно. Ориентированные дендриты могут достигать в длину 200 мкм (рис. 3в). Неупорядоченные дендриты имеют меньшую

длину, но у них более развитая морфология границ. В целом структура наплавленного металла характерна для литого состояния стали 12Х18Н10Т. Дефекты типов: раковины, несплошности, трещины, крупные поры и крупные неметаллические включения – в наплавленном на всех трех схемах металле не обнаружены.

В зонах термического влияния произошел сильный рост зерен. На рис. 4 видно, что аустенитные зерна в зоне термического влияния полэдрические сдвойникованные. Их размеры могут превышать 150 мкм. Ширина зоны термического влияния зависит от места расположения относительно валиков наплавленного металла.

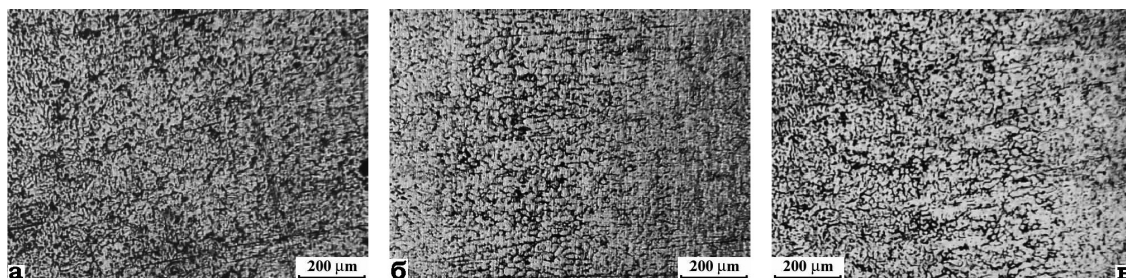


Рис. 3. Структура наплавленного металла:
а – схема 1; б – схема 2; в – схема 3

Если ширина валиков наплавленного металла различна (схема 1), то в месте выклинивания основного металла и под более

широким валиком зона термического влияния охватывает всю толщину свариваемых листов (рис. 5).

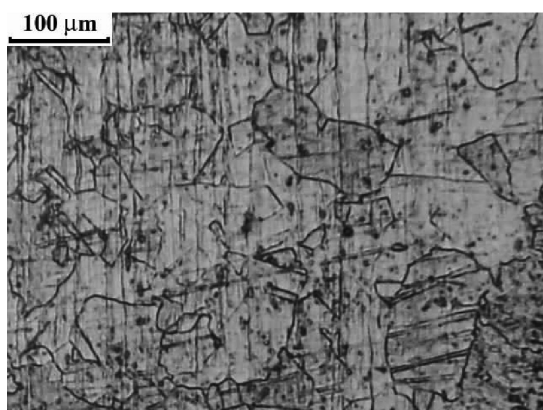


Рис. 4. Микроструктура зон термического влияния

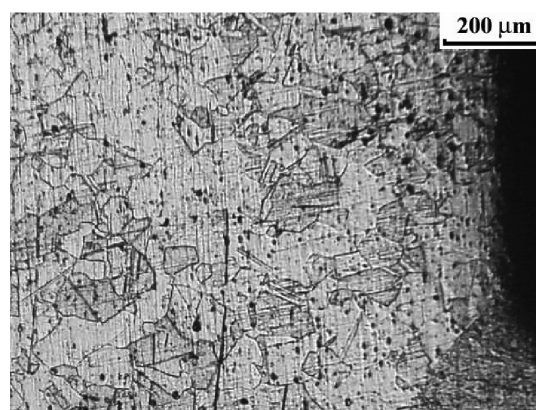


Рис. 5. Зона термического влияния под валиком наплавленного металла (схема 1)

Если валики наложены симметрично с обеих сторон, то зона термического влияния у обеих поверхностей свариваемых листов одинакова. По мере углубления в свариваемый материал она расширяется и достигает максимума на оси. В образце, сваренном по схеме 1, у поверхности вблизи широкого валика она составляет 250 мкм (рис. 6а) и далее расширяется до 3000 мкм, как указано выше (рис. 5).

В образце, сваренном по схеме 2, вблизи поверхности ширина зоны термического

130...180 мкм (рис. 6б). В самой широкой части на оси свариваемого листа она достигает 500...1000 мкм.

Наименьшая ширина зоны термического влияния зафиксирована вблизи поверхности листов, сваренных по схеме 3. Она составляет 75 мкм (рис. 6в). В этом образце и на оси свариваемого листа ширина этой зоны < 1000 мкм (рис. 7).

Во всех соединениях переход от зоны термического влияния к основному металлу происходит плавно без резких границ (см. рис. 6, 7).

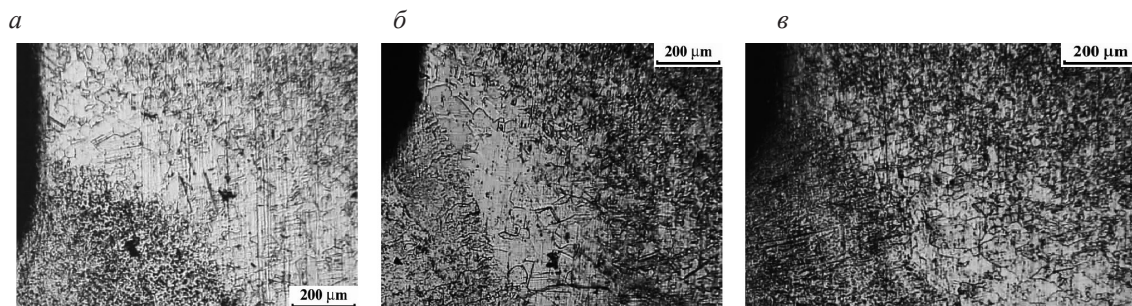


Рис. 6. Минимальная ширина зоны термического влияния в соединении:
а – схема 1; б – схема 2; в – схема 3

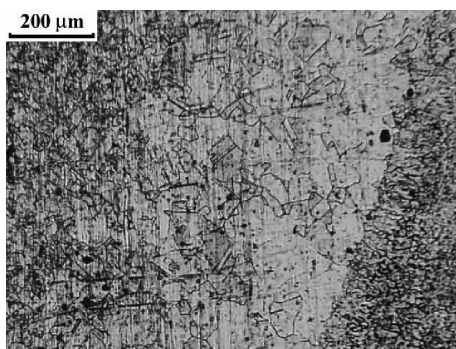


Рис. 7. Максимальная ширина зоны термического влияния в соединении, схема 3

Заключение

Сварные соединения, выполненные по всем исследованным схемам, с точки зрения микро- и макроструктуры являются качественными. В них отсутствуют сварочные дефекты, наплавленный металл имеет сравнительно мелкодисперсную дендритную структуру, а зона термического влияния плавно без резких границ переходит к основному металлу. Наименьшая ширина зоны термического влияния зафиксирована в соединении, выполненном по схеме 3, а наибольшая – в соединении, выполненном по схеме 1.

Список литературы

1. Ильященко Д.П. Влияние энергетических характеристик инверторного источника питания на химический состав и микроструктуру сварного шва из стали 12Х18Н10Т // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013 – №. 4. – С. 178–180.
2. Кусков В.Н., Мамадалиев Р.А., Обухов А.Г. Переход легирующих элементов в наплавленный металл при сварке стали 12Х18Н10Т // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 11 (9). – С. 1794–1797.
3. Сабиров, И.Р. Применение функциональных покрытий при дуговой сварке плавящимся электродом / И.Р. Сабиров, Е.А. Зернин, Д.П. Ильященко // Новые промышленные технологии. – №1. – 2009. – С. 7–8.
4. Пат. 2297311 (РФ). В23К 35/36., Состав покрытия для защиты поверхности свариваемого изделия от налпания брызг расплавленного металла при дуговой сварке плавлением [Текст] / СБ. Сапожков, Е.А. Зернин, Д.П. Ильященко; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Томский политехнический университет». Заяв. 09.03.06; опубл. 20.04.2007. Бюл. №11.

5. Ilyashchenko D.P., Chinakhov D.A., Gotovshchik Y.M. Investigating the influence of the power supply type upon the properties of the weld joints under manual arc welding // Advanced Materials Research. – 2014 – Vol. 1040. – p. 837–844.
6. Ilyashchenko D.P. Thermal Imaging Investigations of Temperature Fields on the Surface of parts being Welded Item during Manual Arc Welding with Coated Electrodes / D.P. Ilyashchenko, D.A. Chinakhov // Russian journal of nondestructive testing, 2011, vol. 47, No11, pp.724–729

References

1. Ilyashchenko D.P. Vliyanie energeticheskikh kharakteristik invertornogo istochnika pitaniya na khimicheskiy sostav i mikrostrukturu svarnogo shva iz stali 12Kh18N10T // Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Povolzhya. – 2013 – №. 4. – pp. 178–180.
2. Kuskov V.N., Mamadaliev R.A., Obukhov A.G. Perekhod legiruyushchikh elementov v naplavlennyy metall pri svarke stali 12Kh18N10T // Fundamentalnye issledovaniya. – 2013. – № 11 (9). – pp. 1794–1797.
3. Sabirov, I.R. Primenenie funktsionanykh pokrytiy pri dugovoy svarke plavyashchimsya elektrodom / I.R. Sabirov, E.A. Zernin, D.P. Ilyashchenko // Novye promyshlennye tekhnologii. – №1. – 2009. – pp. 7–8.
4. Pat. 2297311 (RF). V23K 35/36., Sostav pokrytiya dlya zashchity poverkhnosti svarivaemogo izdeliya ot nalipaniya bryzg rasplavlennogo metalla pri dugovoy svarke plavlennym / SB. Sapozhkov, E.A. Zernin, D.P. Ilyashchenko; zayavitel i patentoobladatel GOU VPO «Tomskiy politekhnicheskiy universitet». Zayav. 09.03.06; opubl. 20.04.2007. Byul. №11.
5. Ilyashchenko D.P., Chinakhov D.A., Gotovshchik Y.M. Investigating the influence of the power supply type upon the properties of the weld joints under manual arc welding // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 1040. – pp. 837–844.
6. Ilyashchenko D.P. Thermal Imaging Investigations of Temperature Fields on the Surface of parts being Welded Item during Manual Arc Welding with Coated Electrodes / D.P. Ilyashchenko, D.A. Chinakhov // Russian journal of nondestructive testing. – 2011. – vol. 47, No11. – pp. 724–729.

УДК 664:53.082

ОБЗОР ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ ТИПА «ЭЛЕКТРОННЫЙ НОС» ДЛЯ АНАЛИЗА КАЧЕСТВА ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

Кечкина Н.И., Попов А.А., Баранова Д.И., Ловдар Ю.А., Кулигина Н.О.,
Токарев С.В., Наумова Е.Г., Зубков И.Л., Бессонов С.Г., Орлов Е.С.

*Дзержинский политехнический институт, филиал ФГБОУ ВПО «Нижегородский
государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Дзержинск,
e-mail: nataliyabaranova@yandex.ru*

Анализируется возможность применения современных мультисенсорных систем типа «электронный нос» для контроля качества пищевых продуктов. Обоснована необходимость их применения в пищевой промышленности. Обобщены результаты представленных экспериментов с целью определения возможностей современных «электронных носов» для задач контроля свежести, определения качественных показателей пищевых продуктов, определения фальсификата, классификации продуктов питания по различным показателям. Отмечена перспективность применения систем типа «электронный нос» и обозначены направления их совершенствования, а именно: минимизация количества датчиков в сенсорной системе, повышение порога чувствительности, снижение стоимости.

Ключевые слова: контроль качества продуктов питания, мультисенсорная система, электронный нос

REVIEW OF THE APPLICATION OF MODERN SYSTEM TYPE «ELECTRONIC NOSE» TO ANALYZE THE QUALITY FOOD

Kechkina N.I., Popov A.A., Baranova D.I., Lovdar Y.A., Kuligina N.O., Tokarev S.V.,
Naumova E.G., Zubkov I.L., Bessonov S.G., Orlov E.S.

*Dzerzhinsky Polytechnic Institute, branch of Nizhny Novgorod State Technical University
n.a. R.E. Alekseev, Dzerzhinsk, e-mail: nataliyabaranova@yandex.ru*

The possibility of the use of modern multisensor systems such as «electronic nose» for food quality control are analyzed. The necessity of their application in the food industry. The results of the experiments presented in order to determine the possibility of modern EN for monitoring tasks freshness, definition of food quality indicators, falsification definition, classification of food products on various parameters. The perspective of the application system type «electronic nose» and identifies ways to improve them, namely to minimize the number of sensors in the sensor system, increase the sensitivity, lower cost.

Keywords: food quality control, multisensory system, the electronic nose

Качество продуктов питания определяется совокупностью свойств, обуславливающих их пригодность в удовлетворении определенных потребностей человека в соответствии с назначением. Для оценки потребительских достоинств пищевых продуктов широко используются сенсорные, или органолептические, методы, основанные на анализе ощущений органов чувств человека. Выяснение принципов функционирования биологической системы обоняния позволило сформулировать подходы к созданию на основе датчиков таких технических средств для анализа газового состава, которые сравнимы по эффективности с биологическим аналогом, называемых в литературе приборами вида «электронный нос» [6].

«Электронными носами» принято называть мультисенсорные системы распознавания газообразных веществ, работающие на различных физических принципах, в частности портативные анализаторы

подвижности ионов, портативные газовые хроматографы. В отличие от традиционных сенсорных систем, требующих высокоселективных чувствительных элементов, «электронные носы» используют набор относительно неселективных сенсоров. Реализация систем типа «электронный нос» возможна благодаря современным технологиям нанoeлектроники и методам обработки многопараметрической информации [2].

«Электронные носы» используются во многих областях, но необходимо подчеркнуть важность их применения в отношении продуктов питания (рис. 1).

ЭН внедряются в область пищевой промышленности с целью контроля качества, процесса мониторинга, оценки свежести продуктов, определения срока годности и т.д. Тем не менее реальные масштабы применения устройств данного типа в этой области являются все еще низкими вследствие сложности химического состава ароматов пищи, представляющих собой смесь

многих различных пахучих молекул, которые находятся в различной концентрации.

Общая функциональная схема «электронного носа» представлена на рис. 2.

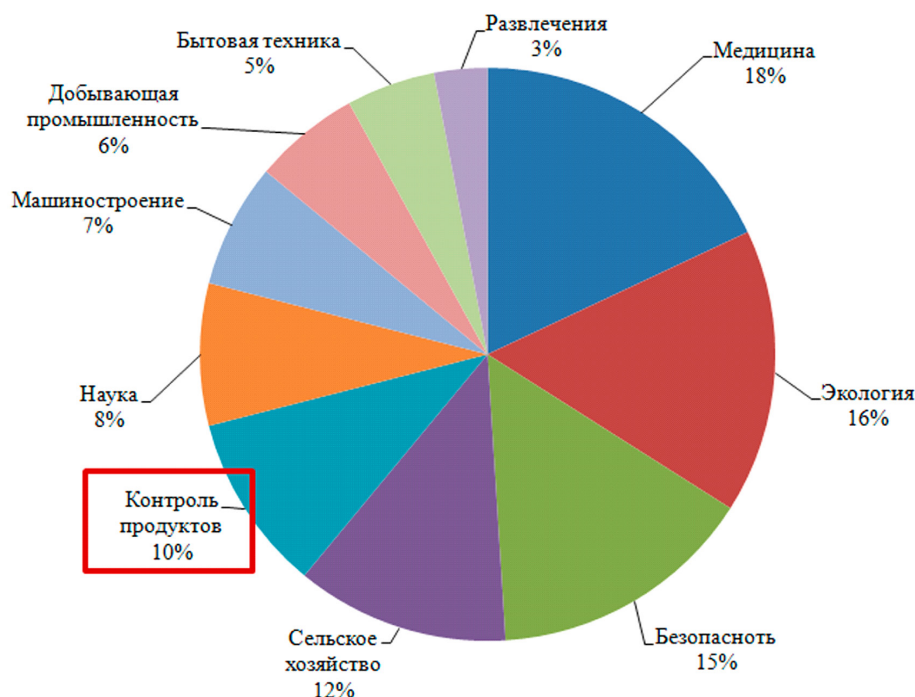


Рис. 1. Области применения мультисенсорных систем типа «электронный нос»

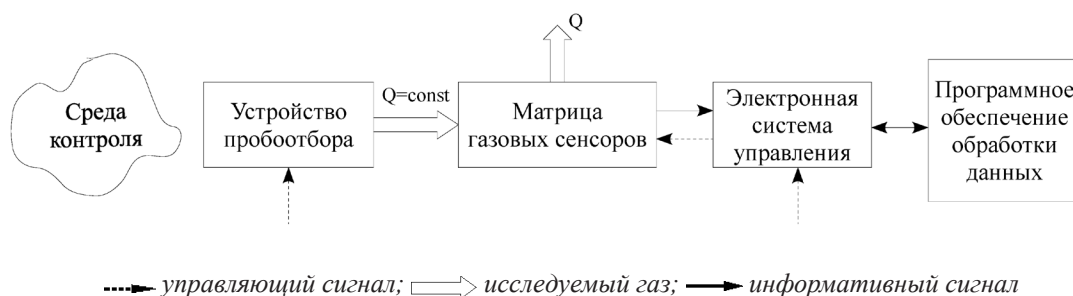


Рис. 2. Общая функциональная схема «электронного носа»

Принцип работы заключается в осуществлении отбора пробы из среды контроля с помощью универсальных или специфических устройств пробоотбора с ее последующей подготовкой для газового анализа. Проведение газового анализа, как правило, осуществляется при стабилизированном расходе потока исследуемого газа, а полученные информативные сигналы с матрицы газовых сенсоров подвергаются дальнейшей обработке с помощью специализированного программного обеспечения для выделения полезных состав-

ляющих и определения их количественных характеристик.

В исследованиях [3 – 6] проведены эксперименты с целью определения возможностей современных «электронных носов» для задач контроля свежести, определения качественных показателей пищевых продуктов, определения фальсификата, классификации продуктов питания по различным показателям.

Например, с целью решения задачи классификации образцов кофе с различным уровнем обжарки возможно использование

услуг дегустаторов с различным уровнем мастерства и подготовки. Однако данный способ ведения контроля качества является очень субъективным. В связи с этим целесообразно использование «электронного носа» в кофейной отрасли при анализе различных видов кофе, оценке качества кофе с целью определения лучшего периода для упаковки, выявления различных марок и смесей и др.

В работе [6] для демонстрации результатов распознавания кофе «электронным носом» «ЭНОС» (рис. 3) в исследовании использовался миндальный тип кофе Арабика. «ЭНОС» состоит из камеры концентрации, а также матрицы газовых сенсоров, обнаруживающих летучие соединения, электронной системы управления, программного обеспечения обработки данных, объединенных в одном блоке. Газовый

датчик представлен набором из 8 металло-оксидных полупроводниковых (МОП) сенсоров фирмы Figaro. Сенсоры на основе МОП обладают очень высокой чувствительностью, быстрым временем реакции и восстановления. Хотя сенсоры на основе МОП реагируют на широкий спектр летучих веществ, они лучше позволяют распознать альдегиды, спирты и кетоны и менее чувствительны к молекулам ароматических соединений и органических кислот. Принцип действия таких сенсоров основан на изменении проводимости ряда широкозонных полупроводников на основе оксидов олова, цинка, титана, вольфрама, индия и иридия, легированных металлами с каталитическими свойствами (палладий, платина) при повышенной температуре в присутствии анализируемых газов [1].



Рис. 3. Внешний вид «электронного носа» «ЭНОС» с камерой концентрации

Результаты измерений показали, что «электронный нос» может быть использован для контроля качества кофе, так как удалось классифицировать по степени обжарки большинство образцов. Однако образцы зеленого кофе не были классифицированы оборудованием из-за низких концентраций летучих компонентов кофейных зерен, что говорит о необходимости повышения порога чувствительности сенсоров.

Качество вина связано с его основными характеристиками: визуальной, вкусовой или ароматической. Это отражается на его цене. Среди недостатков вина выделяется один наиболее важный – чрезмерная концентрация уксусной кислоты, способной скрыть аромат и вкус, снижая тем самым качество вина и делая его менее привле-

кательным, иногда даже непригодным для питья. Таким образом, очень важно для винодельческой промышленности иметь методы исследования, обеспечивающие мониторинг чрезмерной концентрации уксусной кислоты в вине в реальном времени.

Для проведения исследования [2] концентрации уксусной кислоты в вине использовался портативный «электронный нос» PEN3 в сочетании с пробоотборником Headspace HSS32 (рис. 4). Портативный «электронный нос» (PEN3) состоит из аппарата отбора пробы, датчика, содержащего множество сенсоров, и программного обеспечения распознавания образов для записи и обработки данных. Датчик состоит из 10 МОП химических сенсоров. Было доказано, что сенсоры, установленные в «элек-

тронном носе» PEN3, способны обнаруживать присутствие уксусной кислоты в 10%-х водных растворах этанола при концентрации

большей или равной 2 г/л. Для более качественного анализа необходимо также повышать порог чувствительности сенсоров.



Рис. 4. Внешний вид электронного носа PEN3

Свежесть мяса является одним из важных показателей его качества и безопасности. Определить степень свежести на начальных стадиях порчи очень сложно и вместе с тем это очень важно с гигиенической и экономической точек зрения. На практике ученые и технологи пытаются контролировать или изменять некоторые параметры (например, температуру), чтобы либо продлить срок хранения мяса, либо создать новые продукты с приемлемым сроком годности.

Для анализа качества мясных продуктов в исследованиях [4] была применена система «электронный нос» Cyranose 320 (рис. 5),

состоящая из 32 сенсоров на основе проводящих полимеров (ПП). Исследовались образцы говядины в вакуумной упаковке, которые были переупакованы, имитируя условия розничных магазинов, и хранились при температуре 4 °С и 10 °С после прививки им сальмонеллы. Полученные результаты свидетельствуют о том, что «электронный нос» может определить образцы мяса, инфицированные сальмонеллой при уровне концентрации 0,7–2,6 $\log_{10}$ КОЕ/г. Точность классификации образцов двух выбранных типов мяса с помощью сенсоров на основе ПП достигает 95%.



