

Том 23 № 5

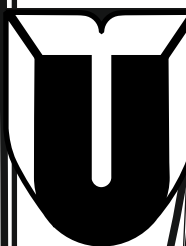
2019

ISSN 1814-3520 (print)  
ISSN 2500-1590 (online)

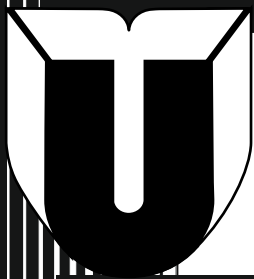
# ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

12+



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



# ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета, 2019



Том 23 № 5

2019

# ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Том 23 № 5

2019

## Редакционная коллегия

Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета

Журнал основан в 1997 г.

Периодичность издания –

6 раз в год

Журнал зарегистрирован Федеральной  
службой по надзору в сфере связи,  
информационных технологий  
и массовых коммуникаций  
(Роскомнадзор).

Свидетельство ПИ № ФС77-62813  
от 18 августа 2015 г.

Учредитель Иркутский национальный  
исследовательский технический  
университет

Подписной индекс в Каталоге  
русской прессы – 38237

Адрес учредителя, издателя:  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Адрес редакции:  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,  
ауд. Д-215, e-mail: pggp@istu.edu

**КОРНЯКОВ М.В.**, доктор технических наук, ректор Иркутского национального  
исследовательского технического университета, главный редактор (г. Иркутск, Россия)

**НЕМЧИНОВА Н.В.**, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой  
металлургии цветных металлов Иркутского национального исследовательского  
технического университета, заместитель главного редактора (г. Иркутск, Россия)

**БАЖИН В.Ю.**, доктор технических наук, декан факультета переработки минерального сырья  
Санкт-Петербургского горного университета (г. Санкт-Петербург, Россия)

**БАЛИКОВ С.В.**, доктор технических наук, главный научный сотрудник Иркутского научно-  
исследовательского института благородных и редких металлов и алмазов (г. Иркутск,  
Россия)

**БЛЮМЕНШТЕЙН В.Ю.**, доктор технических наук, профессор Кузбасского государственного  
технического университета (г. Кемерово, Россия)

**БОЛДЫРЕВ А.И.**, доктор технических наук, профессор кафедры технологии  
машиностроения Воронежского государственного технического университета (г. Воронеж,  
Россия)

**БОРОВИКОВ Ю.С.**, доктор технических наук, и.о. ректора Новгородского государственного  
университета имени Ярослава Мудрого (г. Великий Новгород, Россия)

**ВОРОПАЙ Н.И.**, член-корреспондент РАН, научный руководитель Института систем  
энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)

**ГАЛЕВСКИЙ Г.В.**, доктор технических наук, заведующий кафедрой металлургии цветных  
металлов и химической технологии Сибирского государственного индустриального  
университета (г. Новокузнецк, Россия)

**ДАМБИЕВ Ц.Ц.**, доктор технических наук, профессор Восточно-Сибирского  
государственного университета технологий и управления (г. Улан-Удэ, Россия)

**ЗАЙДЕС С.А.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой  
машиностроительных технологий и материалов Иркутского национального  
исследовательского технического университета (г. Иркутск, Россия)

**ЗАКАРЮКИН В.П.**, доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетики  
транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения (г. Иркутск, Россия)

**КАРПЕНКО Е.И.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой лабораторий  
плазменно-энергетических процессов и технологий Института физического  
материаловедения СО РАН (г. Улан-Удэ, Россия)

**КЛЕР А.М.**, доктор технических наук, главный научный сотрудник Института систем  
энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)

**КОЛОСОК И.Н.**, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института систем  
энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)

**КРЮКОВ А.В.**, доктор технических наук, академик Российской академии транспорта, член-  
корр. АН ВШ РФ и Российской инженерной академии, заслуженный энергетик Республики  
Бурятия, профессор кафедры электроэнергетики транспорта Иркутского государственного  
университета путей сообщения (г. Иркутск, Россия)

**КУРБАЦКИЙ В.Г.**, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института систем  
энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)

**МАМАЧЕНКОВ С.В.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой  
металлургии цветных металлов Уральского Федерального университета им. первого  
Президента России Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург, Россия)

**МАТЛИН М.М.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой деталей машин  
и подъемно-транспортных устройств Волгоградского государственного технического  
университета (г. Волгоград, Россия)

**НОВИЦКИЙ Н.Н.**, доктор технических наук, главный научный сотрудник Института систем  
энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)

**ОГАР П.М.**, доктор технических наук, профессор Братского государственного университета  
(г. Братск, Россия)

**ПАЗДЕРИН А.В.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой  
автоматизированных электрических систем Уральского Федерального университета имени  
первого Президента России Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург, Россия)

**ПАНТЕЛЕЕВ В.И.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой  
электрических комплексов и систем Сибирского федерального университета (г. Красноярск,  
Россия)

**РАХИМЯНОВ Х.М.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии  
машиностроения Новосибирского государственного технического университета  
(г. Новосибирск, Россия)

**СЕНДЕРОВ С.М.**, доктор технических наук, заместитель директора Института систем  
энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)

**СТЕННИКОВ В.А.**, доктор технических наук, профессор, директор Института систем  
энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)

**СТЫЧНИНСКИ З.А.**, профессор Университета Отто-фон-Герике (г. Магдебург, Германия)

**ТАНУТРОВ И.Н.**, доктор технических наук, главный научный сотрудник Института  
металлургии УрО РАН (г. Екатеринбург, Россия)

**ТЮРИНА Э.А.**, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института систем  
энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)

**ФЕДЯЕВ А.А.**, доктор технических наук, заведующий кафедрой промышленной  
теплоэнергетики Братского государственного университета (г. Братск, Россия)

**ФИШОВ А.Г.**, доктор технических наук, профессор Новосибирского государственного  
технического университета (г. Новосибирск, Россия)

**ШОЛЬТЕС Бертольд**, директор Института материаловедения Кассельского университета  
(г. Кассель, Германия)

# PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

Vol. 23 No. 5

2019

Publishers of Irkutsk National Research Technical University

## Editorial board

**KORNYAKOV M.V.**, Dr. Sci. (Eng.), Rector of Irkutsk National Research Technical University, Editor-in-Chief (Irkutsk, Russia)  
**NEMCHINOVA N.V.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Metallurgy of Nonferrous Metals, Irkutsk National Research Technical University, Deputy Editor-in-Chief (Irkutsk, Russia)  
**BAZHIN V.Yu.**, Dr. Sci. (Eng.), Dean of the Mineral Resources Processing Faculty, Saint Petersburg Mining University (Saint Petersburg, Russia)  
**BALIKOV S.V.**, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher of Irkutsk Scientific Research Institute of Noble and Rare Metals and Diamonds (Irkutsk, Russia)  
**BLUMENSTEIN V.Yu.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of Kuzbass State Technical University (Kemerovo, Russia)  
**BOLDYREV A.I.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia)  
**BOROVIKOV Yu.S.**, Dr. Sci. (Eng.), Acting Rector of Novgorod State University n.a. Yaroslav-the-Wise (Veliky Novgorod, Russia)  
**VOROPAI N.I.**, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Head of the Energy Systems Institute n.a. L.A. Melentyev of the SB RAS (Irkutsk, Russia)  
**GALEVSKY G.V.**, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of Nonferrous Metallurgy and Chemical Technology of the Siberian State Industrial University (Novokuznetsk, Russia)  
**DAMBIEV Ts.TS.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the East Siberian State University of Technology and Management (Ulan-Ude, Russia)  
**ZAIDES S.A.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Machine Building Technologies and Materials, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)  
**ZAKARYUKIN V.P.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Transport Electricity of Irkutsk State Railway University (Irkutsk, Russia)  
**KARPENKO E.I.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of the Laboratory of Plasma Energy Processes and Technologies of the Institute of Physical Materials Science of the SB RAS (Ulan-Ude, Russia)  
**KLER A.M.**, Dr. Sci. (Eng.), Chief researcher of the Energy Systems Institute n.a. L.A. Melentyev of the SB RAS (Irkutsk, Russia)  
**KOLOSOV I.N.**, Dr. Sci. (Eng.), Leading researcher of the Energy Systems Institute n.a. L.A. Melentyev of the SB RAS (Irkutsk, Russia)  
**KRYUKOV A.V.**, Dr. Sci. (Eng.), Academician of the Russian Academy of Transport, Corresponding member of the Academy of Sciences of the Higher School of the Russian Federation and the Russian Academy of Engineering, Honored Power Engineer of the Republic of Buryatia, Professor of the Department of Transport Electric Power Industry of Irkutsk State Railway University (Irkutsk, Russia)  
**KURBATSKY V.G.**, Dr. Sci. (Eng.), Leading researcher of the Energy Systems Institute n.a. L.A. Melentyev of the SB RAS (Irkutsk, Russia)  
**MAMYACHENKOV S.V.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Metallurgy of Nonferrous Metals of the Ural Federal University n.a. the first President of Russia B.N. Yeltsin (Ekaterinburg, Russia)  
**MATLIN M.M.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Machine Parts and Hoisting-and-Transport Devices, Volgograd State Technical University (Volgograd, Russia)  
**NOVITSKY N.N.**, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher of the Energy Systems Institute n.a. L.A. Melentyev of the SB RAS (Irkutsk, Russia)  
**OGAR P.M.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of Bratsk State University (Bratsk, Russia)  
**PAZDERIN A.V.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Automated Electric Systems of the Ural Federal University n.a. the first President of Russia B.N. Yeltsin (Ekaterinburg, Russia)  
**PANTELEEV V.I.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Electrical Complexes and Systems of the Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia)  
**RAKHIMYANOV Kh.M.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Mechanical Engineering Technology, Novosibirsk State Technical University (Novosibirsk, Russia)  
**SENDEROV S.M.**, Dr. Sci. (Eng.), Deputy Director of the Energy Systems Institute n.a. L.A. Melentyev of the SB RAS (Irkutsk, Russia)  
**STENNIKOV V.A.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of the Energy Systems Institute n.a. L.A. Melentyev of the SB RAS (Irkutsk, Russia)  
**STYCZYNSKI S.A.**, Professor of the Otto-von-Guericke University (Magdeburg, Germany)  
**TANUTROV I.N.**, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Ekaterinburg, Russia)  
**TYURINAE E.A.**, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher of the Energy Systems Institute n.a. L.A. Melentyev of the SB RAS (Irkutsk, Russia)  
**FEDYAEV A.A.**, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of Industrial Heat and Power Engineering of Bratsk State University (Bratsk, Russia)  
**FISHOV A.G.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor Новосибирского государственного технического университета (Novosibirsk, Russia)  
**SCHOLTES B.**, Director of the Institute of Metal Science of the University of Kassel (Kassel, Germany)

The Journal was founded in 1997  
 Frequency of publication – 6 times a year  
 The journal is registered with the Federal Agency for Supervision of Communications, Information Technologies and Mass Media (Roskomnadzor).  
 Certificate of registration  
 № ПИ № ФС77-62813  
 of 18 August, 2015.  
 Founder: Irkutsk National Research Technical University

Subscription index in the Catalog  
 of the Russian Press – 38237

Address of the founder, publisher:  
 83 Lermontov St., Irkutsk, 664074

Address of the editorial office:  
 83 Lermontov St., Irkutsk, 664074,  
 D-215, e-mail: [pgp@istu.edu](mailto:pgp@istu.edu)



## СОДЕРЖАНИЕ

Содержание .....	850
------------------	-----



### Машиностроение и машиноведение

Джасем М.А., Крауиньш П.Я. Анализ напряженно-деформированного состояния под статической нагрузкой волнового торцевого кинематического редуктора.....	854
Зайдес С.А. От кинематики рабочего инструмента к новым процессам отделочно-упрочняющей обработки.....	863
Ле Чи Винь, Кольцов В.П., Стародубцева Д.А., Фунг Суан Шон. Производительность зачистки поверхности лепестковым кругом после дробеударного формообразования.....	874
Султанова А.Р., Сафронов А.А., Громашев А.Г. Исследование качества герметизации конструкций с деталями из полимерных композиционных материалов при сборке и установке крепежа по неотвержденному внутришовному герметику.....	884



### Энергетика

Герасимова Н.П. Установка для очистки вод гидрозолаудаления.....	895
Дмитриев А.В., Мадышев И.Н., Хафизова А.И., Дмитриева О.С. Оценка пропускной способности безреагентной испарительной градирни со струйно-пленочными контактными элементами.....	902
Закарюкин В.П., Крюков А.В., Нгуен Ты. Определение наведенных напряжений, создаваемых трехфазными линиями электропередачи в особых режимах.....	911
Илькевич Н.И., Дзюбина Т.В., Калинина Ж.В. Анализ основных тенденций инновационного преобразования математической модели потокораспределения в газоснабжающих системах и приобретаемых ими новых свойств.....	924
Кишалов А.Е., Зиннатуллин А.А. Математическое моделирование конденсации рабочего тела в системе отдачи тепла холодному источнику энергоустановки малой мощности.....	934
Круглов В.И., Хазетдинова А.Д., Щербаков А.В. Анализ расчетов идеального и реального циклов двигателя внутреннего сгорания.....	950
Кузнецов Б.Ф., Клибанова Ю.Ю., Сукьясов С.В., Луговнина В.В. Построение стохастической модели бытовой нагрузки на примере водонагревателя.....	958
Труфанов В.В., Драчев П.С. Оценка существующего энергетического потенциала регионов России.....	967
Тюрина Э.А., Корнеева З.Р., Елсуков П.Ю. Комплексная оптимизация теплосилового участка энергоблока атомных электростанций с водо-водяным энергетическим реактором с целью повышения их эффективности.....	978
Уфа Р.А., Васильев А.С., Ропперт А.С., Разживин И.А. Полигон для тестирования алгоритмов автоматического вторичного регулирования частоты и активной мощности в энергосистеме.....	986



### Металлургия и материаловедение

Аринова С.К., Исагулов А.З., Ковалёва Т.В. Технологические особенности изготовления отливок деталей печного оборудования литьем по газифицируемым моделям.....	999
Горланов Е.С. Развитие технологии инертных катодов. Часть 1. Компактные изделия и адгезионные пасты на основе диборида титана.....	1007
Жмурова В.В. Сернокислотное выщелачивание меди и свинца из золотосодержащих катодных осадков.....	1025
Сизяков В.М., Дубовиков О.А., Рис А.Д., Сундунов А.В. Роль термической активации при получении глинозема из низкокачественных бокситов.....	1032

# PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

Vol. 23 No. 5

2019

## CONTENTS

Contents.....	851
---------------	-----

### Mechanical Engineering and Machine Science

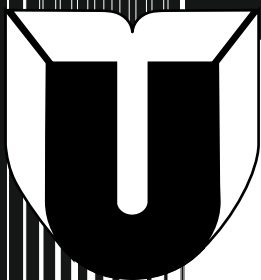
☞ <b>Jasem M.A., Krauinsh P.Ya.</b> Analysis of the stress-strain state under static load of face wave kinematic reducer.....	854
☞ <b>Zaides SA.</b> From working tool kinematics to new finishing-hardening processes.....	863
☞ <b>Le Tri Vinh, Koltsov V.P., Starodubtseva D.A., Phung Xuan Son.</b> Productivity of flap wheel grinding after shot peening.....	874
☞ <b>Sultanova A.R., Safronov A.A., Gromashev A.G.</b> Research of the sealing quality of structures with polymer composite parts at assembly and fastener installation on uncured interlayer sealant.....	884

### Power Engineering

☞ <b>Gerasimova N.P.</b> Hydraulic ash removal water treatment plant.....	895
☞ <b>Dmitriev A.V., Madyshev I.N., Khafizova A.I., Dmitrieva O.S.</b> Estimating capacity of a reagent-free evaporative cooling tower with jet-film contact elements.....	902
☞ <b>Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Nguyen Tu.</b> Determination of voltages induced by three-phase power lines in particular modes.....	911
☞ <b>Ilkevich N.I., Dzyubina T.V., Kalinina Z.V.</b> Analysis of the main trends in the innovative transformation of the mathematical model of flow distribution in gas supply systems and new properties they acquire.....	924
☞ <b>Kishalov A.E., Zinnatullin A.A.</b> Mathematical modeling of working fluid condensation in the system of heat transfer to low-capacity power plant cold source.....	934
☞ <b>Kruglov V.I., Khazetdinova A.D., Shcherbakov A.V.</b> Analysis of internal combustion engine ideal and real cycle calculations.....	950
☞ <b>Kuznetsov B.F., Klibanova Yu.Yu., Sukyasov S.V., Lugovnina V.V.</b> Building a stochastic model of residential load on example of a water heater.....	958
☞ <b>Trufanov V.V., Drachev P.S.</b> Assessment of current energy potential of regions of Russia.....	967
☞ <b>Tyurina E.A., Korneeva Z.R., Elsukov P.Yu.</b> Integrated optimization of thermal power part of PWR nuclear power units to increase their efficiency.....	978
☞ <b>Ufa R.A., Vasiliev A.S., Roppert A.S., Razzhivin I.A.</b> Testing ground for the algorithms of automatic secondary regulation of frequency and active power flows in the electric power system.....	986

### Metallurgy and Materials Science

☞ <b>Arinova S.K., Issagulov A.Z., Kovalyova T.V.</b> Technological features of furnace equipment part casting by gasified models.....	999
☞ <b>Gorlanov E.S.</b> Development of inert cathode technology. Part 1. Titanium diboride-based compact products and adhesive pastes.....	1007
☞ <b>Zhmurova V.V.</b> Sulfuric acid leaching of copper and lead from gold-bearing cathode deposits.....	1025
☞ <b>Sizyakov V.M., Dubovikov O.A., Ris A.D., Sundurov A.V.</b> Role of thermal activation in alumina production from low-quality bauxites.....	1032



# ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

## Уважаемые читатели!

Предлагаем вашему вниманию очередной выпуск научного журнала «Вестник Иркутского государственного технического университета».

Журнал включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, утвержденный ВАК Минобрнауки России.

«Вестник ИрГТУ» включен в международный каталог периодических изданий «UlrichsPeriodicals Directory», в базу данных EBSCO, в Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU), представлен в электронной библиотеке «Cyberleninka», библиотеке Oxford, Directory of Open Access Journals (DOAJ) рассылается в Российскую книжную палату, ВИНТИ РАН, каждой статье присваивается цифровой индикатор DOI.

«Вестник ИрГТУ» реферируется и рецензируется.

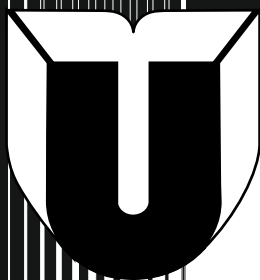
Приглашаем вас к активному творческому сотрудничеству по научным направлениям:

Машиностроение и  
машиноведение

Энергетика

Металлургия и  
материаловедение

Редколлегия



# PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

## Dear Readers!

We would like to bring to your attention the next issue of the scientific journal "Proceedings of Irkutsk State Technical University". The journal is included in the list of the leading scientific journals and publications, where the key scientific results of doctoral (candidate's) theses approved by the State Commission for Academic Degrees and Titles of the Russian Ministry of Education are to be published.

Proceedings of Irkutsk State Technical University ("Vestnik IrGTU") is included in the "UlrichsPeriodicals Directory", EBSCO database, Scientific electronic library (eLIBRARY.RU). It is presented in the e-library "Cyberleninka", University OXFORD, Scientific Indexing Services (SIS), Directory of Open Access Journals (DOAJ). It is sent to the Russian Book Chamber and All-Russian Institute for Scientific and Technical Information (VINITI) RAS. Each article is assigned a digital indicator DOI.

The journal "Proceedings of Irkutsk State Technical University" is abstracted and reviewed.

You are welcome for active and creative collaboration in the following fields:

Mechanical Engineering  
and Machine Science

Power Engineering

Metallurgy and  
Materials Science

**Editorial Board**





Оригинальная статья / Original article

УДК 621.833.16

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-854-862>

## Анализ напряженно-деформированного состояния под статической нагрузкой волнового торцевого кинематического редуктора

© М.А. Джасем, П.Я. Крауиньш

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

**Резюме:** Цель – разработка статической модели конечных элементов для волнового торцевого кинематического редуктора с помощью программной системы конечно-элементного анализа ANSYS. Данная модель, построенная с помощью программы Solidworks, будет прогнозировать распределение напряжений и перемещений исследуемого редуктора. Создание модели включало использование трехмерных конечных элементов, таких как сплошные цилиндры и контактные поверхностные элементы для моделирования зацепления между зубьями колес. Зубья не были смоделированы из-за сложности. При этом контакт зубьев был принят как контакт зубчатой поверхности. Расчет напряжений в зацеплении зубчатых передач является сложным из-за геометрии зацепления и применения большого количества поправочных коэффициентов. Это приводит к неточным результатам, которые отличаются от реальных значений. Одним из лучших способов повышения точностных характеристик зацепления зубчатых передач является создание компьютерных моделей. Таким образом, по результатам расчета напряженно-деформированного состояния предложен метод проверочного расчета контактной и изгибной прочности исследуемого редуктора.

**Ключевые слова:** напряженно-деформированное состояние, волновой торцевой кинематический редуктор, конечно-элементная модель, кинематический редуктор

**Информация о статье:** Дата поступления 22 августа 2019 г.; дата принятия к печати 19 сентября 2019 г.; дата онлайн-размещения 31 октября 2019 г.

**Для цитирования:** Джасем М.А., Крауиньш П.Я. Анализ напряженно-деформированного состояния под статической нагрузкой волнового торцевого кинематического редуктора. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т. 23. № 5. С. 854–862. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-854-862>

## Analysis of the stress-strain state under static load of face wave kinematic reducer

Mohamad A. Jasem, Peter Ya. Krauinsh

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

**Abstract:** The purpose of the article is development of a static finite element model for a face wave kinematic reducer using the finite element analysis software system ANSYS. This model built using the Solidworks software will predict the distribution of stresses and displacements of the reducing gear under investigation. Creation of the model involves the use of three-dimensional finite elements such as solid cylinders and contact surface elements for simulating the engagement between gear teeth. Due to the complexity, the teeth were not modeled. In this case, the contact of the teeth is adopted as the contact of the gear surface. It is complicated to calculate stresses in gear engagements due to the engagement geometry and application of a large number of correction factors. This leads to inaccurate results that differ from the actual values. One of the best ways to improve the precision characteristics of gearing is computer simulation. Thus, according to the calculation results of the stress-strain state a method for checking calculation of the contact and bending strength of the studied reducing gear is proposed.

**Keywords:** stress-strain state, face wave kinematic gearbox, finite element model, kinematic reducer

**Information about the article:** Received August 22, 2019; accepted for publication September 19, 2019; available online October 31, 2019.

**For citation:** Jasem MA, Krauinsh PYa. Analysis of the stress-strain state under static load of face wave kinematic reducer. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2019;23(5):854–862. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-854-862>



## 1. ВВЕДЕНИЕ

Повышение допустимой грузоподъемности и передаточного отношения механических передач является одним из важных направлений развития машиностроения. Существующие волновые передачи способны обеспечить большое передаточное число (от 40 до 300) и высокую кинематическую точность при относительно малых габаритах и массе. Главными недостатками волновой передачи являются высокая напряженность гибкого колеса и пониженная крутильная жесткость<sup>1</sup> [1].

Конструктивные исполнения кинематических волновых редукторов, несмотря на их широкое распространение, ограничены схемами с шестерней и колесом цилиндрической формы. Отсутствуют также изученные схематические изображения кинематических волновых редукторов, у которых зубья расположены на конических образующих поверхностях с большим углом при вершине. Представляет интерес изучение несущей способности зубьев торцевого кинематического редуктора с профилем зуба, выполненного с определенным радиусом, малые массогабаритные размеры при достаточно больших передаточных отношениях и повышенная несущая способность зубьев в кинематических волновых редукторах с цилиндрическими колесами делают эту задачу (проверку) актуальной применительно к редукторам с торцевыми зубьями [2]. Также благодаря волновому редуктору с торцевыми зубьями можно осуществить ряд задач, а именно: улучшить кинематическую точность передачи движения при большом передаточном отношении и малом числе деталей, увеличить долговечность, повысить надежность зацепления, снизить массогабаритные характеристики, уменьшить вибрационные и шумовые характеристики благодаря усовершенствованию геометрической структу-

ры зубчатых колес и кинематической модели зацепления [3].

Расчет напряженно-деформированного состояния зацепления зубчатых передач аналитическими методами (АМ) приводит к большим погрешностям результатов, особенно для конических зубчатых передач с круговыми зубьями из-за сложной геометрии зацепления. С появлением численных методов решение этой задачи существенно упростилось при применении метода конечных элементов (КЭ)<sup>2,3</sup> [4, 5]. При разработке модели редуктора с торцевым расположением зубьев использовались рекомендации [6–14], упрощающие модель для конических зубьев.

Целью исследования является разработка статической модели конечных элементов для волнового торцевого кинематического редуктора, предложенного в работах [6, 7], с помощью программной системы конечно-элементного анализа ANSYS для определения контактных и изгибных напряжений исследуемого редуктора, а также сопоставление результатов расчета с теоретическими данными.

## 2. ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 1 изображена виртуальная 3D-модель волнового торцевого кинематического редуктора, построенная с помощью программы Solidworks [8], состоящая из входного вала (1) с эксцентриком, входного колеса (2) с количеством зубьев  $Z_1$ , шестерни (3) с зубьями  $Z_2$  с двух торцов, выходного колеса (4) с количеством зубьев  $Z_3$ , выходного вала (5) и корпуса (6).

Трехмерная геометрическая модель была построена для пар зубьев колес, которые входят в зацепление друг с другом. В данном случае главные поверхности зубьев вводятся в контакт, а переходные поверхности используются как основание для задания граничных условий.

<sup>1</sup>Анурьев В.И. Справочник конструктора машиностроителя: в 3 т. Т. 1. М.: Машиностроение, 2001. 920 с.

<sup>2</sup>Нахатакян Ф.Г. Напряженно-деформированное состояние упругих элементов зубчатых механизмов и сооружений при их линейном и кромочном контакте: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06. М., 2014. 213 с.

<sup>3</sup>Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин: справочник. М.: Машиностроение, 1993. 640 с.

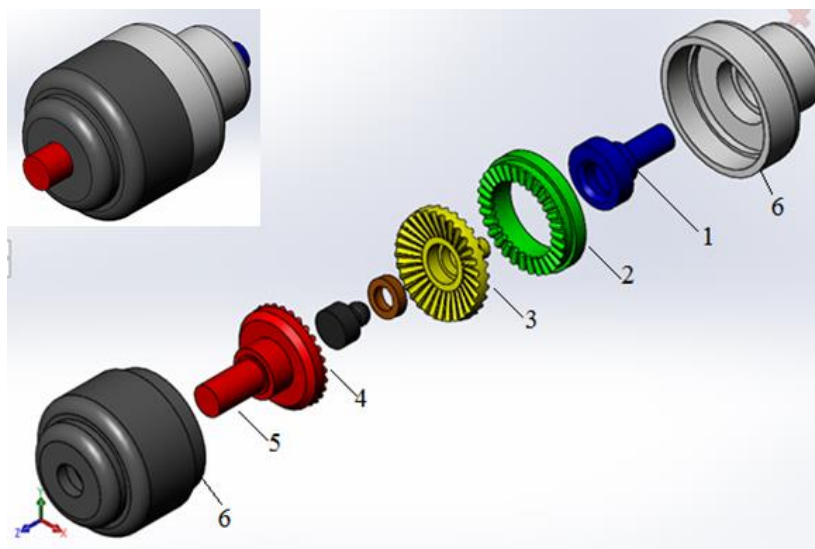


Рис. 1. Виртуальная модель для исследований  
Fig. 1. Virtual model for research

Контур зуба ABCD (см. рис. 2 а) состоит из полуокружности радиуса  $r$  и двух дуг радиуса  $r^*$ . Центры полуокружности и дуг лежат на делительной окружности зубчатого колеса. Контур основания задает линия EFGH. На рис. 2 б, с представлены, соответственно, параметры зуба и физические размеры для КЭ модели редуктора.

При построении структуры конечно-элементной сетки использовались следу-

ющие элементы:

- solid 185 (объемные элементы);
- target 170 (контактные поверхностные элементы).

В таблице подробно описаны свойства материала, физические размеры частей волнового торцевого кинематического редуктора, величина момента, приложенного к выходному колесу.

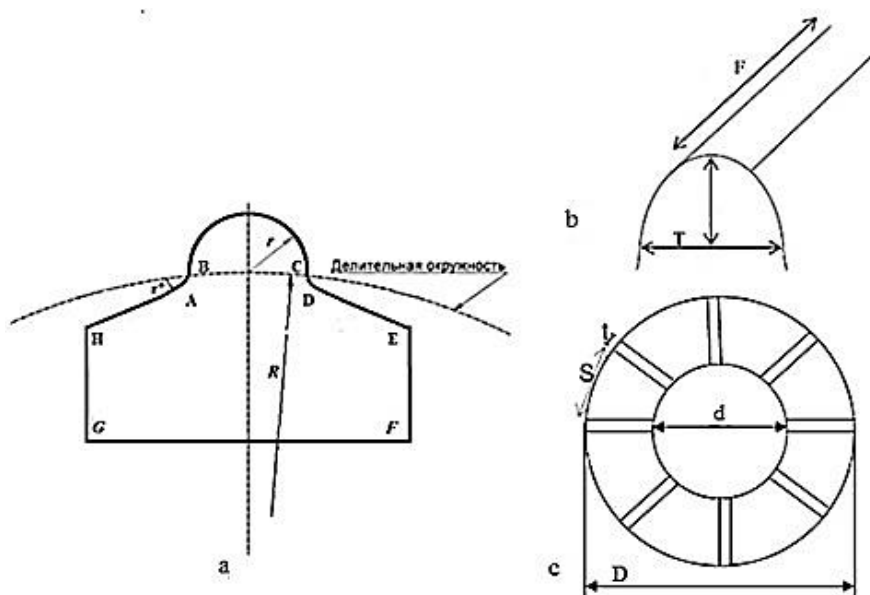


Рис. 2. Контур зуба в сечении (а); исходные параметры зуба (б); физические размеры для конечных элементов модели колеса и шестерни редуктора (с)

Fig. 2. Tooth contour in the cross-section (a); initial tooth parameters (b); physical dimensions for finite elements of the gear wheel and gearbox gear model (c)

**Свойства материала, физические размеры элементов редуктора  
и характеристики конечно-элементной модели**  
**Properties of material, physical dimensions of reducer elements  
and characteristics of the finite element model**

Свойства материала				
Используемый материал			Сталь AISI 9310	
Модуль Юнга (E)			1,9 * 10 <sup>5</sup> МПа	
Коэффициент Пуассона (μ)			0,3	
Физические размеры элементов редуктора				
наименование	неподвижное колесо	шестерня	шестерня	выходное колесо
Z – число зубьев	Z <sub>1</sub> = 28	Z <sub>2</sub> = 30	Z <sub>3</sub> = 27	Z <sub>4</sub> = 26
d – внутренний диаметр, мм	304,8	304,8	304,8	304,8
D – внешний диаметр, мм	326,5	325,1	315,5	315,7
F – ширина лица зуба, мм	22,9	22,9	22,9	22,9
T – толщина зуба, мм	8,55	8,4	8,4	8,55
I – передаточное отношение	30			
Момент, приложенный к выходному колесу			(1..7) x10 <sup>2</sup> Н·м	
Характеристики конечно-элементной модели				
Размер конечных элементов на поверхностях контакта			0,5 мм	
Размер конечных элементов на остальных поверхностях редуктора			1,5 мм	
Число объемных КЭ типа solid 92			177392	
Число поверхностных КЭ типа targe 170			2883842	

Чтобы обеспечить более точное вычисление, создавалось сгущение сетки в области, накрывающей пятно контакта. На рис. 3 представлена конечно-элементная модель волнового торцевого кинематического редуктора.