Рис. 5. Внешний вид «электронного носа» Cyranose 320

Свежесть также является наиболее важным фактором для контроля качества рыбы. Традиционно оценка качества рыбы была

основана на органолептических испытаниях. Этот тип тестирования является субъективным, даже если выполняется опытным

и хорошо обученным персоналом. Использование для оценки «электронного носа» FishNose дало следующие результаты: уровень классификации в диапазоне между 93 % и 95 % для свежих образцов, тогда как для старых образцов значения колебались от 81 % до 93 % [3].

Молочная промышленность использует различные проверки качества, которые включают химические или физические анализы: определение жира, оценку осадка, определение количества бактерий, определение температуры замерзания, белка и т.д. Тем не менее, большинство из этих измерений являются дорогими и трудоемкими. На рынке молока и молочных продуктов, пользующихся стабильным спросом, находятся сотни его наименований и многие из них активно рекламируются, поэтому соблазн подделать или увеличить объемы молока и молочной продукции путем разбавления водой всегда имеется как у продавца, так и у производителя молочной продукции. Этот процесс разбавления молока водой (или обезжиренным молоком, нейтрализующими веществами) называется фальсификацией.

В работе [3] представлены результаты распознавания фальсификации молока с использованием «электронного носа» PEN2. «Электронный нос» был в состоянии различать фальсифицированное обезжиренное молоко с различными объемами воды и восстановленного молока, а также определить образцы обезжиренного молока, хранящиеся от 1 до 4 дней, однако не в состоянии различить образцы, хранящиеся в течение 5–7 дней.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что потенциал для дальнейшего развития и новых применений устройств «электронный нос» для пищевой промышленности огромен, новые технологические открытия в конструкции электронного датчика позволят ускорить развитие новых возможностей газового зондирования. Текущая тенденция развития «электронных носов» для конкретных узких применений, вероятно, продолжится, потому что такие инструменты дешевле и обеспечивают большую полезность, производительность и эффективность в операциях газового зондирования в специализированных промышленных применениях. Для успешного решения многих из перечисленных задач технологии, применяемые при изготовлении «электрон-

ного носа», должны быть значительно более совершенны [1].

Главное направление совершенствования системы типа «электронный нос» – миниатюризация датчиков в сенсорной системе, а также повышение порога чувствительности и снижение стоимости. Представленным условиям удовлетворяют сенсоры на поверхностно-акустических волнах (ПАВ), которые реализуются с применением современных фотолитографических технологий, развитых в микроэлектронике, что определяет технологические и стоимостные преимущества ПАВ по отношению к другим типам сенсоров [7].

Список литературы

1. Ганшин В.М., Фесенко А.В., Чебышев А.В. От обонятельных моделей к «электронному носу». Новые возможности параллельной аналитики // Специальная Техника. – URL: http://www.vrsystems.ru/stati/ot_obonyatelnix_modeli_k_elektronnomu_nosu_novye_vozmojnosti_parallelnoi_analitiki.htm.
2. Долгополов Н., Яблоков М. Наносенсорная нейрореподобная система «электронный нос» // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2008. – № 1. – С. 60–65.
3. Bernal A. Metal oxide sensors for electronic noses and their application to food analysis // Sensors. – 2010. – № 10. – pp. 3882–3910.
4. Ghasemi-Varnamkhasti M., Mohtasebi S.S., Siadat M., Balasubramanian S. Meat quality assessment by electronic nose (machine olfaction technology) // Sensors. 2009, vol. 9, № 8. P. 6058 – 6083.
5. Macias M.M., Manso A.G., Orellana C.J.G., Velasco H.M.G., Caballero R.G., Chamizo J.C.P. Acetic acid detection threshold in synthetic wine samples of a portable electronic nose // Sensors. 2012, № 13. – pp. 208–220.
6. Rodriguez J., Duran C., Reyes A. Electronic nose for quality control of colombian coffee through the detection of defects in «Cup Tests» // Sensors. – 2010. – № 10. – pp. 36 – 46.
7. Wilson A.D. Review of electronic-nose technologies and algorithms to detect hazardous chemicals in the environment // Procedia Technology. – 2012 – № 1. – pp. 453–463.

References

1. Ganshin V.M., Fesenko A.V., Chebyshev A.V. Ot obonyatelnix modelij k «elektronnomu nosu». Novye vozmojnosti parallelnoj analitiki // Specialnaya Texnika. – URL: http://www.vrsystems.ru/stati/ot_obonyatelnix_modeli_k_elektronnomu_nosu_novye_vozmojnosti_parallelnoi_analitiki.htm.
2. Dolgoplov N., Yablokov M. Nanosensornaya nejropodobnaya sistema «elektronnyj nos» // Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes. 2008, № 1. pp. 60 – 65.
3. Bernal A. Metal oxide sensors for electronic noses and their application to food analysis // Sensors. – 2010. – № 10. – pp. 3882 – 3910.
4. Ghasemi-Varnamkhasti M., Mohtasebi S.S., Siadat M., Balasubramanian S. Meat quality assessment by electronic nose (machine olfaction technology) // Sensors. – 2009. – vol. 9, № 8. – pp. 6058 – 6083.
5. Macias M.M., Manso A.G., Orellana C.J.G., Velasco H.M.G., Caballero R.G., Chamizo J.C.P. Acetic acid detection threshold in synthetic wine samples of a portable electronic nose // Sensors. – 2012. – № 13. – pp. 208 – 220.
6. Rodriguez J., Duran C., Reyes A. Electronic nose for quality control of colombian coffee through the detection of defects in «Cup Tests» // Sensors. – 2010. – № 10. – pp. 36 – 46.
7. Wilson A.D. Review of electronic-nose technologies and algorithms to detect hazardous chemicals in the environment // Procedia Technology. – 2012 – № 1. – pp. 453 – 463.

УДК 621. 867

**ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КРУТОНАКЛОННОГО КОНВЕЙЕРА
В УСЛОВИЯХ ТОО «БОГАТЫРЬ КОМИР»****Малыбаев С.К., Балгабеков Т.К., Жанатов И.М., Хайбуллин Р.Р., Рожков А.В.***Карагандинский государственный технический университет, Караганда,**e-mail: ilyas_24.91@mail.ru*

В ходе исследования был проведен анализ транспортной работы по перевозке угля разреза ТОО «Богатырь», г. Экибастуз. В процессе работы были рассмотрены особенности существующей технологии ведения работы с фронта добычи угля до погрузки его в железнодорожный состав и было предложено внедрение крутонаклонного конвейера с целью повышения эффективности и оптимизаций транспортной работы в данных условиях. Приведено описание составных частей предлагаемого конвейера, также обоснование его внедрения.

Ключевые слова: крутонаклонный конвейер, перевозка угля, грузовая лента, прижимная лента, конвейер с прижимной лентой

**FEATURES OF USING OF THE HIGH INCLINATION CONVEYOR OF THE KNK-
2000 MODEL IN THE CONDITIONS OF «BOGATYR KOMIR» LLP****Malybaev S.K., Balgabekov T.K., Zhanatov I.M., Khaybullin R.R., Rozhkov A.V.***State Technical University, Karaganda, e-mail: ilyas_24.91@mail.ru*

During research the analysis of transport work on transportation of coal of Bogatyr LLP coal mine Ekibastuz was carried out. In the course of work features of the work existing technologies of maintaining from the front of coal mining before its loading in the train were considered and introduction of the krutonaklonny conveyor for the purpose of increase of efficiency and optimization of transport work in these conditions was offered. The description of components of the offered conveyor, also justification of its introduction is provided.

Keywords: high inclination conveyor, coal transportation, cargo tape, clamping tape, the conveyor with a clamping tape

В настоящее время неоспорима роль применения комбинированной схемы автомобильного и конвейерного транспорта в условиях глубоких карьеров, что позволяет максимально облегчить работу по погрузке и транспортированию груза. При этом применение ленточных конвейеров в карьерах играет неосценимую роль. Однако, с ростом глубины карьера традиционные ленточные конвейеры приходится располагать по сложной схеме со значительным количеством перегрузочных узлов, иногда включающей и соединительные конвейеры – перегружатели. Опыт использования специальных крутонаклонных конвейеров резко упрощает схему транспортирования и уменьшает длину конвейерных линий [1].

Крутонаклонный конвейер по сравнению с обычным ленточным конвейером позволяет значительно сократить длину транспортирования при одинаковой высоте подъема и снизить объем горно-капитальных работ. В настоящее время известно большое число конструкций и конструктивных схем крутонаклонных конвейеров, основное отличие которых состоит в способе удержания груза на грузонесущей ленте от самопроизвольного движения вниз под действием силы тяжести [2].

Предприятие ТОО «Богатырь Комир», где предлагается проектирование и применение крутонаклонного конвейера, основное угледобывающее предприятие, на долю которого приходится 63% от общего объема угля, добываемого в Республике Казахстан. Производственная мощность «Богатыря» – 32 млн. тонн угля в год, разреза «Северный» – 10 млн. тонн угля в год. Размеры поля разреза «Богатырь» в плане: по простиранию пластов (длина) 44,5 км, ширина простирания пластов 3 км. Проектная глубина отработки – 270 м. В разрезе функционируют четыре поля по добыче угля: 5, 6, 9, 10 (рис. 1).

Поле разреза характеризуется наклонным залеганием пластов, что требует доставки угля с забоя на поверхность карьера по цепочке транспортных средств, способных проходить по внутрикарьерным уклонам. На данный момент эту цепочку работы, начиная с забоя до места погрузки, составляют: погрузочный экскаватор – самосвалы марки БелАЗ и Caterpillar – гидравлические экскаваторы, то есть, принцип работы данного поля таков: в забое работает погрузочный экскаватор, который готовит новые горизонты добычи угля и при подходе самосвалов загружает их углем, загруженные углем самосвалы транспортируют

уголь к месту складирования угля, откуда работу ведет гидравлический экскаватор,

погружающий уголь на железнодорожные составы (рис. 2).

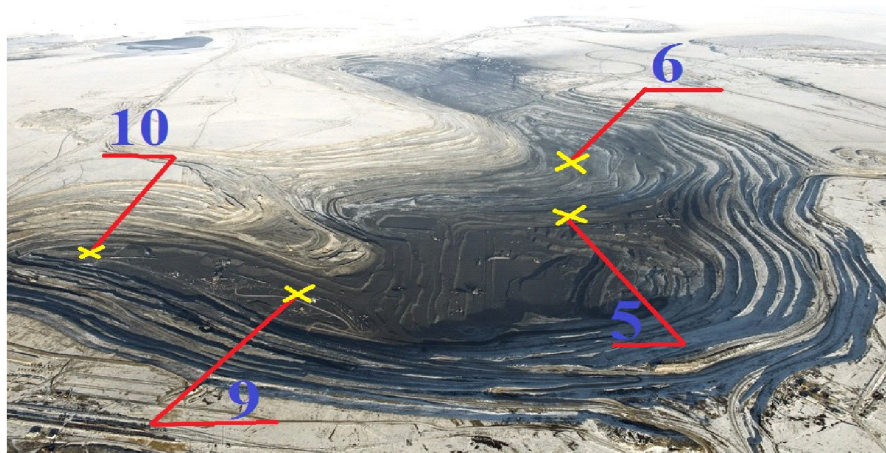


Рис. 1. Угольный разрез Богатырь

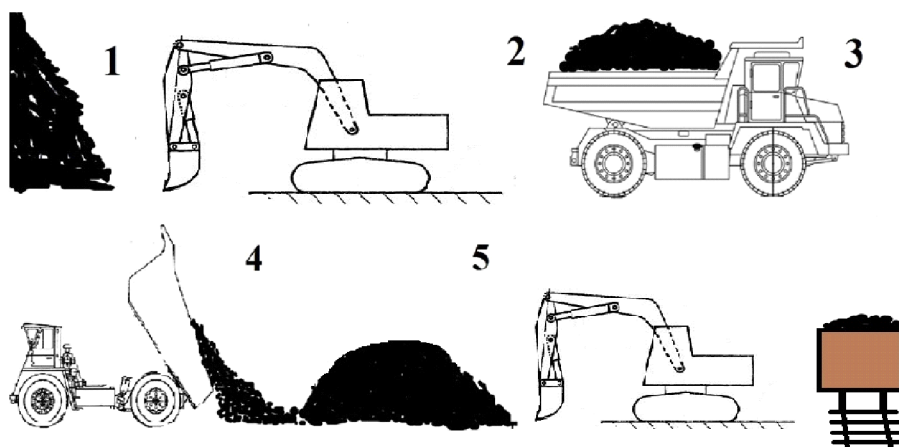


Рис. 2. Существующая технология работы:

1 – добыча угля одноковшовым экскаватором; 2,3 – погрузка и транспортирование угля к месту складирования; 4 – складирование угля; 5 – погрузка угля в вагоны; 6 – поля разреза Богатырь

При добыче полезного ископаемого на глубинах более 200 м время движения груженых автосамосвалов на подъем может достигать 5 % и более от времени рейса. Из-за перегрева тяговых двигателей и трансмиссии движение автосамосвалов производится с частыми остановками. Загазованность атмосферы достигает такого уровня, что карьер приходится останавливать для проветривания до 1000 и более часов в год, что ведет к значительным экономическим потерям. Одним из путей решения указанных проблем является применение на подъеме конвейерного транспорта [3].

В дальнейшем на разрезе планируется реконструкция схемы работы 6-го поля на схему автомобильно-конвейерный, то есть решается

проблема внедрения конвейерного транспорта. Расстояние транспортирования на автосамосвалах с забоя до поверхности – к месту погрузки угля составляет 3 км. Здесь возможно использование ленточного конвейера, однако в связи с высотой уступов и довольно дальним расстоянием к месту погрузки, это потребовало бы немалое количество таких ленточных конвейеров и межуступных перегружателей. Учитывая вышеуказанные недостатки относительно ленточного конвейера, можно сказать, что использование крутонаклонного конвейера в условиях разреза «Богатырь» является наиболее целесообразным [4].

В качестве опытного образца предлагается использовать крутонаклонные конвейера типа КНК-2000 с прижимной лентой,

выпускаемой Новокраматорским машиностроительным заводом (Украина) [5].

Как показано на рис. 3, в цепочке доставки угля, вначале уголь будет поступать на дробильный бункер, который позволяет дробить и измельчать его до определенно-

го куска, удобного для транспортирования между лентами. В разгрузочной части дробильного бункера будет установлен ленточный питатель, который напрямую будет перегружать дробленый уголь на крутонаклонный конвейер.

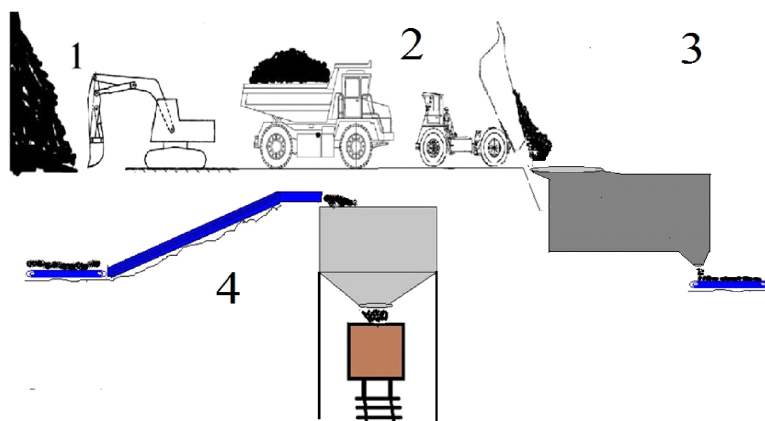


Рис. 3. Размещение крутонаклонного конвейера:

1 – добыча угля одноковшовым экскаватором; 2 – погрузка угля в самосвал; 3 – доставка угля и разгрузка в дробильную установку; 4 – доставка угля через крутонаклонный конвейер на разгрузочное устройство над составом

По существующей технологии данный конвейер может быть расположен на небольшом расстоянии (200 м) от забоя, что дает возможность значительно сократить дальность транспортирования. На месте установки потребуется проведение работ по выравниванию шероховатостей и уступов под удобное расположение данного конвейера на 30°.

Производительности крутонаклонного конвейера с прижимной лентой и стандартного конвейера одинаковы при равных мощностях приводов и высоте подъема, но при

использовании крутонаклонного конвейера сокращаются длина транспортных линий и горно-капитальные работы, это связано с увеличением угла подъема груза. Увеличение угла наклона крутонаклонного конвейера может быть достигнуто при помощи второй ленты, которая создает необходимое давление на груз с целью удержания ее при транспортировании на определенную высоту [6].

Ниже приведена конструкция крутонаклонного конвейера, где показаны основные ее детали (рис. 4).



Рис. 4. Крутонаклонный конвейер модели КНК-2000

К основным деталям крутонаклонного конвейера относятся: загрузочное устройство, грузонесущая и прижимная лента, привод грузонесущей ленты и привод прижимной ленты, также предусмотрен использование самоходной ремонтной тележки для обслуживания конвейера.

Особенностью крутонаклонных конвейеров является надежное стопорение груза и лент в случае обрыва одной из них или отказа тормозов привода, применение специальной самоходной тележки для обслуживания крутонаклонной части конвейера, оснащенной необходимым инструментом, грузоподъемными средствами и местами для персонала, а также возможность размещения конвейеров на откосах уступов без предварительной подготовки промежуточных берм, включая, при необходимости, полное их исключение как площадок описания секций [7].

Сравнивая работу существующей и предлагаемой технологий, в целях обоснования целесообразности предлагаемого способа транспортирования груза были проведены проверочные расчеты. Годовой грузооборот 6-го участка ТОО «Богатырь Комир» составляет 8 млн т. Исходя из этого суточный грузооборот будет составлять

$$Q = \frac{Q_{\text{год}} K_n}{365}, \quad (1)$$

где Q – производительность участка, т/сут;
 K_n – коэффициент неравномерности.

$$Q = \frac{8 \cdot 10^6 \cdot 1,2}{365} = 26301,36 \text{ т/сут.}$$

Имея суточный грузооборот, определяем часовую производительность участка:

$$Q_{\text{час}} = \frac{Q_{\text{сут}} K_n}{16}, \quad (2)$$

где Q – производительность участка, т/ч;
 K_n – коэффициент неравномерности; 16 – количество часов работы за 2 смены.

$$Q_{\text{час}} = \frac{26301,361,2}{16} = 1972,6 \text{ т/ч.}$$

После того как стал известен часовой грузооборот существующей технологии перевозки, можно произвести расчеты по предлагаемой технологии. В связи с использованием на данном участке крутонаклонного конвейера сократится расстояние транспортирования угля автосамосвалом. Если по существующей технологии каждый автосамосвал, доставляя уголь, проезжал около 3 км в один конец, то теперь необходимости в этом нет, так как крутонаклонный конвейер расположен на одном горизонте с экскаватором на расстоянии 200 м от забоя. Учитывая расположение конвейера на небольшом расстоянии и наличие на участке 5 функционирующих автосамосвалов, добавлением еще одного погрузочного экскаватора есть возможность увеличить суточный грузооборот с 1972,6 т/ч на 4000 т/ч. С учетом такой производительности скорость ленты согласно таблице 1 будет составлять– 3,15 м/с, то при данном условии ширина ленты будет

$$B = 1,3 \left[\sqrt{\frac{Q}{kv\gamma_p}} + 0,1 \right], \quad (3)$$

где B – ширина ленты, мм; Q – производительность конвейера, т/ч; k – коэффициент, зависящий от угла естественного откоса груза; v – скорость ленты, м/с; γ_p – насыпная плотность груза, т/м³.

$$B = 1,3 \left[\sqrt{\frac{4000}{550 \cdot 3,15 \cdot 0,8}} + 0,1 \right] = 2200 \text{ мм.}$$

Скорость ленты при ширине ленты

Транспортируемый груз	Ширина ленты, мм				
	400 – 500	650 – 800	1000 – 1200	1400 – 1600	2000 – 2500
Порошковидный и зернистый	1,25–1,6	2–2,5	2,5–4	3,15–4	3,15–5
Мелкие и среднекусковые	1,25–1,6	1,6–2	2–2,5	2,5–3,15	3,15
Крупнокусковые	–	–	1,6–2	2–2,5	2,5–3,15

В соответствии с удобной высотой расположения 200 м и согласно категории груза и оптимальной средней величине транспортирования принято угол установки 30° . Исходя из этого длина транспортирования груза по горизонтали определяется по формуле

$$L = \frac{H}{\operatorname{tg} \alpha}, \quad (4)$$

где H – высота подъема груза, м; α – угол наклона конвейера, град.

$$L = \frac{200}{\operatorname{tg} 30^\circ} = 346 \text{ м.}$$

При этом конструктивная длина конвейера определяется таким образом:

$$L = \frac{H}{\sin \alpha}, \quad (5)$$

$$L = \frac{200}{\sin 30^\circ} = 400 \text{ м.}$$

По предварительным расчетам были получены основные параметры крутонаклонного конвейера. После того как были определены основные конструкционные параметры, необходимо привести экономическое обоснование оптимальности использования крутонаклонного конвейера в условиях данного разреза.

Как было изложено выше, по технологии с применением крутонаклонного конвейера часовая производительность будет составлять 4000 т/ч. Отсюда и известно что годовая производительность будет:

$$Q_{\text{сут}} = \frac{Q_{\text{час}} \cdot 16}{1,2} = \frac{4000 \cdot 16}{1,2} = 53\,333 \text{ т;}$$

$$Q_{\text{год}} = \frac{Q_{\text{сут}} \cdot 365}{1,2} = \frac{53333 \cdot 365}{1,2} = 16,2 \cdot 10^6 \text{ т,}$$

тем более, что с внедрением в эксплуатацию крутонаклонного конвейера транспортные расходы значительно сократятся. Если учесть, что один самосвал за сутки расходует 950–1000 литров топлива, то 5 таких самосвалов, которые там работают расходуют 5000 литров топлива. Учитывая стоимость одного литра в 110 тенге, за такой объем данная сумма будет составлять – 550000 тнг в сутки, а в год это 200 750 000 тнг. А с внедрением крутонаклонного конвейера данные самосвалы взаимодействовали бы только между забоем и местом установки

конвейера, приблизительно 200 м, то есть топливные расходы сокращаются на 93,3 %, то есть

$$T_n = T_c \cdot 6,7\%$$

где T_n – топливные расходы по предлагаемой технологии, л; T_c – топливные расходы по существующей технологии, л; $T_n = 5000 \cdot 0,067 = 335 \text{ л}$

Расход на топливо в год будет 36850 тнг, а в год это 13 450 250 тнг.

Таким образом, подводя итоги проведенного нами анализа работы разреза, видим, что применение крутонаклонного конвейера с прижимной лентой в условиях разреза «Богатырь» имеет большую перспективу. Согласно мировой практике, использование крутонаклонного конвейера в таких горных условиях работы становится все более актуальным. По результатам исследований, которые мы провели в условиях данного разреза, можно сделать следующие выводы:

- производительность работы участка при использовании крутонаклонного конвейера достигает $16,2 \cdot 10^6$ млн т в год (по существующей технологии $8 \cdot 10^6$ млн т в год), что в два раза больше по сравнению с существующим методом;
- значительно уменьшаются транспортные расходы автосамосвалов на 93,3 %, также снижается энерго- и материалоемкость;
- сокращается норма естественной убыли груза;
- улучшается экологическая обстановка разреза благодаря герметичности транспортировки.

Список литературы

1. Картавый А.Н. Создание крутонаклонных конвейеров с прижимной лентой // Тяжелое машиностроение. – 2003. – №3. – 57 с.
2. Картавый А.Н. Перспективы применения крутонаклонных конвейеров с прижимной лентой при ЦПТ // Горный журнал. – 2003. – №6. – 158 с.
3. Малыбаев С.К., Тазабеков И.И., Данияров Н.А., Балгабеков Т.К. Повышение эффективности эксплуатации транспортных систем на карьерах // Машиностроение и техника 21 века, Сборник трудов XII Международной научно-технической конференции, том 3. Донецк, 2006. – 310 с.
4. Малыбаев С.К., Тазабеков И.И., Данияров Н.А., Балгабеков Т.К. и др. Факторы среды, определяющие условия работы горных машин. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сборник научных трудов. – Донецк – 2009, 219 с.
5. Малыбаев С.К., Данияров А.Н. Специальные виды промышленного транспорта: учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Караганда: Изд-во КарГТУ, 2011. – 228 с.

6. Пerten Ю.А., Михайлова Е.А. Крутонаклонные конвейеры и их применение // Научный журнал НИУ ИТМО. – 2011. – №2. – 60 с.

7. Черненко В.Д. Теория и расчет крутонаклонных конвейеров. – Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1985 г. – 246 с.

References

1. Kartavyj A.N. Sozдание krutonaklonnyx konvejerov s prizhimnoj lentoj // Tyazheloe mashinostroenie. – 2003. – №3. – 57 p.

2. Kartavyj A.N. Perspektivy primeneniya krutonaklonnyx konvejerov s prizhimnoj lentoj pri CP T// Gornyj zhurnal. – 2003g. – №6. – 158 p.

3. Malybaev S.K., Tazabekov I.I., Daniyarov N.A., Balgabekov T.K. Povyshenie effektivnosti ekspluatatsii transportnyx sistem na karerax // Mashinostroenie i texnosfera

21 veka, Sbornik trudov, 13 mezhdunarodnyj nauchno-texnicheskoj konferencii, tom 3, 2006g. Doneck, 2006. – 310 p.

4. Malybaev S.K., Tazabekov I.I., Daniyarov N.A., Balgabekov T.K. i dr. Faktory sredy, opredelyayushhie usloviya raboty gornyx mashin. // Progressivnye texnologii i sistemy mashinostroeniya: Mezhdunarodnyj sbornik nauchnyx trudov. – Doneck, 2009. – 219 p.

5. Malybaev S.K., Daniyarov A.N. Specialnye vidy promyshlennogo transporta: uchebnik dlya vuzov. – 2-e izd., pererab. i dop. Karaganda: Izd-vo KarGTU, 2011. – 228 p.

6. Perten Y.A., Mixajlova E.A. Krutonaklonnye konvejery i ix .primeneniye // Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. – 2011. – №2. – 60 p.

7. Chernenko V.D. Teoriya i raschet krutonaklonnyx konvejerov. – L.: Izd-vo Leningradskogo universiteta, 1985 – 246 p.

УДК 539.3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ВЕРТИКАЛЬНОМ СОСРЕДОТОЧЕННОМ ВЗРЫВНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НАБЕРЕЖНОЙ РЕЧНОГО ПОРТА С НЕЗАПОЛНЕННЫМ ВОДНЫМ ОБЪЕКТОМ

Мусаев В.К.

МЭСИ, Москва, e-mail: musayev-vk@yandex.ru

Приводится некоторая информация моделирования безопасности набережной речного порта с незаполненным водным объектом при сосредоточенном взрывном воздействии. Для решения поставленной задачи применяются линейные волновые уравнения механики деформируемого твердого тела. Реализация исследуемой задачи осуществляется с помощью численного моделирования уравнений волновой механики. Для прогноза безопасности сложных объектов при нестационарных волновых воздействиях применяется численное моделирование. На основе метода конечных элементов в перемещениях разработаны: методика; алгоритм; комплекс программ. За основные неизвестные приняты два перемещения и две скорости перемещений в узле конечного элемента. Задачи решаются методом сквозного счета, без выделения разрывов. Линейная динамическая задача с начальными и граничными условиями в виде дифференциальных уравнений в частных производных приведена к системе линейных обыкновенных дифференциальных уравнений с начальными условиями, которая решается по явной двухслойной схеме.

Ключевые слова: набережная речного порта, незаполненный водный объект, сосредоточенное воздействие, волновое уравнение, волновая теория взрывной безопасности, методика, алгоритм, комплекс программ, сложные объекты, основные неизвестные, метод сквозного счета, дифференциальные уравнения, уравнения в частных производных, прогноз безопасности, несущая способность, прочность

THE DEFINITION OF A NON-STATIONARY STATE OF STRESS AT A VERTICAL CONCENTRATED EXPLOSIVE IMPACT ON THE EMBANKMENT OF THE RIVER PORT WITH EMPTY WATER OBJECT

Musaev V.K.

MESI, Moscow, e-mail: musayev-vk@yandex.ru

Provides some information modeling security embankment of the river port with empty water body with a concentrated explosive impact. To solve this task applies a linear wave equations of solid mechanics. Implementation of the investigated task is carried out using numerical simulation of the equations of wave mechanics. To forecast security complex objects in non-stationary wave effects applied numerical modeling. Based on the finite element method in the movement developed: methods; algorithm; complex programs. For the main unknown taken of two moves and two speeds of movement in the node finite element. Problems are solved by the method of end-to-end account, without allocation of breaks. Linear dynamic problem with initial and boundary conditions in the form of differential equations reduced to the system of linear ordinary differential equations with initial conditions, which is solved by an explicit two-layer scheme.

Keywords: embankment of the river port, empty water, concentrated effect, wave equation, wave theory explosive safety, technique, algorithm, program, complex objects, the main unknown, method, end-to-end accounts, differential equations, partial differential equations, forecast security, load-carrying capacity and durability

Постановка динамической задачи теории упругости

Точные уравнения двумерной (плоское напряженное состояние) динамической теории упругости имеют вид

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \rho \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \end{pmatrix} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}, \quad (x, y) \in \Gamma,$$

$$\begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}, \quad (x, y) \in (\Gamma \cup S), \quad (1)$$

где σ_x , σ_y и τ_{xy} – компоненты тензора упругих напряжений; ϵ_x , ϵ_y и γ_{xy} – компоненты тензора упругих деформаций; u и v – составляющие вектора упругих перемещений вдоль осей OX и OY соответственно;

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \rho \begin{pmatrix} C_p^2 & C_p^2 - 2C_s^2 & 0 \\ C_p^2 - 2C_s^2 & C_p^2 & 0 \\ 0 & 0 & C_s^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix},$$

ρ – плотность материала; $C_p = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}}$ –

скорость продольной упругой волны;

$$C_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} - \text{скорость поперечной}$$

упругой волны; ν – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости; $S (S_1 \cup S_2)$ – граничный контур тела Γ .

Систему (1) в области, занимаемой телом Γ , следует интегрировать при начальных и граничных условиях. Начальные условия в области Γ зададим в виде

$$\left\| \begin{matrix} u \\ v \end{matrix} \right\|_{t=0} = \left\| \begin{matrix} u_0 \\ v_0 \end{matrix} \right\|, \quad \left\| \begin{matrix} \dot{u} \\ \dot{v} \end{matrix} \right\|_{t=0} = \left\| \begin{matrix} \dot{u}_0 \\ \dot{v}_0 \end{matrix} \right\|, \quad (x, y) \in \Gamma, \quad (2)$$

где u_0 , v_0 , $\dot{u}_0$ и $\dot{v}_0$ – заданные в области Γ функции.

Граничные условия зададим в виде:

составляющих компонентов тензора упругих напряжений на границе S_1

$$\left\| \begin{matrix} \sigma_x, \tau_{xy} \\ \tau_{xy}, \sigma_y \end{matrix} \right\| l = \left\| \begin{matrix} A_x \\ A_y \end{matrix} \right\|, \quad (x, y) \in S_1; \quad (3)$$

составляющих компонентов вектора упругих перемещений на границе S_2

$$\left\| \begin{matrix} u \\ v \end{matrix} \right\| = \left\| \begin{matrix} B_x \\ B_y \end{matrix} \right\|, \quad (x, y) \in S_2, \quad (4)$$

где l и m – направляющие косинусы; A_x , A_y , B_x и B_y – заданные на границе S функции.

Численное решение двумерной плоской динамической задачи теории упругости

Для решения двумерной плоской динамической задачи теории упругости с начальными и граничными условиями – используем метод конечных элементов в перемещениях.

Принимая во внимание определение матрицы жесткости, вектора инерции и вектора внешних сил для тела Γ , записываем приближенное значение уравнения движения в теории упругости

$$\bar{H} \ddot{\vec{\Phi}} + \bar{K} \vec{\Phi} = \vec{R}, \quad \vec{\Phi}|_{t=0} = \vec{\Phi}_0, \quad \dot{\vec{\Phi}}|_{t=0} = \dot{\vec{\Phi}}_0, \quad (5)$$

где $\bar{H}$ – матрица инерции; $\bar{K}$ – матрица жесткости; $\vec{\Phi}$ – вектор узловых упругих перемещений; $\dot{\vec{\Phi}}$ – вектор узловых упругих скоростей перемещений; $\ddot{\vec{\Phi}}$ – вектор узловых упругих ускорений; $\vec{R}$ – вектор узловых упругих внешних сил.

Интегрируя по временной координате соотношение (5) с помощью конечно-элементного варианта метода Галеркина, получим двумерную явную двухслойную конечноэлементную линейную схему в перемещениях для внутренних и граничных узловых точек:

$$\vec{\Phi}_{i+1} = \vec{\Phi}_i + \Delta t \bar{H}^{-1} (-\bar{K} \vec{\Phi}_i + \vec{R}_i),$$

$$\vec{\Phi}_{i+1} = \vec{\Phi}_i + \Delta t \dot{\vec{\Phi}}_{i+1}. \quad (6)$$

Основные соотношения метода конечных элементов в перемещениях получены с помощью принципа возможных перемещений и конечноэлементного варианта метода Галеркина. Система уравнений (5) для внутренних и граничных узловых точек, полученная в результате интегрирования уравнения движения теории упругости, должна давать решение, сходящееся к решению исходной системы (1). Шаг по временной переменной Δt определяем из следующего соотношения:

$$\Delta t = k \frac{\min \Delta l_i}{C_p} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, r), \quad (7)$$

где Δl – длина стороны конечного элемента.

Результаты численного эксперимента показали, что при $k = 0,5$ обеспечивается устойчивость двумерной явной двухслойной конечноэлементной линейной схемы в перемещениях для внутренних и граничных узловых точек на квазирегулярных сетках.

В работах [1–10] приводится информация о моделировании нестационарных волн напряжений в деформируемых телах.

Решение задачи о сосредоточенном взрывном воздействии

Рассмотрим задачу о сосредоточенном упругом взрывном воздействии (рис. 2) на набережной речного порта с незаполненным водным объектом (рис. 1). В работах [1, 3, 5, 9–10] приведена информация в области оценки достоверности результатов применяемого численного метода. В точке В приложено нормальное воздействие σ_y , которое при $0 \leq n \leq 10$ ($n = t / \Delta t$) изменяется линейно от 0 до P , при $11 \leq n \leq 20$ изменяется P до 0 ($P = \sigma_0$, $\sigma_0 = -0,1$ МПа (-1 кгс/см²)). Граничные условия для контура $CDEF$ при $t > 0$ $u = v = \dot{u} = \dot{v} = 0$. Отраженные волны от контура $CDEF$ не доходят до исследуемых точек при

$0 \leq n \leq 200$. Контур $CBAGF$ свободен от нагрузок, кроме точки B , где приложено сосредоточенное воздействие. Расчеты проведены при следующих исходных данных: $H = \Delta x = \Delta y$; $\Delta t = 1,393 \cdot 10^{-6}$ с; $E = 3,15 \cdot 10^4$ МПа ($3,15 \cdot 10^5$ кгс/см²); $\nu = 0,2$; $\rho = 0,255 \cdot 10^4$ кг/м³ ($0,255 \cdot 10^{-5}$ кгс/см³); $C_p = 3587$ м/с; $C_s = 2269$ м/с. Исследуемая расчетная область имеет 20402 узловые точки. Решается система уравнений из 81608 неизвестных.

На рис. 4–6 показано изменение упругого контурного напряжения $\bar{\sigma}_k$ ($\bar{\sigma}_k = \sigma_k / |\sigma_0|$) во времени n в точках $A1$ – $A3$ (рис. 3), находящихся на свободной поверх-

ности упругой полуплоскости. Растягивающее упругое контурное напряжение $\bar{\sigma}_k$ от точки $A1$ до точки $A10$ изменяется от значения $\bar{\sigma}_k = 0,15$ до значения $\bar{\sigma}_k = 0,331$. Сжимающее упругое контурное напряжение $\bar{\sigma}_k$ от точки $A1$ до точки $A10$ изменяется от значения $\bar{\sigma}_k = -0,228$ до значения $\bar{\sigma}_k = -0,356$. Растягивающее упругое нормальное напряжение $\bar{\sigma}_x$ ($\bar{\sigma}_x = \sigma_x / |\sigma_0|$) от точки $B1$ до точки $B10$ изменяется от значения $\bar{\sigma}_x = 0,105$ до значения $\bar{\sigma}_x = 0,192$. Сжимающее упругое напряжение $\bar{\sigma}_x$ от точки $B1$ до точки $B10$ изменяется от значения $\bar{\sigma}_x = -0,134$ до значения $\bar{\sigma}_x = -0,233$.

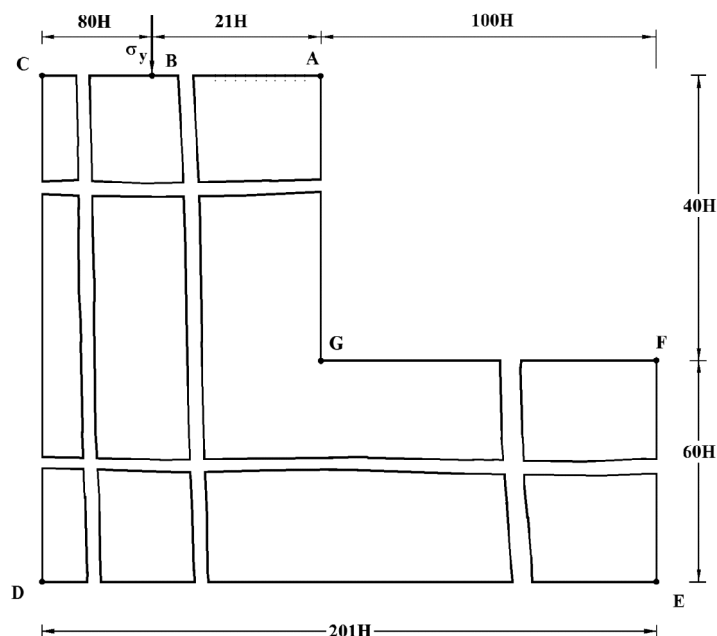


Рис. 1. Постановка задачи о сосредоточенном упругом взрывном воздействии на набережной речного порта с незаполненным водным объектом

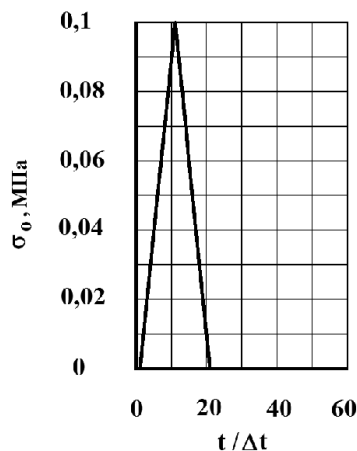


Рис. 2. Взрывное воздействие для задачи с незаполненным водным объектом

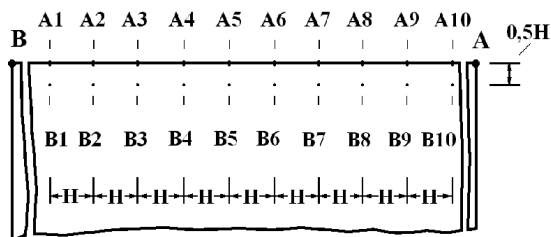


Рис. 3. Точки A1-A10 и B1-B10, в которых получены упругие напряжения во времени

Упругое нормальное напряжение $\bar{\sigma}_y$ в точках от точки B1 до точки B10 является очень маленьким. Растягивающее упругое нормальное напряжение $\bar{\sigma}_y$ ($\bar{\sigma}_y = \sigma_y / |\sigma_0|$) от точки B1 до точки B10 изменяется от значения $\bar{\sigma}_y = 0,016$ до значения $\bar{\sigma}_y = 0,029$. Сжимающее упругое напряжение $\bar{\sigma}_y$ от точки B1 до точки B10 изменяется от значения $\bar{\sigma}_y = -0,023$ до значения $\bar{\sigma}_y = -0,029$.

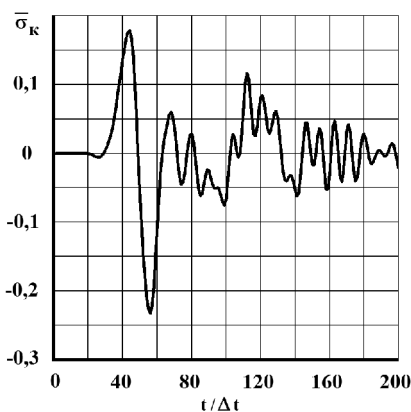


Рис. 4. Изменение упругого контурного напряжения $\bar{\sigma}_k$ во времени $t / \Delta t$ в точке A1 в задаче с незаполненным водным объектом

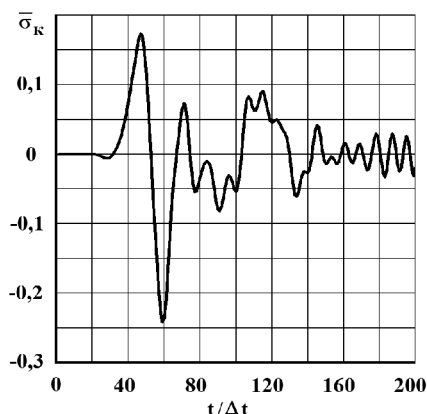


Рис. 5. Изменение упругого контурного напряжения $\bar{\sigma}_k$ во времени $t / \Delta t$ в точке A2 в задаче с незаполненным водным объектом

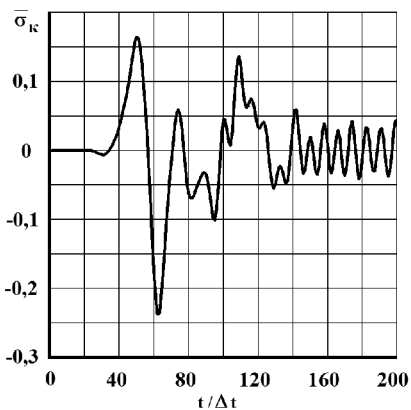


Рис. 6. Изменение упругого контурного напряжения $\bar{\sigma}_k$ во времени $t / \Delta t$ в точке A3 в задаче с незаполненным водным объектом

Упругое касательное напряжение $\bar{\tau}_{xy}$ в точках от точки B1 до точки B10 является маленьким. Растягивающее упругое касательное напряжение $\bar{\tau}_{xy}$ ($\bar{\tau}_{xy} = \tau_{xy} / |\sigma_0|$) от точки B1 до точки B10 изменяется от значения $\bar{\tau}_{xy} = 0,038$ до значения $\bar{\tau}_{xy} = 0,05$. Сжимающее упругое касательное напряжение $\bar{\tau}_{xy}$ от точки B1 до точки B10 изменя-

ется от значения $\bar{\tau}_{xy} = -0,03$ до значения $\bar{\tau}_{xy} = -0,059$.

Выводы

Для прогноза безопасности сооружений при взрывных воздействиях на набережной речного порта с водной средой применяется численное моделирование.

На основе метода конечных элементов в перемещениях разработаны методика, алгоритм и комплекс программ для решения линейных двумерных плоских задач, которые позволяют решать сложные задачи при взрывных воздействиях на сооружения. Задачи решаются методом сквозного счета, без выделения разрывов. Линейная динамическая задача с начальными и граничными условиями в виде дифференциальных уравнений в частных производных для решения задач при взрывных воздействиях с помощью метода конечных элементов в перемещениях приведена к системе линейных обыкновенных дифференциальных уравнений с начальными условиями, которая решается по явной двухслойной схеме.

Решена задача о сосредоточенном упругом взрывном воздействии на набережной речного порта с незаполненным водным объектом. Взрывное воздействие моделируется в виде треугольного импульса. Получены напряжения в точках на набережной речного порта с незаполненным водным объектом.