При построении конечно-элементной модели были приняты следующие предположения:

- модель строится в статическом состоянии;
- вместо подшипниковых опор использовались опорные соединения;
- вал имеет опоры на обоих концах;
- зубья моделировались как поверхностные контактные элементы;
- было выбрано нулевое выравнивание по вертикали вместо реального угла, равного  $2,5^\circ$ ;
- модели цилиндрических зубчатых

колес представлялись в виде сплошных цилиндров;

– контактные элементы были созданы с использованием графического интерфейса в ANSYS.

На рис. 4 представлены граничные условия конечно-элементной модели редуктора. На двух концах вала имеется два подшипника, которые (как две петли на конце) имеют нулевое смещение. Чтобы обеспечить вращающий момент, к узлам шестерни и колеса прикладывалась равномерная нагрузка.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для получения величин контактных и изгибных напряжений методом КЭ использовались две функции:

- нахождения эквивалентных



напряжений Equivalent Stress (Von Mises Stress – напряжения по Мизесу) (отвечает за получение величин контактных напряжений, возникающих в полюсе зацепления);

– Maximum Principal Stress (рассчитывает величину изгибных напряжений, возникающих при опасном сечении основания зуба).

На рис. 5 изображено распределение контактных напряжений в зацеплении при крутящем моменте 200 Н·м.

Контактные напряжения были рассчитаны на основе теории Герца (аналитическим методом)<sup>4</sup> [9, 10]. Расчет изгибных

напряжений проводится при следующем допущении: всю нагрузку заменяют равнодействующей силой, приложенной в полюсе зацепления и направленной по линии зацепления. Равнодействующая сила передается одной парой зубьев<sup>5</sup> [11]. С помощью программы MATLAB был проведен расчет контактных и изгибных напряжений на основе указанных методов.

Для сравнения результатов, полученных методом КЭ и АМ, были построены графики зависимости контактных и изгибных напряжений от крутящего момента (рис. 6, 7).



Рис. 3. Конечно-элементная модель редуктора  
Fig. 3. Finite element model of the reducer

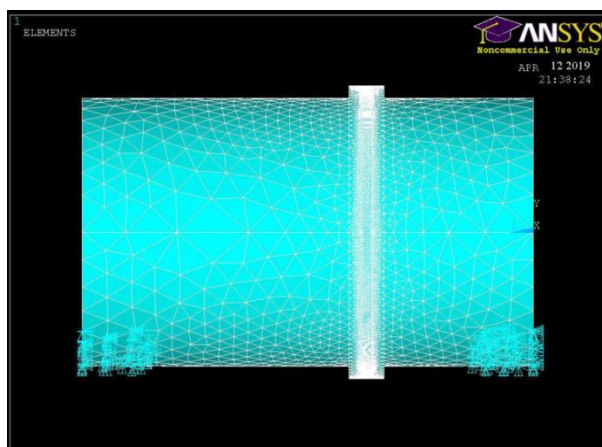


Рис. 4. Граничные условия  
Fig. 4. Boundary conditions

<sup>4</sup>Балашов Б.А., Гальпер Р.Р., Гаркави Л.М. Редукторы энергетических машин: справочник. Л.: Машиностроение, 1985. 232 с.

<sup>5</sup>Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин: справочник. М.: Машиностроение, 1993. 640 с.

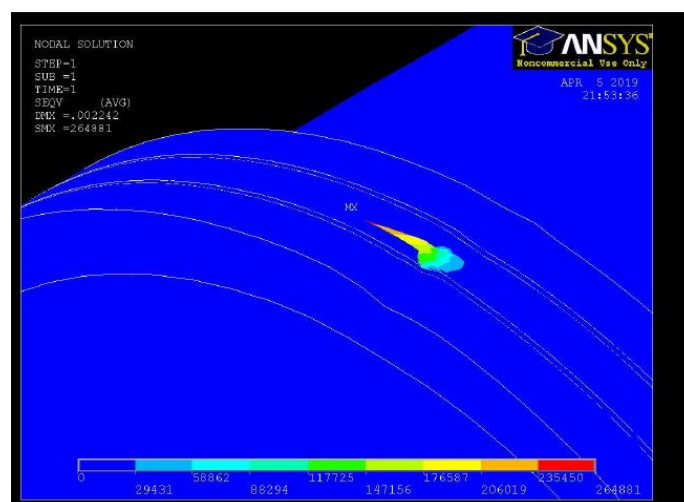


Рис. 5. Распределение контактных напряжений в зацеплении при крутящем моменте 200 Н·м  
 Fig. 5. Distribution of contact stresses in the engagement with the torque of 200 N·m

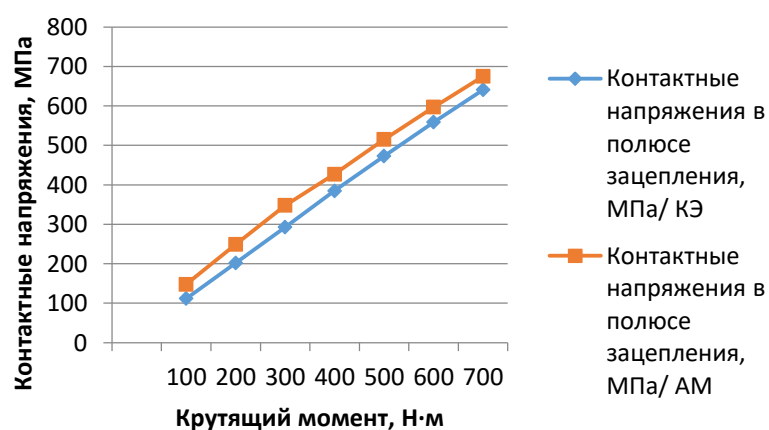


Рис. 6. График зависимости контактных напряжений от крутящего момента  
 Fig. 6. Contact stress vs torque graph

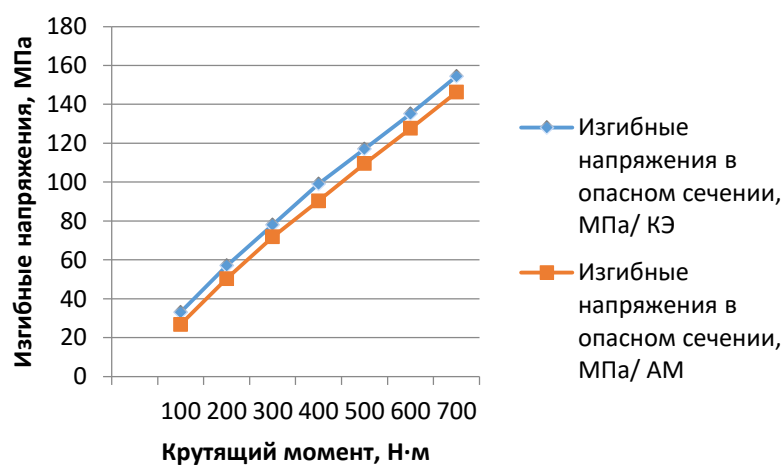


Рис. 7. График зависимости изгибных напряжений от крутящего момента  
 Fig. 7. Bending stress vs torque graph





Сравнение полученных графиков показывает, что разница между методом конечных элементов и аналитическим методом при расчете контактных напряжений равна 3%, а при расчете изгибных напряжений – 6,50%. Погрешность снижается по мере уменьшения размера КЭ. Это, с одной стороны, приводит к улучшению качества конечно-элементной модели в зоне контакта [12], а с другой – использование такой сетки сложно из-за ограничений, накладываемых на конечно-элементную модель [13].

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, цель данного исследования с использованием пакета ANSYS, заключалась в том, чтобы определить изгибные и контактные напряжения методом конечных элементов и сравнить их с аналитическим методом для выходных и входных колес и шестерни. Размеры зубчатых колес также были практически равными, поэтому нагрузки на данных конструктивных элементах были почти одинаковыми. Для упрощения зубчатые колеса представлялись как сплошные цилиндры. В действительности можно использовать конические зубчатые колеса, и они будут смоделированы как конусы.

3D-модель, которая использовалась, была валом (закрепленным на обоих концах), на котором было установлено три шестерни. Зубы не были смоделированы из-за сложности. Тем не менее, контакт зубьев был смоделирован как контакт зубчатой поверхности. Величины напряжений, полученных с помощью трехмерного анализа, были на порядок больше теоретических значений. Причину такой высокой величины можно объяснить тем, что анализ был нелинейным, а отсутствовали зубья, что привело бы к более низкому значению напряжения. Полное моделирование волнового торцевого кинематического редуктора, как описано выше, привело бы к физически надежной и точной модели конечных элементов, которая дала бы результаты, совпадающие с теоретическими результатами. Анализ был проведен для статической модели конечных элементов. Как показало сравнение результатов моделирования и теоретических расчетов, их различие незначительно, поэтому на этапе проектирования допустимо использование теоретической модели с использованием теории Герца. Следует также отметить, что для рассматриваемого профиля зуба фактически не требуется оценка изгибных напряжений, как при теоретическом расчете, так и в модели КЭ.

#### Библиографический список

1. Краснощеков Н.Н., Федякин Р.В., Чесноков В.А. Теория зацепления Новикова. М.: Наука, 1976. 175 с.
2. Lemanski A., Monahan T.J. Non-Traction Pericyclic CVTs // SAE International. 2004. Vol. 40. No. 5. [Электронный ресурс]. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.603.403&rep=rep1&type=pdf> (15.07.2018).
3. Nelson C.A., Cipra R.J. Similarity and Equivalence of Nutating Mechanisms to Bevel Epicyclic Gear Trains for Modeling and Analysis // Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME. 2005. Vol. 127. No. 2. P. 269–277. <https://doi.org/10.1115/1.1829068>
4. Каратушин С.И., Плешанова Ю.А., Бильдюк Н.А., Бокучава П.Н. Анализ конических передач с использованием пакета ANSYS // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016. № 5. С. 52–58. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2016-5-52-58>
5. Jasem M.A., Krauinsh P.Ya. Kinematical analysis of the nutation speed reducer // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2019. P. 012022 [Электронный ресурс]. URL: [https://www.researchgate.net/publication/332643413\\_Kinematical\\_analysis\\_of\\_the\\_nutation\\_speed\\_reducer](https://www.researchgate.net/publication/332643413_Kinematical_analysis_of_the_nutation_speed_reducer) (15.02.2018). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/510/1/012022>
6. Джасем М.А., Крауинш П.Я. Особенности зацепления кинематического торцевого волнового редуктора // Проблемы механики современных машин: материалы VII Междунар. науч. конф. (г. Улан-Удэ, 25–30 июня 2018 г.). Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2018. С. 25–29.
7. Алямовский А.А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation. М.: ДМК Пресс 2010, 464 с.
8. Шевелева Г.И., Волков А.Э., Медведев В.Н. Сравнение методов расчета контактных давлений в конических передачах с круговыми зубьями // Вестник машиностроения. 2003. № 6. С. 9–12.
9. Cameron Z.A., Smith E.C., De Smidt H., Bill R.C. Design Space Exploration of Pericyclic Transmission with Counterbalance and Bearing Load Analysis // Annual Forum Proceedings - AHS International [Элек-

тронный ресурс]. URL: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20180005490.pdf> (06.06.2019)

10. Каратушин С.И., Плешанова Ю.А., Бильдюк Н.А., Бокучава П.Н. Проверочный силовой расчет зубьев планетарной ступени редуктора с использованием пакета ANSYS // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2015. № 12. С. 77–84. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2015-12-77-84>

11. Mathur T.D., Smith E., Desmidt H., Bill R.C. Load distribution and mesh stiffness analysis of an internal-external bevel gear pair in a pericyclic drive // 72nd American Helicopter Society International Annual Forum 2016: Leveraging Emerging Technologies for Future Capabilities (Florida, 1 January 2016). Virginia: American Helicopter Society, 2016. Vol. 3. No. 12.

P. 2646–2657.

12. Конические зубчатые передачи с круговыми зубьями // Сб-Online [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cb-online.ru/spravochniki-online/online-spravochnik-konstruktora/zubchatiye-peredachy/konicheskiye-peredachy/konicheskiye-skruglimy/> (15.07.2018).

13. Каратушин С.И., Спиридонов Д.В., Плешанова Ю.А. Моделирование остаточных напряжений в упругих элементах, работающих на кручение // Технология металлов. 2013. № 7. С. 10–13.

14. Каратушин С.И., Бильдюк Н.А., Плешанова Ю.А. Напряженно-деформированное состояние при качении с противодействующим моментом // Технико-технологические проблемы сервиса. 2013. № 4. С. 42–44.

## References

1. Krasnoshekov NN, Fedyakin RV, Chesnokov VA. *Novikov's theory of gearing*. Moscow: Science; 1976. 175 p. (In Russ.)

2. Lemanski A, Monahan TJ. Non-Traction Pericyclic CVTs. *SAE International*. 2004;40(5). Available from: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.603.403&rep=rep1&type=pdf> [Accessed 15th July 2018].

3. Nelson CA, Cipra RJ. Similarity and Equivalence of Nutating Mechanisms to Bevel Epicyclic Gear Trains for Modeling and Analysis. *Journal of mechanical design – transactions of the Asme*. 2005;127(2):269–277.

4. Karatushin SI, Pleshanova YuA, Bil'dyuk NA, Bokuchava PN. Analysis of bevel gears using ANSYS software package. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Mashinostroenie* = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building. 2016;5:52–58. (In Russ.) <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2016-5-52-58>

5. Jasem MA, Krauinsh PYa. Kinematical analysis of the nutation speed reducer. *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2019. P. 012022. Available from: [https://www.researchgate.net/publication/332643413\\_Kinematical\\_analysis\\_of\\_the\\_nutation\\_speed\\_reducer](https://www.researchgate.net/publication/332643413_Kinematical_analysis_of_the_nutation_speed_reducer) [Accessed 15 February 2018]. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/510/1/012022>

6. Jasem MA, Krauinsh PYa. Gearing features of the kinematic face wave reducer. In: *Problemy mekhaniki sovremennykh mashin: materialy VII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferencii* = Problems of modern machine mechanics: Proceedings of VII International scientific conference, 25–30 June 2018, Ulan-Ude, Ulan-Ude: East Siberian State University of Technology and Management; 2018, p. 25–29. (In Russ.)

7. Alyamovsky AA. *Engineering calculations in Solid-Works Simulation*. Moscow: DMK Press 2010; 464 p. (In Russ.)

8. Sheveleva GI, Volkov AE, Medvedev VN. Comparison of calculation methods of contact pressure in bevel

gearings with circular teeth. *Vestnik mashinostroyeniya* = Bulletin of Machine Building. 2003;6:9–12. (In Russ.)

9. Cameron ZA, Smith EC, Smidt H, Bill RC. Design Space Exploration of Pericyclic Transmission with Counterbalance and Bearing Load Analysis. *Annual Forum Proceedings - AHS International*. Available from: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20180005490.pdf> [Accessed 6th June 2019].

10. Karatushin SI, Pleshanova YuA, Bil'dyuk NA, Bokuchava PN. Control Power Calculation for Teeth of the Planetary Stage of a Gear Drive Using ANSYS Software Package. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Mashinostroenie* = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building. 2015;12:77–84. (In Russ.) <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2015-12-77-84>

11. Mathur TD, Smith E, Desmidt H, Bill RC. Load distribution and mesh stiffness analysis of an internal-external bevel gear pair in a pericyclic drive. In: *72nd American Helicopter Society International Annual Forum 2016: Leveraging Emerging Technologies for Future Capabilities*, 1 January 2016, Florida, Virginia: American Helicopter Society; 2016, vol. 3, no. 12, p. 2646–2657.

12. Bevel gears with circular teeth. *Cb-Online*. Available from: <https://www.cb-online.ru/spravochniki-online/online-spravochnik-konstruktora/zubchatiye-peredachy/konicheskiye-peredachy/konicheskiye-skruglimy/> [Accessed 15th July 2018].

13. Karatushin SI, Spiridonov DV, Pleshanova YuA. Simulation of residual stresses in torsional elastic elements. *Tekhnologiya Metallov* = Technology of Metals. 2013;7:10–13. (In Russ.)

14. Karatushin SI, Bil'dyuk NA, Pleshanova YuA. The stress-strain state of the rolling with opposing points. *Tekhniko-tekhnologicheskie problemy servisa* = Technical and Technological Problems of Maintenance. 2013;4:42–44. (In Russ.)



#### Критерии авторства

Джасем М.А., Крауинш П.Я. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в одинаковой мере несут ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

#### Authorship criteria

Jasem M.A., Krauinsh P.Ya. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

#### Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

##### Джасем Мохамад Али,

аспирант,  
Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет,  
634050, г. Томск, ул. Тимакова, 13, Россия;  
✉ e-mail: eng.mjasem85@gmail.com

##### Крауинш Петр Янович,

доктор технических наук, профессор,  
научный руководитель отделения  
материаловедения инженерной школы новых  
производственных технологий,  
Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет,  
634050, г. Томск, ул. Тимакова, 13, Россия;  
e-mail: peterkrau@tpu.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

##### Mohamad A. Jasem,

Postgraduate student,  
National Research Tomsk Polytechnic University,  
13, Timakov St., Tomsk 634050, Russia;  
✉ e-mail: eng.mjasem85@gmail.com

##### Petr Ya. Krauinsh,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Head of Research of the Department  
of Materials Science of the Engineering School  
of Advanced Manufacturing Technologies,  
National Research Tomsk Polytechnic University,  
13, Timakov St., Tomsk 634050, Russia;  
e-mail: peterkrau@tpu.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.7.011

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-863-873>

## От кинематики рабочего инструмента к новым процессам отделочно-упрочняющей обработки

© С.А. Зайдес

*Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия*

**Резюме:** Цель работы – анализ кинематики рабочего инструмента для создания новых технологических процессов поверхностного пластического деформирования. Материал статьи подготовлен по результатам исследования степеней свободы рабочего инструмента при поверхностном пластическом деформировании деталей машин. Изучение степеней свободы рабочего инструмента позволило выявить новые движения, которые ранее не использовали при упрочняющей обработке, что послужило основанием для создания новых схем обработки и новых процессов поверхностного пластического деформирования: осциллирующее выглаживание, поперечная обкатка гладкими плитами, изменение оси вращения рабочего инструмента, центробежная обкатка цилиндрических поверхностей. Выполненный анализ степеней свободы рабочего инструмента позволил задействовать новые движения и создать современные технологические процессы отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием.

**Ключевые слова:** кинематика рабочего инструмента, пластическое деформирование деталей машин, поперечная обкатка, центробежная обкатка, упрочняющая обработка, обкатка цилиндрических поверхностей

**Информация о статье:** Дата поступления 30 мая 2019 г.; дата принятия к печати 18 июля 2019 г.; дата онлайн-размещения 31 октября 2019 г.

**Для цитирования:** Зайдес С.А. От кинематики рабочего инструмента к новым процессам отделочно-упрочняющей обработки. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т. 23. № 5. С. 863–873. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-863-873>

## From working tool kinematics to new finishing-hardening processes

Semen A. Zaides

*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

**Abstract:** The purpose of the work is to analyze the kinematics of the working tool in order to create new technological processes of surface plastic deformation. The article is based on the research results of the degrees of freedom of a working tool under the surface plastic deformation of machine parts. The study of degrees of freedom of the working tool allowed to reveal new motions not used earlier at hardening processing. This served the basis for the creation of new process diagrams and new processes of surface plastic deformation including oscillating smoothing, transverse burnishing by smooth plates, change of the working tool rotation axis, centrifugal rolling of cylindrical surfaces. The performed analysis of the degrees of freedom of the working tool allowed to use new motions and create modern technological processes of finishing and hardening processing by surface plastic deformation.

**Keywords:** working tool kinematics, plastic deformation of machine parts, transverse rolling, centrifugal rolling, hardening treatment, rolling of cylindrical surfaces

**Information about the article:** Received May 30, 2019; accepted for publication July 18, 2019; available online October 31, 2019.

**For citation:** Zaides SA. From working tool kinematics to new finishing-hardening processes. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2019;23(5): 863–873. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-863-873>

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Для изготовления деталей машин на металлорежущих станках традиционно ис-

пользовалась 3-координатная система, в которой заготовка или рабочий инструмент перемещались в прямоугольной системе координат. Однако в последние годы стали

широко применять 5-координатные станки с числовым программным управлением (ЧПУ), в которых включено дополнительное движение рабочего инструмента и заготовки. Новая техника и технологии позволяют создавать не только уникальные по сложности объекты, но и обладают возможностью сокращать длительность механической обработки [1]. Первые 5-координатные станки появились на предприятиях по производству авиакосмической техники, а в настоящее время они используются практически во всех отраслях, связанных с обработкой материалов.

Сущность технологического процесса изготовления деталей машин заключается в получении поверхностей заданных форм и размеров с определенными физико-механическими свойствами [2]. Если процесс резания применяют для получения деталей определенной формы и размеров, то технологию поверхностного пластического деформирования (ППД) используют в основном для обеспечения необходимого качества уже практически готовых изделий.

Понятие о кинематических схемах механической обработки впервые дано в работе Г.И. Грановского [3], в которой на основании комбинирования нескольких простых движений – поступательных и вращательных – представлено более 200 принципиальных кинематических схем резания.

Профессор Е.Г. Коновалов предложил свой подход к вопросу формообразования поверхностей, учитывающий, что «поверхность возникает не только в пространстве, но и во времени» [4]. Поэтому образующая и направляющая траектории могут возникать во времени различным образом: прерывисто (кусочно), непрерывно и одновременно (мгновенно).

Ю.Г. Проскуряков разработал классификацию [5] методов упрочняющей и формообразующей обработки металлов. В основе классификации лежит две группы методов обработки. Пер-

вая группа характеризуется поверхностной пластической деформацией металла без существенного изменения формы и размеров обрабатываемых деталей. Вторая группа характерна наличием более глубокой пластической деформации металла, которая может охватить весь объем заготовки и в значительной степени изменить ее форму и размеры.

Л.Г. Одинцов в своей разработке<sup>1</sup> начинает классификацию технологических процессов с рассмотрения статических и ударных методов ППД. К статическим относятся методы накатывания, выглаживания и метод однократного обжатия обрабатываемой поверхности без перемещения очагов воздействия. При ударных методах инструмент, рабочие тела, или технологическая среда многократно воздействует на всю обрабатываемую поверхность или на ее часть, при этом сила воздействия в каждом цикле изменяется от нуля до некоторого максимума.

Известны и другие работы [6–9], внесшие значительный вклад в теорию формообразования поверхностей, однако они далеко не исчерпали всех вопросов, например, не рассмотрена кинематика процесса ППД с т.зр. степени свободы деформирующего инструмента.

Цель работы – анализ кинематики рабочего инструмента для создания новых технологических процессов ППД.

## **2. СТЕПЕНЬ СВОБОДЫ РАБОЧЕГО ИНСТРУМЕНТА**

Отделочно-упрочняющая обработка ППД обычно используется для повышения качества поверхностного слоя уже сформированных (изготовленных) деталей машин. Поэтому задачей ППД является тонкое деформирование поверхностного слоя для получения необходимых физико-механических характеристик. Рассмотрим кинематику рабочего инструмента с т.зр. степени свободы его движений.

<sup>1</sup>Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.





Число степеней свободы представляет собой число независимых между собой перемещений механической системы. Если принять прямоугольную систему координат, то полная неподвижность инструмента будет при отсутствии возможности его линейного перемещения в направлении осей координат  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  и поворота или вращения относительно этих осей. Полная свобода движений осуществляется, соответственно, 6-ю степенями свободы. На рис. 1 изображен деформирующий инструмент, обладающий 6-ю степенями свободы. Здесь  $\omega_x$ ,  $\omega_y$ ,  $\omega_z$  – угловая скорость индентора относительно осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ,  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  – силы, действующие относительно осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ .

Рассмотрим число степеней свободы рабочих инструментов в реальных процессах ППД. Одной степенью свободы обладают технологии, осуществляющиеся за счет одного главного движения – продольного перемещения вдоль оси  $X$  (см. рис. 1). К таким процессам ППД можно отнести, например, поверхностное дорнование [10]

и охватывающее ППД [11], когда инструмент или заготовка совершают прямолинейное движение в направлении подачи.

Традиционно ППД происходит в 2-мерной системе координат. Рабочий инструмент в направлении оси  $Y$  создает радиальный натяг и перемещается за счет продольной подачи в направлении оси  $X$  (см. рис. 1). По этой схеме работают процессы обкатки шариком или роликом<sup>1,2</sup>. Известны более сложные движения в 2-мерном пространстве. Например, при использовании ультразвукового ППД инструмент в направлении оси  $Y$  совершает колебательные движения или осциллирующее движение рабочего инструмента относительно продольной оси  $X$ , в результате чего формируется регулярный микрорельеф на поверхности детали. Двумя степенями свободы обладают процессы упрочняющего раскатывания и центробежной обработки<sup>1,2</sup> [12]. Таким образом, большинство известных способов ППД используют деформирующие инструменты с одной или двумя степенями свободы.

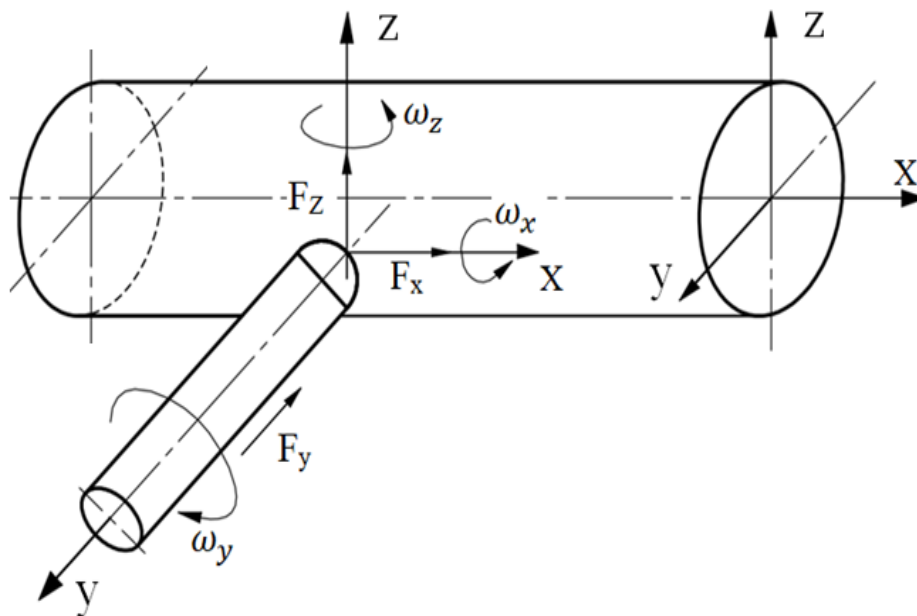


Рис. 1. Кинематическая схема рабочего инструмента при поверхностном пластическом деформировании шаровым индентором  
Fig. 1. Kinematic diagram of the working tool under surface plastic deformation by a spherical indenter

<sup>2</sup>Зайдес С.А. Охватывающее поверхностное пластическое деформирование: учеб. пособ. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2001. 309 с.

### 3. РАЗРАБОТКА НОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Проанализируем схему поверхностного упрочнения на рис. 1. Большинство известных способов обработки основано на возможности перемещения рабочего инструмента в координатах  $X, Y$ . Перемещение инструмента относительно вертикальной оси не имеет смысла, т.к. при этом исчезает зона контакта с заготовкой. Для обеспечения постоянного контакта при движении инструмента в направлении оси  $Z$  необходима другая форма рабочей зоны инструмента, например, в виде стержня или пластины. Подобные формы деформирующих инструментов – цилиндрические гладилки при алмазном выглаживании [13], но они не перемещаются в вертикальной плоскости (в направлении оси  $Z$ ).

В Иркутском государственном техническом университете (ИрГТУ) в период 1974–2013 гг., на основе изучения движений рабочего инструмента были внедрены новые схемы упрочняющей обработки.

Для перемещения рабочего инструмента не вдоль, а поперек оси заготовки (в направлении оси  $Z$ , см. рис. 1) разработано два процесса поверхностного пластического деформирования: осциллирующее выглаживание [14] и поперечная обкатка цилиндрической заготовки гладкими плитами [15].

Схема осциллирующего выглаживания цилиндрических деталей представлена на рис. 2. В качестве рабочего инструмента использована пластина, имеющая скругление на одном из торцов по радиусу ( $r$ ). Эта часть пластины является рабочим элементом, который прижимается к вращающейся обрабатываемой заготовке диаметром  $d_3$ . Пластина может поворачиваться относительно вертикальной плоскости на некоторый угол  $\alpha$  (см. рис. 2), а также совершать осциллирующие вертикальные движения относительно оси заготовки и перемещаться в осевом направлении по направлению подачи  $S$ .

К достоинству осциллирующего выглаживания следует отнести не только высокое качество поверхностного слоя после обработки, но и высокую стойкость рабочего инструмента и возможность формирования регулярного микрорельефа на поверхности упрочняемых деталей [16].

Объемные характеристики и взаимное расположение микрорельефа зависят от отношения  $i$  [18]:

$$i = n_{\text{дв.х}} / n_3 = [i] + \{i\}, \quad (1)$$

где  $[i]$  – целая часть числа  $i$ , а  $\{i\}$  – дробная часть числа  $i$ ,  $n_{\text{дв.х}}$  – частота осцилляции рабочего инструмента,  $n_3$  – частота вращения заготовки.

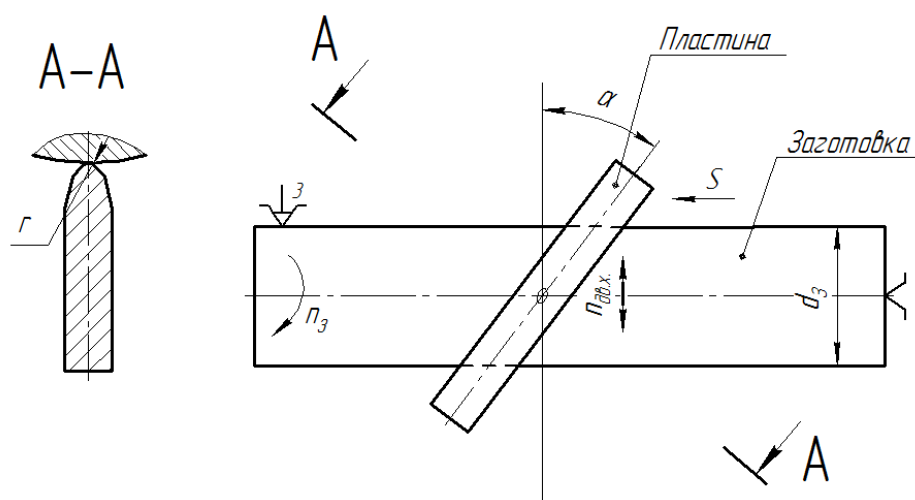


Рис. 2. Схема процесса осциллирующего выглаживания цилиндрических деталей  
Fig. 2. Process diagram of the oscillating smoothing of cylindrical parts



Целая часть численного значения  $\{i\}$  показывает, сколько раз длина волны  $\lambda$  укладывается по длине окружности поперечного сечения заготовки, а дробная  $\{i\}$  показывает величину смещения канавок относительно друг друга при каждом последующем ее обороте:

$$\lambda = v_3 \cdot T; \quad (2)$$

$$v_3 = \pi \cdot d_3 \cdot n_3; \quad (3)$$

$$T = \frac{1}{n_{дв.х}}, \quad (4)$$

где  $v_3$  – скорость вращения заготовки;  $T$  – период осцилляции деформирующего элемента.