Список литературы

1. Мусаев В.К. Оценка достоверности и точности результатов вычислительного эксперимента при решении задач нестационарной волновой теории упругости // Научный журнал проблем комплексной безопасности. – 2009. – № 1. – С. 55–80.
2. Мусаев В.К. Применение вертикальных экранов для моделирования защиты сооружений от воздушных взрывных волн с помощью численного метода В.К. Мусаева / В.К. Мусаев, А.Н. Денисенков, Т.С. Сушев, Н.С. Юзбеков, С.В. Ситник, С.М. Шиянов // Проблемы безопасности российского общества. – 2014. – № 2. – С. 148–160.
3. Мусаев В.К. Математическое моделирование интерференции нестационарных упругих волн напряжений в виде треугольного импульса от свободной поверхности пластинки / В.К. Мусаев, С.В. Ситник, А.А. Тарасенко, В.Г. Ситник, М.В. Зюбина // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 4; URL: www.science-education.ru/118-14118 (дата обращения: 21.09.2014).
4. Мусаев В.К. Моделирование точечного взрывного воздействия на сооружение неглубокого заложения без полости с помощью метода конечных элементов в перемещениях // Проблемы безопасности российского общества. – 2014. – № 3–4. – С. 173–183.
5. Мусаев В.К. О достоверности компьютерного моделирования нестационарных упругих волн напряжений в деформируемых телах сложной формы // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 11 – С. 10–14.
6. Мусаев В.К. Определение упругих напряжений в плотине Койна с основанием с помощью волновой теории сейсмической безопасности // Успехи современного естествознания. – 2014. – № 12 (3). – С. 235–240; URL: www.rae.ru/use/?section=content&op=show_article&article_id=10003415 (дата обращения: 01.01.2015).
7. Мусаев В.К. Моделирование нестационарных упругих волн напряжений в деформируемых областях с помощью метода конечных элементов в перемещениях // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 12 (1). – С. 28–32; URL: www.rae.ru/snt/?section=content&op=show_article&article_id=10003413 (дата обращения: 01.01.2015).
8. Мусаев В.К. Моделирование безопасности по несущей способности дымовых труб с основанием при взрыве атомной бомбы в Нагасаки // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 12 – С. 198–203. – URL: www.rae.ru/upfs/?section=content&op=show_article&article_id=6297 (дата обращения: 01.01.2015).
9. Мусаев В.К. О достоверности компьютерного моделирования нестационарных упругих волн напряжений в деформируемых телах сложной формы // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 11 – С. 10–14. – URL: www.rae.ru/upfs/?section=content&op=show_article&article_id=6064 (дата обращения: 01.01.2015).
10. Мусаев В.К. Математическое моделирование отражения нестационарных упругих волн напряжений

в виде треугольного импульса от свободной поверхности пластинки / В.К. Мусаев, С.В. Ситник, А.А. Тарасенко, В.Г. Ситник, М.В. Зюбина // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11–11. – С. 2375–2379; URL: www.rae.ru/fs/?section=content&op=show_article&article_id=10005217 (дата обращения: 01.01.2015).

References

1. Musaev V.K. Otsenka dostovernosti i tochnosti rezultatov vychislitel'nogo eksperimenta pri reshenii zadach nestatsionarnoy volnovoy teorii uprugosti // Nauchnyy zhurnal problem kompleksnoy bezopasnosti. – 2009. – № 1. – pp. 55–80.
2. Musaev V.K. Primenenie vertikalnykh ekranov dlya modelirovaniya zashchity sooruzheniy ot vozdushnykh vzryvnykh voln s pomoshchyu chislennogo metoda V.K. Musaeva / V.K. Musaev, A.N. Denisenkov, T.S. Sushchev, N.S. Yuzbekov, S.V. Sitnik, S.M. Shiyarov // Problemy bezopasnosti rossiyskogo obshchestva. – 2014. – № 2. – pp. 148–160.
3. Musaev V.K. Matematicheskoe modelirovanie interferentsii nestatsionarnykh uprugikh voln napryazheniy v vide treugolnogo impulsa ot svobodnoy poverkhnosti plastinki / V.K. Musaev, S.V. Sitnik, A.A. Tarasenko, V.G. Sitnik, M.V. Zyubina // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. – 2014. – № 4. – URL: www.science-education.ru/118-14118 (data obrashcheniya: 21.09.2014).
4. Musaev V.K. Modelirovanie tochechnogo vzryvnogo vozdeystviya na sooruzhenie neglubokogo zalozheniya bez polosti s pomoshchyu metoda konechnykh elementov v peremeshcheniyakh // Problemy bezopasnosti rossiyskogo obshchestva. – 2014. – № 3–4. – pp. 173–183.
5. Musaev V.K. O dostovernosti kompyuternogo modelirovaniya nestatsionarnykh uprugikh voln napryazheniy v deformiruemykh telakh slozhnoy formy // Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy. – 2014. – № 11 – pp. 10–14.
6. Musaev V.K. Opredelenie uprugikh napryazheniy v plotine Koyna s osnovaniem s pomoshchyu volnovoy teorii seysmicheskoy bezopasnosti // Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya. – 2014. – № 12 (3). – pp. 235–240; URL: www.rae.ru/use/?section=content&op=show_article&article_id=10003415 (data obrashcheniya: 01.01.2015).
7. Musaev V.K. Modelirovanie nestatsionarnykh uprugikh voln napryazheniy v deformiruemykh oblastyakh s pomoshchyu metoda konechnykh elementov v peremeshcheniyakh // Sovremennye naukoemkie tekhnologii. – 2014. – № 12 (1). – pp. 28–32; URL: www.rae.ru/snt/?section=content&op=show_article&article_id=10003413 (data obrashcheniya: 01.01.2015).
8. Musaev V.K. Modelirovanie bezopasnosti po nesushchey sposobnosti dymovykh trub s osnovaniem pri vzryve atomnoy bomby v Nagasaki // Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy. – 2014. – № 12 – pp. 198–203. URL: www.rae.ru/upfs/?section=content&op=show_article&article_id=6297 (data obrashcheniya: 01.01.2015).
9. Musaev V.K. O dostovernosti kompyuternogo modelirovaniya nestatsionarnykh uprugikh voln napryazheniy v deformiruemykh telakh slozhnoy formy // Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy. – 2014. – № 11 – pp. 10–14 URL: www.rae.ru/upfs/?section=content&op=show_article&article_id=6064 (data obrashcheniya: 01.01.2015).
10. Musaev V.K. Matematicheskoe modelirovanie otrazheniya nestatsionarnykh uprugikh voln napryazheniy v vide treugolnogo impulsa ot svobodnoy poverkhnosti plastinki / V.K. Musaev, S.V. Sitnik, A.A. Tarasenko, V.G. Sitnik, M.V. Zyubina // Fundamental'nye issledovaniya. – 2014. – № 11–11. – pp. 2375–2379. – URL: www.rae.ru/fs/?section=content&op=show_article&article_id=10005217 (data obrashcheniya: 01.01.2015).

УДК 539.3

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О РАСПРОСТРАНЕНИИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ УПРУГИХ ВОЛН НАПРЯЖЕНИЙ В ПОДКРЕПЛЕННОМ КРУГЛОМ ОТВЕРСТИИ

Мусаев В.К.

МЭСИ, Москва, e-mail: musayev-vk@yandex.ru

Рассматриваются некоторые вопросы численного определения волн напряжений в подкрепленном круглом отверстии. Для решения двумерной плоской динамической задачи теории упругости с начальными и граничными условиями применяется метод конечных элементов в перемещениях. Задача решается методом сквозного счета, без выделения разрывов. Основные соотношения метода конечных элементов получены с помощью принципа возможных перемещений. На основе метода конечных элементов в перемещениях разработаны алгоритм и комплекс программ для решения волновых задач теории упругости. Программный комплекс позволяет решать сложные задачи при нестационарных воздействиях на объекты сложной формы. Приводится сопоставление контурного напряжения с результатами аналитического решения.

Ключевые слова: математическое моделирование, контурные напряжения, подкрепленное круглое отверстие, функция Хевисайда, динамическая теория упругости, перемещение, скорость перемещений, ускорение, метод конечных элементов, конечные элементы первого порядка, контурный конечный элемент, принцип возможных перемещений, однородный алгоритм, комплекс программ, узловые точки, явная двухслойная схема

NUMERICAL SOLUTION OF THE PROBLEM OF PROPAGATION OF NON-STATIONARY ELASTIC WAVES STRESSES IN REINFORCED ROUND HOLE

Musaev V.K.

MESI, Moscow, e-mail: musayev-vk@yandex.ru

Discusses some of the issues of numerical determination of stress waves supported in a round hole. For the solution of two-dimensional planar dynamic problem of elasticity theory with initial and boundary conditions using the method of finite elements in the movement. The problem is solved by the method of end-to-end account, without allocation of breaks. The basic correlations of the finite element method is obtained using the principle of possible displacements. Based on the finite element method in the movements of the developed algorithm and software package for solving wave problems of elasticity theory. Software complex allows to solve complex problems in unsteady effects on complex objects. Contains the mapping of the grid voltages with the results of the analytical solution.

Keywords: mathematical modeling, contour voltage, supported by a round hole, the Heaviside function, the dynamic theory of elasticity, displacement, velocity, displacement, acceleration, finite element method, finite elements of the first order, the contour of the end element, principle of virtual displacements, the homogeneous algorithm, complex programs, anchor point, an explicit two-layer scheme

Постановка задачи при упругих волновых воздействиях

Для решения двумерной плоской динамической задачи теории упругости с начальными и граничными условиями – используем метод конечных элементов в перемещениях. Постановки, численные методы, технология программных комплексов и анализ результатов решения нестационарных динамических задач для областей сложной формы рассмотрены в работах [1–10].

Разработка методики и алгоритма

Задача решается методом сквозного счета, без выделения разрывов. Основные соотношения метода конечных элементов получены с помощью принципа возможных перемещений. Для решения линейных дифференциальных уравнений используем метод конечных элементов в перемещениях.

Принимая во внимание определение матрицы жесткости, вектора инерции и вектора внешних сил для тела Г, записываем приближенное значение уравнения движения в теории упругости

$$\bar{H}\ddot{\vec{\Phi}} + \bar{K}\vec{\Phi} = \vec{R}, \quad \vec{\Phi}|_{t=0} = \vec{\Phi}_0, \quad \dot{\vec{\Phi}}|_{t=0} = \dot{\vec{\Phi}}_0, \quad (1)$$

где $\bar{H}$ – диагональная матрица инерции; $\bar{K}$ – матрица жесткости; $\vec{\Phi}$ – вектор узловых упругих перемещений; $\dot{\vec{\Phi}}$ – вектор узловых упругих скоростей перемещений; $\ddot{\vec{\Phi}}$ – вектор узловых упругих ускорений; $\vec{R}$ – вектор внешних узловых упругих сил.

Интегрируя по временной координате соотношение (1) с помощью конечноэлементного варианта метода Галеркина, получим двумерную явную двухслойную линейную схему в перемещениях для внутренних и граничных узловых точек

$$\vec{\Phi}_{i+1} = \vec{\Phi}_i + \Delta t \bar{H}^{-1} (-\bar{K} \vec{\Phi}_i + \vec{R}_i),$$

$$\vec{\Phi}_{i+1} = \vec{\Phi}_i + \Delta t \vec{\Phi}_{i+1}. \quad (2)$$

Общая теория численных уравнений математической физики требует для этого наложения определенных условий на отношение шагов по временной координате Δt и по пространственным координатам, а именно

$$\Delta t = k \frac{\min \Delta l_i}{C_p} \quad (i=1, 2, 3, \dots), \quad (3)$$

где Δl – длина стороны конечного элемента.

Устойчивость двумерной явной двухслойной конечноэлементной линейной схемы в перемещениях для внутренних и граничных узлов точек на квазирегулярных сетках исследуем с помощью численного эксперимента. Результаты численного эксперимента показали, что при $k = 0,5$ обеспечивается устойчивость двумерной явной двухслойной конечноэлементной линейной схемы в перемещениях для внутренних и граничных узлов точек на квазирегулярных сетках.

На основе метода конечных элементов в перемещениях разработаны алгоритм и комплекс программ для решения линейных плоских двумерных задач, которые позволяют решать сложные задачи при нестационарных динамических воздействиях на уникальные сооружения. При разработке комплекса программ использовался алгоритмический язык Фортран-90.

В работах [2–10] приведена информация о численном моделировании волн напряжений.

Определение нестационарных упругих волн напряжений в подкрепленном круглом отверстии

Рассматривается задача о воздействии плоской продольной упругой волны на подкрепленное круглое отверстие. Начальные условия приняты нулевыми. В сечении на расстоянии $1,6H$ (рис. 1) при $0 \leq n_1 \leq 10$ ($n_1 = t / \Delta t_1$) скорость упругого перемещения $\dot{u}_2$ изменяется линейно от 0 до $P_1 = \sigma_0 / (\rho_2 C_{p2})$, а при $n_1 > 10$ $\dot{u}_2 = P_1$. Внутренний контур подкрепленного отверстия $ABCD$ предполагается свободным от нагрузок при $t > 0$.

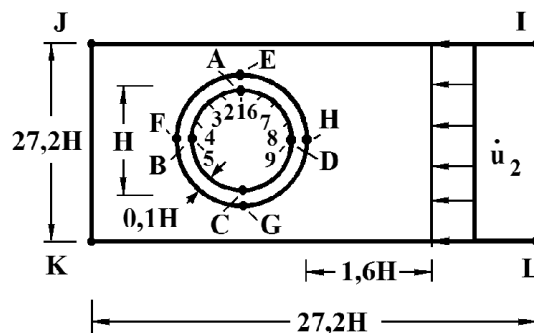


Рис. 1. Постановка задачи для подкрепленного круглого отверстия

На границе подкрепления и среды $EFGH$ приняты условия непрерывности перемещений. Граничные условия для контура $IJKL$ при $t > 0$ $u_2 = v_2 = \dot{u}_2 = \dot{v}_2 = 0$. Отраженные волны от контура $IJKL$ не доходят до исследуемых точек при $0 \leq n_1 \leq 540$. Расчеты проведены при следующих исходных данных:

$$H = 0,2 \text{ м}; \Delta t_1 = 0,186 \cdot 10^{-5} \text{ с};$$

$$E_1 = 0,72 \cdot 10^5 \text{ МПа } (0,72 \cdot 10^6 \text{ кгс/см}^2);$$

$$v_1 = 0,3;$$

$$\rho_1 = 0,275 \cdot 10^4 \text{ кг/м}^3 (0,275 \cdot 10^{-5} \text{ кгс} \cdot \text{с}^2/\text{см}^4);$$

$$C_{p1} = 5364 \text{ м/с}; \Delta t_2 = 0,407 \cdot 10^{-5} \text{ с};$$

$$E_2 = 0,36 \cdot 10^4 \text{ МПа } (0,36 \cdot 10^5 \text{ кгс/см}^2);$$

$$v_2 = 0,36;$$

$$\rho_2 = 0,122 \cdot 10^4 \text{ кг/м}^3 (0,122 \cdot 10^{-5} \text{ кгс} \cdot \text{с}^2/\text{см}^4);$$

$$C_{p2} = 1841 \text{ м/с};$$

$$\sigma_0 = -0,1 \text{ МПа } (-1 \text{ кгс/см}^2)$$

($\dots_1$ – подкрепление; $\dots_2$ – среда).

Исследуемая расчетная область имеет 1536 узловых точек. Внутренний контур подкрепления аппроксимирован 28 узловыми точками. По толщине подкрепление аппроксимировано двумя узловыми точками.

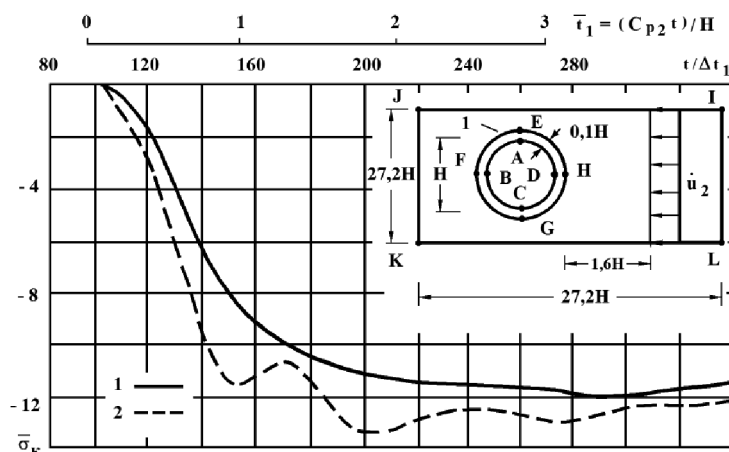


Рис. 2. Изменение упругого контурного напряжения $\bar{\sigma}_k$ в точке 1 во времени $\bar{t}_1$ на внутреннем контуре подкрепленного круглого отверстия при воздействии плоской продольной упругой волны типа функции Хевисайда

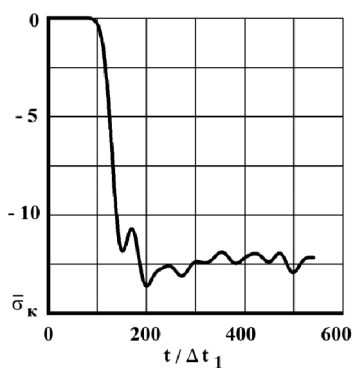


Рис. 3. Изменение упругого контурного напряжения $\bar{\sigma}_k$ в точке 1 на контуре подкрепленного круглого отверстия во времени $t / \Delta t_1$

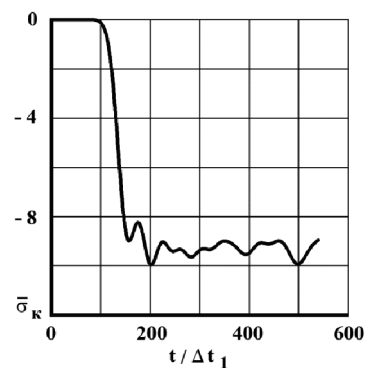


Рис. 4. Изменение упругого контурного напряжения $\bar{\sigma}_k$ в точке 2 на контуре подкрепленного круглого отверстия во времени $t / \Delta t_1$

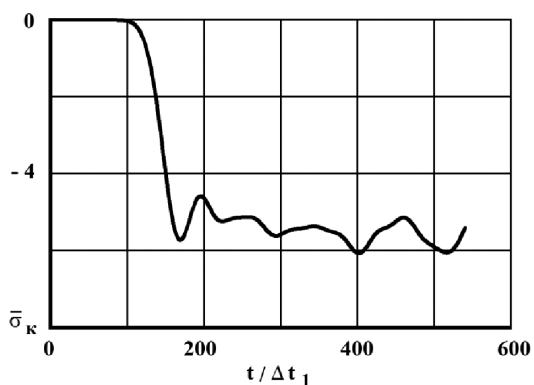


Рис. 5. Изменение упругого контурного напряжения $\bar{\sigma}_k$ в точке 3 на контуре подкрепленного круглого отверстия во времени $t / \Delta t_1$

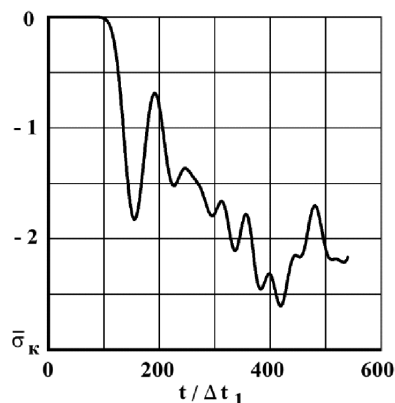


Рис. 6. Изменение упругого контурного напряжения $\bar{\sigma}_k$ в точке 4 на контуре подкрепленного круглого отверстия во времени $t / \Delta t_1$

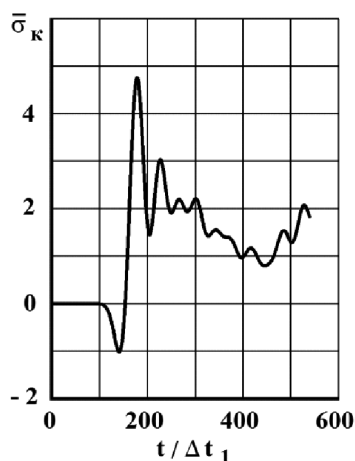


Рис. 7. Изменение упругого контурного напряжения $\bar{\sigma}_k$ в точке 5 на контуре подкрепленного круглого отверстия во времени $t/\Delta t_1$

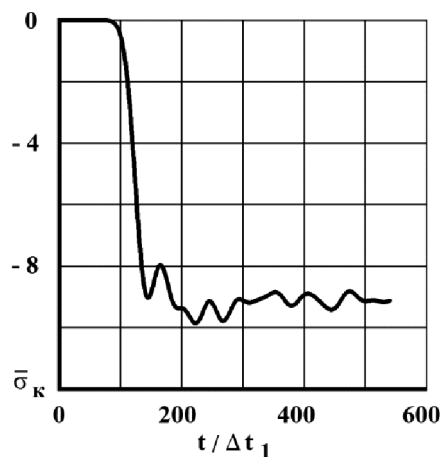


Рис. 8. Изменение упругого контурного напряжения $\bar{\sigma}_k$ в точке 6 на контуре подкрепленного круглого отверстия во времени $t/\Delta t_1$

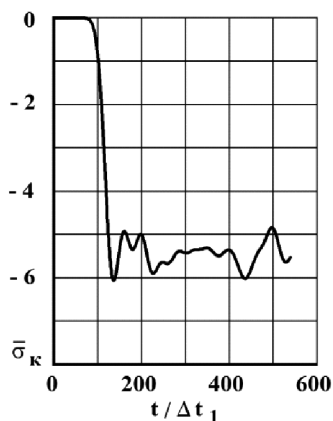


Рис. 9. Изменение упругого контурного напряжения $\bar{\sigma}_k$ в точке 7 на контуре подкрепленного круглого отверстия во времени $t/\Delta t_1$

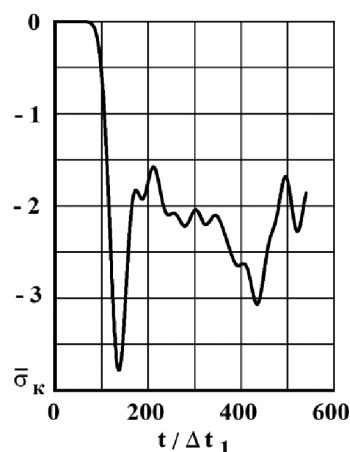


Рис. 10. Изменение упругого контурного напряжения $\bar{\sigma}_k$ в точке 8 на контуре подкрепленного круглого отверстия во времени $t/\Delta t_1$

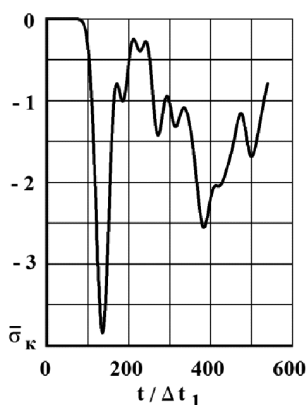


Рис. 11. Изменение упругого контурного напряжения $\bar{\sigma}_k$ в точке 9 на контуре подкрепленного круглого отверстия во времени $t/\Delta t_1$

На рис. 2 показано изменение контурного напряжения $\bar{\sigma}_k$ в точке 1 во времени $\bar{t}_1$ ($\bar{t}_1 = (C_{p2}t)/H$): 1 – результаты аналитического решения [1]; 2 – результаты численного решения, полученные методом конечных элементов [2, 4 и 6]. Расхождение для максимального упругого контурного напряжения составляет 12%. Результаты исследований показаны на рис. 3–11 в виде графиков изменения контурных напряжений $\bar{\sigma}_k$ ($\bar{\sigma}_k = \sigma_k / |\sigma_0|$) в точках 1–9 во времени $t/\Delta t_1$ при воздействии функции Хевисайда. Максимальной величины сжимающее контурное напряжение достигает в точке 1 почти за два прохода фронтом продольной волны диаметра среднего контура

подкрепленного круглого отверстия и равно $\sigma_k = -13,6$.

Вывод

Сравнение с результатами аналитического метода показало их хорошее совпадение, что позволяет сделать заключение о физической достоверности результатов численного решения волновых задач.

Список литературы

1. Гернет Х., Крузе-Паскаль Д. Неустановившаяся реакция находящегося в упругой среде кругового цилиндра произвольной толщины на действие плоской волны расширения // Прикладная механика. Труды американского общества инженеров-механиков. – Сер. Е. – 1966. – Т. 33, № 3. – С. 48–60.
2. Мусаев В.К. Численное решение волновых задач теории упругости и пластичности // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия «Прикладная математика и информатика». – 1997. – № 1. – С. 87–110.
3. Мусаев В.К. О разрушениях в сложных деформируемых телах вызванных импульсными воздействиями // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия проблемы комплексной безопасности. – 2006. – № 1. – С. 36–42.
4. Мусаев В.К. Об оценке достоверности и точности численного решения нестационарных динамических задач // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия проблемы комплексной безопасности. – 2007. – № 3. – С. 48–60.
5. Мусаев В.К. Численное, аналитическое и экспериментальное решение задачи о концентрации нестационарных динамических напряжений в свободном круглом отверстии // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия проблемы комплексной безопасности. – 2008. – № 4. – С. 67–71.
6. Мусаев В.К. Оценка достоверности и точности результатов вычислительного эксперимента при решении задач нестационарной волновой теории упругости // Научный журнал проблем комплексной безопасности. – 2009. – № 1. – С. 55–80.
7. Мусаев В.К. Математическое моделирование интерференции нестационарных упругих волн напряжений в виде треугольного импульса от свободной поверхности пластинки / В.К. Мусаев, С.В. Ситник, А.А. Тарасенко, В.Г. Ситник, М.В. Зюбина // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 4; URL: www.science-education.ru/118-14118 (дата обращения: 21.09.2014).
8. Мусаев В.К. Математическое моделирование отражения нестационарных упругих волн напряжений в виде треугольного импульса от свободной поверхности пластинки / В.К. Мусаев, С.В. Ситник, А.А. Тарасенко, В.Г. Ситник, М.В. Зюбина // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 9 (часть 7). – С. 1466–1470; URL: www.rae.ru/fs/?section=content&op=show_article&article_id=10004353 (дата обращения: 21.09.2014).
9. Мусаев В.К. О достоверности компьютерного моделирования нестационарных упругих волн напряжений в деформируемых телах сложной формы // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 11 – С. 10–14.
10. Мусаев В.К. Математическое моделирование напряженного состояния технических объектов с помощью волновой теории сейсмической безопасности // Проблемы безопасности российского общества. – 2014. – № 3–4. – С. 206–218.

References

1. Gernet K., Kruze-Paskal D. Neustanovivshayasya reaktsiya nakhodyashchegosya v uprugoy srede krugovogo tsilindra proizvolnoy tolshchiny na deystvie ploskoy volny rasshireniya // Prikladnaya mekhanika. Trudy amerikanskogo obshchestva inzhenerov-mekhanikov. – Ser. E. – 1966. – T. 33, № 3. – pp. 48–60.
2. Musaev V.K. Chislennoe reshenie volnovykh zadach teorii uprugosti i plastichnosti // Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya prikladnaya matematika i informatika. – 1997. – № 1. – pp. 87–110.
3. Musaev V.K. O razrusheniyakh v slozhnykh deformiruemykh telakh vyzvannykh impulsnyimi vozdeystviyami // Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya problemy kompleksnoy bezopasnosti. – 2006. – № 1. – pp. 36–42.
4. Musaev V.K. Ob otsenke dostovernosti i tochnosti chislenno go resheniya nestatsionarnykh dinamicheskikh zadach // Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya problemy kompleksnoy bezopasnosti. – 2007. – № 3. – pp. 48–60.
5. Musaev V.K. Chislennoe, analiticheskoe i eksperimentalnoe reshenie zadachi o kontsentratsii nestatsionarnykh dinamicheskikh napryazheniy v svobodnom kruglom otverstii // Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya problemy kompleksnoy bezopasnosti. – 2008. – № 4. – pp. 67–71.
6. Musaev V.K. Otsenka dostovernosti i tochnosti rezultatov vychislitel'nogo eksperimenta pri reshenii zadach nestatsionarnoy volnovoy teorii uprugosti // Nauchnyy zhurnal problem kompleksnoy bezopasnosti. – 2009. – № 1. – pp. 55–80.
7. Musaev V.K. Matematicheskoe modelirovanie interferentsii nestatsionarnykh uprugikh voln napryazheniy v vide treugol'nogo impulsa ot svobodnoy poverkhnosti plastinki / V.K. Musaev, S.V. Sitnik, A.A. Tarasenko, V.G. Sitnik, M.V. Zyubina // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. – 2014. – № 4. – URL: www.science-education.ru/118-14118 (data obrashcheniya: 21.09.2014).
8. Musaev V.K. Matematicheskoe modelirovanie otrazheniya nestatsionarnykh uprugikh voln napryazheniy v vide treugol'nogo impulsa ot svobodnoy poverkhnosti plastinki / V.K. Musaev, S.V. Sitnik, A.A. Tarasenko, V.G. Sitnik, M.V. Zyubina // Fundamentalnye issledovaniya. – 2014. – № 9 (chast 7). – pp. 1466–1470; URL: www.rae.ru/fs/?section=content&op=show_article&article_id=10004353 (data obrashcheniya: 21.09.2014).
9. Musaev V.K. O dostovernosti kompyuternogo modelirovaniya nestatsionarnykh uprugikh voln napryazheniy v deformiruemykh telakh slozhnoy formy // Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy. – 2014. – № 11 – pp. 10–14.
10. Musaev V.K. Matematicheskoe modelirovanie napryazhennogo sostoyaniya tekhnicheskikh obektov s pomoshchyu volnovoy teorii seysmicheskoy bezopasnosti // Problemy bezopasnosti rossiyskogo obshchestva. – 2014. – № 3–4. – pp. 206–218.

УДК 621.77:669.14.018.27

ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ С ВОЛОЧЕНИЕМ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРЯЧЕКАТАНОЙ СТАЛИ 40Х

Пачурин Г.В., Филиппов А.А., Пачурин В.Г.

*ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»,
Нижний Новгород, e-mail: PachurinGV@mail.ru*

В машиностроении и, в частности, автомобилестроении широкое применение нашли крепёжные изделия в виде болтов, шпилек, стремянок и т.п. В процессе изготовления они обычно подвергаются закалке с отпуском. В современных условиях, наряду с повышением конструкционной прочности и эксплуатационной надёжности, развитие производства такого упрочнённого крепежа предполагает снижение затрат по всей производственной цепочке, начиная от получения проката, и заканчивая изготовлением готовых деталей требуемого качества. Это особенно актуально в условиях массового производства. При этом в плане минимизации стоимости выбора марки стали под крепеж наиболее предпочтительной представляется сталь 40Х, имеющая традиционно наибольшее распространение для упрочняемых крепёжных изделий любой степени массовости. В работе исследована зависимость механических характеристик от температуры изотермической обработки с последующим волочением с разными степенями деформации. Показана возможность применения упрочняющей обработки с максимальным использованием упрочнения изотермической обработкой и последующим волочением проката перед высадкой высокопрочных болтовых изделий.

Ключевые слова: горячекатаный прокат, изотермическая обработка, волочение, степень обжатия, механические свойства, структура

INFLUENCE OF TEMPERATURE ISOTHERMAL TREATMENT WITH DRAWING ON MECHANICAL PROPERTIES OF HOT-ROLLED 40X

Pachurin G.V., Filippov A.A., Pachurin V.G.

*Nizhny Novgorod State Technical University R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod,
e-mail: PachurinGV@mail.ru*

In engineering and in particular, widely used as automotive products in the form of fastening screws, pins, ladders, etc. During the manufacturing process, they are generally subjected to quenching and tempering. Under current conditions, along with the strength and operational reliability, the development of production of such hardened fasteners involves reducing costs throughout the production chain, from receipt of rental, and ending with finished parts required quality. This is especially true in conditions of mass production. In this case, in terms of minimizing the cost of steel grade selection Wizarid is most preferably steel 40X, which has traditionally been the most widely used for hardened fasteners of any mass. We have studied the dependence of mechanical properties on the temperature of the isothermal treatment followed by drawing with different degrees of deformation. The possibility of applying hardening treatment with the maximum use of isothermal hardening treatment followed by drawing and rolling before planting high-bolt products.

Keywords: hot-rolled steel, isothermal processing, drawing, reduction ratio, mechanical properties, structure

В современном машиностроении и, в частности, автомобилестроении широкое применение нашли крепёжные изделия в виде болтов, шпилек, стремянок и т.п. Значительную их часть получают из сортового проката применением различных технологических операций холодного деформирования [5] – волочения, высадки, накатки резьбы. В процессе изготовления такие изделия обычно подвергаются закалке с отпуском [7–10]. Наряду с повышением конструкционной прочности и эксплуатационной надёжности, развитие современного производства упрочнённого крепежа предполагает снижение затрат по всей производственной цепочке, начиная от получения проката [6], и заканчивая изготовлением готовых деталей требуемого качества [9, 10]. Это особенно актуально в условиях

массового производства, как, например, в автостроении и целом ряде других отраслей промышленности. При этом в плане минимизации стоимости выбора марки стали под крепеж наиболее предпочтительной представляется сталь 40Х [2], имеющая традиционно наибольшее распространение для упрочняемых крепёжных изделий любой степени массовости. Данная марка стали стандартизована (ГОСТ 4543), она традиционно имеет наибольшее распространение для упрочняемых крепёжных изделий и зарекомендовала себя легко осваиваемой метизным производством любой степени массовости. При этом соответствующее содержание углерода и легирование хромом (достаточно экономное) упрощает реализацию предлагаемого технического решения во всех его технологических компонентах [4].

Материалы и методы исследования

Химический состав стали 40X соответствует ГОСТ 10702-78. По геометрическим параметрам горячекатаный прокат (г/к) диаметром 11,0 и 13,0 мм соответствует ГОСТ 2590-88 «Прокат стальной горячекатаный круглый» обычной точности прокатки «В». Металлопрокат из мотка выпрямлялся на станке «Шустер» и нарезались образцы длиной 300 мм, по 8 образцов на указанные ниже размеры исследуемой конструкционной легированной стали 40X. Отжиг горячекатаного проката стали 40X на микроструктуру – зернистый перлит производился в камерной печи с выдвижным подом. Очистка поверхности термически обработанного проката от окалины производилась в маточном растворе серной кислоты в соотношении: H_2SO_4 – 25%, остальное железный купорос ($Fe_2SO_4 + H_2$). Затем прокат промывали в проточной воде. Волочение проката производилось на однократном волоочильном стане BC/1-750, соответственно со степенями обжатия 5, 10, 20, 30, 40 и 60%. В качестве технологической смазки использовалась мыльная стружка.

После волочения образцы подвергались изотермической обработке. Ее температура и степень обжатия при волочении варьировались в зависимости от задачи исследования. Важным фактором, формирующим окончательную микроструктуру, является однородность аустенита. Поэтому температура нагрева перед изотермической обработкой принималась 880 °C. Образцы проката подвергались нагреву в соляной ванне (78% $BaCl + 22\% NaCl$) в течение пяти минут. Затем образцы переносились в селитровую ванну (50% $NaNO_3 + 50\% KNO_3$) и осуществлялась операция патентирования при температурах 370, 400, 425, 450, 500 и 550 °C с выдержкой пять минут. Далее охлаждение образцов проводилось на воздухе в течение двух минут, затем они охлаждались в воде. Точность регулирования температуры в ванне при патентировании составляла $\pm 5^\circ C$. Последующую подготовку поверхности (снятие окисного слоя) изотермически обработанного проката производили в маточном растворе серной кислоты (H_2SO_4 – 25%, остальное железный купорос – Fe_2SO_4). Затем прокат промывался в проточной воде.

Прочностные и пластические характеристики горячекатаного проката в исходном состоянии и калиброванного проката после всех видов технологической переработки определялись при испытании на растяжении на разрывной машине типа ЦДМ-100 со шкалой 20 кг. Испытывались образцы длиной 300 мм.

Микроструктура горячекатаного проката в исходном состоянии и калиброванного проката после всех видов технологической переработки исследовалась методом просмотра поверхности специально подготовленных образцов (поперечные микрошлифы) под микроскопом МИМ-8 при увеличении $\times 200 \dots 600$ и на горизонтальном микроскопе «Неофот-21» при увеличении $\times 100$ и $\times 600$. Металлографические микрошлифы готовились по традиционным для данной марки стали технологиям. Травление микрошлифов производилось в 4% растворе азотной кислоты в этиловом спирте. Твердость измеряли на приборе Роквелл, шкала В и С, на параллельных шлифованных лысках. Твердость HRC по переводной шкале переводили в твердость HB.

Результаты исследования и их обсуждение

Исследования показали, что временное сопротивление разрыву и предел текуче-

сти г/к проката составляют соответственно, 780 и 440 МПа. Относительные удлинения и сужения равны 61% и 20% соответственно.

Выявлено, что с увеличением температуры патентирования от 370 до 500 °C прочностные и пластические характеристики и твердость г/к проката меняются. При этом, временное сопротивление разрыву г/к проката снижается с 1100 до 950 МПа в интервале температур от 370 до 400 °C, а затем монотонно растет с 950 до 1120 МПа в интервале температур патентирования от 400 до 500 °C. Оно снижается с 1120 до 880 МПа при температуре патентирования от 500 до 550 °C.

Предел текучести г/к проката изменяется при температуре патентирования от 370 до 550 °C. Он остается постоянным при температуре патентирования от 370 до 425 °C и равен 700 МПа. При дальнейшем увеличении температуры от 425 до 450 °C его величина снижается с 700 до 600 МПа. В интервале температур патентирования от 450 до 500 °C предел текучести увеличивается с 600 до 710 МПа. При увеличении температуры патентирования от 500 до 550 °C он снижается с 710 до 595 МПа.

Относительное сужение г/к проката при повышении температуры патентирования от 370 до 550 °C существенно меняется. С увеличением температуры патентирования от 370 до 400 °C относительное сужение возрастает от 35 до 59%. Затем, с ростом температуры от 400 до 500 °C, идет монотонное его снижение с 59 до 29%. Повышение температуры патентирования от 500 до 550 °C увеличивает относительное сужение с 29 до 57%. Относительное удлинение в диапазоне температур патентирования от 370 до 450 °C возрастает с 12 до 16%. При увеличении температуры от 450 до 500 °C оно снижается с 16 до 12%. Относительное удлинение возрастает с 12 до 19% при увеличении температуры с 500 до 550 °C.

Ниже представлены результаты исследования влияния изотермической обработки (патентирования) в интервале температур 370, 400, 425, 450, 500 и 550 °C и последующего волочения на механические характеристики.

При 370 °C. Графики влияния температуры патентирования 370 °C и последующего обжатия при волочении на прочностные и пластические характеристики проката стали марки 40X показаны на рис. 1 и 2.

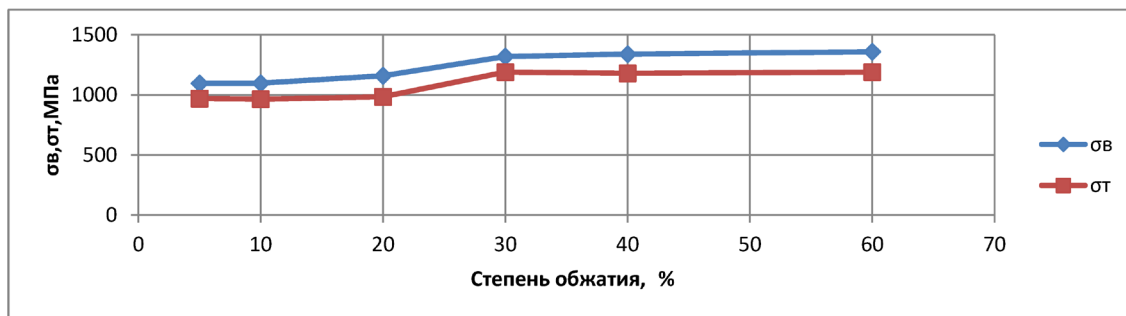


Рис. 1. Зависимость $\sigma_{\text{в}}$ и $\sigma_{\text{т}}$ от степени обжатия при волочении для температуры 370 °С

Экспериментальные данные показывают, что при температуре патентирования от 370 °С и последующих обжатиях от 5 до 60 % прочность проката увеличивается. Установлено, что предел текучести

при обжатиях от 5 до 60 % монотонно возрастает с 1000 до 1200 МПа. Временное сопротивление разрыву при обжатиях от 5 до 60 % монотонно увеличивается с 1097 до 1360 МПа,

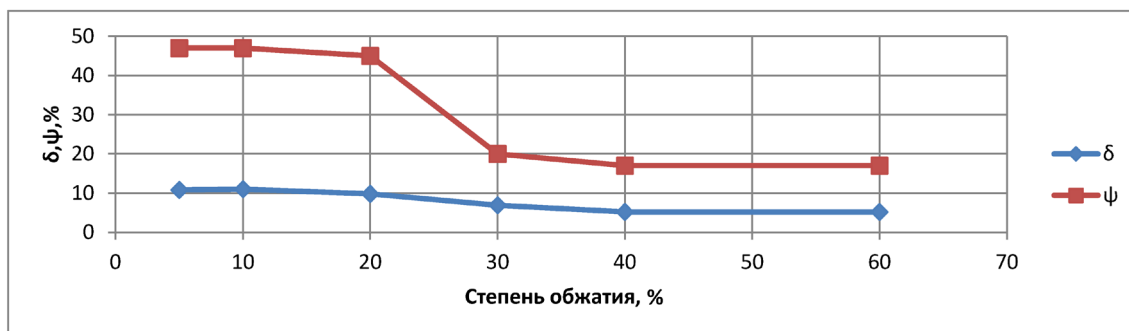


Рис. 2. Зависимость δ и ψ от степени обжатия при волочении для температуры 370 °С

Выявлено, что при температуре патентирования 370 °С с увеличением обжатия от 5 до 60 % пластичность проката изменяется. Относительное удлинение при степенях обжатия от 5 до 60 % монотонно снижается с 11 до 6 %. Относительное сужение при степенях обжатия от 5 до 20 % остается постоянным на уровне 40–45 %, а затем при обжатии от 20 до 60 % снижается с 45 до 15 %.

При 400 °С. Результаты влияния температуры патентирования 400 °С и последующего волочения с обжатиями от 5 до 60 %

на прочностные и пластические характеристики проката показаны на рис. 3 и 4. Экспериментальные данные показывают, что при температуре патентирования 400 °С и волочении с обжатиями от 5 до 60 % увеличиваются прочностные характеристики проката. Так, предел текучести при обжатиях от 5 до 30 % постоянно растет с 840 до 1100 МПа. При степенях деформации от 30 до 40 % он снижается с 1100 до 1080 МПа. При обжатиях от 40 до 60 % предел текучести увеличивается с 1080 до 1220 МПа.

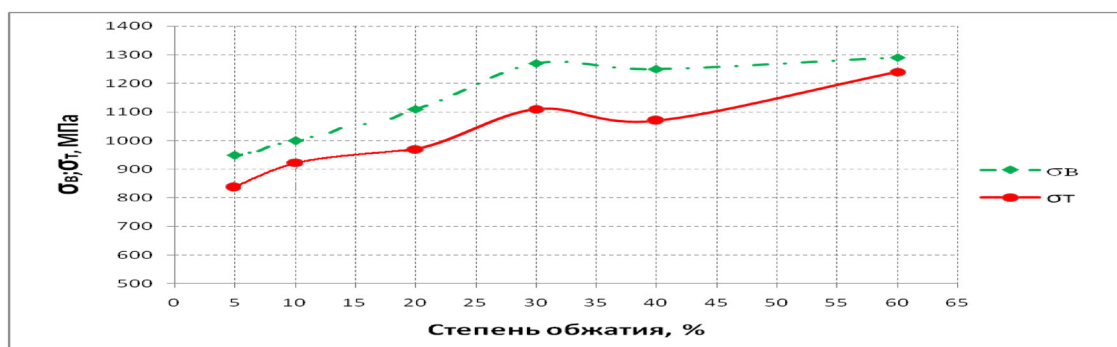


Рис. 3. Зависимость σ_b и σ_t от степени обжатия при волочении для температуры 400 °С

Временное сопротивление разрыву монотонно растет при обжатиях от 5 до 30% и увеличивается с 940 до 1270 МПа. При обжатиях от 30 до 40% оно снижается с 1270 до 1240 МПа. При обжати-

ях от 40 до 60% σ_b увеличивается с 1240 до 1280 МПа.