На рис. 3 приведены схемы взаиморасположения канавок в зависимости от значений  $\{i\}$  ( $a$  – амплитуда). При  $\{i\}$  равно нулю ( $i$  равно целому числу) смещение канавок отсутствует (см. рис. 3 а). Если  $\{i\} = 0,5$ , то канавки смещаются при каждом последующем обороте заготовки на половину длины волны  $\lambda$  (см. рис. 3 б). При  $0,5 > \{i\} > 0$  канавки располагаются по схеме рис. 3 в (переплетаются).

Схема упрочняющего процесса, основанного на поперечной обкатке заготовки гладкими плитами, представлена на рис. 4. Поперечная обкатка гладкими плитами

представляет собой перспективную технологию финишной отделочно-упрочняющей обработки металлов давлением, позволяя обработать детали типа дисков, тонких коротких осей и валиков [17]. Отличительной особенностью упрочняющей обработки на гладких плитах являются высокая производительность процесса, возможность автоматизации технологического процесса, отсутствие необходимости закрепления детали перед обработкой, отсутствие центральных отверстий, доступность полной обработки цилиндрической поверхности без переустановки детали, отсутствие изгиба при упрочнении, возможность обработки тонких (мало жестких) деталей.

Процесс поперечной обкатки гладкими плитами аналогичен процессу поперечно-клиновой прокатки [18–20]. Основными параметрами прокатки данного вида являются степень обжатия и геометрия инструмента. В процессе поперечной обкатки инструмент имеет вид гладкой плиты с малым углом заходной части  $\alpha_1$  (рис. 4). Малый угол  $\alpha_2$  в выходной части инструмента служит для уменьшения концентрации напряжения при выходе детали из зоны обработки. Поэтому для процесса поперечной обкатки основным параметром режима обработки является степень относительного обжатия  $Q$  [17].

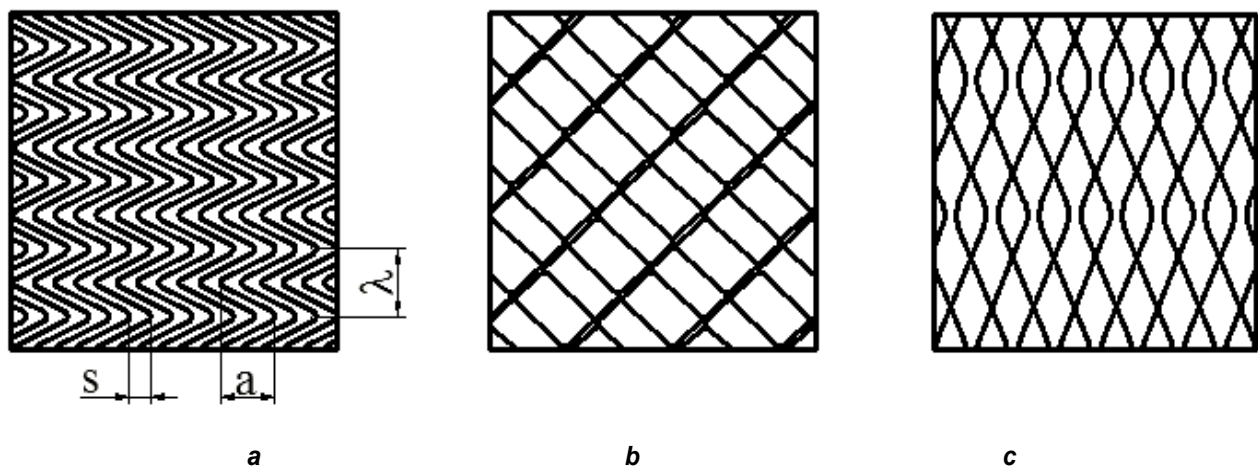


Рис. 3. Зависимость формы микрорельефа поверхностного слоя от величины  $\{i\}$ :

$a - \{i\} = 0$ ;  $b - \{i\} = 0,5$ ;  $c - \{i\} = 0,25$

Fig. 3. Dependence of the surface layer microrelief shape on the value of  $\{i\}$   $a - \{i\} = 0$ ;  $b - \{i\} = 0.5$ ;  $c - \{i\} = 0.25$

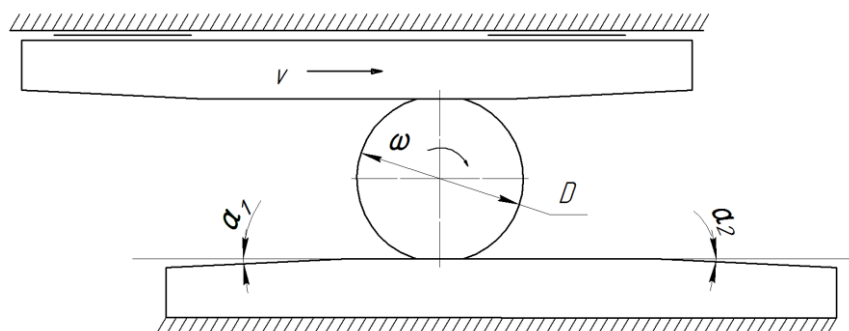


Рис. 4. Схема процесса поперечной обкатки гладкими плитами  
 Fig. 4. Process diagram of transverse burnishing by smooth plates

$$Q = \frac{F_{II} - F_{III}}{F_{III}} = \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right) \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $F_u$  – площадь исходного сечения заготовки;  $F_{пр}$  – площадь поперечного сечения заготовки после обкатки,  $D$  – исходный диаметр заготовки;  $d$  – диаметр заготовки после обкатки.

Кинематика процесса поперечной обкатки гладкими плитами и режимы обработки изложены в работе [17]. Рассматриваемый процесс отделочно-упрочняющей обработки обкаткой плоскими плитами является новым видом поверхностного пластического деформирования.

**Изменение оси вращения рабочего инструмента.** При обкатке цилиндрических поверхностей вращение деформирующего ролика осуществляется относительно оси X (рис. 5). Для повышения эффективности упрочнения предложена новая кинематика движения – вращение ролика относительно вертикальной оси Y (см. рис. 5). Здесь  $P$  – сила, действующая на обрабатываемую поверхность,  $R$  – радиус ролика,  $l$  – расстояние между точками контакта ролика с заготовкой.

В практике ППД известны и широко используются две схемы упрочняющей обработки: упрочнение по схеме качения рабочего инструмента (см. рис. 5 а) и упрочнение по схеме скольжения (см. рис. 5 б). Последнюю схему значительно реже используют на практике, т.к. трение скольжения в зоне контакта приводит к большим тепловым процессам, а сам инструмент интенсивно изнашивается. Однако если оце-

нить эти две схемы упрочнения с точки зрения механики процесса и возможности деформационного искажения микроструктуры, то обработка по схеме скольжения представляется более эффективной.

Техническая идея по интенсификации напряженного состояния в очаге деформации заключается в изменении кинематики рабочего инструмента, которая будет усиливать искажение зеренной структуры материала [17]. Предлагается вращать деформирующий ролик не относительно горизонтальной оси, а относительно вертикальной (см. рис. 5 с). В этом случае пластический отпечаток от ролика на поверхности детали, представляющий собой фигуру в виде эллипса, постоянно изменяет ориентацию большой и малой оси. При вращении ролика вокруг вертикальной оси у-у происходит наложение пластических полей разных ориентаций по направлению, что должно способствовать «перемешиванию» структуры в поверхностном слое.

Если совместить два ролика вместе и вращать их также относительно оси у-у (см. рис. 5 d), то эффективность обработки должна быть еще выше, т.к. в процессе деформирования участвует не два, а четыре очага деформации на каждый оборот ролика.

На рис. 6 показано влияние схем деформирования на максимальное эквивалентное остаточное напряжение ( $\sigma_{\text{экв.}}$ ). При ППД качением (простое обкатывание, см. рис. 6 а) происходит минимальное искажение структуры. При условии ППД скольжением (см. рис. 6 б) возникает боль-

шое трение, которое приводит к повышению интенсивности напряжения в зоне деформации. При ППД с вращением ролика относительно своей диаметральной оси у-у (см. рис. 6 с) за счет разных положений очага деформации напряжения усиливаются. Наиболее эффективный результат получен при ППД с вращением двух роликов относительно оси у-у (см. рис. 6 d). В результате применения конструкции профиля рабочей части двухрадиусного обкатного ролика металл поверхностного слоя детали при обработке находится в условиях сложного напряженного состояния, испытывает пластическую деформацию с накоплением большого числа искажений.

**Вращение рабочего инструмента относительно продольной оси заготовки.** Для создания рабочего усилия прижима деформирующего тела (шарика, ролика и др.) в настоящее время используется множество различных конструкций<sup>1</sup> [11]. Центробежный инструмент более предпочтителен для обеспечения высокой производительности при заданном качестве и стабильности процесса обработки. К недостаткам известных конструкций центробежных раскатников следует отнести большую частоту вращения инструмента. Для генерации рабочего усилия необходи-

мой величины, обеспечиваемого силой инерции при малой массе роликов, требуется большая частота вращения инструмента, которую не обеспечивает стандартное оборудование. Высокая частота вращения приводит также к возникновению вибраций, что, несомненно, сказывается на однородности обработки. Наиболее простым решением проблемы увеличения рабочего усилия, генерируемого центробежной силой, является применение рычажной системы. Такая компоновка центробежного обкатника была разработана и запатентована группой ученых ИргТУ (ныне – ИРНИТУ) [19–23]. На криволинейном рычаге закрепляется деформирующий элемент и груз (рис. 7).

Вся система вращается относительно неподвижной оси заготовки, и сила инерции груза создает момент относительно точки закрепления рычага, который уравнивается моментом рабочего усилия относительно той же точки. При малой длине плеча криволинейного рычага относительно точки закрепления рычага возрастает величина рабочего усилия. Таким образом, деформирующее усилие регулируется соотношением плеч и величины груза. При большой величине груза до-

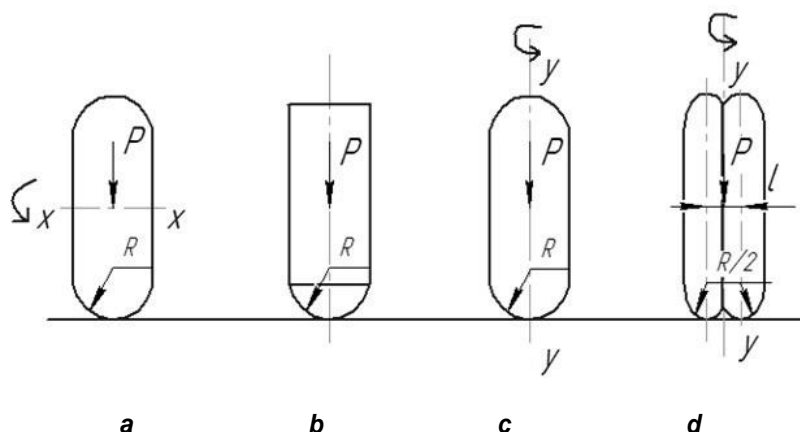


Рис. 5. Схемы нагружения при различных условиях контакта с обрабатываемой поверхностью (x-x, y-y: оси вращения): а – обработка по схеме качения ролика; б – обработка по схеме скольжения ролика; в – обработка при вращении ролика относительно вертикальной оси Y; д – обработка двумя совмещенными роликами, вращающимися относительно вертикальной оси Y

Fig. 5. Loading diagrams for different contact conditions with the machined surface (x-x, y-y: axis of rotation): a – processing according to the roller rolling pattern; b – processing according to the roller sliding pattern; c – processing under roller rotation relative to the vertical axis Y; d – processing by two combined rollers rotating relative to the vertical axis Y



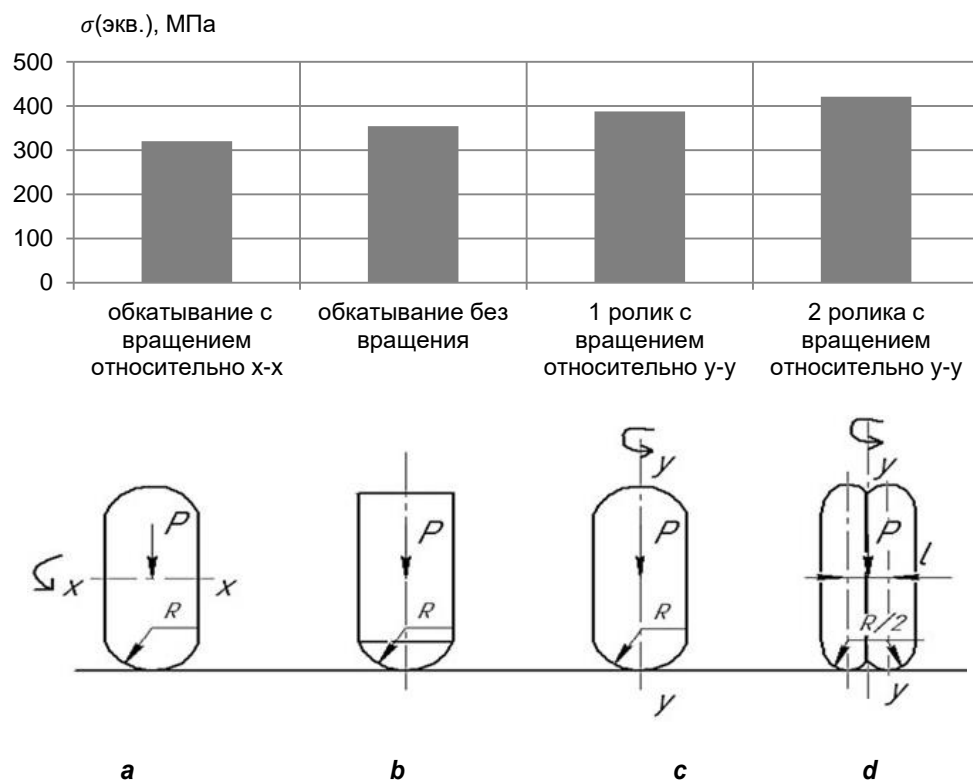


Рис. 6. Влияние схем деформирования на максимальные значения эквивалентных остаточных напряжений: (x-x, y-y: оси вращения): а – обработка по схеме качения ролика; б – обработка по схеме скольжения ролика; с – обработка при вращении ролика относительно вертикальной оси Y; d – обработка двумя совмещенными роликами, вращающимися относительно вертикальной оси Y

Fig. 6. The effect of deformation patterns on the maximum values of equivalent residual stresses: (x-x, y-y: axis of rotation): a – processing according to the roller rolling pattern; b – processing according to the roller sliding pattern; c – processing under roller rotation relative to the vertical axis Y; d – processing by two combined rollers rotating relative to the vertical axis Y

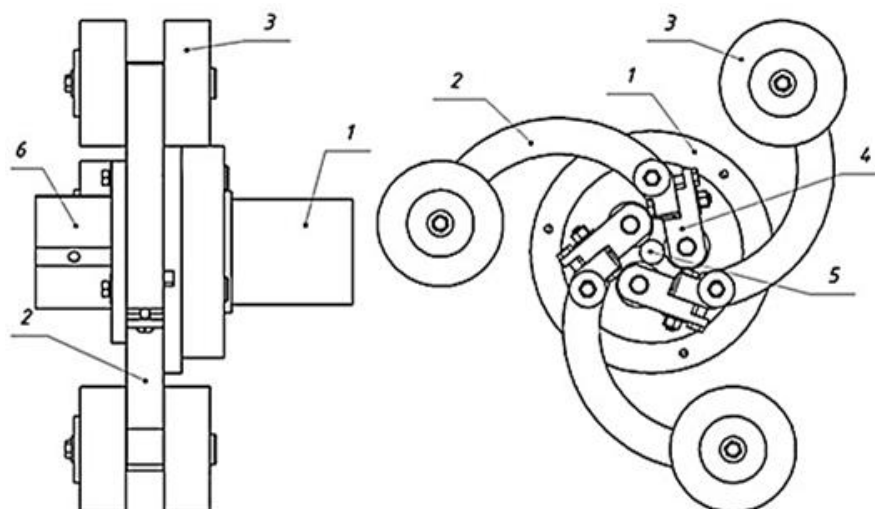


Рис. 7. Центробежный обкатник: 1 – остов и лекало; 2 – рычаг; 3 – груз; 4 – державка с деформирующим роликом; 5 – обкатываемая деталь; 6 – дополнительная опора (защитный кожух убран)

Fig. 7. Centrifugal roller: 1 – core and curve; 2 – lever; 3 – load; 4 – holder with a deforming roller; 5 – rolled part; 6 – additional support (protective housing is removed)



статочные для обработки ППД усилия возникают при частоте вращения, обеспечиваемой стандартным оборудованием. Использование центробежного обкатника позволяет регулировать величину жесткости на изгиб обрабатываемой детали установкой двух дополнительных опор как в конструкции обкатника, так и вне его на станине станка. Усовершенствованная конструкция центробежного обкатника состоит из корпуса 1 с коаксиальным отверстием, в котором размещается заготовка 5. На торцевой части корпуса 1 через  $120^\circ$  расположены три оси, на которых крепятся рычаги 2 с возможностью поворота. На концах короткого плеча каждого из рычагов выполнен паз, где расположен деформирующий ролик 4. На длинном плече каждого рычага на осях крепятся сменные грузы 3. При вращении корпуса на рычаги и грузы действуют силы инерции, поворачивающиеся рычаги 2 относительно осей прижимают деформирующий ролик к заготовке 5. Усилие прижима инструмента к заготовке регулируется уменьшением или увеличением массы грузов и (или) частоты вращения обкатника.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ кинематики локального рабочего инструмента при поверхностном пластическом деформировании показал, что в современной технологии упрочнения используют обычно одну-две степени свободы. Расширить технологические возможности отделочно-упрочняющих процессов удалось за счет использования трехмерного пространства для перемещения рабочего инструмента и сложного вращения инструмента относительно собственной осевой линии. Задействовав дополнительные степени свободы рабочего инструмента, были созданы новые технологические процессы поверхностного пластического деформирования: осциллирующее выглаживание, поперечная обкатка гладкими плитками, центробежная обкатка и др.

#### Библиографический список

1. Нигурей А.И., Макаров И.В., Жидяев А.Н. Особенности создания виртуальных математических моделей пятикоординатных станков // Известия Самарского научного центра РАН. 2017. Т. 19. № 1-2. С. 269–273.
2. Коновалов Е.Г., Чистосердов П.С., Фломенблит А.И. Ротационная обработка поверхностей с автоматической подачей. Минск: Вышэйш. шк., 1976. 190 с.
3. Грановский Г.И. Кинематика резания. М.: Машгиз, 1947. 112 с.
4. Коновалов Е.Г. Основы новых способов металлообработки. Минск: Изд-во АН БССР, 1961. 257 с.
5. Проскуряков Ю.Г. Технология упрочняющей обработки металлов. М.: Машиностроение, 1971. 208 с.
6. Суслов А.Г., Гуров Р.В., Тишевских Е.С. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. № 9. С. 20–22.
7. Бабичев А.П., Бабичев И.А. Основы вибрационной технологии. Изд. 2-е, перераб. и доп. Ростов н/Д.: Изд. центр ДГТУ, 2008. 693 с.
8. Копылов Ю.Р. Динамика процессов виброударного упрочнения. Воронеж: Науч. кн., 2011. 568 с.
9. Рыковский Б.П., Смирнов В.А., Щетинин Г.М. Местное упрочнение деталей поверхностным наклепом. М.: Машиностроение, 1985. 151 с.
10. Зайдес С.А., Исаев А.Н. Технологическая механика осесимметричного деформирования. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. 427 с.
11. Поляк М.С. Технология упрочнения. В 2 т. Т. 2. М.: Машиностроение, 1995. 688 с.
12. Беляев В.Н., Иванов В.П., Ингеманссон А.Р., Исаев А.Н., Киричек А.В., Крайнев Д.В. [и др.]. Эффективные технологии поверхностного пластического деформирования и комбинированной обработки. М.: Изд-во «Спектр», 2014. 403 с.
13. Хворостухин Л.А., Шишкин С.В., Ковалев А.П., Ишмаков Р.А. Повышение несущей способности деталей машин поверхностным упрочнением. М.: Машиностроение, 1988. 141 с.
14. Пат. № 2626522, Российская Федерация, В24В 39/04. Устройство для поверхностного пластического деформирования / С.А. Зайдес, Нгуен Ван Хинь, Фам Дак Фьонг; заявитель и патентообладатель Иркутский национальный исследовательский технический университет. Заявл. 05.04.2016; опубл. 28.07.2017. Бюл. № 22.
15. Пат. № 2600302, Российская Федерация, В21Н 1/18. Устройство для обкатывания цилиндрических изделий плоскими инструментами / С.А. Зайдес, Фам Дак Фьонг; заявитель и патентообладатель Иркутский национальный исследовательский технический университет. Заявл. 16.04.2015; опубл. 20.10.2016. Бюл. № 29.

16. Зайдес С.А., Нгуен Ван Хинь. Оценка качества поверхностного слоя при реверсивном поверхностном пластическом деформировании // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. № 6. С. 34–40. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-6-34-40>
17. Зайдес С.А., Фам Дак Фыонг, Нго Као Кыонг. Новые процессы поверхностного пластического деформирования. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2019. 352 с.
18. Кожевникова Г.В. Теория и практика поперечно-клиновой прокатки. Минск: Беларуская навука, 2010. 291 с.
19. Андреев Г.В., Клушкин В.А., Макушок Е.М., Сегал В.М., Щукин В.Я. Поперечно-клиновая прокатка. Минск: Наука и техника, 1974. 160 с.
20. Щукин В.Я. Основы поперечно-клиновой прокатки. Минск: Наука и техника, 1986. 223 с.
21. Пат. № 2090343, Российская Федерация, В24В

- 39/04. Устройство для упрочнения поверхности цилиндрических деталей / С.А. Зайдес, Д.А. Журавлев, С.А. Кургузов; заявитель и патентообладатель Иркутский государственный технический университет. Заявл. 28.03.1996; опубл. 20.09.1997. Бюл. № 26.
22. А.с. № 1719191, СССР, В24В 39/04. Устройство для упрочнения поверхности цилиндрических деталей / С.А. Зайдес, А.К. Скороходов, С.А. Кургузов; заявитель и патентообладатель Иркутский политехнический институт. Заявл. 27.03.1990; опубл. 15.03.1992. Бюл. № 10.
23. Пат. № 142561, Российская Федерация, В24В 39/04. Устройство для отделочно-упрочняющей обработки валов центробежного типа / С.А. Зайдес, А.В. Горбунов; заявитель и патентообладатель Иркутский государственный технический университет. Заявл. 11.12.2013; опубл. 27.06.2014. Бюл. № 18.

### References

1. Nigurej AI, Makarov IV, Zhidyayev AN. Features of creation the virtual kinematic models of five-coordinate machine tools. *Izvestiya samarskogo nauchnogo centra rossijskoj akademii nauk* = *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2017;19(1-2):269–273. (In Russ.)
2. Konovalov EG, Chistoserdov PS, Flomenblit AI. *Rotary treatment of surfaces with automatic feed*. Minsk: Vyshejschaya shkola; 1976. 190 p.
3. Granovskij GI. *Kinematics of cutting*. Mosco: Mashgiz; 1947. 112 p. (In Russ.)
4. Konovalov EG. *Fundamentals of new methods of metalworking*. Minsk: Academy of Sciences of Belorussian Soviet Socialist Republic; 1961. 257 p.
5. Proskuryakov YuG. *Hardening and calibrating technology of metalworking*. Moscow: Mashinostroenie; 1971. 208 p. (In Russ.)
6. Suslov AG, Gurov RV, Tischevskih ES. Finishing-strengthening processing by surface plastic deformation. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* = *Strengthening Technologies and Coatings*. 2008;9:20–22. (In Russ.)
7. Babichev AP, Babichev IA. *Fundamentals of vibration technology*. Rostov-na-Donu: Don State technical University; 2008. 693 p. (In Russ.)
8. Kopylov YuR. *Dynamics of vibration shock hardening*. Voronezh: Nauchnaya kniga; 2011. 568 p. (In Russ.)
9. Rykovskij BP, Smirnov VA, Shchetinin GM. *Local hardening of parts by surface hardening*. Moscow: Mashinostroenie; 1985. 151 p. (In Russ.)
10. Zajdes SA, Isaev AN. *Technological mechanics of axisymmetric deformation*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2007. 427 p. (In Russ.)
11. Polyak MS. *Hardening technology*. Moscow: Mashinostroenie; 1995. 688 p. (In Russ.)
12. Belyaev VN, Ivanov VP, Ingemansson AR, Isaev AN, Kirichek AV, Krajnev DV, et. al. *Effective technologies of surface plastic deformation and combined processing*. Moscow: Spektr; 2014. 403 p. (In Russ.)
13. Hvorostuhin LA, Shishkin SV, Kovalev AP, Ishmakov RA. *Increasing bearing capacity of machine parts by surface hardening*. Moscow: Mashinostroenie; 1988. 141 p. (In Russ.)
14. Zajdes SA, Nguen Van Hin', Fam Dak Fyong. *Surface plastic deformation device*. Patent RF, no. 2626522; 2017. (In Russ.)
15. Zajdes SA, Fam Dak Fyong. *Device for rolling cylindrical products with flat tools* Patent RF, no. 2600302; 2016. (In Russ.)
16. Zajdes SA, Nguen Van Hin'. Evaluation of surface layer quality in reversible surface plastic deformation. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2016;6:34–40. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-6-34-40>
17. Zajdes SA, Fam Dak Fyong, Ngo Cao Cuong. *New processes of surface plastic deformation*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2019. 352 p. (In Russ.)
18. Kozhevnikova GV. *Theory and practice of cross-wedge rolling*. Minsk: Belaruskaya navuka; 2010. 291 p.
19. Andreev GV, Klushkin VA, Makushok EM, Segal VM, Shchukin VYa. *Cross-wedge rolling*. Minsk: Nauka i tekhnika; 1974. 160 p.
20. Shchukin VYa. *Basics of cross-wedge rolling*. Minsk: Nauka i tekhnika; 1986. 223 p.
21. Zajdes SA, Zhuravlev D.A., Kurguzov SA. *Device for hardening the surface of cylindrical parts*. Patent RF, no. 2090343; 1997. (In Russ.)
22. Zajdes SA, Skorohodov AK, Kurguzov SA. *Device for hardening the surface of cylindrical parts*. Copyright certificate RF, no. 1719191; 1992. (In Russ.)
23. Zajdes SA, Gorbunov AV. *Device for finishing and hardening treatment of centrifugal shafts*. Patent RF, no. 142561; 2014. (In Russ.)



#### **Критерии авторства**

Зайдес С.А. получил и оформил научные результаты и несет ответственность за плагиат.

#### **Конфликт интересов**

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ**

**Зайдес Семен Азикович,**  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой машиностроительных  
технологий и материалов,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;  
✉ e-mail: zsa@istu.edu

#### **Authorship criteria**

Zaides S.A. has obtained and formalized the scientific results and bears the responsibility for plagiarism.

#### **Conflict of interests**

The author declares that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by the author.

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHOR**

**Semen A. Zaides,**  
Dr. Sci. (Eng), Professor,  
Head of the Department of Mechanical Engineering  
Technologies and Materials,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,  
✉ e-mail: zsa@istu.edu



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.98.042

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-874-883>

## Производительность зачистки поверхности лепестковым кругом после дробеударного формообразования

© Ле Чи Винь\*, В.П. Кольцов\*, Д.А. Стародубцева\*, Фунг Суан Шон\*\*

\*Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

\*\*Ханойский индустриальный институт, г. Ханой, Вьетнам

**Резюме:** Цель – разработка математической модели формирования количества снимаемого материала при зачистке лепестковым кругом дробеобработанной поверхности, обеспечивающей стабильное качество поверхности по параметру шероховатости. При формообразовании длинномерных панелей и обшивок широко используется дробеударная обработка. Вследствие дробеударного воздействия на обрабатываемой поверхности образуется специфическая микрогеометрия, характерной особенностью которой являются многочисленные отпечатки дроби различного диаметра и глубины. Наличие этих отпечатков вызывает возрастание параметров шероховатости поверхности. Поэтому после дробеударной обработки обязательным требованием является выполнение зачистки поверхности лепестковым кругом для частичного удаления следов воздействия дроби, которые по величине значительно превышают впадины микронеровностей. Величина назначаемого припуска на зачистку зависит от требований к качеству поверхности детали. Вследствие зачистки на обрабатываемой поверхности образуется новый микрорельеф в виде комбинации следов воздействия абразивных зерен лепестков круга и остатков отпечатков от дробеударной обработки. При этом глубина оставляемых отпечатков дроби даже после зачистки значительно больше значения величин впадин микронеровностей поверхности, образованной в результате воздействия зерен лепестков круга. Так как отпечатки имеют сферическую форму со значительно большим радиусом кривизны, чем их глубины, они оказывают особое влияние на объем снимаемого металла при росте величины припуска. В работе приведено аналитическое описание съема материала с поверхности, обработанной дробью при зачистке лепестковым кругом, на основе анализа микрогеометрии поверхности.

**Ключевые слова:** дробеударное формообразование, степень покрытия, зачистка лепестковым кругом, отпечатки дроби, объем снимаемого материала, припуск

**Информация о статье:** Дата поступления 27 мая 2019 г.; дата принятия к печати 11 июля 2019 г.; дата онлайн-размещения 31 октября 2019 г.

**Для цитирования:** Ле Чи Винь, Кольцов В.П., Стародубцева Д.А., Фунг Суан Шон. Производительность зачистки поверхности лепестковым кругом после дробеударного формообразования. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т. 23. № 5. С. 874–883. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-874-883>

## Productivity of flap wheel grinding after shot peening

Le Tri Vinh\*, Vladimir P. Koltsov\*, Daria A. Starodubtseva\*, Phung Xuan Son\*\*

\*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

\*\*Hanoi industrial Institute, Hanoi, Vietnam

**Abstract:** The purpose of the paper is to develop a mathematical model of removed material amount formation when flap wheel grinding of the surface subjected to shot blasting that provides a stable quality of the surface in terms of the roughness parameter. Shot peening is widely used when forming long panels and skins. Shot peening results in the formation of a specific microgeometry of the treated surface, whose feature is numerous shot indents of various diameters and depths. The presence of these indents leads to the increase in surface roughness parameters. Therefore, after shot peening it is mandatory to perform surface grinding by a flap wheel for partial removal of indents – the results of shot peening which are much larger than microroughness dents. The value of the assigned allowance for grinding depends on the requirements for the part surface quality. As a result of grinding, a new microrelief is formed on the treated surface in the form of a combination of impact traces of flap wheel abrasive grains and the remained indents of shot blasting. However, the value of the depth of remained shot dents even after grinding is much larger than the values of surface roughness dents formed as a result of the impact of flap wheel grains. Since the indents have a spherical shape with the curvature radius much larger than their depths they have a special effect on the amount of removed metal with the allowance growth. The paper gives an analytical description of material removal from the shot peened surface when grinding with a flap wheel on the basis of the analysis of surface microgeometry.

**Keywords:** shot peening, coverage degree, flap wheel grinding, indents, volume of removed material, allowance

**Information about the article:** Received May 27, 2019; accepted for publication July 11, 2019; available online October 31, 2019.