Результаты влияния температуры патентирования 400 °С и обжатия при волочении на пластические характеристики проката показаны на рис. 4.



Рис. 4. Зависимость δ и ψ от степени обжатия при волочении для температуры 400 °С

Экспериментальные данные показывают, что при температуре патентирования 400 °С и последующем волочении с обжатиями от 5 до 60%, пластичность проката меняется не однозначно. Установлено, что относительное удлинение при обжатиях с 5 до 20% остается практически постоянным и равно 12–13%, а при изменении обжатия проката от 20 до 60% оно монотонно убывает с 12 до 8%. Относительное сужение при обжатиях от 5 до 30% резко убывает с 62 до 44%. При

дальнейших обжатиях с 30 до 40% его величина остается постоянной на уровне 42%. Относительное сужение при изменении обжатия от 40 до 60% продолжает постоянно убывать с 42 до 23%.

При 425 °С. Результаты изучения влияния температуры патентирования при 425 °С и волочения с обжатиями от 5 до 60% на прочностные и пластические характеристики проката стали 40Х показаны на рис. 5 и 6.

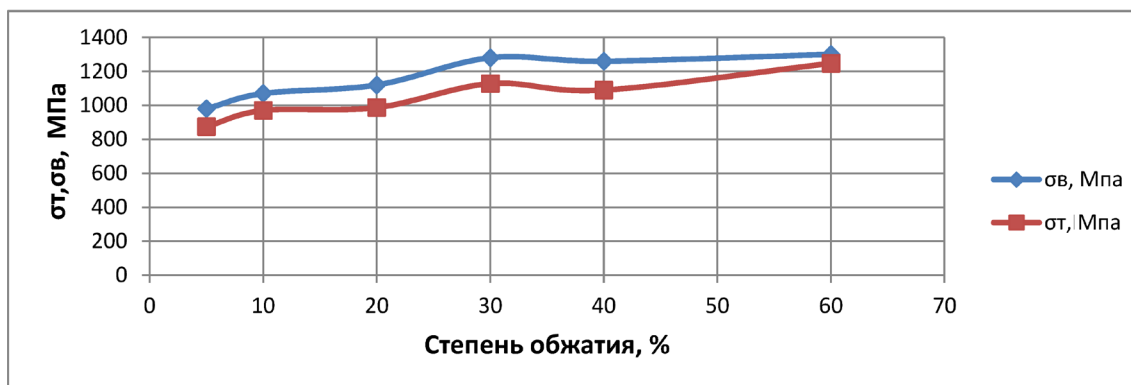


Рис. 5. Зависимость $\sigma_{св}$ и $\sigma_{т}$ от степени обжатия при волочении для температуры 425 °С

Результаты данных, представленных на рис. 5, показывают, что при температуре патентирования 425 °С и увеличении обжатия от 5 до 60% увеличиваются прочностные характеристики проката.

Выявлено, что предел текучести при обжатиях от 5 до 30% постоянно растет с 875 до 1128 МПа. При обжатиях от 30 до 40% происходит его снижение с 1128 до 1090 МПа. При последующих обжатиях от 40 до 60% $\sigma_{т}$ увеличивается с 1090 до 1247 МПа.

Временное сопротивление разрыву монотонно растет при обжатиях от 5 до 30%, увеличиваясь с 980 до 1300 МПа. При обжатиях от 30 до 40% происходило его снижение с 1280 до 1260 МПа. При обжатиях от 40 до 60% временное сопротивление разрыву увеличивается с 1260 до 1300 МПа.

Результаты влияния патентирования при температуре ванны 425 °С и последующего волочения на пластические характеристики проката показаны на рис. 6.

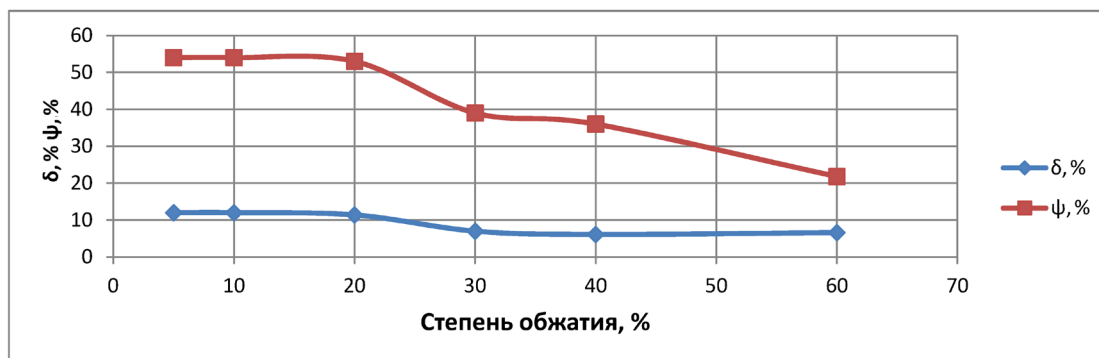


Рис. 6. Зависимость δ и ψ от степени обжатия при волочении для температуры 425 °С

Данные экспериментальных исследований показывают, что при температуре патентирования 425 °С и последующем волочении с обжатиями от 5 до 60% его пластические характеристики также изменяются не монотонно.

Установлено, что относительное удлинение при обжатиях с 5 до 20% остается постоянным и равно 11%, а с ростом обжатия от 20 до 30% оно убывает с 11 до 7%. При обжатиях от 30 до 60% относительное удлинение остается постоянным на уровне, равном 6,5%.

Относительное сужение постоянно при обжатиях от 5 до 20% и равно 54%. При обжатиях от 20 до 30% оно резко снижается с 54 до 39%. При дальнейших обжатиях от 30 до 40% относительное сужение остается постоянным на уровне 39%. Исследуемый показатель пластичности при изменении обжатия от 40 до 60% убывает с 35 до 33%.

При 450 °С. Результаты исследования влияния температуры патентирования 450 °С и последующего волочения со степенями обжатия от 5 до 60% на прочность и пластичность проката стали 40Х показаны на рис. 7 и 8.

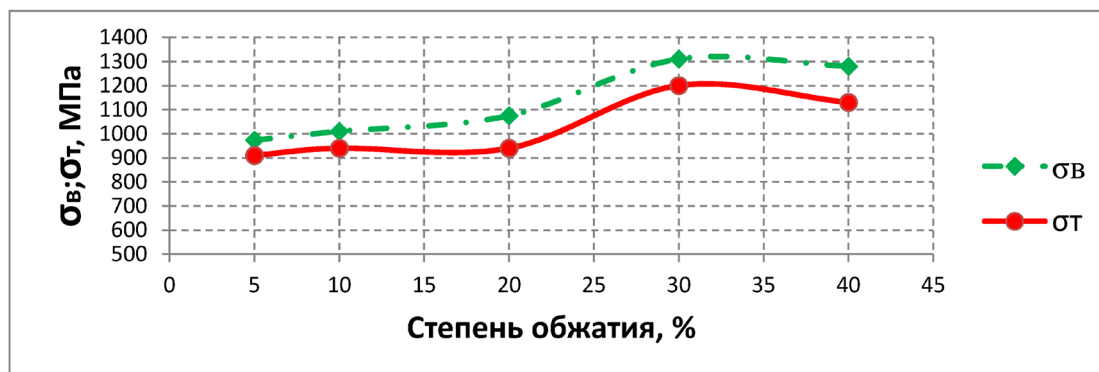


Рис. 7. Зависимость σ_b и σ_t от степени обжатия при волочении для температуры 450 °С

Установлено, что при температуре патентирования 450 °С и увеличении обжатия от 5 до 60 % прочностные характеристики проката возрастают.

При этом предел текучести при обжатиях от 5 до 10 % возрастает с 905 до 930 МПа. При обжатиях от 10 до 20 % он остается постоянным на уровне 930 МПа. При последующих обжатиях от 20 до 30 % σ_t увеличивается с 930 до 1200 МПа. Предел текучести начинает снижаться с 1200 до 1120 МПа при обжатиях от 30 до 40 %. При увеличении степени обжатия, равной 60 %, при волочении происходит обрыв проката.

Поэтому при обжатии 60 % данные предела текучести отсутствуют.

Временное сопротивление разрыву при обжатиях от 5 до 30 % монотонно возрастает с 980 до 1305 МПа. При обжатиях от 30 до 40 % оно снижается с 1305 до 1280 МПа. При обжатии 60 % при волочении происходит обрыв проката в инструменте стана. Поэтому данные временного сопротивления разрыву при степени обжатия 60 % отсутствуют.

Влияние температуры патентирования 450 °С и степени обжатия при волочении на пластические характеристики стали 40X показаны на рис. 8.

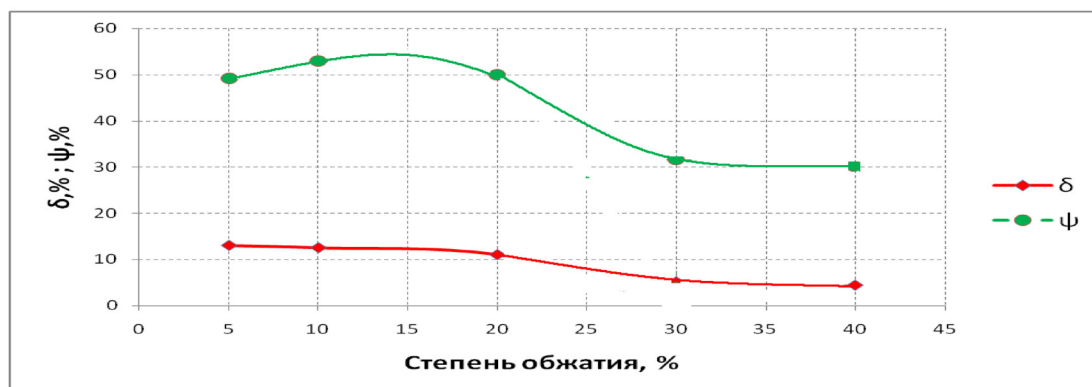


Рис. 8. Зависимость δ и ψ от степени обжатия при волочении для температуры 450 °С

Экспериментальные данные показывают, что при температуре 450 °С и при волочении с обжатиями от 5 до 40 % пластичность проката меняется следующим образом: относительное удлинение монотонно снижается с 12 до 6 % при обжатиях от 5 до 40 %. Данные по величине относительного удлинения при обжатии 60 % отсутствуют, т.к. произошел обрыв проката при волочении. Относительное сужение при обжатиях

от 5 до 10 % возрастает с 50 до 52 %. При обжатиях проката с 10 до 30 % ψ резко снижается с 50 до 30 %. Данные относительного сужения при обжатии 60 % отсутствуют.

При 500 °С. Влияние патентирования при температуре 500 °С и последующего волочения с обжатиями от 5 до 20 % на прочностные характеристики проката показано на рис. 9 и 10.

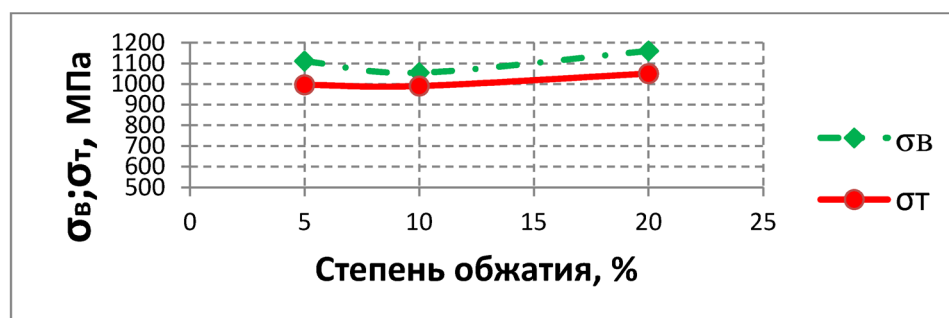


Рис. 9. Зависимость σ_v и σ_t от степени обжатия при волочении для температуры 500 °С

Согласно данным, представленным на рис. 9, выявлено, что при температуре 500 °С и обжатиях от 5 до 20 % меняются прочностные характеристики проката.

Предел текучести при обжатиях от 5 до 20 % увеличивается с 1000 до 1050 МПа. Данные при обжатиях 30, 40 и 60 % отсутствуют, т.к. происходил обрыв проката при волочении. Временное сопротивление разрыву при обжатиях проката от 5 до 10 % снижается с 1100 до 1060 МПа. При

обжатиях от 10 до 20 % оно увеличивается с 1060 до 1160 МПа. При попытке дальнейшего волочения с обжатиями от 30 до 60 % происходил обрыв проката в инструменте волочильного стана. Поэтому при обжатиях со степенями деформации от 30 до 60 %, данные отсутствуют. Влияние температуры 500 °С и последующего волочения с различными степенями обжатия на пластические характеристики проката стали 40Х показано на рис. 10.

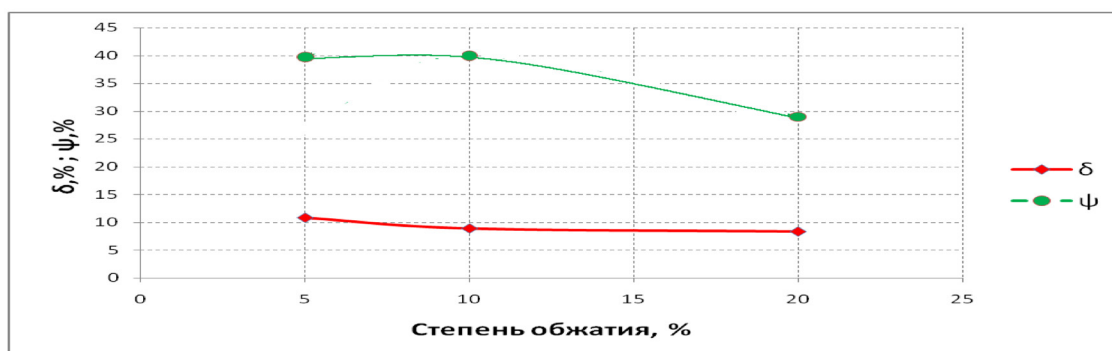


Рис. 10. Зависимость δ и ψ от степени обжатия при волочении для температуры 500 °С

Экспериментальные данные показывают, что температура патентирования 500 °С и последующее волочение с обжатиями от 5 до 20 %, изменяют пластические характеристики проката. Установлено, что относительное удлинение монотонно снижается с 11 до 8 % при обжатиях проката от 5 до 20 %. Данные при обжатиях 30, 40 и 60 % отсутствуют, т.к. произошел обрыв проката при волочении.

Относительное сужение при обжатиях от 5 до 10 % остается постоянным на уровне 40 %, затем резко снижается с 40 до 29 % при обжатиях от 10 до 20 %. При обжатиях

от 30 до 60 % происходит обрыв проката. По этой же причине при обжатиях со степенями деформации от 30 до 60 % данных нет.

При 550 °С. Результаты исследования влияния патентирования при температуре ванны 550 °С и последующего волочения со степенями обжатия от 5 до 60 % на прочностные и пластические характеристики проката показаны на рис. 11 и 12.

Экспериментальные данные, представленные на рис. 11, показывают, что при температуре патентирования 550 °С и волочении с обжатиями от 5 до 60 % увеличиваются прочностные характеристики проката.

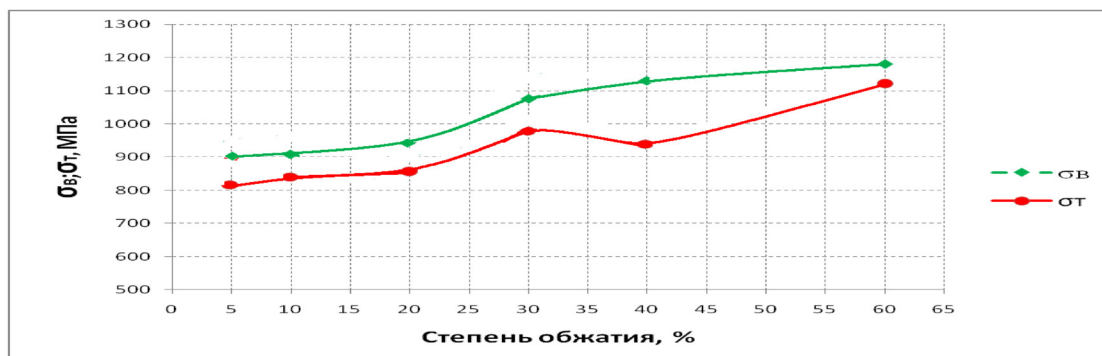


Рис. 11. Зависимость σ_s и σ_t от степени обжатия при волочении для температуры 550 °C

Установлено, что предел текучести при обжатиях от 5 до 30% увеличивается с 810 до 980 МПа. При обжатиях от 30 до 40% он снижается с 980 до 940 МПа. При обжатиях от 40 до 60% σ_t снова увеличивается с 940 до 1110 МПа.

Временное сопротивление разрыву монотонно увеличивается с 910 до 1180 МПа при обжатиях от 5 до 60%. Результаты изучения влияния патентирования при температуре 550 °C и последующего волочения с различными степенями обжатия на пластические характеристики проката показаны на рис. 12.

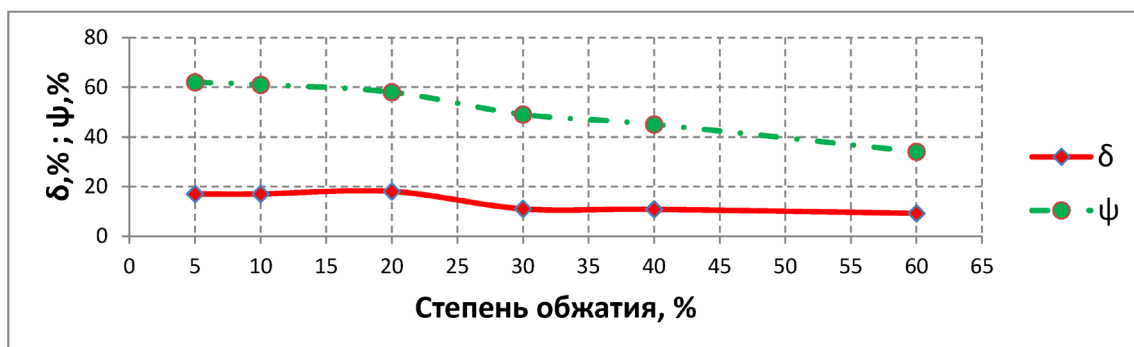


Рис. 12. Зависимость δ и ψ от степени обжатия при волочении для температуры 500 °C

Выявлено, что при температуре патентирования 550 °C и увеличении обжатия от 5 до 60% при волочении, пластические характеристики проката изменяются не однозначно.

Относительное удлинение остается постоянным при обжатиях от 5 до 20% и равно 18–19%. При обжатиях от 20 до 30% оно убывает с 20 до 10%. При изменении обжатия от 30 до 60% величина относительного удлинения для проката остается постоянной на уровне 10%. Относительное сужение при обжатиях от 5 до 60% монотонно убывает с 62 до 35%.

Выводы

1. Исследовано влияние температуры изотермической обработки при температурах селитровой ванны 370, 400, 425,

450 и 550 °C с последующим волочением со степенью обжатия 5, 10, 20, 30, 40 и 60% на прочностные и пластические характеристики горячекатаной стали 40X.

2. Выявлена зависимость структурно-механических характеристик от температуры изотермической обработки с последующим волочением проката с разными степенями пластической деформации.

3. Выявлена оптимальная микроструктура проката для последующего изготовления из него длинномерных болтов.

4. Показана возможность применения упрочняющей обработки с максимальным использованием упрочнения при патентировании и волочении, которые применяются в процессе обработки проката. Предполагается достижение такого же уровня упрочнения, как и при термическом улучшении, что

позволит исключить его из производственного цикла изготовления готовых деталей.

Список литературы

1. Иванов В.Н. Словарь-справочник по литейному производству. – М.: Машиностроение, 1990. – 384 с.
2. Пачурин Г.В., Филиппов А.А. Экономичная технология подготовки стали 40Х к холодной высадке крепежных изделий // Вестник машиностроения. – 2008. – № 7. – С. 53–56.
3. Пачурин Г.В., Филиппов А.А. Выбор рациональных значений степени обжата горячекатаной стали 40Х перед холодной высадкой метизов // Известия вузов. Черная металлургия. – 2008. – № 7. – С. 23–25.
4. Пачурин Г.В., Филиппов А.А., Кузьмин Н.А. Влияние химического состава и структуры стали на качество проката для изготовления болтов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 8 (Часть 2). – С. 87–92.
5. Пачурин Г.В., Филиппов А.А. Эффект пластической деформации при волочении и термической обработки на структуру и свойства стального проката // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 8 (Часть 2). – С. 93–98.
6. Пачурин Г.В., Филиппов А.А., Кузьмин Н.А. Анализ качества проката для холодной высадки крепежных изделий // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 8 (Часть 2). – С. 111–115.
7. Филиппов А.А., Пачурин Г.В., Кузьмин Н.А. Упрочняющая обработка проката для крепежа с целью снижения его стоимости // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 8 (Часть 2). – С. 107–110.
8. Филиппов А.А., Пачурин Г.В. Ресурсосберегающая подготовка стального проката к холодной высадке крепежных изделий // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 8. (Ч. 4). – С. 23–29.
9. Филиппов А.А., Пачурин Г.В. Основные направления развития производства высокопрочного крепежа // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 8. (Ч. 4). – С. 30–36.

10. Pachurin G.V., Filippov A.A. Economical preparation of 40X steel for cold upsetting of bolts // Russian Engineering Research. 2008. T. 28. № 7. C. 670–673.

References

1. Ivanov V.N. Slovar-spravochnik po litejnomu proizvodstvu. – M.: Mashinostroyeniye, 1990. – 384 p.
2. Pachurin G.V., Filippov A.A. Ekonomichnaya tekhnologiya podgotovki stali 40X k xolodnoj vysadke krepezhnykh izdelij // Vestnik mashinostroyeniya. – 2008. – № 7. – pp. 53–56.
3. Pachurin G.V., Filippov A.A. Vybor racionalnykh znachenij stepeni obzhatiya goryachekatanoy stali 40X pered xolodnoj vysadkoj metizov // Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya. – 2008. – № 7. – pp. 23–25.
4. Pachurin G.V., Filippov A.A., Kuzmin N.A. Vliyaniye khimicheskogo sostava i struktury stali na kachestvo prokata dlya izgotovleniya boltov // Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy. – 2014. – № 8 (Chast 2). – pp. 87–92.
5. Pachurin G.V., Filippov A.A. Effekt plasticheskoy deformatsii pri volochenii i termicheskoy obrabotki na strukturu i svoystva stalnogo prokata // Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy. – 2014. – № 8 (Chast 2). – pp. 93–98.
6. Pachurin G.V., Filippov A.A., Kuzmin N.A. Analiz kachestva prokata dlya xolodnoj vysadki krepezhnykh izdelij // Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy. – 2014. – № 8 (Chast 2). – pp. 111–115.
7. Filippov A.A., Pachurin G.V., Kuzmin N.A. Uprochnyayushchaya obrabotka prokata dlya krepezha s celyu snizheniya ego stoimosti // Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy. – 2014. – № 8 (Chast 2). – pp. 107–110.
8. Filippov A.A., Pachurin G.V. Resursosberegayushchaya podgotovka stalnogo prokata k xolodnoj vysadke krepezhnykh izdelij // Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy. – 2014. – № 8. (Ch. 4). – pp. 23–29.
9. Filippov A.A., Pachurin G.V. Osnovnyye napravleniya razvitiya proizvodstva vysokoprochnogo krepezha // Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy. – 2014. – № 8. (Ch. 4). – pp. 30–36.
10. Pachurin G.V., Filippov A.A. Economical preparation of 40X steel for cold upsetting of bolts // Russian Engineering Research. – 2008. – T. 28, № 7. – pp. 670–673.

УДК 621.778

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ПРОВОЛОКИ В СОВМЕЩЕННОМ ПРОЦЕССЕ БЕСФИЛЬЕРНОГО ВОЛОЧЕНИЯ И ОЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТИ

¹Пашенко К.Г., ¹Бахматов Ю.Ф., ¹Кальченко А.А., ¹Рузанов В.В.,
¹Михайлицин С.В., ¹Ярославцев А.В., ¹Ярославцева К.К., ¹Терентьев Д.В.,
¹Шекшеев М.А., ¹Тютеряков Н.Ш., ²Шашкин Д.А., ²Кальченко А.А.

¹ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,
Магнитогорск, e-mail: mgtu@magtu.ru;

²ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», Магнитогорск

Традиционно проволоку получают из катанки. Перед волочением через волок (фильеры) с поверхности катанки удаляют окалину. Волочение без использования фильер (бесфильерное) позволяет вести обработку катанки без удаления окалины, т.е. создать совмещенный процесс удаления окалины и волочения. Для исследования процесса бесфильерного волочения авторами создана экспериментальная установка с кинематически заданной вытяжкой. На установке исследованы геометрические характеристики проволоки после бесфильерного волочения.

Ключевые слова: пластичность, твердость, временное сопротивление разрыву, бесфильерное волочение, волочильный стан, волока, проволока, катанка, удаление окалины, ультразвук, обжатия, вытяжки

COMPARATIVE PROPERTIES OF THE WIRE IN THE INTEGRATED PROCESS OF DRAWING WITHOUT DIE PLATES AND ROD SURFACE DESCALING

¹Paschenko K.G., ¹Bakhmatov Y.F., ¹Kalchenko A.A., ¹Ruzanov V.V.,
¹Mikhaylitsyn S.V., ¹Yaroslavtsev A.V., ¹Yaroslavtseva K.K., ¹Terentev D.V.,
¹Shekshchev M.A., ¹Tyuteryakov N.S., ²Shashkin D.A., ²Kalchenko A.A.

¹Nosov Magnitogorsk State Technical University, Chelyabinsk region, Magnitogorsk,
e-mail: mgtu@magtu.ru;

²Magnitogorsk Iron and Steel Works, Magnitogorsk

Usually wire is produced from wire rod. The surface of wire rod is descaled before die plate drawing. The drawing without die plates (dieless drawing) makes it possible to process the rod without descaling that is to provide integrated process of descaling and drawing. To study the process of drawing without die plates the authors developed the experimental facility with kinematically preset drawing out. There were compared different parameters of wire rod drawing without using die plates and traditional drawing on the facility.

Keywords: ductility, hardness, tensile strength, drawing without die plates, drawing mill, die plates, wire, rod, descaling, ultrasound, compression, drawing out

Повышение эффективности технологических процессов обеспечивается разработкой операций, имеющих близкие значения оперативного времени, позволяющих создавать непрерывные блоки технологических операций [1, 3]. Такой подход приводит, кроме всего прочего, к уменьшению времени переходных процессов, влияющих на экономические показатели и показатели качества продукции. Так как определяющей операцией при обработке катанки является волочение, то операции подготовки поверхности катанки к волочению должны иметь оперативное время, близкое со временем пластической деформации. Имеется много технологических решений конструирования таких операций, в частности [2], в которых собственно операция волочения производится на традиционном волочильном инструменте. Именно это создает определенные трудности, связанные с из-

носостойкостью волок. Те же проблемы возникают в процессах знакопеременного изгиба с растяжением – окалиноломанием. Но развитие этого направления, связанного со значительным увеличением вытяжки до 1.5–2.0, позволяет совместить две операции без использования волок на первых проходах [3, 4, 5, 6, 16, 17, 18]. Проведенные исследования в этом направлении позволили создать новый инструмент для решения задачи совмещения двух операций: удаления окалины и пластической деформации [2]. Операция вытяжки проволоки без использования волок по современной терминологии попадает под понятие – «бесфильерное волочение», операция предполагает ввод в очаг деформации дополнительной энергии: тепловой – нагрев, механической – изгиб, – ультразвук и т. д. [4, 3, 16, 17, 18].

Цель исследований. Для оценки возможности дальнейшей обработки прово-

локи волочением были исследованы механические свойства и микроструктура проволоки, полученной фильерным и бесфильерным способами.

Материалы и методы исследования

Для исследования процесса бесфильерного волочения создана экспериментальная установка с кинематически заданной вытяжкой [2, 5, 6, 17, 18]. В исследованиях образцов оценивались: запас пластичности, микротвёрдость, шероховатость поверхности, дефекты, микроструктура.

Для изучения механических свойств с помощью испытаний создавались образцы проволоки, полученной фильерным (волочением в волоке) и бесфильерным методом растяжения – изгиба (по схеме на рис. 1), с различными степенями деформации из отожженной проволоки диаметром 1,2 мм, с внесением ультразвука и без ультразвука. Образцы, полученные бесфильерным волочением, изначально деформировались до несколько больших поперечных сечений, чем образцы, протянутые через волоку. Для совпадения поперечных сечений после бесфильерного волочения образцы калибровались через волоку, на которой проводилось фильерное волочение.

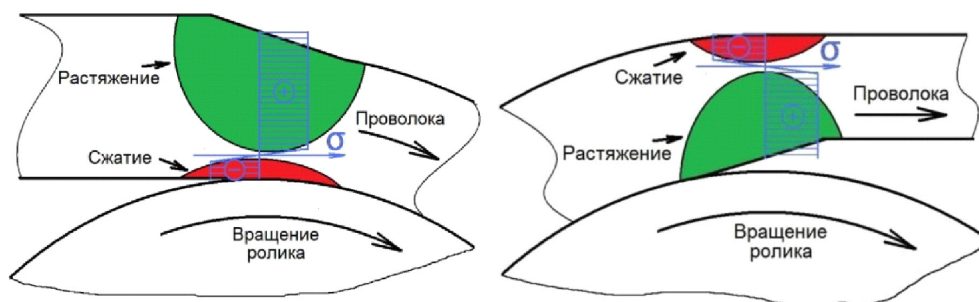


Рис. 1. Области пластической деформации при намотке (слева) проволоки на ролик с натяжением и область схода проволоки с ролика (справа)

Исследования проводились в соответствии с методами испытаний, определения и описания параметров результатов, которые установлены стандартами: ГОСТ 5639-82, ГОСТ Р 50708-94, ГОСТ 1579-93 (ИСО 7801-84), ГОСТ Р 50708-94, ГОСТ 2789-73, ГОСТ 9450-76 и другими.

Конструкция технологической установки для реализации способа для бесфильерного волочения включает в себя бесфильерную волоку с отражательным элементом, создающим режим стоячей волны для ультразвуковых колебаний [2, 3, 4, 5, 6, 16, 17, 18]. Схема предусматривает изменение кинематики движения проволоки, которое создает дополнительные напряжения изгиба, суммирующиеся с продольными растягивающими напряжениями. В определенных случаях эти напряжения приводят к пластической деформации. Упрощенно схему деформации проволоки можно представить как два очага деформации на изгибе и разгибе (рис. 1).

В устройстве поверхность металла испытывает растяжение – сжатие, аналогично протяжке в роликовых окалиноломателях, но при значительном растяжении, вплоть до достигаемых в фильерах вытяжек и более.

Результаты исследования и их обсуждение

В экспериментах удается получить стабильный процесс волочения заготовки покрытой окалиной, с чистой матовой поверхностью на выходе Ra 30 для обжатий 30–50% (рис. 2). Проволока, полученная бесфильерным способом, с обжатиями более 50% обладает еще более высокой шероховатостью, Ra до 50 микрон и выше.

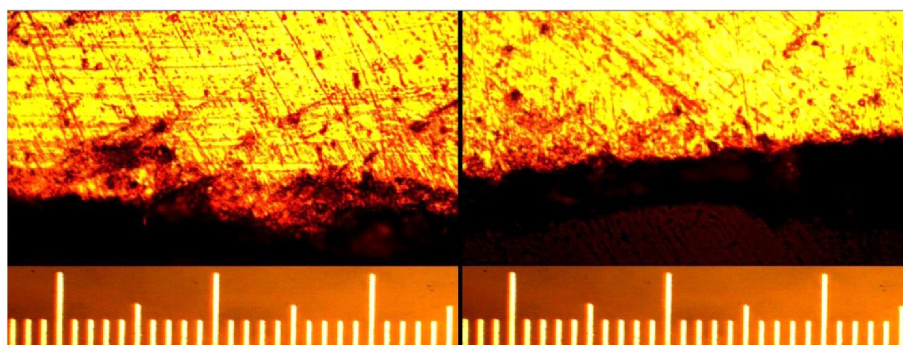


Рис. 2. Срез вдоль оси проволоки, слева полученная бесфильерным волочением проволока, справа фильерным, обжатия 40%, шкала 0,01 мм

В микроструктуре проволоки полученной фильерным и бесфильерным способами, не выявлено различий. По ГОСТу 5639-82 «Методы выявления и определения величины зерна» для сечения вдоль

и поперек измерили зернистость образцов из металла «Сталь 10» после 30% обжатий. На рисунке 3 показаны панорамные микроструктуры. Влияние способа волочения на микроструктуру не выявлено.

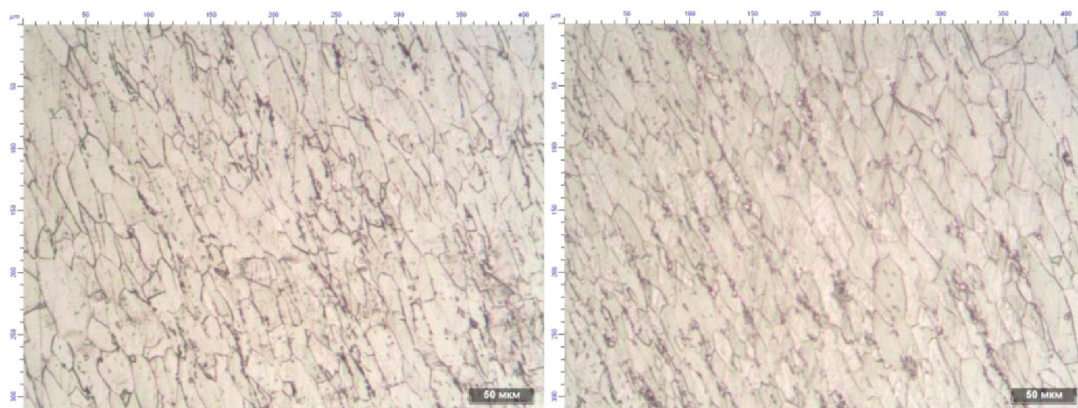


Рис. 3. Панорамные микроструктуры. Слева бесфильерное волочение, справа фильерное

Твердость с ростом величины деформации для бесфильерного волочения растет заметно медленнее, чем для фильерного волочения. Для всех достигнутых на лабораторной установке степеней деформации твердость после бесфильерного волочения ниже не более чем на 15% по отношению к фильерному. Но при бесфильерном волочении внесение в очаг деформации ультра-

звукового поля может повысить твердость до любых значений, достижимых наклепом для используемой марки стали. Распределение твердости для бесфильерного волочения отличается в зависимости от направления измерения: вдоль направления изгибов твердость выше. На рис. 4 показано распределение твердости по поперечному срезу проволоки для обжатий в 30%.

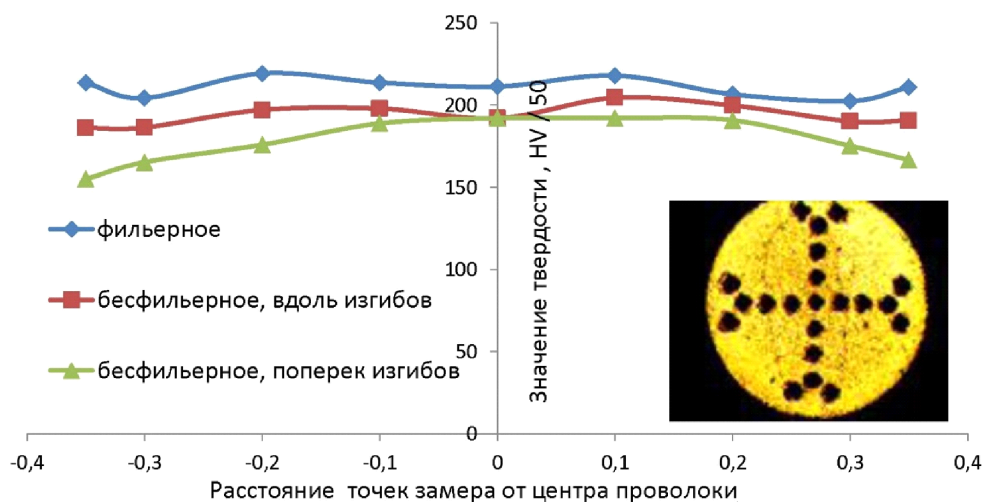


Рис. 4. Сравнительные результаты измерения твердости по Микро-Виккерсу для бесфильерного волочения и для фильерного волочения при 30% обжатиях, справа панорама отпечатков на торце проволоки, металл образцов Сталь 10

В результате не выявлено существенных различий и в пластических свойствах проволоки, полученной двумя способами до обжарки в 40 %. Например, образцы проволоки для 30 % обжарки выдерживают 14 перегибов (на роликах 2.5 мм) при фильерном волочении в волоке и для 14-16 перегибов при бесфильтерном волочении, в зависимости от направления перегиба. При больших деформациях для бесфильтерного волочения изгибом-растяжением характерно стремительное разрушение образцов при незначительных нагрузках. Так, уже при деформации изгибом – растяжением до обжарки в 50–60 % количество возможных перегибов отличается в разы. При еще больших деформациях изгибом – растяжением образцы совсем теряют пластичность, разрушаясь при 1–2 перегибах, образцы разрушаются и потому, что образуются периодические шейки. При бесфильтерном волочении ультразвуковые колебания негативно влияли на пластичность образцов при любых степенях деформации. При совмещении бесфильтерного волочения и последующего волочения в волоках достигается сближение пластичности проволоки с пластичностью проволоки, полученной традиционным волочением. Пластичность в совмещенном процессе волочения при благоприятных параметрах для бесфильтерного волочения, например при небольшой доле деформаций изгибом – растяжением (вклад бесфильтерного волочения в общую деформацию до 20 %, обжарка до 10 %) и малом количестве перегибов (до четырех), при большом натяжении (80–90 % от предела текучести), даже выше, чем для волочения только в волоках.

Временное сопротивление разрыву при бесфильтерном волочении показало значительно меньший рост с увеличением степени деформации, чем при фильерном волочении, причем при всех величинах вытяжек и для всех марок сталей. Разницы в усилиях разрыва образцов, полученных фильерным и бесфильтерным волочением росли со степенью деформации, от разницы в 8 % для обжарки 15 %, и до разницы в 70 % и более для обжарки 50 %. При бесфильтерном волочении ультразвуковые колебания повышали усилия разрыва образцов при увеличении интенсивности звука. Усилия разрыва при бесфильтерном волочении поднимались до значений несколько меньших (на 10–60 %), чем достигаются наклепом.

Заключение

Проволока, полученная бесфильтерным волочением методом изгиба – растяжения по предложенной технологии, уступает проволоке, полученной традиционным способом – фильерным волочением по двум важнейшим характеристикам: временному сопротивлению разрыву и пластичности. Но если использовать бесфильтерное волочение в первом проходе для деформаций с обжарками не более чем в 30–35 % и с последующим волочением в фильерах, то разницы в механических свойствах со значений в 10–15 % уменьшатся до значений 2–10 % или совсем исчезнут, в зависимости от последующих величин деформаций. Таким образом, предварительные исследования пластического растяжения с изгибом показали возможность использования предложенной схемы деформации для реализации совмещенного процесса очистки от окалина – волочение. Исследования позволили построить аналитическую модель для ресурса пластичности [4, 6], усталостной прочности для проволоки при знакопеременных нагрузках изгиба – растяжения. Такая модель актуальна для решения задач механики сплошных сред при прогнозировании работоспособности алмазно-кабанатного инструмента [7–15].

Список литературы

1. Бахматов Ю.Ф., Носков Е.П., Голубчик Э.М. Конструирование совмещенных процессов в метизном производстве. – Магнитогорск: Магнитогорская государственная горно-металлургическая академия им. Г.И. Носова, Южно-Уральское отделение Российской инженерной академии. – М.: 1994. – 92 с.
2. Бахматов Ю.Ф., Пашенко К.Г. Устройство для волочения проволоки с ультразвуком через калибр сформированный бойками резонансных размеров, с динамическим замыканием изделием (проволокой) зазора между ними // Патент на полезную модель РФ № 122920, 12.07.2012.
3. Бахматов Ю.Ф., Пашенко К.Г. Технологические основы пластической обработки катанки в совмещенном процессе бесфильтерного волочения с ультразвуком // Сталь. – 2014. – №8. – С. 80–82.
4. Бахматов Ю.Ф., Пашенко К.Г., Абдулин Э.М., Езов О.В., Смирнов Н.В. Технологические основы пластической обработки катанки в совмещенном процессе с воздействием ультразвуком // Обработка сплошных и слоистых материалов, 2013. № 1 (39). С. 89–92.
5. Бахматов Ю.Ф., Пашенко К.Г., Кальченко А.А., Белов А.С., Тютеряков Н.Ш. Совмещенный процесс бесфильтерного волочения и очистки поверхности катанки // Металлург. – 2014. – № 4. – С. 88–91.
6. Пашенко К.Г., Бахматов Ю.Ф., Голубчик Э.М. Влияние пластического растяжения – изгиба в совмещенном процессе удаления окалины – волочения на свойства проволоки // Сталь. – 2011. – № 3. – С. 47–49.
7. Першин Г.Д., Караулов Н.Г., Уляков М.С. The research of high-strength dimension stone mining technological schemes

in Russia and abroad // Сборник научных трудов Sworld. Выпуск 2. Том 11. – Одесса: КУПРИЕНКО, 2013. – С. 64–73.

8. Першин Г.Д., Караулов Н.Г., Уляков М.С., Шаров В.Н. Features of diamond-wire saws application for rock overburden removal at marble quarry construction // Сборник научных трудов Sworld. Выпуск 3. Том 14. – Одесса: КУПРИЕНКО, 2013. – С. 39–42.

9. Першин Г.Д., Пшеничная Е.Г., Уляков М.С. Влияние режима управления работой канатной пилы на ее производительность // Добыча, обработка и применение природного камня: сб. науч. тр. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. – С. 54–63.

10. Першин Г.Д., Уляков М.С. Анализ влияния режимов работы канатных пил на себестоимость отделения монолитов камня от породного массива // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014. – № 2. – С. 125–135.

11. Першин Г.Д. и др. Влияние режимов работы канатных пил на себестоимость отделения монолитов камня от массива породы / Г.Д. Першин, С.А. Голяк, Н.Г. Караулов, М.С. Уляков, И.С. Сорокин, Р.Ф. Иштакбаев // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 11. – С. 350–354.

12. Першин Г.Д., Уляков М.С. Обоснование комбинированного способа подготовки к выемке блочного высокопрочного камня // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2013. – № 4. – С. 20–30.

13. Першин Г.Д., Уляков М.С. Повышение эффективности разработки месторождений блочного высокопрочного камня // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2014. – № 7. – С. 10–18.

14. Уляков М.С. Обоснование комбинированного способа подготовки к выемке блочного высокопрочного камня: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Магнитогорск, 2013.

15. Уляков М.С. Особенности применения карьерных погрузчиков при добыче блочного камня высокой прочности // Добыча, обработка и применение природного камня: сб. науч. тр. – Магнитогорск: изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. – С. 69–75.