**For citations:** Le Tri Vinh, Koltsov V.P., Starodubtseva D.A., Phung Xuan Son. Productivity of flap wheel grinding after shot peening. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2019;23(5):874–883. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-874-883>

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Дробеударная обработка является одним из важнейших этапов комплексной технологии формообразования крупногабаритных поверхностей панелей и обшивок. Метод позволяет добиться требуемого теоретического контура путем деформирования поверхности потоком дроби. В последующем обязательном этапе в комплексную технологию формообразования включена операция зачистки абразивным лепестковым кругом, она предназначена для улучшения качества исходной поверхности, полученной на этапе дробеударного формообразования, путем удаления величины припуска [1–3].

При воздействии потока дроби на поверхности обрабатываемой детали формируется специфическая микро топография, характеризующаяся многочисленными отпечатками дроби различного диаметра и глубины с хаотичным (случайным) характером распределения по поверхности [4–15].

Совокупность таких отпечатков принято характеризовать степенью покрытия [16–18]. Последняя является важным показателем процесса дробеударной обработки и характеризуется отношением суммарной площади отпечатков дроби на рассматриваемом участке к общей площади этого участка, а выражается в процентном соотношении. Таким образом, для дробеударного формообразования (в отличие от процесса дробеметного упрочнения) характерно неполное покрытие поверхности следами обработки, порядка 10–40%.

Многочисленные результаты экспериментальных исследований по анализу микро топографии дробеобработанных образцов показали, что при невысокой степени покрытия (до 40%) наплывы металла на поверхности вокруг отпечатков дроби фактически не превышают высоты исходного микрорельефа, полученного фрезерованием, также практически отсутствует наложение отпечатков дроби (рис. 1) [19, 20].

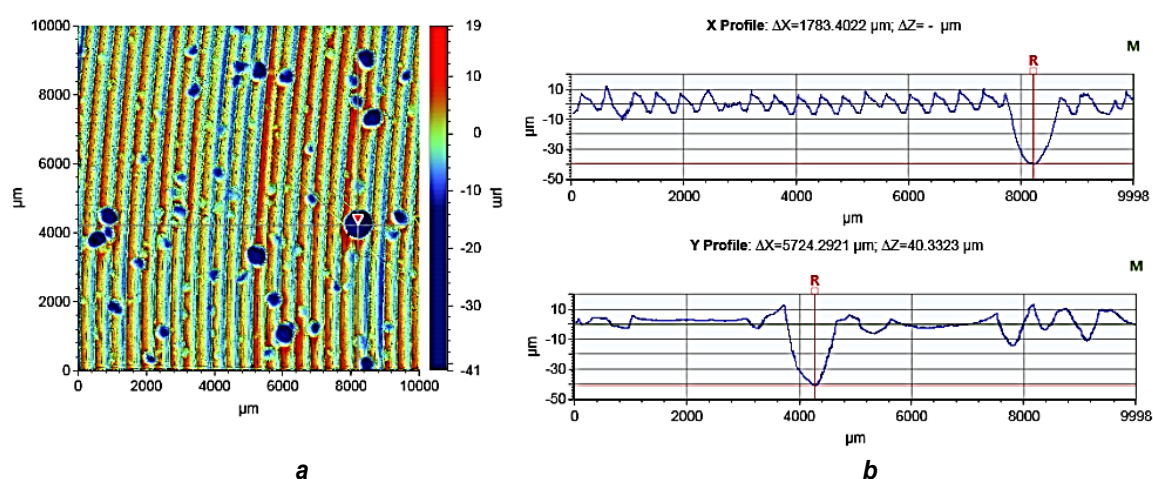


Рис. 1. Результат сканирования участка поверхности образца после дробеударного формообразования: а – микро топография поверхности образца (в плане);

б – профиль поверхности в нормальном сечении

Fig. 1. Scanning result of the sample surface area after shot peening: a – microtopography of the sample surface (in the plan); b – surface profile in a normal section



При зачистке дробеобработанной поверхности удалению подлежат не все отпечатки, а лишь некоторая часть. Причиной является полная или частичная потеря формы детали в случае удаления всех отпечатков. Общую глубину отпечатков стараются обеспечить такой, чтобы она не превышала высоты микронеровностей профиля, полученного при фрезеровании.

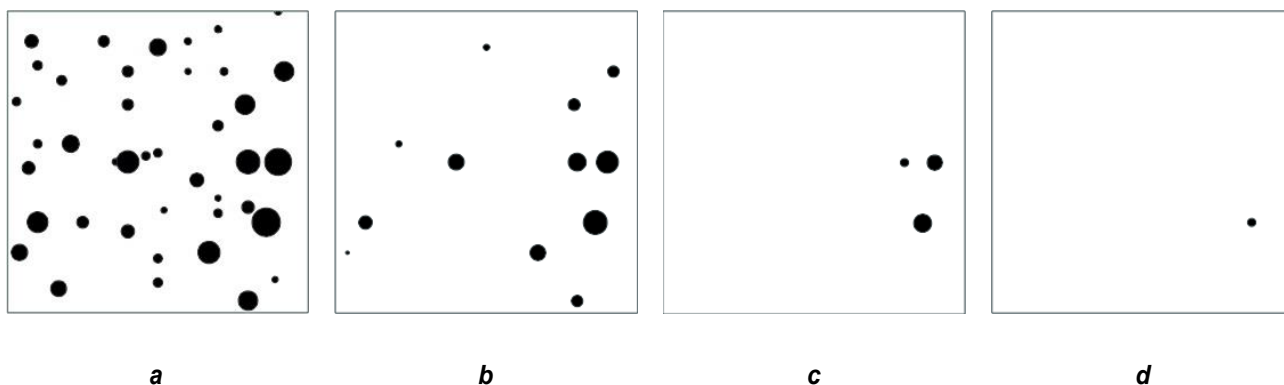
Если рассматривать этапы формирования микротопографии поверхности при выполнении последовательности технологических операций «дробеударное формообразование – зачистка», то следует отметить неравномерный характер удаления материала с обработанной дробью поверхности. При зачистке в несколько проходов вначале происходит срезание незначительного количества наплыва металла вокруг отпечатков со слоем микрорельефа от предыдущей обработки (фрезерование), а при последующих проходах снимаются (счищаются) и последующие слои материала с уменьшением глубин отпечатков дробы. При этом с увеличением толщины снимаемого слоя материала при зачистке резко уменьшается степень покрытия поверхности отпечатками дробы (рис. 2).

На рис. 2 представлены типичные картины дробеобработанной поверхности, при этом исходная степень покрытия поверхности отпечатками дробы составляет

7,81% (см. рис. 2 а), при удалении припуска 0,02 мм степень покрытия снижается и составляет 2,37% (см. рис. 2 б), при дальнейшем увеличении припуска 0,04 мм степень покрытия – 0,58%, и 0,06 мм – 0,06%, соответственно.

С учетом того, что профиль отпечатков дробы имеет близкую к сферической форму [6], и глубина отпечатков (десятки микрометров) значительно превышает впадины исходного микрорельефа, суммарный объем пустот отпечатков заметно сказывается на объеме снимаемого металла. Таким образом, увеличение количества проходов с одинаковым припуском при зачистке приводит к резкому увеличению доли снимаемого объема материала. При этом при переходе от одного прохода к другому возрастает количество зерен лепестков, одновременно участвующих в процессе резания, что, в свою очередь, сказывается на постоянном росте сил и мощности резания. Силы резания и мощность стабилизируются по мере удаления следов отпечатков дробы.

В связи с этим возникла задача разработки математической модели формирования количества снимаемого материала при зачистке лепестковым кругом дробеобработанной поверхности, обеспечивающей стабильное качество поверхности по параметру шероховатости.



**Рис. 2. Процесс формирования микротопографии поверхности при выполнении последовательности технологических операций «дробеударное формообразование – зачистка», где: а – отпечатки до зачистки; б, с, d – оставшиеся отпечатки по мере приращения припуска**

**Fig. 2. Formation of surface microtopography when performing a sequence of technological operations of shot peening – grinding, where а – indents before grinding; б, с, d – remained indents as the allowance increases**



## 2. ФОРМИРОВАНИЕ СЪЕМА МЕТАЛЛА ПРИ ЗАЧИСТКЕ ЛЕПЕСТКОВЫМ КРУГОМ ДРОБЕОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

На рис. 3 схематически представлен микропрофиль поверхности после механической обработки с изображением отпечатка дроби и последующей зачистки.

На рис. 3 внесены следующие обозначения:  $R_s$  – радиус дроби;  $P_0$  – средняя плоскость после фрезерования;  $P_i$  – средняя плоскость после зачистки без учета отпечатков дроби;  $h_i$  – глубина  $i$ -го отпечатка дроби от исходной средней плоскости  $P_0$ ;  $h'_i$  – глубина  $i$ -го отпечатка дроби от исходной средней плоскости  $P_0$  до средней плоскости  $P_i$ ;  $h''_i$  – расстояние от средней плоскости  $P_i$  до дна отпечатка дроби;  $r_i$  – радиус  $i$ -го отпечатка дроби в плане на исходной средней плоскости  $P_0$ ;  $r_{iz}$  – радиус  $i$ -го отпечатка дроби в плане на средней плоскости  $P_i$ ;  $V'_i$  – объем усеченной части  $i$ -го отпечатка дроби между средними плоскостями  $P_0$  и  $P_i$ ;  $V''_i$  – объем  $i$ -го отпечатка дроби после зачистки от средней плоскости  $P_i$ .

Назовем  $F_b$  контрольной площадью определения степени покрытия поверхности отпечатками дроби.

Учитывая то, что наплыв материала вокруг отпечатков после дробеударной обработки не превышает высоты исходного микрорельефа поверхности, объем материала обрабатываемой детали после дробеударной обработки  $Q_{peen}$  на контрольной площади определяется как:

$$Q_{peen} = \rho \cdot F_b \cdot H - \rho \cdot \sum_{i=1}^n V_i, \quad (1)$$

где  $\rho$  – объемный вес материала обрабатываемой детали;  $H$  – толщина обрабатываемой детали;  $n$  – количество отпечатков на контрольной площади после дробеударной обработки;  $V_i$  – объем лунки  $i$ -го отпечатка.

После зачистки лепестковым кругом все еще остается некоторая часть отпечатков (см. рис. 2), при этом масса снимаемого материала при зачистке  $Q_{gr}$  на контрольной площади может быть определена следующим выражением:

$$Q_{gr} = \rho \cdot F_b \cdot (H - a) - \rho \cdot \sum_{i=1}^m V''_i, \quad (2)$$

где  $a = h'_i$  есть припуск, удаляемый при зачистке;  $m$  – количество отпечатков дроби, оставшихся после зачистки (определяется при измерении глубин отпечатков после дробеударной обработки, при этом  $m < n$ ,  $m \in n$ ).

Таким образом, количество снимаемого материала  $Q_m$  (в кг) при зачистке определяется по следующим формулам:

$$Q_m = Q_{peen} - Q_{gr}, \quad (3)$$

$$Q_m = \rho \cdot F_b \cdot a - \rho \cdot \sum_{i=1}^n V_i + \rho \cdot \sum_{i=1}^m V''_i. \quad (4)$$

При этом объем снимаемого материала при зачистке дробеобработанной поверхности  $V_m$  рассчитывается следующим образом:

$$V_m = F_b \cdot a - \sum_{i=1}^n V_i + \sum_{i=1}^m V''_i. \quad (5)$$

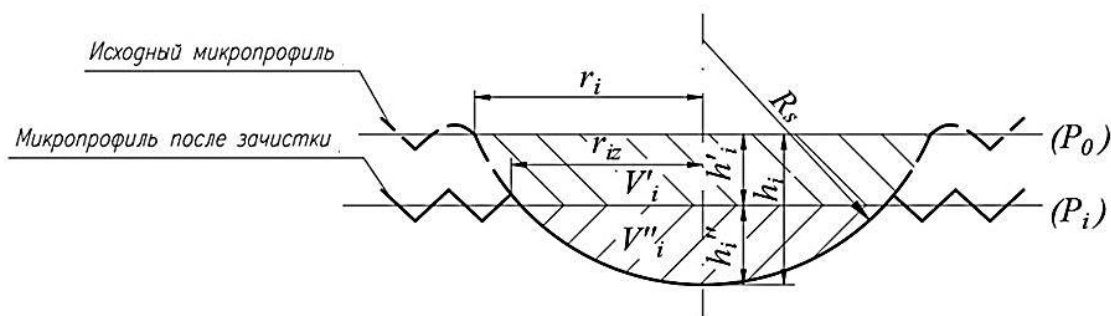


Рис. 3. Микропрофиль поверхности после обработки дробью и последующей зачистки  
 Fig. 3. Surface microprofile after shot peening and subsequent grinding



Учитывая, что форма отпечатка дроби близка к сферической [6], получаем выражение для определения количества снимаемого материала при зачистке дробеобработанной поверхности:

$$Q_m = \rho \cdot \left( F_b \cdot a - \sum_{i=1}^n \pi \cdot h_i^2 \left( R_s - \frac{1}{3} h_i \right) + \sum_{i=1}^m \pi \cdot (h_i'')^2 \cdot \left( R_s - \frac{1}{3} h_i'' \right) \right) \quad (6)$$

Величина  $h_i''$  для количества отпечатков  $m$  связана с припуском  $a$  и может быть определена исходя из глубины отпечатка после дробеударной обработки и толщины снимаемого слоя материала (припуска):

$$h_i'' = h_i - a. \quad (7)$$

Таким образом, масса снимаемого материала может быть определена следующей зависимостью:

$$Q_m(a) = \rho \cdot \left( F_b \cdot a - \sum_{i=1}^n \pi \cdot h_i^2 \left( R_s - \frac{1}{3} h_i \right) + \sum_{i=1}^m \pi \cdot (h_i - a)^2 \cdot \left( R_s - \frac{1}{3} (h_i - a) \right) \right). \quad (8)$$

Из представленной зависимости (8) следует, что задача определения массы снимаемого материала при зачистке упрощается, т.к. не требуется измерения глубины отпечатков дроби, оставшихся после зачистки, допустимо использовать ранее полученные значения на этапе дробеударной обработки.

Формула (8) применяется для определения общей массы удаляемого материала при заданной величине припуска  $a$ , при последующих рабочих ходах лепесткового круга с иной величиной припуска, например,  $b$  – масса определяется следующим образом:

$$Q_m(b) = Q_m(a + b) - Q_m(a); \quad (9)$$

$$Q_m(b) = \rho \cdot \left( F_b \cdot b + \sum_{i=1}^k \pi \cdot (h_i - a - b)^2 \cdot \left( R_s - \frac{1}{3} (h_i - a - b) \right) - \sum_{i=1}^m \pi \cdot (h_i - a)^2 \cdot \left( R_s - \frac{1}{3} (h_i - a) \right) \right), \quad (10)$$

где  $k$  – количество отпечатков дроби, оставшихся после последующего рабочего хода при зачистке с величиной припуска  $b$ .

Однако при зачистке с постоянной величиной припуска для каждого рабочего хода общая толщина снимаемого слоя материала является функцией от скорости съема металла лепестковым кругом, продольной подачи и числа рабочих ходов:

$$Q_m(a) = \frac{B}{S} \cdot v \cdot p, \quad (11)$$

где  $B$  – ширина лепесткового круга;  $S$  – продольная подача;  $v$  – скорость снятия слоя металла при зачистке (в мм/с) за один рабочий ход;  $p$  – количество рабочих ходов.

Величина скорости снятия слоя металла может быть определена экспериментальным либо теоретическим путем в зависимости от свойств материала обрабатываемой детали, угловой скорости и характеристик лепесткового круга.

В этом случае масса снимаемого материала в ходе зачистки определяется следующим выражением:

$$Q_m = \rho \cdot \left( F_b \cdot \frac{B}{S} \cdot v \cdot p - \sum_{i=1}^n \pi \cdot h_i^2 \left( R_s - \frac{1}{3} h_i \right) + \sum_{i=1}^m \pi \cdot \left( h_i - \frac{B}{S} \cdot v \cdot p \right)^2 \cdot \left( R_s - \frac{1}{3} \left( h_i - \frac{B}{S} \cdot v \cdot p \right) \right) \right). \quad (12)$$

Поскольку одним из важнейших контрольных параметров процесса дробеударной обработки является степень покрытия поверхности  $K$  [18] (зависит от размера отпечатков дробы в плане), ее требуется учесть при дальнейших расчетах.

$$K_{peen} = \frac{\pi \cdot \sum_{i=1}^n r_i^2}{F_b} \cdot 100\%; \quad (13)$$

$$K_{gr} = \frac{\pi \cdot \sum_{i=1}^m r_{iz}^2}{F_b} \cdot 100\%, \quad (14)$$

где  $K_{peen}$ ,  $K_{gr}$  – степень покрытия поверхности после дробеударной обработки и зачистки лепестковым кругом, соответственно.

Тогда масса снимаемого материала за весь цикл зачистки может быть определена размерами отпечатков в плане и представлена следующим образом:

$$\begin{aligned} Q_m = & \rho \cdot \left( F_b \cdot \frac{B}{S} \cdot v \cdot p - \right. \\ & - \sum_{i=1}^n \pi \cdot \left( R_s - \sqrt{R_s^2 - r_i^2} \right)^2 \cdot \\ & \cdot \left( R_s - \frac{1}{3} \left( R_s - \sqrt{R_s^2 - r_i^2} \right) \right) + \\ & + \sum_{i=1}^m \pi \cdot \left( R_s - \frac{B}{S} \cdot v \cdot p - \sqrt{R_s^2 - r_i^2} \right)^2 \cdot \\ & \cdot \left( R_s - \frac{1}{3} \left( R_s - \frac{B}{S} \cdot v \cdot p - \sqrt{R_s^2 - r_i^2} \right) \right) \Bigg). \end{aligned} \quad (15)$$

Очевидно, что съем металла при зачистке зависит не только от величины продольной подачи, скорости снятия металла лепестками, количества рабочих ходов, но также и от степени покрытия поверхности отпечатками дробы.

На рис. 4–6 показаны типичные результаты расчета степени покрытия по-

верхности отпечатками дробы, объема снимаемого материала в зависимости от прироста толщины снимаемого слоя, а также общего объема снимаемого материала в зависимости от припуска (для наглядности представляемых данных расчеты проведены по объему удаляемого материала).

Расчет выполнен для базовой площади  $15 \times 15$  мм [6] образца из алюминиевого сплава В95. Согласно технологии изготовления крупных авиационных панелей и обшивок, образец фрезерован до чистоты поверхности  $Ra$  0,4, после фрезерования обработан шаровой стальной дробью диаметром 3,5 мм на дробеметной установке контактного типа УДФ-4М с режимом обработки, где частота вращения дробеметного колеса 1200 об/мин, продольная подача 2,5 м/мин за один рабочих ход. После дробеударной обработки поверхность образца была отсканирована при использовании трехмерного оптического профилометра для получения необходимых данных об отпечатках дробы (в данном случае насчитано 120 отпечатков с глубиной лунки от 3,2 до 90,5 мкм, степень покрытия отпечатками после дробеударной обработки составила 10,66%).

Исходя из данных рис. 5, очевидно, что из-за различных размеров отпечатков после дробеударного формообразования объем снимаемого материала при одинаковом припуске за проход не постоянен и меняется по логарифмической зависимости. Однако (согласно рис. 6) общий объем снимаемого материала практически прямо пропорционален припуску, удаляемому при зачистке. Это объясняется тем, что в данном случае из-за низкой исходной степени покрытия после дробеударного формообразования (порядка 10,66%) и резкого снижения последней при увеличении припуска (см. рис. 5) объем пустот оставшихся отпечатков после каждого последующего прохода незначительный по сравнению с общим объемом материала, что несущественно влияет на общий объем снимаемого материала.

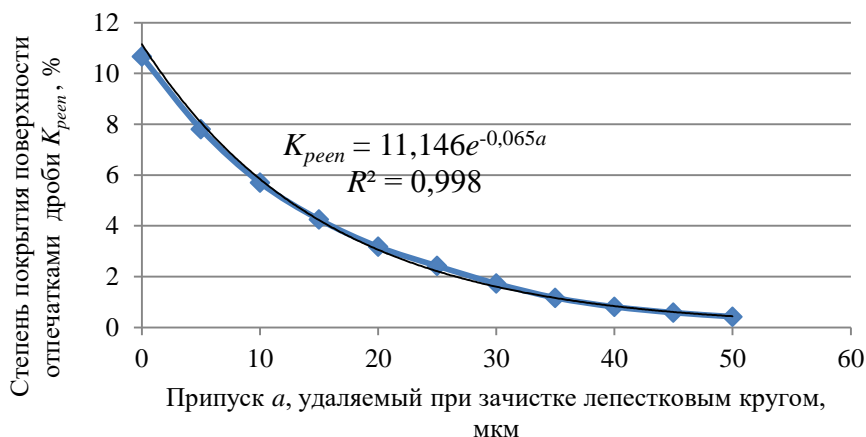


Рис. 4. Зависимость степени покрытия поверхности отпечатками дроби от величины припуска  
Fig. 4. Surface coverage degree with shot indents vs allowance value

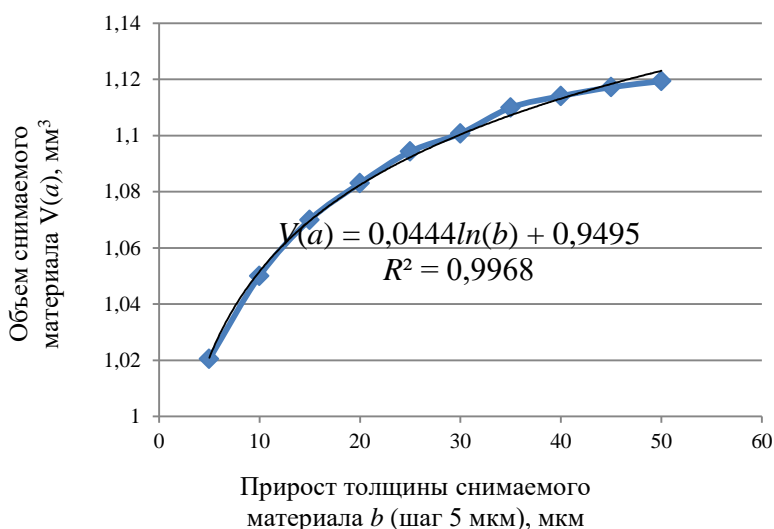


Рис. 5. Зависимость величины объема снимаемого материала от величины удаляемого слоя  
Fig. 5. Removed material volume vs removed layer value

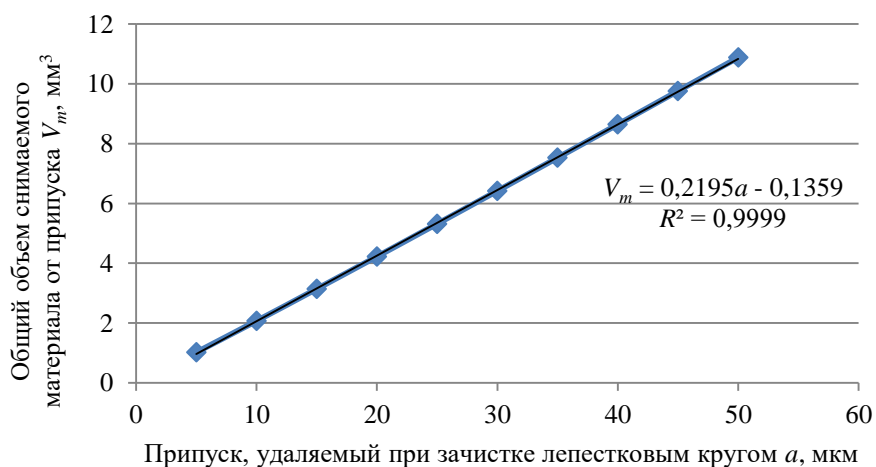


Рис. 6. Зависимость общего объема снимаемого материала от припуска при зачистке  
Fig. 6. Removed material total volume vs allowance when grinding

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отпечатки, образованные после дробеударного формообразования, оказывают существенное влияние на объем снимаемого материала при зачистке лепестковым кругом.

Предложен метод расчета съема материала при зачистке лепестковым кругом поверхности после дробеударного формообразования в зависимости от припуска, удаляемого при зачистке с учетом степени покрытия.

#### Библиографический список

1. Пашков А.Е. Технологические связи в процессе изготовления длинномерных листовых деталей. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2005. 138 с.
2. Пашков А.Е., Чапышев А.П. Учет влияния структуры зоны обработки при дробеударном формообразовании // Технологическая механика материалов: межвузовский сб. науч. тр. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2003. С. 22–27.
3. Димов Ю.В. Перспективы использования лепестковых кругов при изготовлении деталей самолета // Повышение эффективности технологических процессов в машиностроении: сб. научн. тр. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2000. С. 3–10.
4. Муминов М.Р., Маматова Д.А., Шин И.Г. Энергетический подход к оценке шероховатости поверхности деталей при упрочнении дробью // Вестник машиностроения. 2012. № 4. С. 60–63.
5. Шин И.Г., Максудов Р.Х. Метод расчета глубины упрочненного дробью поверхностного слоя деталей // Вестник машиностроения. 2011. № 4. С. 44–47.
6. Кольцов В.П., Ле Чи Винь, Стародубцева Д.А. К определению степени покрытия после дробеударной обработки // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 11. С. 45–52. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-11-45-52>
7. Кольцов В.П., Стародубцева Д.А., Чапышев А.П. К определению величины припуска при зачистке поверхности панелей и обшивок лепестковым кругом после дробеударного формообразования // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2017. Т. 73. № 1. С. 25–30.
8. Чапышев А.П. Статистическое описание поверхности после дробеударного формообразования // Перспективные технологии получения и обработки материалов: материалы региональной науч.-техн. конф. (г. Иркутск, 25–26 сентября 2004 г.). Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2004. С. 42–46.
9. Матлин М.М., Лебский С.Л., Казанкина Е.Н., Казанкин В.А. Определение шероховатости поверхностей деталей, обработанных дробеупрочнением // Вестник машиностроения. 2013. № 10. С. 54–55.
10. Лебеденко В.Г. Математическое моделирование процесса формирования геометрических параметров поверхностного слоя и параметров упрочнения при обработке деталей дробью // Вестник Донского государственного технического университета. 2008. Т. 8. № 4. С. 202–212.
11. Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Лебеденко В.Г. Исследование параметров качества поверхностного слоя при обработке дробью // Вестник машиностроения. 2010. № 2. С. 51–54.
12. Badrinarayan P.A., Narendra P.S., Lingyun Pan, Wei Huang, Jarrett M., Forck J.A. A computational approach for fatigue life prediction in shot peened welded specimens // Welding in the World. 2013. Vol. 57. Issue 5. P. 675–684. <https://doi.org/10.1007/s40194-013-0065-z>
13. Baragetti S. Three-Dimensional Finite Element procedures for shot peening residual stress field prediction // International Journal of Computer Applications in Technology. 2001. Vol. 14. Issue 1–3. P. 51–63.
14. Anderson D., Warkentin A. Experimental and Numerical Investigations of Single Abrasive-Grain Cutting // International Journal of Machine Tools. 2011. Vol. 51. P. 898–910.
15. Bruzzone A.A.G., Costa H.L., Lonardo P.M., Lucca D.A. Advances in Engineered Surfaces for Functional Performance // CIRP Annals. 2008. Vol. 57. Issue 2. P. 750–769. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000785060800190X> (12.08.2018). <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.09.003>
16. Meguid S.A., Shagal G., Stranart J.C. 3D FE analysis of peening of strain-rate sensitive materials using multiple impingement model // International Journal of Impact Engineering. 2002. Vol. 27. Issue 2. P. 119–134.
17. Матлин М.М., Мосейко В.В. Вероятностная оценка параметров процесса дробеобработки // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2005. № 2. С. 35–38.
18. Ле Чи Винь, Стародубцева Д.А., Кольцов В.П., Нгуен Тхе Хоанг. Определение степени покрытия после дробеударного формообразования методом обработки изображений // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 2. С. 32–37. <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2018-2-32-37>
19. Koltsov V.P., Le Tri Vinh, Starodubtseva D.A. To the problem of shot peening coverage degree determination // International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018). Section: Manufacturing Technologies, Tools and Equipment (30 October 2018). MATEC Web of Conference. 2018. Vol. 241. P. 01070. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/ref/2018/83/mateconf\\_icmtmte2018\\_01070/mateconf\\_icmtmte2018\\_01070.html](https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/ref/2018/83/mateconf_icmtmte2018_01070/mateconf_icmtmte2018_01070.html)



(12.08.2018). <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822401070>

20. Кольцов В.П., Ле Чи Винь, Стародубцева Д.А. Структура формирования параметров шероховатости поверхности при реализации технологической

последовательности «дробеударное формообразование – зачистка» // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 12. С. 56–67. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-12-56-67>

## References

1. Pashkov AE. *Technological connections under long sheet metal part manufacturing*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2005. 138 p. (In Russ.)
2. Pashkov AE, Chapyshev AP. Consideration of the machining zone structure effect at shot peening. In: *Tekhnologicheskaya mekhanika materialov* = Technological mechanics of materials. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2003. p. 22–27. (In Russ.)
3. Dimov YuV. Application prospects of flap wheels in aircraft parts manufacturing. In: *Improving efficiency of technological processes in mechanical engineering* = Improving the efficiency of technological processes in mechanical engineering. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2000. p. 3–10. (In Russ.)
4. Muminov MR, Mamatova DA, Shin IG. Assessing the surface roughness of parts after shot hardening. *Vestnik mashinostroeniya* = Bulletin of Mechanical Engineering. 2012;4:60–63. (In Russ.)
5. Shin IG, Maksudov RH. Method for calculating the depth of a hardened by a shot surface layer of parts. *Vestnik mashinostroeniya* = Bulletin of Mechanical Engineering. 2011;4:44–47. (In Russ.)
6. Koltsov BP, Le Tri Vinh, Starodubtseva DA. To the problem of shot peening coverage degree determination. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2017;21(11):45–52. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-11-45-52>
7. Koltsov VP, Starodubtseva DA, Chapyshev AP. To allowance value determination under deburring of panel and skin surfaces by a flap wheel after shot peen forming. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva* = Bulletin of Kazan State Technical University named after A.N. Tupolev. 2017;73;1:25–30. (In Russ.)
8. Chapyshev AP. Surface statistical description after shot peening. In: *Perspektivnye tekhnologii polucheniya i obrabotki materialov: materialy regional'noj nauchno-tekhnicheskoy konferencii* = Promising technologies for material production and processing: Materials of the regional scientific and technical conference, 25–26 September 2004, Irkutsk, Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2004. p. 42–46. (In Russ.)
9. Matlin MM, Lebsky SL, Kazankina EN, Kazankin VA. Determination of roughness of parts surfaces, treated by grit hardening. *Vestnik mashinostroeniya* = Bulletin of Mechanical Engineering. 2013;10:54–55. (In Russ.)
10. Lebedenko VG. The mathematical description of process of formation of geometrical parameters of the superficial layer and hardening at processing details in fraction. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Bulletin of the Don State Technical University. 2008;8(4):202–212. (In Russ.)
11. Tamarkin MA, Tishchenko EE, Lebedenko VG. Surface-layer quality in shot treatment. *Vestnik mashinostroeniya* = Bulletin of Mechanical Engineering. 2010;2:51–54. (In Russ.)
12. Badrinarayan PA, Narendra PS, Lingyun Pan, Wei Huang, Jarrett M, Forck JA. A computational approach for fatigue life prediction in shot peened welded specimens. *Welding in the World*. 2013;57(5):675–684. <https://doi.org/10.1007/s40194-013-0065-z>
13. Baragetti S. Three-dimensional finite element procedures for shot peening residual stress field prediction. *International Journal of Computer Applications in Technology*. 2001;14(1–3):51–63.
14. Anderson D, Warkentin A. Experimental and Numerical Investigations of Single Abrasive-Grain Cutting. *International Journal of Machine Tools*. 2011;51:898–910.
15. Bruzzone AAG, Costa HL, Lonardo PM, Lucca DA. Advances in Engineered Surfaces for Functional Performance. *CIRP Annals*. 2008;57(2):750–769. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000785060800190X> [Accessed 12th August 2018]. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.09.003>
16. Meguid SA, Shagal G, Stranart JC. 3D FE analysis of peening of strain-rate sensitive materials using multiple impingement model. *International Journal of Impact Engineering*. 2002;27(2):119–134.
17. Matlin MM, Moseyko VV. Probabilistic estimation of shot peening parameters. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of the Volgograd State Technical University. 2005;2:35–38. (In Russ.)
18. Le Chi Vinh, Starodubtseva DA, Koltsov VP, Nguyen The Hoang. Determination of a degree of shot coverage after shot peen forming by image processing. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* = Systems. Methods. Technologies. 2018;2:32–37. (In Russ.)
19. Koltsov VP, Le Tri Vinh, Starodubtseva DA. To the problem of shot peening coverage degree determination. *International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018)*. Section: Manufacturing Technologies, Tools and Equipment, 30 October 2018, MATEC Web of Conference. 2018;241:01-070. Available from: [https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/ref/2018/83/mateconf\\_icmtmte2018\\_01070/mateconf\\_icmtmte2018\\_01070.html](https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/ref/2018/83/mateconf_icmtmte2018_01070/mateconf_icmtmte2018_01070.html) [Accessed 12th August 2018]. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822401070>
20. Kol'cov V.P., Le Chi Vin', Starodubceva D.A. For-

mation structure of surface roughness parameters at «shot peen forming – grinding» technological sequence implementation. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo*

#### **Критерии авторства**

Ле Чи Винь, Кольцов В.П., Стародубцева Д.А., Фунг Суан Шон заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в одинаковой мере несут ответственность за плагиат.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

##### **Ле Чи Винь,**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;  
e-mail: vinh\_istu@mail.ru

##### **Кольцов Владимир Петрович,**

доктор технических наук,  
профессор кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;  
e-mail: kolcov@istu.edu

##### **Стародубцева Дарья Александровна,**

младший научный сотрудник кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;  
✉ e-mail: d.star-irk@yandex.ru

##### **Фунг Суан Шон,**

кандидат технических наук, доцент,  
заместитель декана факультета машиностроения, заведующий кафедрой промышленного оборудования и инструментов,  
Ханойский индустриальный институт,  
г. Ханой, ул. Каузиен, 298, Вьетнам;  
e-mail: phungxuanson@hau.edu.vn

*tehnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018;22(12):56–67. (In Russ.)  
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-12-56-67>

#### **Authorship criteria**

Le Tri Vinh, Koltsov V.P., Starodubtseva D.A., Phung Xuan Son declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

#### **Conflict of interests**

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

##### **Le Tri Vinh,**

Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor of the Department of Technology and Equipment of Machine-Building Production, Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;  
e-mail: vinh\_istu@mail.ru

##### **Vladimir P. Koltsov,**

Dr. Sci. (Eng.),  
Professor of the Department of Technology and Equipment of Machine-Building Production, Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;  
e-mail: kolcov@istu.edu

##### **Daria A. Starodubtseva,**

Junior Researcher of the Department of Technology and Equipment of Machine-Building Production, Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;  
✉ e-mail: d.star-irk@yandex.ru

##### **Phung Xuan Son,**

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Deputy Dean of the Faculty of Mechanical Engineering, Head of the Department of Industrial Equipment and Tools at Hanoi University of Industry,  
298, Cau Dien Street, Bac Tu Liem District, Ha Noi;  
e-mail: phungxuanson@hau.edu.vn





Оригинальная статья / Original article

УДК 629.735.3

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-884-894>

## Исследование качества герметизации конструкций с деталями из полимерных композиционных материалов при сборке и установке крепежа по неотвержденному внутришовному герметику

© А.Р. Султанова, А.А. Сафронов, А.Г. Громашев

АО «АэроКомпозит», г. Москва, Россия

**Резюме:** Целью работы является подтверждение равномерного распределения герметика внутри отверстия в пакете из композитных деталей в момент установки основного крепежа в течение 20–72 ч с момента приготовления внутришовного герметика PR1782C12-M при технологии сборки на неотвержденном герметике без доработки отверстий. Для технологической отработки оценки качества установки крепежа на внутришовном герметике был выбран типовой элемент конструкции крыла самолета – пакет сочленения двух плоских панелей из полимерных композиционных материалов. В процессе испытаний проведена органолептическая оценка состояния (степень полимеризации) и присутствия герметика PR1782C12-M в отверстиях и по торцам пакета, а также герметика, наносимого на крепеж. В процессе эксперимента было проведено исследование состояния герметика и наличия липкого слоя на гладкой части крепежа в период времени от 20 до 72 ч с момента его приготовления. Определен рекомендуемый процесс по нанесению герметика на крепеж при технологии сборки на неотвержденном герметике без доработки отверстий.

**Ключевые слова:** полимерный композиционный материал, герметизация, внутришовный герметик, болт-заклепочные соединения, технология сборки

**Информация о статье:** Дата поступления 01 июля 2019 г.; дата принятия к печати 05 августа 2019 г.; дата онлайн-размещения 31 октября 2019 г.

**Для цитирования:** Султанова А.Р., Сафронов А.А., Громашев А.Г. Исследование качества герметизации конструкций с деталями из полимерных композиционных материалов при сборке и установке крепежа по неотвержденному внутришовному герметику. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т. 23. № 5. С. 884–894. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-884-894>

## Research of the sealing quality of structures with polymer composite parts at assembly and fastener installation on uncured interfay sealant

Albina R. Sultanova, Anton A. Safronov, Andrey G. Gromashev

Aerocomposit JSC, Moscow, Russia

**Abstract:** The purpose of the paper is substantiation of the equal distribution of the sealing compound inside the hole in the stack of composite parts during the installation of basic fasteners within 20-72 hours from the preparation moment of the interfay sealant PR1782C12-M when the assembly is performed on the uncured interfay sealant without finish drilling of holes. A wing as a typical aircraft structure element, which is represented by a stack of two flat panels made of polymer composite materials, is chosen for the technological development of quality assessment of fastener installation on the interfay sealant. The carried out tests include an organoleptic assessment of the PR1782C12-M sealant condition (polymerization degree), its presence in the holes and on the stack end surfaces, and the sealant applied to the fasteners. The experiment also involves the assessment of the sealant condition and presence of the tack layer on the grip in the period of time from 20 to 72 hours from the moment of sealant preparation. The recommended process for sealant application to fasteners under assembly on the uncured sealant without finish drilling of holes is defined.

**Keywords:** polymer composite material, sealing, interfay sealant, high lock joints, assembly technology

**Information about the article:** Received 01 July, 2019; accepted for publication 05 August, 2019; available online October 31, 2019.

**For citation:** Sultanova AR, Safronov AA, Gromashev AG. Research of the sealing quality of structures with polymer composite parts at assembly and fastener installation on uncured interfay sealant. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2019;23(5):884–894. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-884-894>

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В течение последних лет стремительно растет доля композиционных материалов, используемых в машиностроении. Наибольшее распространение в авиастроении получили полимерные композиционные материалы (ПКМ) с полимерной матрицей на основе углеродных волокон, также их называют «углепластиками».

Одной из важнейших задач агрегатно-сборочного производства является получение надежных соединений деталей, в т.ч. герметичных соединений деталей, выполненных из ПКМ.

Герметизация выполняется для исключения утечек топлива из кессон-баков, воздуха из герметичных отсеков фюзеляжа и проникновения влаги в щели и зазоры в негерметичных отсеках фюзеляжа, а также для дополнительной антикоррозионной защиты мест, подверженных коррозии (соединения разнородных материалов, места скопления конденсата и проч.)<sup>1-3</sup> [1–6].

Для герметизации крупногабаритных деталей применяются внутришовные герметики с большим временем сборки. Но даже такого временного промежутка не всегда достаточно, чтобы успеть установить основной крепеж (например, в закрытом кессоне) при варианте технологии сборки на неотвержденном герметике без доработки отверстий. Одним из аспектов задачи обеспечения гарантии герметизации является оценка наличия герметика внутри

отверстия, заполненного крепежом при окончательной сборке, а также под закладной головкой крепежного элемента при установке крепежа в отверстие<sup>4</sup> [7–14].

## 2. ЦЕЛЬ

Целью работы является подтверждение равномерного распределения герметика внутри отверстия в пакете из композитных деталей в момент установки основного крепежа в течение 20–72 ч с момента приготовления внутришовного герметика PR1782C12-M, время сборки которого (согласно техническому описанию) 20 ч при технологии сборки на неотвержденном герметике без доработки отверстий.

## 3. МАТЕРИАЛЫ

Материалы, использованные в работе, представлены в табл. 1.

## 4. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для технологической отработки оценки качества установки крепежа на внутришовном герметике был выбран типовой элемент конструкции крыла самолет – пакет сочленения двух плоских панелей из ПКМ (каждая панель – углепластик марки PRISMEP2400/TX1100IMS65-24K-UD196-6.35 толщиной не менее 6 мм). Панели покрыты грунтом PR205 в один слой. Эскиз с типовыми размерами представлен на рис. 1.

<sup>1</sup>Григорьев В.П. Сборка клепаных агрегатов самолетов и вертолетов: учеб. пособ. М.: Машиностроение, 1975. 344 с.

<sup>2</sup>Гусева Р.И. Вопросы технологии сборочных работ в самолетостроении. Технологические процессы сборки, монтаж сборочных приспособлений: учеб. пособ. Комсомольск-на-Амуре: КНАПИ, 1994. 101 с.

<sup>3</sup>Гусева Р.И., Вялов А.В. Теоретические основы сборки самолета: учеб. пособ. Комсомольск-на-Амуре: КНАГТУ, 2005. 96 с.

<sup>4</sup>Ершов В.И., Павлов В.В., Каширин М.Ф., Хухорев В.С. Технология сборки самолетов: учебник. М.: Машиностроение, 1986. 456 с.



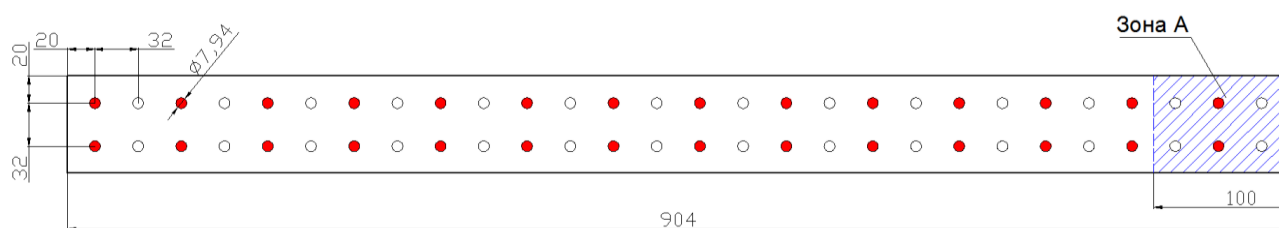
Таблица 1

Материалы, использованные в работе

Table 1

Materials used in the research work

Материал	Обозначение
ПКМ на основе углеренты и эпоксидного связующего	PRISM EP2400/ TX1100 IMS65-24K-UD-196-6.35
Внутришовный герметик для сборки панелей	PR1782C12-M
Внутришовный герметик для установки крепежа	PR1782C12-M
Крепеж технологический	M6
Крепеж основной	XPL4BC-V10-17



● Установленный технологический крепеж

Рис. 1. Типовой пакет сочленения двух плоских панелей из полимерных композиционных материалов  
Fig. 1. A typical stack of two flat panels made of polymer composites

Две плоских панели были собраны по сборочным отверстиям и совместно рассверлены, диаметр отверстий – 7,94 мм, качество – Н9. После чего пакет был разобран и очищен от стружки, а также сняты заусенцы [4, 8].

Затем осуществлялся процесс сборки панелей на внутришовный герметик

PR1782C12-Ми установки крепежа в соответствии со схемой, изображенной на рис. 2. В зоне А (см. рис. 1) герметик не наносился. В качестве основного крепежа применены болт-защелки XPL4BC-V10-09.

**Этап 1. Работа в период от 20 до 40 ч (этап IV, см. рис. 1).** Установка 50% основного крепежа изображена на рис. 3.

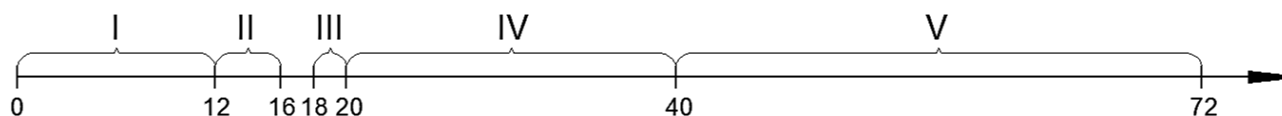


Рис. 2. Схема выполнения технологических операций (временные интервалы указаны в часах):  
0 – время окончания приготовления (смешивания) герметика; I – время нанесения герметика, сборки и установки 50% технологического крепежа; II – время повторной затяжки технологического крепежа; III – время контрольной затяжки технологического крепежа; IV – время установки 50% основного крепежа;

V – время удаления технологического крепежа и замена его на основной

Fig. 2. Diagram of technological operations (time intervals are indicated in hours): 0 – completion time of sealant preparation (mixing); I – time of sealant application, assembly and installation of 50% of temporary fasteners; II – retightening time of temporary fasteners; III – time of control tightening of temporary fasteners; IV – installation time of 50% of main fasteners; V – time of temporary fasteners removal and their replacing with the main ones

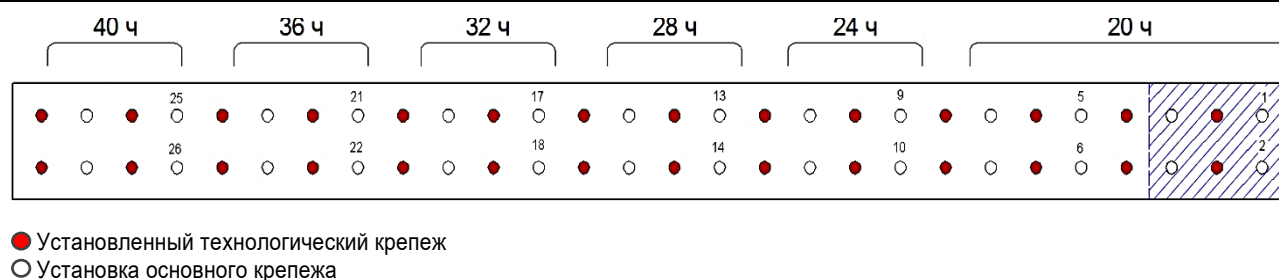


Рис. 3. Последовательность установки основного крепежа в период 20–40 ч  
 Fig. 3. Installation sequence of main fasteners within 20–40 hours

В период от 20 до 40 ч от момента приготовления герметика, на который были собраны панели, через каждые 4 ч проводилась установка основного крепежа с оценкой состояния герметика по следующим показателям:

- органолептическая оценка состояния (консистенции) герметика PR1782C12-M, выдавленного в отверстия и по торцам пакета;

- органолептическая оценка наличия остаточного герметика, наносимого на крепеж, на выходе плоской части крепежа из пакета при установке удлиненного крепежа;

- органолептическая оценка состояния (консистенции) герметика PR1782C12-M, выдавленного по торцам пакета после установки основного крепежа.

Перед установкой основного крепежа в отверстие вставлялся удлиненный крепеж, визуально оценивался герметик на выходе из пакета плоской части удлиненного крепежа [3, 7, 12].

При установке основного крепежа было использовано два вида процесса нанесения герметика на крепеж:

- 1) на болты с нечетными номерами герметик наносился только под головку;

- 2) на болты с четными номерами герметик наносился на всю гладкую часть болта.

**Этап 2. Работа в период от 42 до 72 ч (этап V, рис. 1).** Замена технологического крепежа на «боевой» показана на рис. 4.

## 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В процессе отработки было исследовано поведение герметика в период времени от 20 до 72 ч с момента его приготовления для сборки панелей. Исследование внешнего вида герметика и наличия липкого слоя на гладкой части крепежа проводилось методом органолептического анализа [2].

Результаты оценки по наличию липкого слоя на плоской части удлиненного крепежа сведены в табл. 2.

На основе анализа полученных результатов сделаны следующие выводы.

1. В зоне с отсутствием внутришовного герметика (заштрихованная зона на рис. 1, 3), там, где герметик нанесен под головку крепежа, гладкая зона удлиненного крепежа сухая (не липнет) – крепеж поз. 1 Этап 1 и поз. 1 Этап 2. Там, где герметик

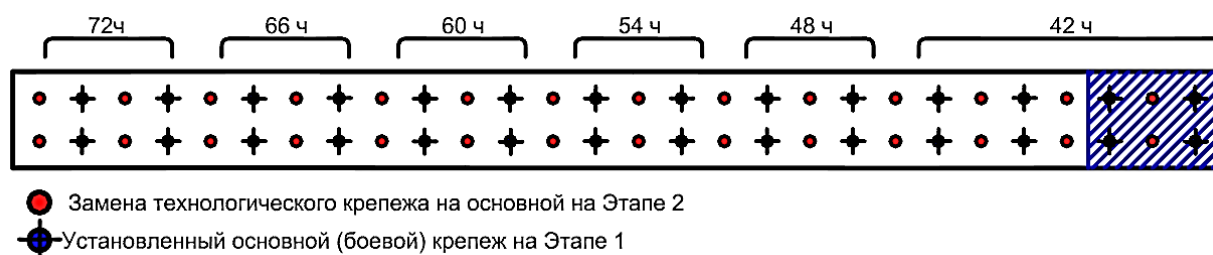


Рис. 4. Последовательность установки основного крепежа в период 42–72 ч  
 Fig. 4. Installation sequence of main fasteners within 42–72 hours



Таблица 2

Обобщенные данные по наличию липкого слоя на крепеже

Table 2

Summarized data on the tack layer presence on fasteners

№ этапа	Время после смешения герметика, ч	Нечетный № позиции крепежа / наличие липкости на гладкой части	След на белой ткани после протирки гладкой части	Четный № позиции крепежа / наличие липкости на гладкой части	След на белой ткани после протирки гладкой части
1	20,5	1 / есть (зона без внутришовного герметика)	–	2 / есть (зона без внутришовного герметика)	–
1	20,5	5 / нет	–	6 / нет	–
1	25	11 / нет	есть	12 / есть	есть
1	30	13 / нет	нет	14 / нет	нет
1	33	17 / нет	–	18 / нет	–
1	36	21 / есть	есть	22 / есть	есть
1	41	25 / есть	есть	26 / есть	есть
2	43	1 / не липнет (зона без внутришовного герметика)	нет	2 / липнет (зона без внутришовного герметика)	есть
2	43	5 / есть	–	6 / есть	–
2	48	7 / есть	есть	8 / есть	есть
2	53	11 / нет	–	12 / есть	–
2	60	15 / есть	есть	16 / есть	есть
2	67	19 / нет	нет	20 / есть	нет
2	72	23 / есть	нет	24 / есть	есть

наносился на всю гладкую часть удлиненного крепежа, на выходе обнаружено наличие липкого слоя (тонкой пленки герметика) – крепеж поз. 2 Этап 1 и поз. 2 Этап 2.

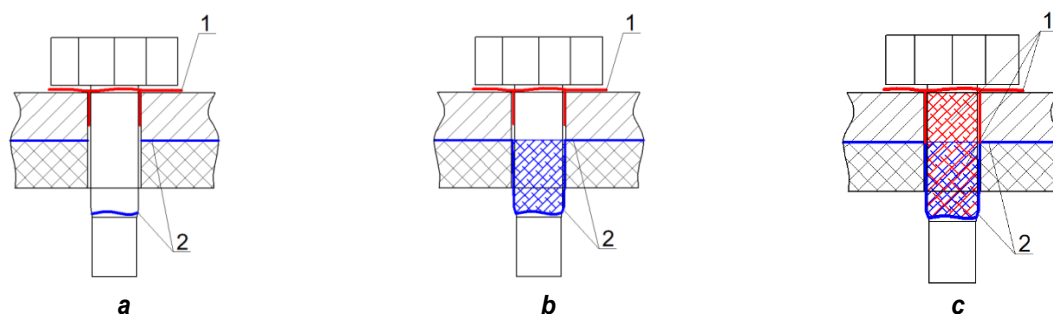
2. В зонах с нанесенным внутришовным герметиком на Этапе 1 эксперимента (20,5–33 ч после приготовления герметика) для нечетных позиций крепежа (герметик на крепеж наносился под головку) гладкая часть удлиненного крепежа после установки в сборочный образец не имела липкости в четырех случаях из шести. Для четных позиций крепежа (герметик на крепеж наносился на всю гладкую часть крепежа) гладкая часть удлиненного крепежа не имела липкости в трех случаях из шести.

На основании данных результатов сделано предположение, что гладкая часть удлиненного крепежа (после установки в сборочный образец) не имеет герметика на поверхности по причине минимального до-

пуска между отверстием и крепежом, и герметик физически не проходит через отверстие в сборке (частично остается на поверхности отверстия), как для случая нанесения герметика под головку крепежа, так и на гладкую часть крепежа (см. рис. 5 а).

Для примера с нанесением герметика под головку: гладкая часть удлиненного крепежа (после установки в сборочный образец) в двух случаях из шести имела внутришовный герметик на поверхности по причине большего допуска на отверстиях как минимум для нижней панели образца (см. рис. 5 б); внутришовный герметик сформировал пленку на половине гладкой части болта.

Для случая с нанесением герметика на всю гладкую часть: гладкая часть удлиненного крепежа (после установки в сборочный образец) в четырех случаях из шести имела внутришовный герметик на по-



**Рис. 5. Вероятное расположение герметика при постановке крепежа. Этап 1**  
 (1 – герметик, нанесенный на крепеж; 2 – герметик между панелями):

**а** – герметик нанесен под головку болта, болт установлен в сухой зоне (зона А на рис. 1); **б** – герметик нанесен под головку болта;  
**с** – герметик нанесен на всю гладкую часть

**Fig. 5. Probable location of sealant under fastener installation. Stage 1.**

(1 – sealant applied to fasteners; 2 – sealant is between the panels):

**a** – sealant is applied under the bolt head, the bolt is installed in the dry area (fig. 1 area A);  
**b** – sealant is applied under the bolt head; **c** – sealant is applied to the entire grip

верхности по причине большего (достаточного для формирования тонкого слоя герметика) допуска на отверстиях и прохода герметика через отверстие. Ввиду нахождения внутришовного герметика на первом этапе до ~ 33 ч в липком состоянии (см. табл. 2) вероятно смещение (совмещение) внутришовного герметика от сборки с герметиком на крепеже в нижней половине образца (см. рис. 5 с). После истечения приготовления герметика порядка 33 ч вероятность смещения (совмещения) внутришовного герметика и герметика на крепеже, а также формирования непрерывного герметичного слоя для нижней половины сборки уменьшается, в т.ч. из-за разной консистенции этих двух герметиков.

3. В зонах с нанесенным внутришовным герметиком на Этапе 2 эксперимента (43–72 ч после приготовления герметика) для нечетных позиций крепежа (герметик на крепеж наносился под головку) гладкая часть удлиненного крепежа после установки в сборочный образец не имела липкости в двух случаях из шести. Для четных позиций крепежа (герметик на крепеж наносился на всю гладкую часть) гладкая часть удлиненного крепежа была липкой во всех шести случаях.

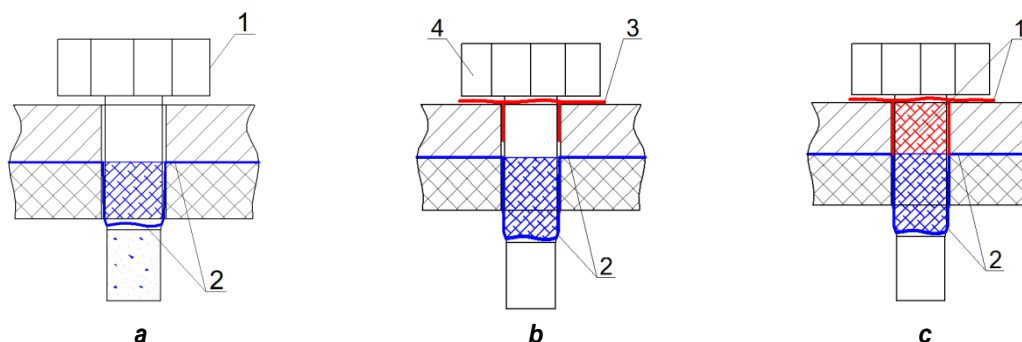
На данном этапе осуществлялась замена технологического крепежа (меньшего диаметра по сравнению с основным) на

основной крепеж. В данном случае при постановке технологического крепежа на Этапе 1 внутришовный герметик изначально распространяется по всей нижней части отверстия в сборке (рис. 6 а).

После удаления технологического крепежа (при постановке основного крепежа) вероятность того, что оставшийся герметик будет находиться на гладкой части основного крепежа, возрастает (см. табл. 2). При этом возможно нарушение непрерывности данного слоя при удалении технологического крепежа, т.к. герметик находится не в вулканизированном состоянии.

Для случая с нанесением герметика под головку: гладкая часть удлиненного крепежа (после установки в сборочный образец) в четырех случаях из шести имела внутришовный герметик на поверхности, что возможно в случае большего допуска на отверстиях как минимум для нижней панели образца, а также наличия герметика в отверстии после установки технологического крепежа (см. рис. 6 б).

Для случая с нанесением герметика на всю гладкую часть: гладкая часть удлиненного крепежа (после установки в сборочный образец) во всех случаях (шесть из шести) имела внутришовный герметик на поверхности. Ввиду изменения консистенции герметика на Этапе 2 (через 36 ч после



**Рис. 6. Вероятное расположение герметика при постановке крепежа**  
(1 – технологический крепеж; 2 – герметик внутришовный; 3 – герметик, нанесенный на крепеж; 4 – основной крепеж): а – герметик нанесен под головку болта, болт установлен в сухой зоне (зона А на рис. 1); б – герметик нанесен под головку болта; в – герметик нанесен на всю гладкую часть

Этап 1 – технологический крепеж; Этап 2 – основной крепеж

**Fig. 6. Probable location of sealant under fastener installation**

(1 – temporary fasteners; 2 – interlay sealant; 3 – sealant applied to the fasteners; 4 – main fasteners): а – sealant is applied under the bolt head, the bolt is installed in the dry area (fig.1 area A); б – sealant is applied under the bolt head; в – sealant is applied to the entire grip  
Stage 1 – temporary fasteners; Stage 2 – main fasteners

смешения герметик скатывается с пальцев, не оставляя следа), вероятность смешивания герметика с крепежа и внутришовного герметика в нижней части сборки уменьшается. Скорее всего, герметик, нанесенный на крепеж, занимает верхнюю часть отверстия в сборке, а остаточный внутришовный герметик – нижнюю часть (см. рис. 6 в). При этом возможно нарушение непрерывности данного слоя при удалении технологического крепежа, т.к. герметик находится не в вулканизированном состоянии.

В случае, когда гладкая часть удлиненного крепежа (после установки в сборочный образец) не имеет герметика на поверхности (не липнет), предполагается, что качество отверстия не позволяет остаться пленке герметика на поверхности гладкой части болта и практически весь герметик выталкивается крепежом (зоной перехода от гладкой части к резьбовой).

Сделанные выше предположения подтверждены характером расположения герметика в отверстии и на крепеже после распила образца.

На рис. 7 а показано типовое расположение герметика для зоны без внутришовного герметика с нанесением под головку и на все тело болта. Герметик располагается под головкой (на 1/3 гладкой ча-

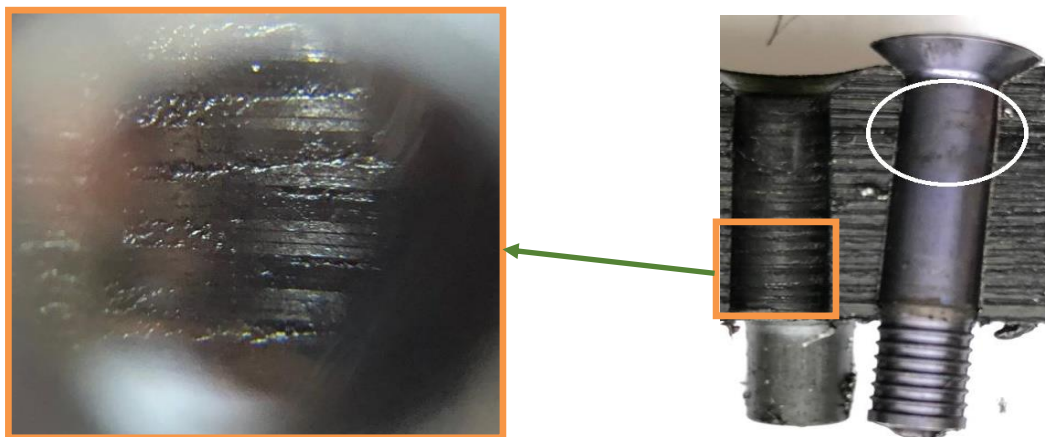
сти) почти так же, как и был нанесен (следы герметика на крепеже выделены белым цветом). На нижней части болта отсутствует внутришовный герметик, который не был применен в данной зоне установки крепежа. Нижняя часть пакета была рассмотрена под микроскопом (увеличение×45).

На рис. 7 б показано типовое расположение герметика для зоны без внутришовного герметика с нанесением на всю гладкую часть болта. Герметик прошел на нижнюю часть сборки (следы герметика на крепеже выделены белым цветом).

На рис. 7 в показано типовое расположение герметика для зоны с внутришовным герметиком с нанесением под головку болта. Герметик располагается под головкой (на 1/3 гладкой части), а также в нижней части болта (следы герметика на крепеже выделены белым цветом). В нижней части болта герметик сформировался в процессе установки из выдавившегося в отверстие внутришовного герметика.

На рис. 7 д показано типовое расположение герметика для зоны с внутришовным герметиком с нанесением на всю гладкую часть болта. Следы герметика располагаются на всей гладкой части болта (следы герметика на крепеже выделены белым цветом).