16. Харитонов В.А., Иванцов А.Б., Лаптева Т.А.. Обработка проволоки растяжением. – Магнитогорск: Изд-во: Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. – 162 с.

17. Bakhmatov Y.F., Pashchenko K.G. Plastic Machining of Wire Rod in Die-Free Drawing, in the Presence of Ultrasound // Steel in Translation. – 2014, Vol. 44, № 8. – pp. 607–609.

18. Pashchenko K.G., Bakhmatov Y.F., Golubchik E.M. Influence of plastic tension-flexure on the wire properties in scale removal and drawing // Steel in Translation. – 2011. – Vol. 41, № 3. – pp. 246–249.

References

1. Baxmatov Y.F., Noskov E.P., Golubchik E.M. Konstruirovaniye sovmeshhennykh processov v metiznom proizvodstve // Magnitogorskaya gosudarstvennaya gornometallurgicheskaya akademiya im. G.I. Nosova, Yuzhno-Uralskoe otdeleniye Rossiyskoy inzhenernoy akademii. – M., 1994. – 92 p.

2. Baxmatov Y.F., Pashhenko K.G. Ustrojstvo dlya volocheniya provoloki s ultrazvukom cherez kalibr sformirovannyj bojkami rezonansnykh razmerov, s dinamicheskim zamykaniem izdeliem (provolojkoj) zazora mezhdu nimi // Patent na poleznuyu model RF № 122920, 12.07.2012.

3. Baxmatov Y.F., Pashhenko K.G. Teknologicheskie osnovy plasticheskoy obrabotki katanki v sovmeshhennom

processe besfilernogo volocheniya s ultrazvukom // Stal. – 2014. – № 8. – pp. 80–82.

4. Baxmatov Y.F., Pashhenko K.G., Abdulin E.M., Ezhov O.V., Smirnov N.V. Teknologicheskie osnovy plasticheskoy obrabotki katanki v sovmeshhennom processe s vozdejstviem ultrazvukom // Obrabotka sploshnykh i sloistykh materialov. – 2013. – № 1 (39). – pp. 89–92.

5. Baxmatov Y.F., Pashhenko K.G., Kalchenko A.A., Belov A.S., Tyuteryakov N.S. Sovmeshhennyj process besfilernogo volocheniya i ochistki poverkhnosti katanki // Metallurg – 2014. – № 4. – pp. 88–91.

6. Pashhenko K.G., Baxmatov Y.F., Golubchik E.M. Vliyanie plasticheskogo rastyazheniya – izgiba v sovmeshhennom processe udaleniya okaliny – volocheniya na svojstva provoloki // Stal. – 2011. – № 3. – pp. 47–49.

7. Pershin G.D., Karaulov N.G., Ulyakov M.S. The research of high-strength dimension stone mining technological schemes in Russia and abroad // Sbornik nauchnykh trudov Sworld. Vyp. 2. Tom 11. – Odessa: KUPRIENKO, 2013. – pp. 64–73.

8. Pershin G.D., Karaulov N.G., Ulyakov M.S., Sharov V.N. Features of diamond-wire saws application for rock overburden removal at marble quarry construction // Sbornik nauchnykh trudov Sworld. Vyp. 3. Tom 14. – Odessa: KUPRIENKO, 2013. – pp. 39–42.

9. Pershin G.D., Pshenichnaya E.G., Ulyakov M.S. Vliyanie rezhima upravleniya rabotoj kanatnoj pily na ee proizvoditel'nost // Dobycha, obrabotka i primenenie prirodnogo kamnya: sb. nauch. tr. – Magnitogorsk: Izd-vo Magnitogorsk. gos. texn. un-ta im. G.I. Nosova, 2012. – pp. 54–63.

10. Pershin G.D., Ulyakov M.S. Analiz vliyaniya rezhimov raboty kanatnykh pil na sebestoimost' otdeleniya monolitov kamnya ot porodnogo massiva // Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh. – 2014. – № 2. – pp. 125–135.

11. Pershin G.D. i dr. Vliyanie rezhimov raboty kanatnykh pil na sebestoimost' otdeleniya monolitov kamnya ot massiva porody / G.D. Pershin, S.A. Golyak, N.G. Karaulov, M.S. Ulyakov, I.S. Sorokin, R.F. Ishtakbaev // Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy. – 2014. – № 11. – pp. 350–354.

12. Pershin G.D., Ulyakov M.S. Obosnovaniye kombinirovannogo sposoba podgotovki k vyemke blochnogo vysokoprochnogo kamnya // Izvestiya vysshix uchebnykh zavedenij. Gornyj zhurnal. – 2013. – № 4. – pp. 20–30.

13. Pershin G.D., Ulyakov M.S. Povysheniye effektivnosti razrabotki mestorozhdenij blochnogo vysokoprochnogo kamnya // Izvestiya vysshix uchebnykh zavedenij. Gornyj zhurnal. – 2014. – № 7. – pp. 10–18.

14. Ulyakov M.S. Obosnovaniye kombinirovannogo sposoba podgotovki k vyemke blochnogo vysokoprochnogo kamnya: avtoref. dis. ... kand. texn. nauk. – Magnitogorsk, 2013.

15. Ulyakov M.S. Osobennosti primeneniya kar'ernykh pogruzchikov pri dobyche blochnogo kamnya vysokoj prochnosti // Dobycha, obrabotka i primenenie prirodnogo kamnya: sb. nauch. tr. – Magnitogorsk: izd-vo Magnitogorsk. gos. texn. un-ta im. G.I. Nosova, 2011. – pp. 69–75.

16. Xaritonov V.A., Ivancov A.B., Lapteva T.A.. Obrabotka provoloki rastyazheniem. – Magnitogorsk: izd-vo: Magnitogorsk. gos. texn. un-ta im. G.I. Nosova, 2012. – 162 p.

17. Bakhmatov Yu.F., Pashchenko K.G. Plastic Machining of Wire Rod in Die-Free Drawing, in the Presence of Ultrasound // Steel in Translation. – 2014ю – Vol. 44, № 8ю – pp. 607–609.

18. Pashchenko K.G., Bakhmatov Y.F., Golubchik E.M. Influence of plastic tension-flexure on the wire properties in scale removal and drawing // Steel in Translation. – 2011ю – Vol. 41, № 3. – pp. 246–249.

УДК 629

СОВРЕМЕННЫЕ ГРУППОВЫЕ ПОДВОДНЫЕ СРЕДСТВА ДВИЖЕНИЯ**Романов А.Д., Чернышов Е.А., Романова Е.А.***Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Нижний Новгород, e-mail: nil_st@nntu.nnov.ru*

В работе приведен обзор конструкции групповых подводных средств движения (ПСД), предназначенных как для военного, так и для коммерческого использования. Зачастую ПСД предназначенные для военного и гражданского применения, визуально не отличаются, но военные имеют усиленную конструкцию, большую емкость аккумуляторов и др. При этом ПСД разных типов имеют кардинально отличную конструкцию. Данная информация может быть полезна студентам, аспирантам и преподавателям вузов, а также работникам научно-исследовательских и проектно-конструкторских организаций.

Ключевые слова: подводное средство движения, исследование океана, силы специальных операций

MODERN GROUP UNDERWATER MEANS OF THE MOVEMENT**Romanov A.D., Chernyshov E.A., Romanova E.A.***The Nizhny Novgorod state technical university of R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod,
e-mail: nil_st@nntu.nnov.ru*

The review of a design of the group underwater means of the movement intended both for the military and for commercial use is provided in work. Often the design and estimate documentation intended for military and civil application visually don't differ, but military have the strengthened design, big capacity of accumulators, etc. At this design and estimate documentation of different types different have cardinally excellent design. This information can be useful to students, graduate students and teachers of higher education institutions, and also employees of the research and design organizations.

Keywords: underwater means movement, research of the ocean, force of special operations

В настоящее время стремительно развиваются средства обнаружения и противодействия подводным средствам движения (ПСД), в том числе системы раннего обнаружения, селекции малозаметных целей на естественном фоне, датчики измерения в естественном фоне среды, повышение гидростатического давления, сейсмические датчики по колебаниям морского дна, освещенность подводного дна, магнитное поле и др. Дальность и скорость современных средств поражения делают шансы на бегство иллюзорными. Поэтому развитие средств обнаружения накладывает определенные ограничения на разработку новых ПСД, прежде всего с точки зрения снижения собственных физических полей [1–3].

Наиболее известно ПСД «сухого» (экипаж находится в сухом отделении и при атмосферном давлении) типа, созданное в рамках программы ASDS (Advanced SEAL Delivery System) для командования сил специальных операций США (Special Operations Command, SOCOM). Водоизмещение аппарата составляет 55 тонн, длина – около 20 м, ширина – 2,1 м, высота – 2,55 м, дальность плавания 125 миль при скорости хода 8 узлов, кроме экипажа из двух человек может транспортировать восемь пловцов, выход которых осуществляется через специальную шлюзовую камеру. Первый аппа-

рат серии ASDS был построен в 1997 году. Шлюзовое устройство может стыковаться с палубным люком подводной лодки-носителя, что позволяет использовать аппарат в качестве глубоководного спасательного средства. По данным [4] может оснащаться оружием в транспортно-пусковых контейнерах.



*Рис. 1. Advanced SEAL Delivery System
в Перл-Харборе, 2004 год*

Для удобства транспортировки ряд аппаратов имеют разборную / модульную конструкцию. Например, аппарат Орка построен по «сухой» схеме, корпус, разбираемый на 4 модуля для упрощения технического обслуживания и транспортировки, имеет длину 13,27 м и наибольший диа-

метр 2,1 м. Изготовлен из немагнитной стали и обладает низким уровнем собственных физических полей [5]. Значительное число сверхмалых подводных лодок и ПСД «сухого» типа после окончания второй мировой войны были построены итальянскими компаниями [6].

Групповые буксировщики «мокрого» (экипаж не защищен от воздействия окружающей среды) типа впервые были использованы в Первую мировую войну итальянцами [1]. Во время Второй мировой войны ПСД данного типа активно применялись итальянцами и англичанами. Практически все групповые буксировщики «мокрого» типа имеют уравнительную систему для компенсации влияния переменных грузов и изменения плотности воды по глубине и в зависимости от района применения, могут иметь систему группового дыхания из баллонов внутри аппарата.

Часть имеют модульную конструкцию, например UWSH (Under Wasser Schwimm Hilfe). В сложенном состоянии ПСД имеет длину 3,4 м. Модульная конструкция позволяет в зависимости от задачи применять в десантном (2 чел.), десантно-грузовом (1 чел.) или грузовом варианте.



Рис. 2. SDV



Рис. 3. Тритон-1

Для снижения воздействия на экипаж набегающего потока воды ПСД часто имеют выдвижные щиты либо полностью закрытую конструкцию. В частности, в СССР созданы буксировщик «мокрого» пр. 907 Тритон-1, корпус ПСД изготавливался из алюминивно-магниевого сплава, а в качестве движителя использовался помещенный в насадку гребной винт, приводимый в движение при помощи гребного электродвигателя.

Аналогичные аппараты были построены и другими компаниями, например R-2M (Brodosplit) представляет собой двухместное ПСД «мокрого» типа, корпус которого выполнен из алюминиевого сплава. Имеются контейнеры для перевоза специального оборудования и снаряжения, водоизмещение нормальное надводное составляет 1,4 тонны, длина 4,9 метра, развивает подводную скорость 4 узла и имеет дальность плавания до 18 миль.

Часть буксировщиков «мокрого» типа являются более крупными, например SDV (Swimmer Delivery Vehicle или SEAL Delivery Vehicle) типа Mk 8. Его длина 6,45 м, высота 1,32 м, наибольшая дальность плавания 36 миль при скорости хода 6 узлов. Кроме двух членов экипажа он способен транспортировать четырех пловцов либо дополнительную нагрузку. В район боевого применения Mk 8 может доставляться надводными кораблями, вертолетами, а также ПЛ, у которых на внешнем корпусе установлены специальные док-камеры DDS (Dry Dock Shelter).

Аппарат был сконструирован в двух модификациях, различавшихся в первую очередь силовым набором. Силовая рама первой модификации, получившей обозначение Mk VIII Mod 0, была сварена из круглых труб и одновременно являлась частью балластной системы. В Mk VIII Mod 1 трубчатая рама была заменена рамой из алюминиевых профилей. При этом также улучшились условия размещения и монтажа бортовых систем и оборудования, упростилось техническое обслуживание и ремонт. Внешний вид корпуса модификаций ничем не отличается, однако высвободившиеся внутренние объемы использованы для установки дополнительного современного оборудования и приборов.

Погружающиеся катера имели прототипы в различных странах, производимые на базе надувных лодок (RIB). Перед погружением лодка сдувалась, глушился подвесной мотор, движение под водой осуществлялось под электромотором. В настоящее время наиболее характерными примерами являются подводный глассер «Subskimmer» и погружаемый катер SRC (Submersible Recovery Craft) [2, 3]. Аппараты оснащены

двигателями внутреннего сгорания, позволяющими развивать скорость до 45 узлов (в надводном положении). Дальность плавания в подводном положении достигает 10 миль при скорости хода 2–3 узла. Часть аппаратов могут оснащаться устройством работы двигателя под водой. Жесткий корпус изготовлен из композиционных материалов, баллоны для компенсации положительной плавучести заполняются водой самотеком, для всплытия продуваются воздухом высокого давления. В надводном варианте могут оснащаться оружием. Также рядом стран и другими формированиями применяются «низкопрофильные суда», которые предназначены для движения по поверхности, однако некоторые из них имеют возможность полного погружения в течение небольшого времени.

В СССР было разработано ПСД нестандартной конструкции пр. 908 «Тритон 2». В аппарате кабины пловцов были выполнены непроницаемыми для защиты от забортного давления, однако пловцы находились в кабинах в воде при постоянном давлении независимо от глубины погружения и пользовались дыхательными аппаратами. Фактически экипаж располагается в цистернах главного балласта. Маневрирование по глубине не изменяло давление в кабинах, было безболезненным для экипажа и не требовало прохождения декомпрессии. Выход боевых пловцов и членов экипажа осуществлялся через люки в верхней части корпуса. В ПСД имеются непроницаемые объемы: пульт управления, приборный отсек, аккумуляторная яма, электромоторный отсек. Скорость хода – 5 узлов. Дальность плавания – 60 миль. Размер: длина – 5 м; ширина – 1,35 м; высота – 1,38 м, полное водоизмещение 15,5 тонн

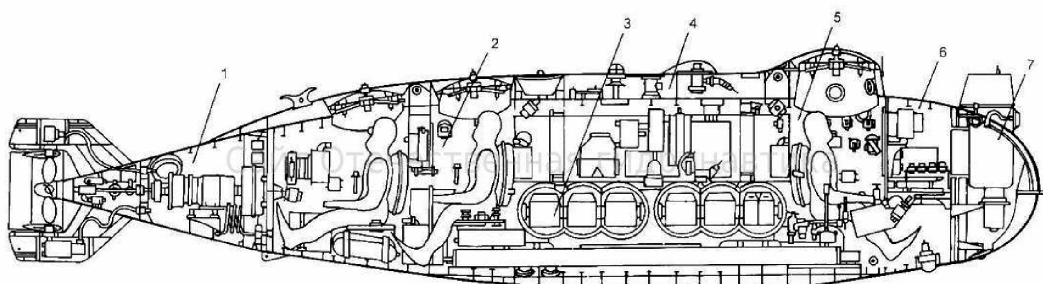


Рис. 4. Тритон 2 [7]:

1 – электромоторный отсек; 2 – водолазный отсек; 3 – контейнер АБ; 4 – отсек оборудования; 5 – отсек управления; 6 – пульт управления; 7 – проницаемая оконечность

Одним из главных ограничений в создании подводного средства движения «мокрого» типа является воздействие окружающей среды на экипаж. Длительность пребывания под водой в значительной степени ограничивается температурным режимом в гермообъеме ПСД или водолазном снаряжении и скоростным напором набегающего потока жидкости, имеет вполне определимый физиологический предел.

Поэтому разрабатываются аппараты «сухого-мокрого» типа, что подразумевает нахождение экипажа в сухом отделении, но при этом экипаж подвергается воздействию внешнего давления благодаря системе компенсации внешнего давления. Применение такой системы подразумевает те же пери-

оды декомпрессии, что и при обычном погружении.

Подобная система была применена на экспериментальной малой подводной лодке «ШОС», корпус которой был выполнен из стали толщиной 2,5 мм и не мог выдержать давление воды при повышении глубины более 10 метров.

Наиболее известны «сухие-мокрые аппараты» компании HAVAS [8]. Она создала ряд образцов носителей, особенностями которых являются небольшие массо-габаритные характеристики и наличие водонепроницаемого отсека. Система компенсации забортного давления (Dynamic Pressure Compensation System) позволяет уравнивать давление внутри стеклопластиковой кабины.



Рис. 5. Annapam Advanced SDV (ASDV) Mk 10

За счет системы компенсации внешнего давления становится возможным снижение массы прочного корпуса, включая применение неметаллических материалов. Это ведет к снижению массы ПСД в целом и допускает его перевозку к месту применения воздушным транспортом или спуск с малых судов. Также применение неметаллических материалов уменьшает уровень физических полей ПСД, что снижает вероятность обнаружения.

Однако при этом применении системы компенсации прочный корпус подвергается частым знакопеременным нагрузкам, в том числе за счет «вынужденных» изменений глубины движения (попадание в линзы воды с отличной от окружающей плотности, течения со значительной вертикальной составляющей и др.). Это может привести к ситуации, когда давление внутри аппарата превышает окружающее. Корректный

расчет запаса прочности корпуса является необходимой составляющей внедрения подобных ПСД. Также оценка запаса прочности необходима для расчета прочного корпуса, особенно мест крепления и формы прилегания внутренних деталей и наружного корпуса, мест соединения деталей с различными значениями деформации под нагрузкой, например системы металлический комингс люка – прочный корпус из неметаллических материалов [9].

Часть современных ПСД могут нести оружие и представляют собой высокоавтоматизированные аппараты с экипажем 2–4 человека и фактически являются сверхмалыми подводными лодками [10]. Причем на вооружении военно-морских сил некоторых стран, например Ирана [11] и КНДР [12], состоит значительное количество сверхмалых подводных лодок и подводных средств движения различного водоизмеще-

ния, эффективность которых в прибрежной зоне сравнима с классическими ПЛ при значительно меньшей стоимости.

Список литературы

1. Зарембовский В., Колесников Ю. Морской спецназ. История (1938 – 1968 гг.)
2. Романов А.Д., Чернышов Е.А., Романова Е.А. Итальянские малые подводные лодки и подводные средства движения сухого типа // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 8. – С. 35–39.
3. Романов А.Д., Чернышов Е.А., Романова Е.А. Современные малые подводные лодки // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 3. – С. 68–71.
4. Романов А.Д., Чернышов Е.А., Романова Е.А. Подводные силы исламской республики Иран // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 9. – С. 89–92.
5. Романов А.Д., Чернышов Е.А., Романова Е.А. Подводные лодки Корейской Народно-Демократической Республики // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 6. – С. 25–28.
6. Сверхмалые подводные лодки 1914–2004 гг. / А.Е. Тарас. – Мн.: Харвест, 2004. – 248 с.
7. Фёдоров В., Иванов И. Подводные средства доставки Сил специальных операций ВМС зарубежных стран // Зарубежное военное обозрение. – 2012. – №12 – С.76–80.
8. Фёдоров В., Иванов И. Подводные средства доставки Сил специальных операций ВМС зарубежных стран // Зарубежное военное обозрение. – 2013. – №1 – С. 84–88.
9. Чернышов Е.А., Романов А.Д. Современные технологии производства изделий из композиционных материалов // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 2. – С. 46–51.
10. Чернышов Е.А., Романов А.Д. Развитие сталей для прочных корпусов подводных лодок. // Технология металлов. – 2014. – № 5. – С. 45–48.
11. Jean Claude Havas: le genial inventeur // SUBAQUA Mai-juin. – 2012. – pp. 56 – 63.

References

1. Zarembovskij V., Kolesnikov Y. Morskoj specnaz. Istoriya (1938 – 1968).
2. Romanov A.D., Chernyshov E.A., Romanova E.A. Italyanskie malye podvodnye lodki i podvodnye sredstva dvizheniya suxogo tipa // Sovremennye naukoemkie tehnologii. – 2014. – № 8. – pp. 35–39.
3. Romanov A.D., Chernyshov E.A., Romanova E.A. Sovremennye malye podvodnye lodki // Sovremennye naukoemkie tehnologii. – 2014. – № 3. – pp. 68–71.
4. Romanov A.D., Chernyshov E.A., Romanova E.A. Podvodnye sily islamskoj respubliki Iran // Sovremennye naukoemkie tehnologii. – 2014. – № 9. – pp. 89–92.
5. Romanov A.D., Chernyshov E.A., Romanova E.A. Podvodnye lodki Korejskoj Narodno-Demokraticheskoj Respubliki // Sovremennye naukoemkie tehnologii. – 2014. – № 6. – pp. 25–28.
6. Sverxmalye podvodnye lodki 1914–2004. / A.E. Taras. – Mn.: Xarvest, 2004. – 248 p.
7. Fyodorov V., Ivanov I. Podvodnye sredstva dostavki Sil specialnyx operacij VMS zarubezhnyx stran // Zarubezhnoe voennoe obozrenie. – 2012. – №12. – pp.76–80.
8. Fyodorov V., Ivanov I. Podvodnye sredstva dostavki Sil specialnyx operacij VMS zarubezhnyx stran // Zarubezhnoe voennoe obozrenie. – 2013. №1 – pp. 84–88.
9. Chernyshov E.A., Romanov A.D. Sovremennye tehnologii proizvodstva izdelij iz kompozicionnyx materialov // Sovremennye naukoemkie tehnologii. – 2014. – № 2. – pp. 46–51.
10. Chernyshov E.A., Romanov A.D. Razvitie stalej dlya prochnyx korpusov podvodnyx lodok // Texnologiya metallov. – 2014. – № 5. – pp. 45–48.
11. Jean Claude Havas: le genial inventeur // SUBAQUA Mai-juin. – 2012 – pp. 56–63.