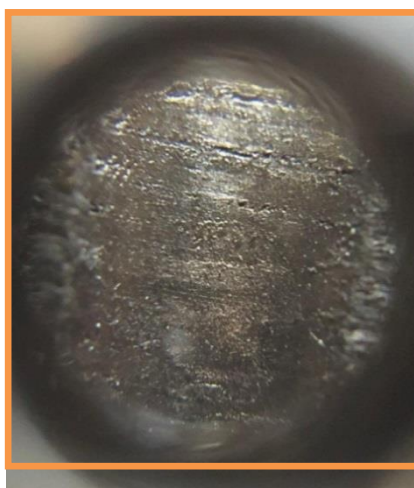
Болт 1 Этап 1 (a)



Болт 2 Этап 2 (b)



Болт 3 Этап 2 (c)



Болт 14 Этап 1 (d)

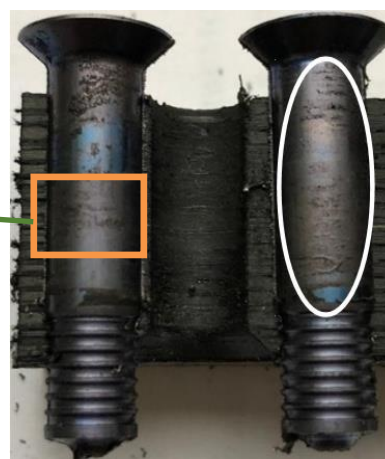


Рис. 7. Расположение герметика в отверстии и на крепеже:

- а – зона без внутришовного герметика. Нанесение под головку (на 1/3 гладкой части);
- б – зона без внутришовного герметика. Нанесение на всю гладкую часть болта;
- с – зона с внутришовным герметиком. Нанесение под головку (на 1/3 гладкой части);
- д – зона с внутришовным герметиком. Нанесение на всю гладкую часть болта

Fig. 7. Location of sealant in the hole and on the fastener: a – interfacial sealant-free area. Application under the head (1/3 of the grip); b – interfacial sealant-free area. Application on the entire grip; c – interfacial sealant area. Application under the head (1/3 of the grip); d – interfacial sealant area. Application on the entire grip



Для крепежа, установленного на Этапе 2, при замене технологического на основной наблюдается наличие плотного слоя герметика в нижней части сборки, что обусловлено меньшим диаметром технологического крепежа и формированием слоя внутришовного герметика при его установке (в нижней части пакета выделено белым цветом).

Наблюдается небольшая зона (полоска), расположенная выше стыка панелей, с отсутствием герметика, появление которой обусловлено наличием интервала между сформированным слоем из внутришовного герметика в нижней части пакета при установке технологического крепежа, и нанесенным под головку основного болта герметика при установке (рис. 8 а).

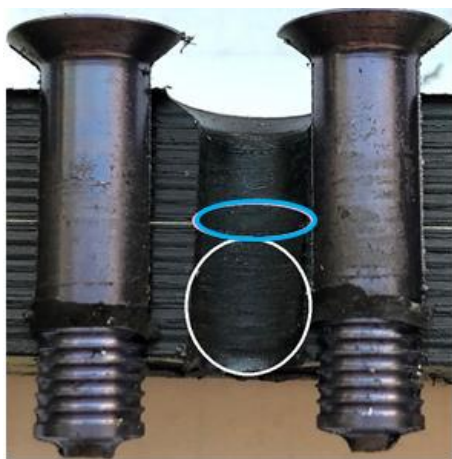
На рис. 8 б показано типовое расположение герметика для зоны с внутришовным герметиком с нанесением на всю гладкую часть болта и установленного после удаления технологического крепежа. Герметик располагается на гладкой части болта, а также наблюдается в отверстии и на теле крепежа, на нижней части отверстия прослеживается плотный слой пленки,

сформированной в процессе установки технологического крепежа меньшего диаметра (выделено белым цветом).

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что постановка крепежа на Этапе 1 с нанесением герметика под головку крепежа может привести к возникновению воздушной полости в пространстве между ранее нанесенным кольцом герметика на болте и стыком пакета (середина пакета) (см. рис. 5 б, 5 с). При этом по истечении порядка 33–36 ч (после приготовления герметика) внутришовный герметик, заполняющий нижнюю часть отверстия в сборке, меняет консистенцию. В зоне А, где внутришовный герметик при сборке панелей не наносился, наблюдается неоднородность поверхности отверстия (см. рис. 7 а).

Постановка крепежа на Этапе 1 с нанесением герметика на всю гладкую часть крепежа формирует, если это позволяет допуск отверстия, непрерывный тонкий слой герметика, который заполняет все неровности на поверхности отверстия (см.



Болт 12 Этап 2 (а)



Болт 12 Этап 2 (б)

Рис. 8. Расположение герметика в отверстии и на крепеже. Этап 2:

а – зона с внутришовным герметиком. Нанесение под головку (на 1/3 гладкой части).

Установка основного крепежа после удаления технологического;

б – зона с внутришовным герметиком. Нанесение на всю гладкую часть болта. Установка основного крепежа после удаления технологического

Fig. 8. Location of the sealant in the hole and on the fastener. Stage 2: а – interlayer sealant area. Application under the head (1/3 of the grip). Installation of the main fasteners after temporary fasteners removal; б – interlayer sealant area. Application on the entire grip. Installation of the primary fasteners after temporary fasteners removal

рис. 7 д). После 33 ч есть вероятность смешивания (совмещения) герметика, нанесенного на крепеж, и внутришовного герметика в нижней части отверстия сборки (см. рис. 5 с).

На Этапе 2 нанесение герметика под головку крепежа может привести к возникновению воздушной полости в пространстве между головкой и нижним элементом (панелью) в сборке (см. рис. 7 б).

Постановка крепежа на Этапе 2 с нанесением герметика на всю гладкую часть крепежа формирует непрерывный тонкий слой герметика в первой половине отверстия сборки из герметика, который был нанесен на крепеж, а во второй половине – из герметика, получившегося путем смешивания (совмещения) герметика, нанесенного на крепеж, и внутришовного герметика (см. рис. 5 с и 8 б).

Процесс нанесения герметика под головку крепежа с целью исключения появления герметика внутри отверстия при данном варианте технологии сборки неработо-

способен, т.к. в нижней части сборки будет формироваться слой герметика от выдавившегося в отверстие внутришовного герметика. Для гарантированного отсутствия герметика необходимо удалять внутришовный герметик из отверстия либо проводить постановку крепежа по отвержденному внутришовному герметику с разделкой отверстий в окончательный размер.

Равномерное распределение герметика внутри отверстия в момент установки основного крепежа в течение 20–72 ч с момента приготовления внутришовного герметика PR1782C12-M присутствует при процессе нанесения герметика на всю гладкую часть крепежа. В период после 33 ч после приготовления герметика во второй части отверстия происходит смешение двух герметиков разной консистенции. Качество смешения и выполнения всего процесса герметизации многократно подтверждалось испытанием натуральных образцов и летными испытаниями воздушного судна.

#### **Библиографический список**

1. Абибов А.Л., Бирюков Н.М., Бойцов В.В., Григорьев В.П., Елисеев С.В. Технология самолетостроения. М.: Машиностроение, 1982. 551 с.
2. Вашуков Ю.А. Технология и оборудование сборочных процессов. Самара: Изд-во СГАУ, 2011. 47 с.
3. Демидов А.И., Молокова С.В. Исследование методов оценки герметичности заклепочных соединений // Современные наукоемкие технологии. 2013. № 8. Вып. 2. С. 190–192.
4. Иванов Ю.Л., Кузьмин В.Ф., Марьин Б.Н., Волков И.В., Макаров К.А., Муравьев В.И. [и др.] Современные технологические процессы сборки планера самолета. М: Машиностроение, 1999. 304 с.
5. Книгин В.В. Пути повышения ресурса и герметичности заклепочных соединений // Авиационная промышленность. Приложение к журналу. 1977. № 4. С. 20–24.
6. Савенкова А.В., Чурсова Л.В., Елисеев О.А., Глазов П.А. Герметики авиационного назначения // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 3. С. 40–43.
7. Сироткин О.С., Гришин В.И., Литвинов В.Б. Проектирование, расчет и технология соединений авиационной техники. М.: Машиностроение, 2006. 331 с.
8. Шишкин С.В., Шишкин С.С. К расчету авиационных заклепочных соединений на герметичность //

Проблемы машиностроения и надежности машин. 2008. № 3. С. 51–60.

9. Ярковец А.И., Сироткин О.С., Фирсов В.А., Киселев Н.М. Технология выполнения высокоресурсных заклепочных и болтовых соединений в конструкциях самолетов. М.: Машиностроение, 1987. 191 с.
10. Ashrafi S.A., Sharif S., Farid A.A., Yahya M.Y. Performance evaluation of carbide tools in drilling CFRP-Al stacks // Journal of Composite Materials. 2014. Vol. 48. No. 17. P. 2071–2084.
11. Davim J.P., Reis P. Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastics (cfrp) using design experiments // Composite Structures. 2003. Vol. 59. No. 4. С. 481–487.
12. Krishnamoorthy A., Rajendra Boopathy S., Palanikumar K. Delamination analysis in drilling of cfrp composites using response surface methodology // Journal of Composite Materials. 2009. Vol. 43. No. 24. P. 2885–2902.
13. Shyha I., Soo S.L., Aspinwall D.K., Bradley S., Dawson S., Pretorius C.J. Drilling of titanium/cfrp/aluminium stacks // Key Engineering Materials. 2010. Vol. 447. P. 624–633.
14. Zitoun R., Krishnaraj V., Collombet F. Study of drilling of composite material and aluminium stack // Composite Structures. 2010. Vol. 92. No. 5. P. 1246–1255.



## References

1. Abibov AL, Biryukov NM, Bojcov VV, Grigor'ev VP, Eliseev SV. *Aircraft manufacturing technology*. Moscow: Mashinostroenie; 1982. 551 p. (In Russ.)
2. Vashukov YuA. *Technology and equipment of assembly processes*. Samara: Samara State aerospace University. Named after S.P. Korolev; 2011. 47 p. (In Russ.)
3. Demidov AI, Molokova SV. Study of methods assessing riveted joint tightness. *Sovremennye naukoemkie tehnologii* = Modern High Technologies. 2013;8(2):190–192. (In Russ.)
4. Ivanov YuL, Kuz'min VF, Mar'in BN, Volkov IV, Makarov KA, Murav'ev VI, et al. *Modern technological processes of aircraft airframe assembly*. Moscow: Mashinostroenie; 1999. 304 p. (In Russ.)
5. Knigin VV. Ways to improve the resource and tightness of riveted joints. *Aviacionnaya promyshlennost'. Prilozhenie k zhurnalu* = Aircraft Industry. Appendix to the magazine. 1977;4:20–24.
6. Savenkova AV, Chursova LV, Eliseev OA, Glazov PA. Sealants of aviation purposes. *Aviacionnaya materialy i tehnologii* = Aviation Materials and Technologies. 2012;3:40–43. (In Russ.)
7. Sirotkin OS, Grishin VI, Litvinov VB. *Design, calculation and technology of aviation equipment connections*. Moscow: Mashinostroenie; 2006. 330 p. (In Russ.)
8. Shishkin SV, Shishkin SS. Calculating hermeticity of aviation riveting. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* = Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2008;3:51–59. (In Russ.)
9. Yarkowetz AI, Sirotkin OS, Firsov VA, Kiselev NM. *Technology of making high-resource riveted and bolted joints in aircraft structures*. Moscow: Mashinostroenie; 1987. 191 p.
10. Ashrafi SA, Sharif S, Farid AA, Yahya MY. Performance evaluation of carbide tools in drilling CFRP-Al stacks. *Journal of Composite Materials*. 2014;48(17):2071–2084
11. Davim JP, Reis P. Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastics (cfrp) using design experiments. *Composite Structures*. 2003;59(4):481–487.
12. Krishnamoorthy A, Rajendra Boopathy S, Palanikumar K. Delamination analysis in drilling of cfrp composites using response surface methodology. *Journal of Composite Materials*. 2009;43(24):2885–2902.
13. Shyha I, Soo SL, Aspinwall DK, Bradley S, Dawson S, Pretorius CJ. Drilling of titanium/cfrp/aluminium stacks. *Key Engineering Materials*. 2010;447:624–633.
14. Zitoun R, Krishnaraj V, Collombet F. Study of drilling of composite material and aluminium stack. *Composite Structures*. 2010;92(5):1246–1255.

## Критерии авторства

Султанова А.Р., Сафронов А.А., Громашев А.Г. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в одинаковой мере несут ответственность за плагиат.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Султанова Альбина Руслановна**,  
ведущий инженер-технолог,  
АО «АэроКомпозит»,  
125284, г. Москва, ул. Поликарпова, 23 Б/2, Россия;  
✉ e-mail: alja\_8@mail.ru

**Сафронов Антон Александрович**,  
начальник департамента материаловедения,  
АО «АэроКомпозит»,  
125284, г. Москва, ул. Поликарпова, 23 Б/2, Россия;  
e-mail: batonich@hotmail.com

**Громашев Андрей Геннадьевич**,  
доктор технических наук,  
главный технолог,  
АО «АэроКомпозит»,  
125284, г. Москва, ул. Поликарпова, 23 Б/2, Россия;  
e-mail: a\_gromashev@aerocomposit.ru

## Authorship criteria

Sultanova A.R., Safronov A.A., Gromashev A.G. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

## Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Albina R. Sultanova**,  
Leading Production Engineer,  
Aerocomposit JSC,  
23 B/2, Polikarpov St., Moscow 125284, Russia;  
✉ e-mail: alja\_8@mail.ru

**Anton A. Safronov**,  
Head of the Materials Science Department,  
Aerocomposit JSC,  
23 B/2, Polikarpov St., Moscow 125284, Russia;  
e-mail: batonich@hotmail.com

**Andrey G. Gromashev**,  
Dr. Sci. (Eng.),  
Chief Process Engineer,  
Aerocomposit JSC,  
23 B/2, Polikarpov St., Moscow 125284, Russia;



## Установка для очистки вод гидрозолоудаления

© Н.П. Герасимова

*Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия*

**Резюме:** Цель – представить установку для очистки вод гидрозолоудаления, содержащую систему проточных индукторов, выполненных в виде трубы с коаксиальным кабелем, подключенных к источнику переменного тока и соединенных между собой посредством электричества с помощью торцевой перемычки. Установлено, что в настоящее время на многих тепловых электрических станциях зола и шлак из котлоагрегатов удаляются и складываются в золоотвалах гидравлическим способом. При этом шлакозоловая пульпа по трубопроводам подается под давлением (созданным багерными насосами) на заданные расстояния, затем осветляется и переливается в водоем, из которого поступает в ближайший бассейн реки или озера. Так как осветленная в золоотстойнике вода содержит растворенные соли и основания, то она представляет собой агрессивную среду, что препятствует ее непосредственному применению для транспортировки золы и шлака – багерные насосы в агрессивной среде быстро выходят из строя. Подтверждено, что технической задачей (решение которой предполагает использование устройства для очистки вод гидрозолоудаления) является высокопроизводительная обработка индукционными токами сточных вод тепловых электрических станций для снижения их агрессивности с целью повторного применения. Данная проблема решается тем, что установка для очистки воды содержит систему проточных индукторов, каждый из которых выполнен в виде трубы с коаксиальным кабелем.

**Ключевые слова:** гидрозолоудаление, сточные воды гидрозолоудаления, очистка вод гидрозолоудаления, золошлакоотвалы, оборотное водоснабжение, индукционные токи

**Информация о статье:** Дата поступления 22 августа 2019 г.; дата принятия к печати 27 сентября 2019 г.; дата онлайн-размещения 31 октября 2019 г.

**Для цитирования:** Герасимова Н.П. Установка для очистки вод гидрозолоудаления. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т. 23. № 5. С. 895–901. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-895-901>

## Hydraulic ash removal water treatment plant

Natalia P. Gerasimova

*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

**Abstract:** The purpose of the paper is to present a treatment plant for hydraulic ash sluicing waters containing a system of flow-through inductors made in the form of a pipe with a coaxial cable, which are connected to an AC source and interconnected between each other by electricity using an end jumper. It is found out that today ash and slag from CHP boilers are hydraulically removed and stored in ash disposal areas. At the same time the slag ash pulp is supplied under pressure (created by bagger pumps) through the pipelines on the fixed distances, then it is clarified and poured into a reservoir from which it enters the nearest river or lake basin. Since the water clarified in the ash sump contains dissolved salts and bases, it represents itself an aggressive medium. This fact prevents it from direct transportation of ash and slag as bagel pumps fail quickly in the aggressive medium. It is proved that the engineering task (the solution of which involves the use of a treatment plant for hydraulic ash sluicing waters) consists in the high-performance treatment of CHP waste waters with induction currents in order to reduce their aggressiveness and recycling. The solution of the problem is in the fact that the water treatment plant includes a system of flow-through inductors, each of which is made in the form of a pipe with a co-axial cable.

**Key words:** hydraulic ash removal, waste water of hydraulic ash removal, treatment of hydraulic ash removal waters, ash and slag disposal, recycling water supply, induction currents

**Information about the article:** Received August 22, 2019; accepted for publication September 27, 2019; available online October 31, 2019.

**For citation:** Gerasimova NP. Hydraulic ash removal water treatment plant. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2019;23(5):895–901. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-895-901>



## **1. ВВЕДЕНИЕ**

Исторически сложилось, что с периода послевоенных лет и до настоящего времени на тепловых электростанциях (ТЭС) России, работающих на твердом топливе, наибольшее распространение получили гидравлические системы золошлакоудаления (гидрозолоудаления) (ГЗУ) [1, 2].

Системы ГЗУ на ТЭС России выполняются преимущественно по схеме совместного удаления золы и шлака [3–5]. При этом шлакозоловая пульпа по трубопроводам ГЗУ подается под давлением (созданном багерными насосами) на заданные расстояния, затем осветляется и переливается в водоем, из которого поступает в ближайший бассейн реки или озера. Так как осветленная в золоотстойнике вода ГЗУ содержит растворенные соли и основания, то она представляет собой агрессивную среду, что препятствует ее непосредственному использованию для транспортировки золы и шлака – багерные насосы в агрессивной среде быстро становятся неисправными.

Для размещения и отгрузки шлака и золы организуются площадки. Узлы отгрузки шлака в таких схемах могут располагаться как на промплощадке ТЭС, так и за ее пределами, образуя золошлакоотвалы, существенно загрязняющие окружающую среду. Кроме того, в сочетании с рыночными условиями экономической деятельности, постоянно ужесточающиеся нормативные требования природоохранного законодательства вынуждают более тщательно подходить к эколого-экономической оценке систем ГЗУ [6–8].

С другой стороны, количество сточных вод систем ГЗУ во много раз превышает суммарный объем всех остальных загрязненных стоков ТЭС [9]. По этой причине очистка сточных вод систем ГЗУ (а для оборотных систем – очистка продувочной воды) является весьма затруднительным мероприятием. Очистка этих стоков усложняется высокой концентрацией фторидов, мышьяка, ванадия, ртути, германия

и некоторых других элементов, обладающих токсичными свойствами. В применении к таким водам более целесообразно их обезвреживание, т.е. снижение концентрации вредных веществ до значений, при которых возможны их сбросы в водоемы.

В настоящее время основными методами обезвреживания являются следующие: осаждение примесей; сорбция примесей на различных сорбентах, в т.ч. на золе; предварительная обработка с применением окислительно-восстановительных процессов [10, 11].

Наиболее проверенным методом, применяемым для удаления токсичных элементов из сточных вод, является осаждение примесей в результате образования малорастворимых химических соединений или в результате их адсорбции на поверхности образуемых в воде твердых частиц с применением различных реагентов [12].

Принципиальным решением проблемы обезвреживания сточных вод служат способы осаждения примесей с помощью обработки стоков электрическим током, например, как при применении устройства для очистки воды электрохимическим способом в нестационарном электрическом поле с последующей коагуляцией [13].

Такие известные в настоящее время методы и устройства позволяют снизить агрессивность сточных вод гидрозолоудаления, но обладают высоким гидравлическим сопротивлением, большой индуктивностью обмоток, что препятствует их непосредственному применению для обработки больших расходов вод ГЗУ из-за низкой производительности.

## **2. ОБОСНОВАНИЕ ОБРАБОТКИ СТОЧНЫХ ВОД ГИДРОЗОЛУДАЛЕНИЯ ИНДУКЦИОННЫМИ ТОКАМИ**

Если сточные воды гидрозолоудаления рассматривать как электролит, то при наведении индукционных токов в них можно получить электрохимический эффект, который позволит активизировать компоненты, не вступающие во взаимодей-



ствие друг с другом в обычных условиях.

Уравнение, показывающее справедливость данного утверждения, выводится следующим образом.

В электродинамическом анализе величина электромагнитной индукции может быть получена путем сложных преобразований по замене самой величины силовой характеристики – магнитной напряженности через переменные параметры, заранее зная (на основании эмпирического закона Фарадея) о существовании такой величины – электродвижущей силы электромагнитной индукции ( $E$ ) [14]:

$$E = E_1 - E_2 = -A \left( \frac{1}{r} \cdot \frac{dI}{dt} + \frac{I}{2\pi r^2} \cdot \frac{dr}{dt} \right). \quad (1)$$

Составными частями электродвижущей силы (ЭДС) электромагнитной индукции в данном выражении (1) являются  $E_1$  и  $E_2$ .  $E_1$  возникает вследствие изменения тока  $I$  со временем  $t$ , а  $E_2$  – в результате взаимодействия вторичного тока  $I_2$  с первичным  $I_1$  при изменении расстояния между ними. Данное обстоятельство, выраженное в зависимости, необходимо отметить здесь особенно. Зависимость ЭДС от обратной величины квадрата расстояния ( $r$ ) до электрода  $\left( \frac{1}{r^2} \right)$  означает принципиальную возможность создания сверхвысоких напряжений в непосредственной близости от первичных проводников с переменными токами.

Электролиты, проводимость которых на 5–6 порядков меньше проводимости металлических проводников, в качестве возможных электрических цепей электротехникой не рассматриваются. Вместе с тем из выражения непосредственно следует, что при погружении первичной обмотки в электролит возможно образование в нем значительные токи и, следовательно, вызвать заметные электрохимические эффекты.

Следовательно, низкая электропроводность электролитов не является пре-

пятствием для создания больших токов в них, т.к. вблизи обмотки индуктора, которая в данном случае является первичной обмоткой своеобразного трансформатора, вторичной обмоткой которого служит сам электролит, в который погружен индуктор, ЭДС может быть выражена формулой (1). Другими словами, электрический трансформатор вследствие замены вторичной обмотки окружающей средой (в виде электропроводящего раствора) превращается в открытую техническую систему. Учитывая малые размеры изоляции обмотки, составляющие практически доли миллиметров, становится возможным образование больших токов вблизи обмотки в электролитах, что и обеспечивает их высокоэффективное влияние на процессы в таких растворах.

В зоне действия индукционных токов особенно интенсивно протекает ионизация: т.к. величина магнитного поля наибольшая вблизи первичного тока, то вблизи поверхности электрического проводника образуется зона интенсивной ионизации всех компонентов раствора.

Так как в процессе любой химической реакции происходит взаимодействие нескольких компонентов – реагентов, изменяется давление, температура, другие физические и химические характеристики этой системы, то химические технологии представляют собой классические примеры многомерных функциональных пространств.

Рассматривая безэлектродный электрохимический процесс в растворах в качестве классического многомерного функционального пространства на основе математического моделирования, установлено, что с помощью многомерного математического моделирования можно перенести характер влияния индукционных токов на химические реакции в растворах, зависимости такого влияния от расстояния до первичного тока в обмотке индуктора и другие закономерности. Таким образом, существует неразрывная связь между свойствами аппарата проецирования одного пространства на другое и свойствами соответствий между ними. Другими слова-



ми, зная свойства одного, можно определить свойства другого.

Вышеперечисленные выводы можно применить к решению проблемы снижения концентрации минеральных примесей в водах ГЗУ.

### 3. СПОСОБ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ГИДРОЗОЛОУДАЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ УСТАНОВКИ ИЗ ТРУБЧАТЫХ ИНДУКТОРОВ

Решением технической задачи, заключающейся в снижении концентрации минеральных примесей в водах ГЗУ, является высокопроизводительная обработка индукционными токами для снижения их агрессивности с целью повторного использования в системах гидрозолоудаления [15].

Установка очистки вод гидрозолоудаления предназначена для снижения концентрации минеральных примесей в сточных водах, позволяя использовать эти воды повторно в оборотных системах водоснабжения тепловых электрических станций. Установка для очистки сточных вод гидрозолоудаления содержит систему трубчатых индукторов, соединенных между собой последовательно, параллельно или смешанным способом в соответствии с заданными условиями эксплуатации, а также блок электропитания. Трубчатый индуктор состоит из металлической трубы, коаксиального кабеля в ней, электрически соединенных между собой с помощью торцевой перемычки. На концах трубы и кабеля выполнены типовые электрические клеммы, к которым подводится переменный электри-

ческий ток от блока питания. Технический эффект – высокопроизводительная обработка индукционными токами сточных вод для снижения их агрессивности и возможность повторного использования их в системах гидрозолоудаления.

Этот эффект достигается тем, что установка для очистки вод гидрозолоудаления содержит систему проточных индукторов, каждый из которых выполнен в виде трубы с коаксиальным кабелем, подключенных между собой электрически с помощью торцевой перемычки.

Установка для очистки сточных вод гидрозолоудаления содержит систему трубчатых индукторов 1 и блок электропитания 2 (рис. 1). Дамба 10 отделяет золоотстойник 11 от накопителя обработанной воды 12.

В трубе 3 кабель 4 снабжен упорами 6. На концах трубы и кабеля выполнены типовые электрические клеммы (не показаны), к которым подводится переменный электрический ток от блока питания 2 (рис. 2).

Упор 6 кабеля 4 содержит разборную втулку из сегментов 7 с радиальными кронштейнами. Сегменты 7 разборной втулки имеют замковые сопряжения 8, выполненные в виде выступов и впадин, диаметрально противоположные концы которых имеют треугольный профиль.

Трубчатый индуктор состоит из металлической, например, стальной трубы 3 и коаксиального кабеля 4 в ней, соединенных между собой торцевой перемычкой 5 (принципиальная эквивалентная электрическая схема индуктора показана на рис. 3).

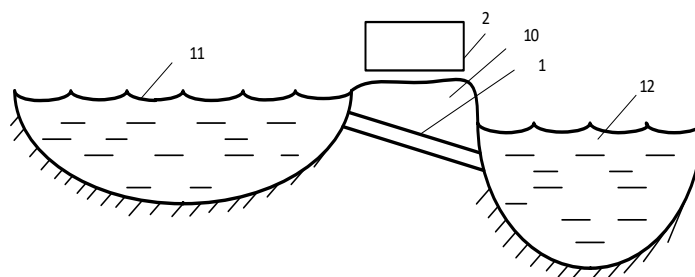
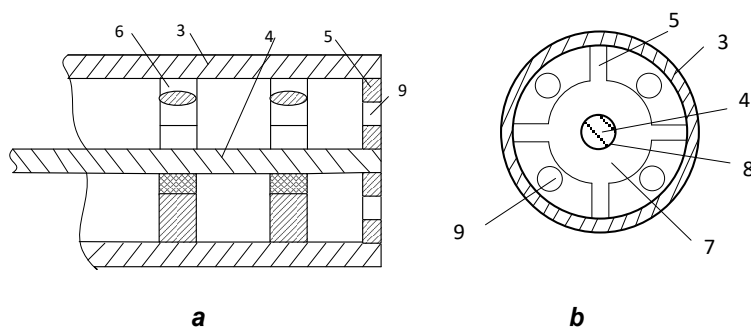
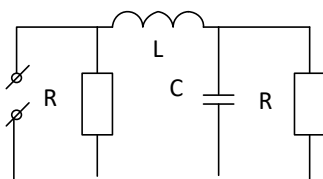


Рис. 1. Вертикальный разрез установки для очистки вод гидрозолоудаления по месту ее размещения  
Fig. 1. Vertical section of a treatment plant for hydraulic ash removal waters at the place of its location



**Рис. 2. Эскиз трубчатого индуктора: а – продольный разрез; б – поперечный разрез**  
**Fig. 2. Sketch of a tubular inductor: a – longitudinal section; b – transverse section**



**Рис. 3. Принципиальная эквивалентная электрическая схема индуктора**  
**Fig. 3. Principal equivalent electrical circuit of the inductor**

Торцевая перемычка 5 выполнена в виде диска с отверстиями 9, соединена с торцом трубы 3 и кабелем 4, например, с помощью сварки.

Установка для очистки вод гидрозолоудаления работает следующим образом.

В соответствии с заданными условиями эксплуатации трубчатые индукторы 1 соединяются между собой параллельно, последовательно или смешанным образом.

Установка размещена в дамбе 10 между золоотстойником 11 и накопителем обработанной воды 12. При этом уровни поверхностей вод в золоотстойнике 11 и накопителе 12 размещены на разных горизонтах: уровень воды в золоотстойнике 11 выше, а в накопителе 12 ниже.

Таким образом, установка размещена в дамбе 10 наклонно в сторону накопителя 12, позволяя осветленной воде из золоотстойника 11 самотеком поступать в накопитель 12 через трубчатые индукторы 1 установки.

К контактным клеммам (на чертежах не показаны как типовые) трубы 3 и кабеля 4 с помощью типовых электропроводов (не показаны как типовые) от блока электрического питания 2 подводится переменное

электрическое напряжение заданной величины, которое создает по трубе 3 и кабелю 4 переменный электрический ток. Величина электрического тока по трубе 3 и кабелю 4 через торцевую перемычку 5 определяется конкретными электрическими параметрами этих деталей, выбираемых по определенным условиям эксплуатации.

Так как осветленная вода из золоотстойника 11 протекает в накопитель по трубчатым индукторам 1 между стенкой трубы 3 и кабелем 4, где создается переменное электромагнитное поле, то в результате электрокоагуляции она очищается и в ней снижается концентрация агрессивных примесей.

Таким образом, в накопитель 12 поступает обработанная вода с пониженной агрессивностью, что позволяет осуществить водозабор из накопителя 12 с помощью типовых насосов (не показаны) для повторного использования этой воды в системе гидрозолоудаления.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение установки для очистки вод гидрозолоудаления, содержащей си-

стему проточных индукторов, выполненных в виде трубы с коаксиальным кабелем, подключенных к источнику переменного тока и соединенных между собой электрически с помощью торцевой перемычки, позволяет повысить эффективность очистки вод ГЗУ. При этом эффективность уста-

новки определяется заданными условиями эксплуатации, т.к. габаритные размеры трубчатого индуктора, их количество в установке и схема соединения между собой выбираются по конкретным значениям расхода вод гидрозолоудаления и концентраций примесей в них.

#### **Библиографический список**

1. Тумановский А.Г. Перспективы развития угольных ТЭС России // *Теплоэнергетика*. 2017. № 6. С. 3–13.
2. Неуймин В.М. ОАО РАО «ЕЭС России» завершает функционирование, проблемы экологии в электроэнергетике остаются и обостряются // *Энергосбережение и водоподготовка*. 2008. № 4. С. 2–9.
3. Архипов А.М., Путилов В.Я. Перспектива комплексной оптимизации сжигания проектного экибастузского и непроектного кузнецкого углей на котле П-57 энергоблока мощностью 500 МВт // *Теплоэнергетика*. 2011. № 12. С. 26–33.
4. Путилов В.Я., Путилова И.В. Проблемы обращения с золошлаками ТЭС в России: барьеры, возможности и пути решения // *Теплоэнергетика*. 2010. № 7. С. 63–66.
5. Герасимова Н.П., Федчишин В.В., Артемова О.С. Анализ эффективности работы систем золошлакоудаления ТЭС // *Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всероссийской науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Иркутск, 22–26 апреля 2019 г.)*. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2019. С. 237–242.
6. Тумановский А.Г., Глебов В.П., Чугаева А.Н., Шмиголь И.Н., Зыков А.М. Обеспечение экологических требований при производстве тепла и электроэнергии на тепловых электростанциях // *Теплоэнергетика*. 2006. № 7. С. 35–42.
7. Тимошенко О.Т., Фомина А.А. Эффективность очистки промливневых сточных вод Омским филиалом ОАО «ТГК № 11» // *Динамика систем, механизмов и машин*. 2012. № 3. С. 238–241.
8. Кремлева Н.В., Хабибулина А.Д. Оптимизация системы очистки сточных вод для вторичного использования на предприятиях тепловых сетей // *Химия и инженерная экология: материалы XVI междунар. науч. конф., посвященная 15-летию реализации принципов Хартии Земли в Республике Татарстан (г. Казань, 25–27 сентября 2016 г.)*. Казань: Изд-во: Фолиант, 2016. С. 197–200.
9. Буденный А.П., Ничкова Л.А., Скаковская А.Н., Гутник С.А. Очистка сточных вод от ионных примесей // *Системы контроля окружающей среды*. 2017. № 8. С. 114–117.
10. Дремичева Е.С. Повышение эффективности процесса предварительной очистки воды на предприятиях теплоэнергетики // *Теплоэнергетика*. 2018. № 2. С. 39–43. <https://doi.org/10.1134/S0040363618020029>
11. Ларин Б.М. Водный режим и химический контроль на ТЭС и АЭС: проблемы и задачи (по материалам конференций) // *Теплоэнергетика*. 2018. № 2. С. 50–54. <https://doi.org/10.1134/S0040363618020030>
12. Ларин Б.М., Ларин А.Б., Суслов С.Ю., Кирилина А.В. Нормирование качества водного теплоносителя на Российских ТЭС // *Теплоэнергетика*. 2017. № 4. С. 79–84.
13. Шестаков И.Я., Раева О.В., Никифорова Э.М., Еромасов Р.Г. Исследование очистки воды электрохимическим способом в нестационарном электрическом поле с последующей коагуляцией // *Современные проблемы науки и образования*. 2013. № 1. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=8154> (26.06.2019)
14. Вертинская Н.Д., Герасимова Н.П. Применение математического моделирования для оптимизации режимов оборотного водоснабжения в системах ГЗУ // *Моделирование неравновесных систем: сб. материалов IX Всесоюз. семинара (г. Красноярск, 13–15 октября 2006 г.)*. Красноярск: Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук, 2006. С. 49–53.
15. Пат. № 2199491, Российская Федерация, С02F 1/463. Установка для очистки вод гидрозолоудаления / А.С. Максимов, Н.П. Герасимова; заявитель и патентообладатель Иркутский национальный исследовательский технический университет. Заявл. 05.04.2001; опубл. 27.02.2003. Бюл. № 8.

#### **References**

1. Tumanovskii AG. Prospects for the Development of Coal-Steam Plants in Russia. *Teploenergetika* = Thermal Engineering. 2017;6:3–13. (In Russ.)
2. Neuimin VM. The Russian Joint-Stock Company RAO United Energy System of Russia shuts down – the environmental problems in electric power industry remain and worsen. *Energoberezhenie i vodopodgotovka* = Energy Saving and Water Treatment. 2008;4:2–9. (In Russ.)
3. Arkhipov AM, Putilov VY. Prospects for comprehensively optimizing the combustion of design Ekibastuz and off-design Kuznetsk coals in the P-57 boiler of a 500-MW power unit. *Teploenergetika* = Thermal Engineering. 2011;12:26–33. (In Russ.)



4. Putilov VY, Putilova IV. Problems of handling ashes and slags produced at Russian thermal power stations: barriers, possibilities, and ways of solving them. *Teploenergetika* = Thermal Engineering. 2010;7:63–66. (In Russ.)

5. Gerasimova NP, Fedchishin VV, Artemova OS. Analysis of operation efficiency of CHP ash and slag removal systems. *Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyakh Sibiri: materialy Vserossiyskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem* = Improving efficiency of energy production and use in Siberia: Materials of All-Russian scientific and practical conference with international participation. 22–26 April 2019, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2019, p. 237–242. (In Russ.)

6. Tumanovskii AG, Glebov VP, Chugaeva AN, Shmigol' IN, Zykov AM. Meeting environmental requirements when producing heat and electricity at thermal power stations. *Teploenergetika* = Thermal Engineering. 2006;7:35–42. (In Russ.)

7. Timoshenko OT, Fomina AA. Efficiency of industrial wastewater treatment by the Omsk branch of District Generation Company No. 11 OJSC. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin* = Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines. 2012;3:238–241. (In Russ.)

8. Kremleva NV, Khabibulina AD. Optimization of a wastewater treatment system for water recycling at the enterprises of heating networks. *Himiya i inzhenernaya ekologiya: materialy XVI mezhdunarodnoy nauchnoy konferencii, posvyashchennaya 15-letiyu realizatsii principov Hartii Zemli v Respublike Tatarstan* = Chemistry and environmental engineering: Materials of XVI International scientific conference dedicated to the 15th anniversary of the implementation of the principles of the Earth Charter in the Republic of Tatarstan. 25–27 September 2016, Kazan'. Kazan': Foliant; 2016, p. 197–200. (In Russ.)

#### Критерии авторства

Герасимова Н.П. получила и оформила научные результаты и несет ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**Герасимова Наталья Павловна**,  
кандидат химических наук,  
доцент кафедры теплоэнергетики,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,  
✉ e-mail: gerasimova@istu.edu

9. Budonyi AP, Nichkova LA, Skakovskaya AN, Gutnik SA. Treatment of sewage from ionic contaminants. *Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy* = Monitoring Systems of Environment. 2017;8:114–117. (In Russ.)

10. Dremicheva ES. Improving the efficiency of natural raw water pretreatment at thermal power stations. *Teploenergetika* = Thermal Engineering. 2018;2:39–43. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S0040363618020029>

11. Larin BM. Water chemistry and chemistry monitoring at thermal and nuclear power plants: problems and tasks (based on proceedings of conferences). *Teploenergetika* = Thermal Engineering. 2018;2:50–54. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S0040363618020030>

12. Larin BM, Larin AB, Suslov SY, Kirilina AV. Standardization of the water heat carrier quality at Russian thermal power plants. *Teploenergetika* = Thermal Engineering. 2017;4:79–84. (In Russ.)

13. Shestakov IYa, Raeva OV, Nikiforova EM, Ero.masov RG. Study of water treatment by electrochemical methods in non-stationary electric field with subsequent coagulation. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* = Modern problems of science and education. 2013;1. Available from: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=8154> [Accessed 26th June 2019]. (In Russ.)

14. Vertinskaya ND, Gerasimova NP. The use of mathematical modeling to optimize the modes of reverse water supply in hydraulic ash removal systems. *Modelirovanie neravnovesnykh sistem: sbornik materialov IX Vsesoyuznogo seminara* = Nonequilibrium system modeling: Collected materials of IX All-Union Seminar. 13–15 October 2006, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk: Institute of Computational Modeling Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2006, p. 49–53. (In Russ.)

15. Maximov AS, Gerasimova NP. *Installation for water treatment ash removal*. Patent RF, no. 2199491; 2003. (In Russ.)

#### Authorship criteria

Gerasimova N.P. has obtained and formalized the scientific results and bears the responsibility for plagiarism.

#### Conflict of interests

The author declares that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by the author.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Natalia P. Gerasimova**,  
Cand. Sci. (Chemistry),  
Associate Professor of the Department  
of Heat Engineering,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;  
✉ e-mail: gerasimova@istu.edu



## Оценка пропускной способности безреагентной испарительной градирни со струйно-пленочными контактными элементами

© А.В. Дмитриев\*, И.Н. Мадышев\*\*, А.И. Хафизова\*, О.С. Дмитриева\*\*

\*Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

\*\*Нижнекамский химико-технологический институт, филиал Казанского национального исследовательского технологического университета, г. Нижнекамск, Россия

**Резюме:** Целью данной статьи является оценка эффективности и пропускной способности струйно-пленочного контактного устройства, а также сравнение по различным критериям с его аналогами. Рассмотрено охлаждение оборотной воды в бесконтактной испарительной градирне с использованием струйно-пленочных контактных элементов, разработанных авторами для применения на промышленных предприятиях теплоэнергетики и других отраслей. Использован «закрытый» контур при охлаждении основного потока, а также блок насадки для снижения температуры остальной жидкости. Проведен сравнительный анализ разработанного контактного устройства с отечественными и мировыми контактными моделями. Выполнена техническая схема градирни с замкнутым контуром охлаждения, которая позволяет сократить использование химических реагентов. Предложена оригинальная конструкция струйно-пленочного контактного устройства, работающая в широком диапазоне рабочих скоростей, обладающая большой постоянно обновляющейся площадью поверхности контакта фазы. Проведен сравнительный анализ разработанной конструкции контактного устройства с аналогами: определено гидравлическое сопротивление в зависимости от «среднерасходной» скорости газа. Приведены технические характеристики блока насадки в зависимости от геометрических размеров устройства. Вычислен F-фактор (произведение скорости воздуха на корень из ее плотности) конструкции при изменении плотности орошения и ширины сливного стакана. Установлено, что устройство работает в широком диапазоне нагрузок, имеет хорошую пропускную способность, достигает высоких значений F-фактора. На разработанной конструкции струйно-пленочного контактного устройства происходит эффективное охлаждение воды, а использование замкнутого контура при охлаждении основного потока оборотной воды позволяет значительно снизить обработку химическими реагентами.

**Ключевые слова:** безреагентная градирня, струйно-пленочное контактное устройство, тепломассообмен, гидравлическое сопротивление, пропускная способность

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации № МК-417.2019.8.

**Информация о статье:** Дата поступления 21 июня 2019 г.; дата принятия к печати 19 августа 2019 г.; дата онлайн-размещения 31 октября 2019 г.

**Для цитирования:** Дмитриев А.В., Мадышев И.Н., Хафизова А.И., Дмитриева О.С. Оценка пропускной способности безреагентной испарительной градирни со струйно-пленочными контактными элементами. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т. 23. № 5. С. 902–910. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-902-910>

## Estimating capacity of a reagent-free evaporative cooling tower with jet-film contact elements

Andrey V. Dmitriev, Ilnur N. Madyshev, Aliya I. Khafizova, Oksana S. Dmitrieva

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Nizhnekamsk Chemical Technology Institute, Branch of Kazan National Research Technological University, Nizhnekamsk, Russia

**Abstract:** The purpose of this article is to evaluate the efficiency and throughput capacity of the jet-film contact device as well as its comparison with analogues by various criteria. Consideration is given to the cooling of circulating water in a contactless evaporative cooling tower using jet-film contact elements developed by the authors for the use at industrial enterprises of heat power engineering and other industries. For cooling the main flow, a "closed" circuit is used whereas a nozzle block is used to reduce the temperature of the rest of the liquid. The developed contact device is compared with domestic and world contact models. The process flow diagram of the cooling tower with a closed cooling circuit, which

allows to reduce the use of chemical reagents is made. An original design of a jet-film contact device operating in a wide range of running speeds and featuring a large constantly renewing surface area of the phase contact is proposed. A comparative analysis of the developed design of the contact device with its analogues is carried out: the hydraulic resistance is determined depending on the average flow rate of gas. The technical characteristics of the nozzle block are given depending on device geometric dimensions. The F-factor (air velocity- its density root product) of the design is calculated when changing the irrigation density and the width of the drain cup. It is determined that the device operates in a wide range of loads, has a good throughput capacity and reaches high values of the F-factor. The developed design of the jet-film contact device provides an effective cooling of water, while the use of a closed circuit when cooling the main flow of recycled water significantly reduces the processing by chemical reagents.

**Keywords:** reagent-free cooling tower, jet-film contact device, heat and mass transfer, hydraulic resistance, capacity

**Acknowledgements:** The work is executed at financial support of the grant of the President of the Russian Federation no. MK-417.2019.8.

**Information about the article:** Received June 21, 2019; accepted for publication August 19, 2019; available online October 31, 2019.

**For citation:** Dmitriev AV, Madyshev IN, Khafizova AI, Dmitrieva OS. Estimating capacity of a reagent-free evaporative cooling tower with jet-film contact elements. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2019;23(5):902–910. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-902-910>

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Для сокращения забора свежей воды из природных источников на многих промышленных предприятиях применяют оборотное водоснабжение, оно позволяет сократить потребление воды в несколько десятков раз. Охлаждение оборотной воды на предприятиях чаще всего происходит в градирнях. Наиболее эффективными и распространенными являются вентиляторные испарительные градирни. Правильная эксплуатация градирни во многом сокращает использование природных ресурсов, также ощутимо снижает энергетические, материальные затраты и уменьшает вредное воздействие на окружающую среду [1–3]. В связи с развитием научно-технологического прогресса появляется множество конструкций для охлаждения промышленной воды, модернизируются оросители, форсунки, каплеуловители [4–7]. Однако, решая одни вопросы, остается ряд других, которые говорят о существенных проблемах охлаждения оборотной воды при эксплуатации градирни, одной из которых является развитие и размножение микроорганизмов и образование биологических отложений на поверхностях конструкций.

Для решения поставленной задачи на многих предприятиях используют химические реагенты, которые уничтожают бактерии, однако они не способны справиться со всеми микроорганизмами в водной среде, а для уничтожения всех живых организмов требуются колоссальные объемы реагентов, что заметно сказывается на экономической составляющей предприятия. Также существенным недостатком при использовании реагентов является их вред, наносимый окружающей среде<sup>1</sup> [8–11].

Решением данной проблемы занимаются не только в России, но и за рубежом. Например, американская компания «Delta Cooling Towers» [12] по производству градирен разработала конструкцию градирни «Cooling Towers – Anti-Microbial Cooling Towers», в которой уничтожение микроорганизмов происходит при соприкосновении со стенками устройства. Такого эффекта создатели добились за счет использования в материалах конструкции антимикробной смолы. Однако у данной конструкции есть недостаток в виде уничтожения только определенного вида микроорганизмов. Также существуют микробы, которые способны приспосабливаться к плохим условиям и продолжать свое существование.

В связи с этим наиболее рацио-

<sup>1</sup>Копылов А.С., Лавыгин В.М., Очков В.Ф. Водоподготовка в энергетике: учеб. пособ. для вузов. М.: Изд. дом МЭИ, 2016. 309 с.

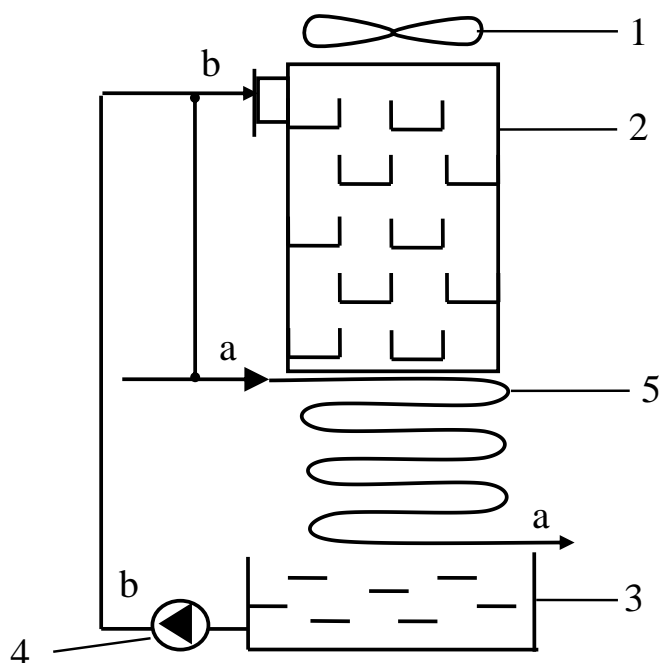
нальным способом решения данной проблемы и повышения эффективности охлаждения оборотной воды является разработка конструкции градирни, которая позволила бы существенно сократить использование химических реагентов при должном охлаждении воды. Такого эффекта можно добиться за счет разделения жидкости, поступающей на охлаждение. При этом основной поток жидкости контактирует с охлаждающим воздухом только через стенку труб. Следовательно, эта часть жидкости не нуждается в дополнительной обработке химическими реагентами в отличие от жидкости, поступающей из градирни.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Авторами данной статьи была разработана конструкция градирни бесконтактного испарительного охлаждения с использованием струйно-пленочных контактных элементов (рис. 1). Особенность данной градирни заключается в том, что горячий поток воды, поступающий в градирню,

разделяется на два: основной поток (а) поступает в трубы и отдает тепло через стенку предварительно охлажденной в контактных устройствах жидкости. Другой поток (b) поступает в блок оросителя, распределяется по всему его сечению, контактируя с восходящим потоком воздуха. Часть воды испаряется, отдавая свое тепло, затем уже охлажденная вода с последней ступени контактного устройства распределяется в виде капель, брызг и пленки по наружной поверхности радиатора. Стоит отметить, что данный вид контакта позволяет увеличить коэффициенты теплоотдачи с поверхности труб в несколько раз за счет соударения жидкой фазы о твердую поверхность и, как следствие, наименьшего ламинарного пограничного слоя.

Основными элементами предлагаемой градирни являются: блок оросителя 2, состоящий из струйно-пленочных контактных элементов; водосборный бассейн 3; вентилятор 1, обеспечивающий движение атмосферного воздуха; водяной насос 4; радиатор 5, служащий для охлаждения основного потока оборотной воды.



**Рис. 1. Принципиальная схема безреагентной испарительной градирни со струйно-пленочным и контактными элементами (а – основной поток горячей воды; b – орошаемый поток воды):**

**1 – вентилятор; 2 – ороситель; 3 – водосборный бассейн; 4 – водяной насос; 5 – радиатор**

**Fig. 1. Schematic diagram of a reagent-free evaporative cooling tower with jet-film contact elements (a – main hot water flow; b – sprayed water flow): 1 – fan; 2 – sprinkler; 3 – drainage basin; 4 – water pump; 5 – radiator**

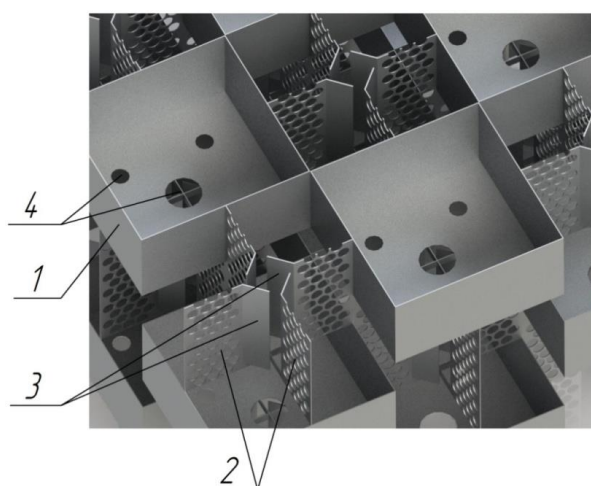


Разработанный блок оросителя [13] представлен на рис. 2 и состоит из открытых сверху сливных стаканов 1 квадратной формы, необходимых для сбора и распределения жидкости по сечению аппарата в целом. Эти стаканы 1 устанавливают на комплекс перегородок 2. В последних выполнены отгибы 3, направленные в сторону линии сгиба перпендикулярно расположенной перегородки. С целью снижения металлоемкости устройства в перегородках 2 выполнены круглые отверстия. В днище сливных стаканов 1 выполнены отверстия 4, которые служат для слива жидкости на нижерасположенном сливном стакане 1. Причем основной поток жидкости проходит через центральное отверстие большего диаметра.

Блок насадки, устанавливаемый в градирню, работает следующим образом: подаваемая на охлаждение вода поступает в сливные стаканы 1 и стекает через отверстия 4 в днище, затем поток в виде струй распределяется по поверхности нижерасположенных вертикальных перегородок 2, далее пленка, ударяясь о поверхность воды в сливных стаканах 1, создает новую поверхность контакта фаз, которая определяется наличием относительно небольших газовых пузырей в слое жидкости и вылетающих из него капель, при этом она

постоянно обновляется. В сливных стаканах поддерживается уровень жидкости за счет наличия вертикальных стенок; из-за шахматного распределения сливных стаканов 1 атмосферный воздух, поступающий снизу, движется зигзагообразно. Такое конструктивное оформление позволяет увеличить относительную скорость движения рабочих сред, интенсифицируя при этом процессы переноса массы, энергии и импульса. Под действием восходящего потока воздуха струи воды образуют устойчивую пленку, которая стекает по поверхности вертикальных перфорированных перегородок 2. Таким образом, при непосредственном контакте газовой и жидкой фаз происходит тепломассоперенос.

Геометрические размеры контактного устройства с пленочным взаимодействием газа и жидкости выбираются исходя из равенства площадей для прохода газа в поперечном и продольном сечениях аппарата. Отсутствие локальных расширений и сужений для восходящего потока воздуха ведет к снижению гидравлического сопротивления контактного устройства, а отсутствие деталей, изготавливаемых с высокой точностью, обеспечивает невысокую себестоимость выпуска блоков предлагаемой насадки.



**Рис. 2. Контактное устройство с пленочным взаимодействием газа и жидкости:**

**1 – сливной стакан; 2 – вертикальные перфорированные перегородки; 3 – отгибы на вертикальных перфорированных перегородках; 4 – сливные отверстия**

**Fig. 2. Contact device with film interaction of gas and liquid: 1 – down comer; 2 – vertical perforated partitions; 3 – bends on the vertical perforated partitions; 4 – drain holes**



Целью настоящих исследований является оценка эффективности и пропускной способности предлагаемого блока насадки, а также комплексное сравнение по различным критериям с известными отечественными и мировыми контактными устройствами.

При относительно невысоких значениях удельной поверхности контакта фаз в предлагаемом блоке насадки (при ширине сливного стакана 60 мм) высота, эквивалентная теоретической тарелке (ВЭТТ), может достигать 0,15 м (таблица). Термин «теоретическая тарелка (тт)» характеризует полное достижение равновесия, следовательно, в предлагаемом устройстве высотой 150 мм может наблюдаться насыщение воздуха водяными парами до 100%. Данные получены на основе экспериментальных исследований по адиабатическому увлажнению воздуха, представленных в работе [14]. Кроме того, при расчете удельной поверхности контакта фаз не были учтены поверхности образующихся струй, капель и пузырей.

Сравнение по гидравлическому сопротивлению предлагаемого блока оросителя с насадкой «Инжехим-2000» [15] показывает, что при среднерасходной скорости газа до 2,3 м/с сопротивление струйно-пленочного устройства несколько выше (рис. 3). Однако диапазон рабочих скоростей газа в струйно-пленочных контактных устройствах значительно больше, т.е. режим «подвисяния» начинается при скоро-

сти газа 3,2–3,3 м/с при прочих равных условиях (система «воздух-вода»).

Для того чтобы дать более точную оценку пропускной способности разработанного устройства, авторами был определен  $F$ -фактор (рис. 4), представляющий собой произведение плотности газа в степени 0,5 и его среднерасходной скорости. Изменение  $F$ -фактора (в зависимости от ширины сливного стакана) происходит практически линейно и, как видно из графика, с ростом ширины сливного стакана  $F$ -фактор также увеличивается. Кроме того, стоит отметить, что с увеличением плотности орошения значение  $F$ -фактора снижается. Полученные результаты говорят о высокой пропускной способности предлагаемых аппаратов, т.к. известные насадки на сегодняшний день имеют максимальные значения  $F$ -фактора в пределах 6–8 [16–19].

Одним из ключевых показателей, определяющих энергетическую эффективность насадочных элементов, является комплексная характеристика  $\Delta P/N_{тт}$  (отношение гидравлического сопротивления  $\Delta P$  к количеству теоретических тарелок  $N_{тт}$ ), показывающая потери давления на одной теоретической тарелке. Сравнение предлагаемого блока насадки с известными мировыми аналогами фирм «Sulzer», «NORTON», «БАКУПАК», «КЕДР», «Инжехим», «Koch-glitsch» показывает высокую конкурентоспособность струйно-пленочных контактных элементов. Так, например, регулярная насадка Mellapak 250.Y фирмы

### Технические характеристики блока насадки, состоящего из струйно-пленочных контактных элементов

#### Technical characteristics of the nozzle unit consisting of jet-film contact elements

Ширина сливного стакана $b$ , мм	Удельный свободный объем, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>			Удельная поверхность контакта фаз, м <sup>2</sup> /м <sup>3</sup>			ВЭТТ, м
	толщина металла, мм			уровень жидкости в сливном стакане $h_2$			
	0,5	1	2	$b/8$	$b/4$	$b/2$	
60	0,967	0,93	0,867	94,6	89,0	78,0	0,15–0,36
75	0,97	0,945	0,89	75,5	71,1	62,2	0,34–0,52
100	0,98	0,96	0,92	56,7	53,4	46,7	0,45–0,83
150	0,986	0,97	0,945	37,8	35,6	31,1	0,6–1,1

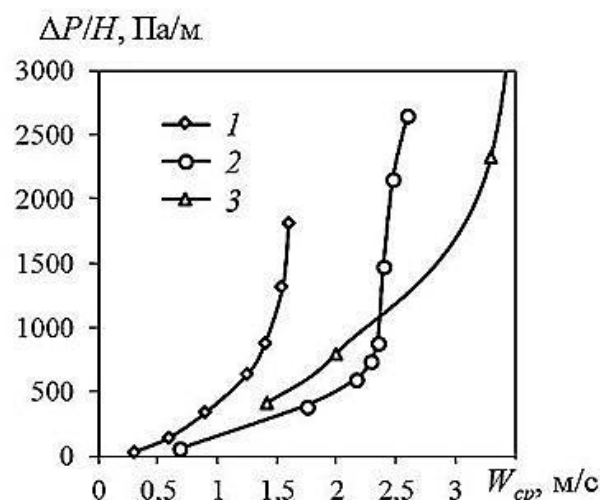


Рис. 3. Зависимость гидравлического сопротивления насадочного слоя от среднерасходной скорости газа и типа контактного устройства при плотности орошения  $40 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ : 1 – кольца Рашига  $50 \times 50 \text{ мм}$ ; 2 – насадка «Инжехим-2000»; 3 – струйно-пленочное контактное устройство,  $b = 60 \text{ мм}$

Fig. 3. Dependence of the flow resistance of the packing layer on the average rate of gas and the type of contact device at the liquid spray rate of  $40 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ : 1 – Rashig ring of  $50 \times 50 \text{ мм}$ ; 2 – "Injexim-2000" nozzle; 3 – jet-film contact device,  $b = 60 \text{ мм}$

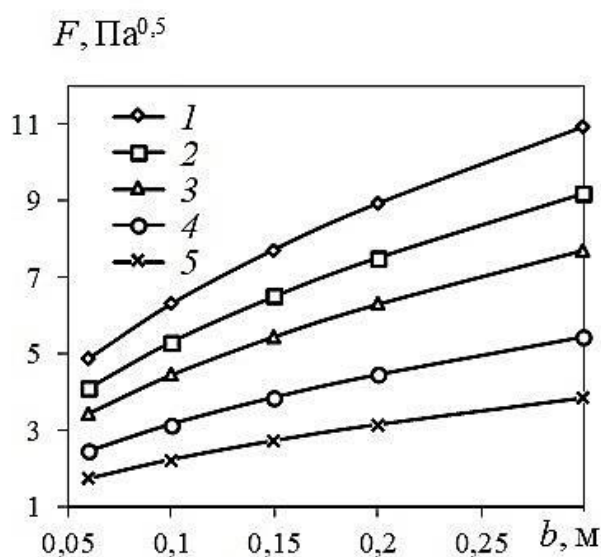


Рис. 4. Изменение F-фактора предлагаемого блока насадки в зависимости от ширины сливного стакана при различных плотностях орошения,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ : 1 – 10; 2 – 20; 3 – 30; 4 – 50; 5 – 70

Fig. 4. Variation of the F-factor of the proposed nozzle block depending on the width of the down comer at different liquid spray rates,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ : 1 – 10; 2 – 20; 3 – 30; 4 – 50; 5 – 70

«Sulzer» эффективно работает только при плотностях орошения до  $20 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ . Число теоретических тарелок на 1 м занимаемой высоты составляет 2–3, а гидравлическое сопротивление при среднерасходной ско-

рости газа равной 3 м/с – около 700 Па/м [20]. Следовательно,  $\Delta P/\text{Нтт}$  составит 233,3–350 Па. При аналогичных условиях работы в струйно-пленочных контактных устройствах (при ширине сливного стакана



$b = 60$  мм) гидравлическое сопротивление составляет 1300 Па/м, число теоретических тарелок на 1 м высоты контактных элементов изменяется в пределах 3–6. Тогда  $\Delta P/N_{\text{т}} = 216,7\text{--}433,3$  Па.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенные исследования подтверждают высокую пропускную способность и эффективность разработанных контактных устройств, при этом они способны работать в широком диапа-

зоне нагрузок как по жидкой, так и по газовой фазам при относительно невысоком гидравлическом сопротивлении, не превышающем показатели известных аналогов. Предложенная конструкция струйно-пленочного контактного устройства позволяет эффективно охлаждать воду промышленных предприятий, а использование замкнутого контура при охлаждении основного потока оборотной воды обеспечивает значительное снижение обработки химическими реагентами.

### Библиографический список

1. Даутов Р.Г., Вилохин С.А. Повышение эффективности процесса охлаждения в градирне // Вестник Казанского технологического университета. 2013. № 5. С. 190–193.
2. Xuehong Chen, Fengzhong Sun, Youliang Chen, Ming Gao. Novel method for improving the cooling performance of natural draft wet cooling towers // Applied Thermal Engineering. 2019. Vol. 147. P. 562–570. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.10.076>
3. Golovanchikov A.B., Merentsov N.A., Balashov V.A. Modeling and analysis of a mechanical-draft cooling tower with wire packing and drip irrigation // Chemical and Petroleum Engineering. 2013. Vol. 48. No. 9–10. P. 595–601.
4. Boev E.V., Ivanov S.P., Afanasenko V.G., Nikolaev E.A. Polymeric drop-film sprinklers for cooling towers // Chemical and Petroleum Engineering. 2009. Vol. 45. No. 7–8. P. 454–459.
5. Dmitrieva O.S., Dmitriev A.V., Nikolaev A.N. Distribution of circulating water in the work area of a vortex chamber with disk atomizer for the purpose of increasing the efficiency of the cooling process // Chemical and Petroleum Engineering. 2014. Vol. 50. No. 3–4. P. 169–175. <https://doi.org/10.1007/s10556-014-9874-1>
6. Fisenko S.P., Petruchik A.I., Solodukhin A.D. Evaporative cooling of water in a natural draft cooling tower // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2002. Vol. 45. No. 23. P. 4683–4694.
7. Afanasenko V.G., Khafizov F.Sh., Khafizov N.F., Ivanov S.P., Boev E.V. Development of designs for polymeric water traps in cooling towers using centrifugal separation forces // Chemical and Petroleum Engineering. 2007. Vol. 43. Issue 11–12. P. 653–656.
8. Чичирова Н.Д., Чичиров А.А., Власов С.М., Власова А.Ю. Методы снижения бактериального загрязнения систем оборотного охлаждения ТЭЦ // Теплоэнергетика. 2015. № 7. С. 62–67. <https://doi.org/10.1134/S0040363615070024>
9. Cheremisinoff N.P. Pollution Control Handbook for Oil and Gas Engineering. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016. 1400 p.
10. Yang Liu, Wei Zhang, Sileika T., Warta R. Disinfection of bacterial biofilms in pilot-scale cooling tower systems // Biofouling. 2011. Vol. 27. No. 4. P. 393–402. <https://doi.org/10.1080/08927014.2011.577525>
11. Pagnier I., Merchat M., La Scola B. Potentially pathogenic amoeba-associated microorganisms in cooling towers and their control // Future Microbiology. 2009. No. 4. P. 615–629.
12. Iervolino M., Mancini B., Cristino S. Industrial Cooling Tower Disinfection Treatment to Prevent Legionella spp // International journal of environmental research and public health. 2017. Vol. 14. No. 10. P. 1125.
13. Пат. № 187324, Российская Федерация, В01D 3/20. Контактное устройство со струйно-пленочным взаимодействием газа и жидкости / А.В. Дмитриев, О.С. Дмитриева, И.Н. Мадышев, А.А. Сагдеев, А.Н. Николаев, Р.С. Гатин; заявитель и патентообладатель Дмитриев А.В. Заявл. 26.11.2018; опубл. 01.03.2019. Бюл. № 7.
14. Dmitrieva O.S., Madyshev I.N., Dmitriev A.V. Determination of the Heat and Mass Transfer Efficiency at the Contact Stage of a Jet-Film Facility // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2017. Vol. 90. No. 3. P. 651–656.
15. Лаптев А.Г. Контактные насадки промышленных теплообменных аппаратов. Казань: Отечество, 2013. 454 с.
16. Каган А.М., Пушнов А.С., Рябушенко А.С. Сравнение эффективности промышленных насадок для испарительного охлаждения оборотной воды в градирнях // Химическая промышленность сегодня. 2007. № 4. С. 44–48.
17. Сокол Б.А., Чернышев А.К., Баранов Д.А., Беренгартен М.Г., Левин Б.В. Насадки массообменных колонн. М.: ИНФОХИМ, 2009. 358 с.
18. Меренцов Н.А., Нефедьева Е.Э., Лебедев В.Н., Циркунова Е.А., Голованчиков А.Б., Балашов В.А. Экспериментальное исследование модульной теплообменной насадки градирен // Вестник Технологического университета. 2017. Т. 20. № 24. С. 141–144.
19. Голованчиков А.Б., Меренцов Н.А., Топилин М.В., Персидский А.В. Динамическая насадка для

тепло- и массообменных процессов // Вестник Технологического университета. 2018. Т. 21. № 9. С. 50–53.

20. Леонтьев В.С. Инновации в области разработки высокоинтенсивных массообменных устройств для

модернизации ректификационных комплексов // Нефтегазовое дело. 2012. № 1. С. 178–186. [Электронный ресурс]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20709408> (12.08.2018).

## References

1. Dautov RG, Vilokhin SA. Improving cooling efficiency in a cooling tower. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* = Bulletin of Kazan Technological University. 2013;5:190–193. (In Russ.)
2. Xuehong Chen, Fengzhong Sun, Youliang Chen, Ming Gao. Novel method for improving the cooling performance of natural draft wet cooling towers. *Applied Thermal Engineering*. 2019;147:562–570. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.10.076>
3. Golovanchikov AB, Merentsov NA, Balashov VA. Modeling and analysis of a mechanical-draft cooling tower with wire packing and drip irrigation. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2013;48(9–10):595–601.
4. Boev EV, Ivanov SP, Afanasenko VG, Nikolaev EA. Polymeric drop-film sprinklers for cooling towers. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2009;45(7–8):454–459.
5. Dmitrieva OS, Dmitriev AV, Nikolaev AN. Distribution of circulating water in the work area of a vortex chamber with disk atomizer for the purpose of increasing the efficiency of the cooling process. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2014;50(3–4):169–175. <https://doi.org/10.1007/s10556-014-9874-1>
6. Fisenko SP, Petruchik AI, Solodukhin AD. Evaporative cooling of water in a natural draft cooling tower. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2002;45(23):4683–4694.
7. Afanasenko VG, Khafizov FSh, Khafizov NF, Ivanov SP, Boev EV. Development of designs for polymeric water traps in cooling towers using centrifugal separation forces. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2007;43(11–12):653–656.
8. Chichirova ND, Chichirov AA, Vlasov SM, Vlasova AYU. Methods to reduce bacterial contamination of recycling cooling systems of a CHPP. *Thermal Engineering*. 2015;7:62–67. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S0040363615070024>
9. Cheremisnoff NP, Cheremisnoff NP. *Pollution Control Handbook for Oil and Gas Engineering*. Hoboken: John Wiley & Sons; 2016. 1400 p.
10. Yang Liu, Wei Zhang, Sileika T, Warta R. Disinfection of bacterial biofilms in pilot-scale cooling tower systems. *Biofouling*. 2011;27(4):393–402. <https://doi.org/10.1080/08927014.2011.577525>
11. Pagnier I, Merchat M, La Scola B. Potentially pathogenic amoeba-associated micro-organisms in cooling towers and their control. *Future Microbiology*. 2009;4:615–629.
12. Iervolino M, Mancini B, Cristino S. Industrial Cooling Tower Disinfection Treatment to Prevent Legionella spp. *International journal of environmental research and public health*. 2017;14(10):1125.
13. Dmitriev AV, Dmitrieva OS, Madyshev IN, Sagdeev AA, Nikolaev AN, Gatin RS. *Contact device with jet-film interaction of gas and liquid*. Patent RF, no. 187324; 2019. (In Russ.)
14. Dmitrieva OS, Madyshev IN, Dmitriev AV. Determination of the Heat and Mass Transfer Efficiency at the Contact Stage of a Jet-Film Facility. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2017;90(3):651–656.
15. Laptev AG. *Contact nozzles of industrial heat-mass transfer devices*. Kazan: Otechestvo; 2013. 454 p. (In Russ.)
16. Kagan AM, Pushnov AS, Ryabushenko AS. Comparing efficiency of industrial nozzles for evaporative cooling of circulating water in cooling towers. *Himicheskaya promyshlennost' segodnya* = Chemical Industry Today. 2007;4:44–48. (In Russ.)
17. Sokol BA, Chernyshev AK, Baranov DA, Berengarten MG, Levin BV. *Nozzles of mass transfer columns*. Moscow: INFOKHIM; 2009. 358 p. (In Russ.)
18. Merentsov NA, Nefed'yeva EE, Lebedev VN, Tsirkunova EA, Golovanchikov AB, Balashov VA. Experimental study of modular heat and mass transfer nozzles of cooling towers. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta* = Bulletin of the Technological University. 2017;20(24):141–144. (In Russ.)
19. Golovanchikov AB, Merentsov NA, Topilin MV, Persidskiy AV. Dynamic nozzle for heat- and mass-exchange processes. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta* = Bulletin of the Technological University. 2018;21(9):50–53. (In Russ.)
20. Leont'yev VS. Innovative development of high-intensity mass exchange units for rectification complexes modernization. *Neftegazovoe delo* = Oil and Gas business. 2012;1:178–186. Available from: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20709408> [Accessed 12th August 2018].

## Критерии авторства

Дмитриев А.В., Мадышев И.Н., Хафизова А.И., Дмитриева О.С. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в одинаковой мере несут ответственность за плагиат.

## Authorship criteria

Dmitriev A.V., Madyshev I.N., Khafizova A.I., Dmitrieva O.S. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.



### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Дмитриев Андрей Владимирович,**

доктор технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой теоретических  
основ теплотехники,  
Казанский государственный энергетический  
университет,  
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, Россия;  
✉ e-mail: ieremiada@gmail.com

**Мадышев Ильнур Наилович,**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры машин и аппаратов химических  
производств,  
Нижнекамский химико-технологический институт,  
филиал Казанского национального  
исследовательского технологического университета,  
423575, г. Нижнекамск, пр. Строителей, 47, Россия;  
Казанский государственный энергетический  
университет,  
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, Россия;  
e-mail: ilnyr\_91@mail.ru

**Хафизова Алия Ильгизаровна,**

студент,  
Казанский государственный энергетический  
университет,  
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, Россия;  
e-mail: aliyahi@mail.ru

**Дмитриева Оксана Сергеевна,**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры процессов и аппаратов химических  
технологий,  
Нижнекамский химико-технологический институт,  
филиал Казанского национального  
исследовательского технологического университета,  
423575, г. Нижнекамск, пр. Строителей, 47, Россия;  
Казанский государственный энергетический  
университет,  
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, Россия;  
e-mail: ja\_deva@mail.ru

### Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Andrey V. Dmitriev,**

Dr. Sci. (Eng.),  
Associate Professor,  
Head of the Department of Theoretical Foundations  
of Heat Engineering,  
Kazan State Power Engineering University,  
51, Krasnoselskaya St., Kazan 420066, Russia;  
✉ e-mail: ieremiada@gmail.com

**Ilnur N. Madyshev,**

Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor of the Department of Machinery  
and Apparatus of Chemical production», Nizhnekamsk  
Chemical Technology Institute, Branch of Kazan  
National Research Technological University,  
47 Stroiteley pr., Nizhnekamsk 423575, Russia;  
Kazan State Power Engineering University,  
51, Krasnoselskaya St., Kazan 420066, Russia;  
e-mail: ilnyr\_91@mail.ru

**Aliya I. Khafizova,**

Student,  
Kazan State Power Engineering University,  
51, Krasnoselskaya St, Kazan 420066, Russia;  
e-mail: aliyahi@mail.ru

**Oksana S. Dmitrieva,**

Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor of the Department of Processes  
and Apparatus of Chemical Technologies,  
Nizhnekamsk Chemical Technology Institute, Branch  
of Kazan National Research Technological University,  
47 Stroiteley pr., Nizhnekamsk 423575, Russia;  
Kazan State Power Engineering University,  
51, Krasnoselskaya St, Kazan 420066, Russia;  
e-mail: ja\_deva@mail.ru



## Определение наведенных напряжений, создаваемых трехфазными линиями электропередачи в особых режимах

© В.П. Закарюкин\*, А.В. Крюков\*\*\*, Нгуен Ты\*\*

\*Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия

\*\*Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

**Резюме:** Цель – разработка методики компьютерного моделирования наведенных напряжений, создаваемых высоковольтными линиями электропередачи в режимах обрыва фаз и несимметричных коротких замыканий. Применены методы определения режимов электроэнергетических систем в фазных координатах, реализованные в программном комплексе Fazonord. Воздушные линии различного назначения, проходящие вдоль трасс высоковольтных линий электропередачи переменного тока, подвержены электрическому и магнитному воздействию. Поэтому возможно появление опасных напряжений на отключенных линиях при их значительной удаленности (100 м и более) от влияющей линии. Для определения уровней наведенных напряжений проведено моделирование режимов линий электропередачи 220 кВ, параллельно которой проложена линия 10 кВ. Расчеты наведенных на смежной линии напряжений выполнены для следующих режимов работы линий электропередачи: симметричного обрыва фаз А, В и С, А – с одновременным замыканием на землю однофазного и двухфазного коротких замыканий. Рассмотрение различных способов заземления линии, подверженной влиянию, показало, что в некоторых условиях уровни наведенных напряжений могут превышать 11 кВ. Предложенная методика компьютерного моделирования режимов электроэнергетических систем, разработанная в Иркутском государственном университете путей сообщения, позволяет определять условия электробезопасности при работе на линиях электропередачи и связи, находящихся в зонах электромагнитного влияния. Методика отличается универсальностью и позволяет определять наведенные напряжения на линиях, подверженных электромагнитному влиянию в различных режимах работы.

**Ключевые слова:** высоковольтные линии электропередачи, электромагнитное влияние, наведенные напряжения

**Информация о статье:** Дата поступления 28 февраля 2019 г.; дата принятия к печати 01 апреля 2019 г.; дата онлайн-размещения 31 октября 2019 г.

**Для цитирования:** Закарюкин В.П., Крюков А.В., Нгуен Ты. Определение наведенных напряжений, создаваемых трехфазными линиями электропередачи в особых режимах. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т. 23. № 5. С. 911–923. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-911-923>

## Determination of voltages induced by three-phase power lines in particular modes

Vasily P. Zakaryukin, Andrey V. Kryukov, Nguyen Tu

*Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia*

*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

**Abstract:** The purpose of the paper is to develop a method of computer simulation of induced voltages generated by high-voltage power lines in the modes of open phase faults and asymmetric short circuits. The study uses the methods of determining electric power system modes in phase coordinates implemented in the software package Fazonord. Air lines for various purposes running along the routes of high-voltage AC power lines are subjected to electrical and magnetic influences. Therefore, dangerous voltages may appear on the disconnected lines when they are located remotely (100 m and more) from the influencing line. To determine the levels of the induced voltages the modes of 220 kV power lines located in parallel to the 10 kV line are simulated. Calculations of voltages induced on the adjacent line are performed for the following operation modes of a transmission line: symmetric open fault of the phases A, B and C, whereas A is with the simultaneous short circuit to earth of the single phase and two phase short circuits. Consideration of different grounding methods of the line subjected to the influence showed that under some conditions the levels of the induced voltages can exceed 11 kV. The proposed method of computer simulation of electric power system modes developed at the Irkutsk state Transport University allows to determine the conditions of electrical safety when working on power and com-



munication lines located in the areas of electromagnetic effects. The procedure is versatile and allows determination of the induced voltages on the lines exposed to electromagnetic effects in different operating modes.

**Keywords:** high-voltage power lines, electromagnetic influence, induced voltages

**Information about the article:** Received February 28, 2019; accepted for publication 01 April, 2019; available online October 31, 2019.

**For citation:** Zakaryukin VP, Kryukov AV, Nguyen Tu. Determination of voltages induced by three-phase power lines in particular modes. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2019;23(5):911–923. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-911-923>

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Воздушные линии различного назначения, проходящие вдоль трасс высоковольтных линий электропередачи (ЛЭП) переменного тока, подвержены электрическому и магнитному влияниям этих ЛЭП. Поэтому возможно появление опасных напряжений на отключенных линиях при значительной их удаленности (100 м и более) от влияющей ЛЭП [1–10]. В нормальных условиях симметричного режима высоковольтной ЛЭП ее влияние на смежные линии ввиду равенства нулю сумм напряжений и токов проводов сравнительно невелико. Однако при обрыве фаз и некоторых видах несимметричных коротких замыканий возникает неуравновешенный режим ЛЭП с возвратом тока через землю, что приводит к значительному росту наведенных напряжений на смежных линиях. Такие режимы представляют серьезную опасность при обслуживании отключенных смежных линий электропередачи или связи.

Поэтому задача разработки методов компьютерного моделирования наведенных напряжений является актуальной. Анализ работ [9–15], посвященных проблеме защиты от воздействия наведенных напряжений, показывает, что универсальная методика определения наведенных напряжений, реализованная в программном продукте, в этих работах не представлена.

Методы моделирования режимов электроэнергетических систем (ЭЭС), предложенные в Иркутском государственном университете путей сообщения [16–18] и реализованные в программном комплексе Fazonord, позволяют предложить универсальную методику определения наведен-

ных напряжений, отличающуюся возможностью моделирования различных режимов, включая сложносимметричные, в частности, отличающиеся многократными продольными и поперечными несимметриями.

## 2. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАВЕДЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Моделирование режимов ЭЭС в наиболее общем виде может быть представлено как следующее функциональное преобразование:

$$\mathbf{A} : \mathbf{D} \Rightarrow \mathbf{X}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{A}$  – нелинейный оператор;  $\mathbf{D} = \mathbf{S} \cup \mathbf{Y}$  – вектор исходных данных;  $\mathbf{X}$  – вектор параметров режима;  $\mathbf{S}$  – набор данных, описывающих структуру и параметры элементов СЭС;  $\mathbf{Y}$  – параметры, характеризующие генераторы и нагрузки.

Преобразованию (1) отвечает система уравнений установившегося режима, в общем случае являющаяся нелинейной

$$\mathbf{F}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \mathbf{0}, \quad (2)$$

где  $\mathbf{F}$  – нелинейная вектор-функция.

В основу предлагаемых в статье моделей положена технология определения режимов электроэнергетических систем, когда уравнения (2) записываются с использованием фазных координат [16–18]. Рассматриваемые методы моделирования ЭЭС базируются на применении решетчатых схем замещения, обладающих полностью связной топологией.



Основные элементы, образующие сеть ЭЭС, могут быть разделены на две группы [16]:

- элементы для транспорта электроэнергии: воздушные и кабельные линии электропередачи, токопроводы и т.д.;
- преобразовательные элементы, к которым относятся трансформаторы различных конструкций.

Указанные устройства можно обобщенно рассматривать как статические многопроводные элементы, которые можно представлять в виде набора проводов или обмоток с электромагнитными связями.

Проблема моделирования многопроводных линий в фазных координатах пересекается с вопросами анализа опасного электромагнитного влияния одной линии на другую. Разработанные модели элементов ЭЭС [16] напрямую применимы к решению задач определения наведенных напряжений. При этом реализуется системный подход, когда анализируемые ЛЭП рассматриваются в неразрывной связи со сложной ЭЭС.

Для адекватного расчета наведенных напряжений определение сопротивления взаимной индуктивной связи между проводами линий необходимо определять с корректным учетом интеграла Карсона [19] в ближней, промежуточной и дальней зонах [20]. Именно такой подход [17, 18] реализован в рассматриваемой в статье методике.

### 3. ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА МОДЕЛИРОВАНИЯ

В качестве объектов исследований рассмотрено две линии электропередачи: линия 220 кВ под рабочим напряжением и (параллельно ей расположенная) отключенная линия 10 кВ.

Для получения количественной оценки наведенных напряжений проведено численное моделирование для сравнительно простой схемы, показанной на рис. 1 а. В состав исследуемой системы входили

ли шины 220 кВ питающей энергосистемы большой мощности, участок ЛЭП 220 кВ АС-600 (с параллельно расположенной линией 10 кВ длиной 10 км) и симметричная нагрузка, включенная через трансформатор мощностью 630 МВ·А с заземленной нейтралью, с мощностями потребления  $50+j30$  МВ·А на фазу в симметричном режиме и при обрыве одной фазы. При обрыве двух фаз нагрузки снижены до  $2+j2$  МВ·А на фазу. При коротких замыканиях (КЗ) нагрузки принимались нулевыми. Координаты расположения проводов ЛЭП 220 кВ представлены на рис. 1 б. Провода смежной линии 10 кВ расположены на расстоянии 100 м от ЛЭП 220 кВ на высоте 8 м.

Проанализированы следующие режимы работы ЛЭП 220 кВ:

- симметричный нагрузочный режим;
- трехфазное, однофазное и два вида двухфазных коротких замыканий;
- обрывы фаз, включая режимы одновременного замыкания оборванного провода на землю.

Расчеты режимов ЛЭП 220 кВ и соответствующих ему наведенных напряжений на линии 10 кВ проведены программным комплексом Fazonord, в котором реализовано моделирование электроэнергетических систем в фазных координатах [16–18]. Фрагмент расчетной схемы для симметричного режима ЛЭП 220 кВ показан на рис. 2. Расчеты наведенных напряжений проводились по методике работы [17]. Удельная проводимость земли принята равной 0,01 См/м.

В соответствии с рекомендациями статьи [12], рассматривались ситуации, связанные с заземлением отключенной линии 10 кВ (табл. 1), в т.ч. не предусмотренные правилами, но возможные в практике эксплуатации<sup>1</sup>.

В соответствии с межотраслевыми правилами<sup>1</sup>, допустимыми по условиям безопасности, являются схемы, представленные в строках 1 и 5 табл. 1. Однако, как

<sup>1</sup> Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок. М.: НЦ ЭНАС, 2003. 192 с.

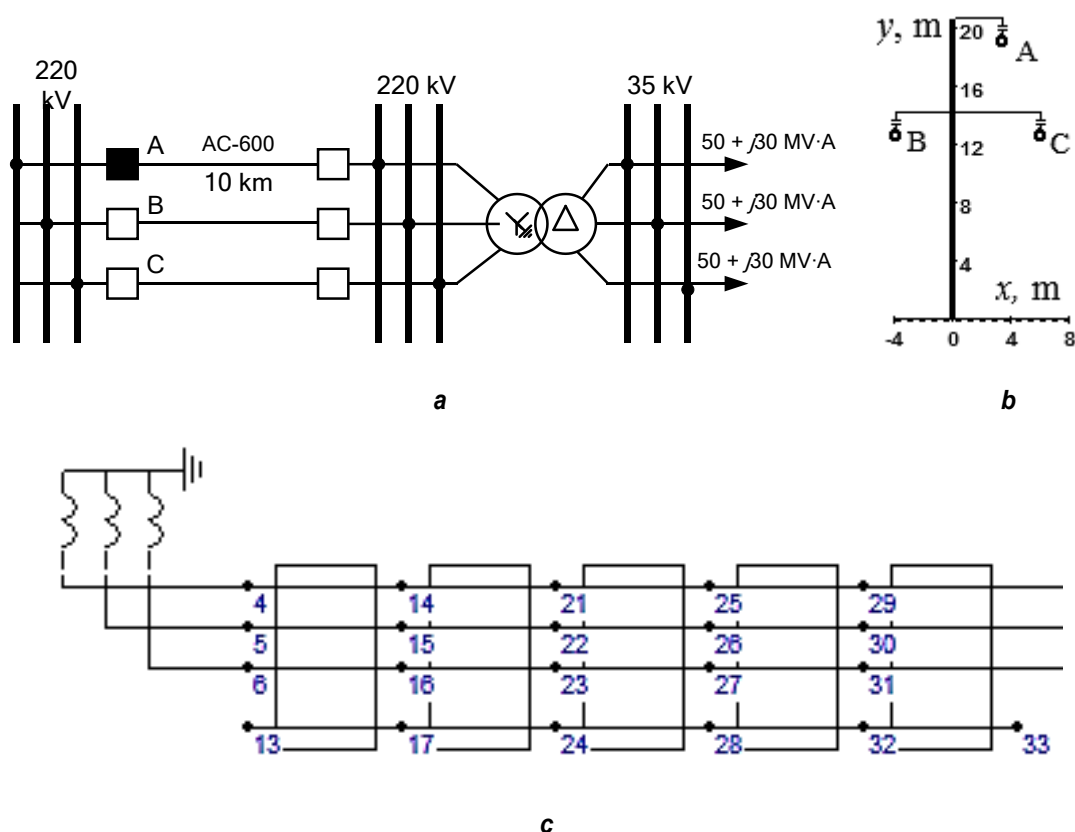


Рис. 1. Схема сети (а), расположение проводов на опоре линии электропередач 220 кВ (b) и  
 фрагмент расчетной схемы для симметричного режима сети 220 кВ (с)  
 Fig. 1. Network diagram (a), wires arranged on a 220 kV power line support (b) and a fragment of the design  
 diagram for the symmetric mode of 220 kV network (c)

Таблица 1

Варианты заземления линии 10 кВ

Table 1

10 kV line grounding options

№	Способ заземления	Схема заземления
1	Заземление в распределительных устройствах и на месте работ	
2	Двустороннее заземление	
3	Одностороннее заземление слева	
4	Одностороннее заземление справа	
5	Заземление в месте работ	
6	Незаземленная линия	

Примечание/Note. Цифрами обозначены узлы расчетной схемы по рис. 1 с./ The numbers indicate the nodes of the design diagram according to Fig. 1 с.



отмечается в работе [12], остальные схемы, приведенные в этой таблице, могут реализовываться в практике эксплуатации электроустановок.

Ситуация, приведенная во второй строке табл. 2, может возникнуть на отключенной линии, которая заземлена на отправном и приемном концах, когда переносное заземление (ПЗ) на рабочем месте еще не установлено. Она может иметь место также при окончании работ после снятия ПЗ. Кроме того, она может проявляться и в процессе работ по следующим причинам:

- ошибочное снятие ПЗ;
- повреждение проводников переносного заземления;
- плохой контакт ПЗ с заземлителем;
- неисправности в заземляющем устройстве.

Схемы, приведенные в строках 3 и 4, могут иметь место в следующих случаях:

- при проведении оперативных переключений по выводу линии в ремонт;
- при возникновении неисправности в заземляющем устройстве;
- при обрывах проводов отключенной линии.

Схема, представленная в последней строке табл. 1, может быть реализована при следующих ситуациях:

- на промежуточных этапах вывода линии в ремонт;
- при ошибочном снятии ПЗ в схемах, приведенных в строках 3 и 4;
- при наличии неисправности на заземлителе, к которому присоединено ПЗ.

#### **4. НАВЕДЕННЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ОБРЫВАХ ФАЗ**

Обрывы фаз ЛЭП 220 кВ приводят к неполнофазным режимам, сопровождающимся повышенными напряжениями, наведенными на смежной линии. Для количественной оценки таких эффектов рассмотрены неполнофазные режимы с обрывом фазы А на отправном конце ЛЭП и с обрывом фаз В и С в той же точке.

Зависимости (наведенных на проводах линии 10 кВ) напряжений от расстояния до питающей подстанции по вариантам табл. 1 при сопротивлениях заземлителей 10 Ом показаны на рис. 2. Цифры на графиках здесь и далее отвечают номерам строк табл. 1.

Результаты расчетов показали следующее.

1. В симметричном режиме влияющей ЛЭП 220 кВ наведенные напряжения сравнительно невелики. При длине, заземленной в нескольких точках смежной линии 10 км, наведенные напряжения провод-земля не превышают 13 В; при незаземленной линии напряжение определяется емкостной связью и достигает 200 В.

2. При обрыве провода ЛЭП 220 кВ и токах здоровых фаз около 850 А наведенное напряжение при заземлении смежной линии в нескольких точках может превысить 1000 В. Такие большие напряжения определяются индуктивной связью с влияющей ЛЭП и возникающими за счет этого значительными токами в смежной линии (в рассмотренном примере около 86 А). При наличии заземления на одном из концов смежной линии напряжения на противоположном конце превышали 2 кВ.

3. При обрыве двух проводов ЛЭП 220 кВ и сравнительно небольших нагрузках наведенные напряжения при наличии заземлений смежной линии не превышают 100 В, при незаземленной смежной линии напряжения на ней доходят до 250 В.

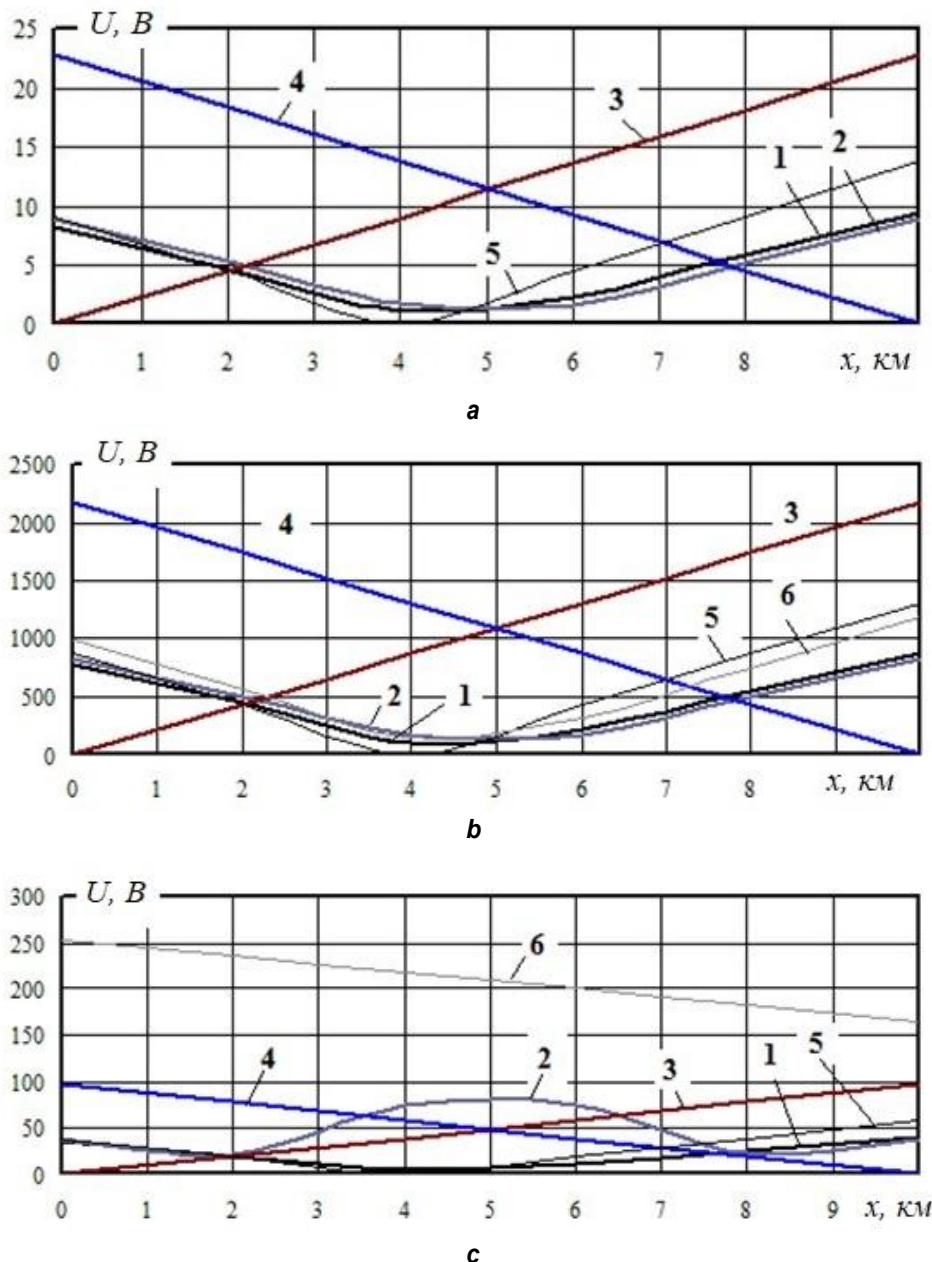
4. Нулевой потенциал достигается в месте работ при установке там переносного заземления. При использовании дополнительных заземлений по краям ЛЭП уровень наведенного напряжения в этой точке повышается до 102 В при обрыве одной фазы и до 5 В при обрыве двух фаз.

#### **5. НАВЕДЕННЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ОБРЫВАХ ФАЗ С ОДНОВРЕМЕННЫМ ЗАМЫКАНИЕМ НА ЗЕМЛЮ**

Режимы обрыва фаз с одновременным коротким замыканием возникают при падении проводов на землю и характери-

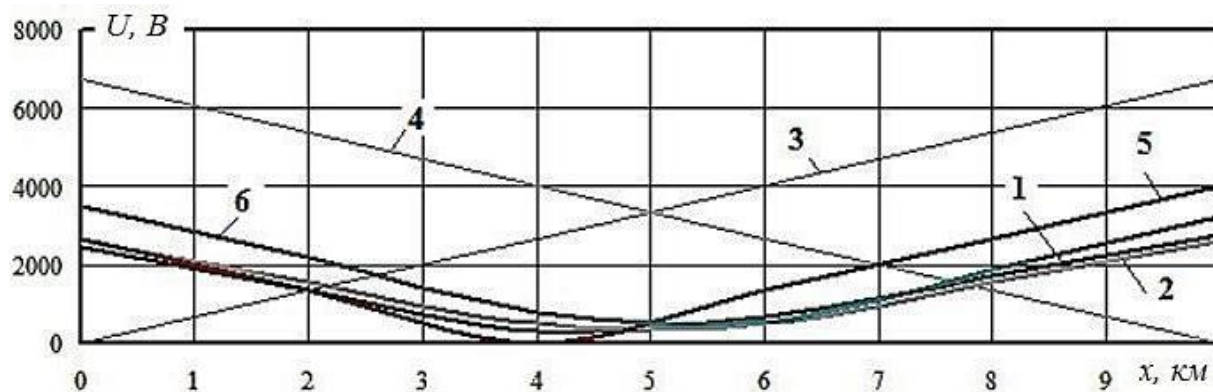
зуются протеканием значительных токов, достигающих в расчетном примере 7,5 кА при повреждении на приемном конце ЛЭП 220 кВ. При повреждении на отправном конце токи составляют 1,5 кА. Протекание таких токов приводит к значительным уровням наведенных напряжений на смежной

линии, достигающих в некоторых точках 11 кВ при обрыве фазы А на приемном конце ЛЭП и более 6 кВ при обрыве фазного провода А на отправном конце (рис. 3). Сопротивление заземления провода принято равным 1 Ом, сопротивление заземлителей смежной линии равно 10 Ом.

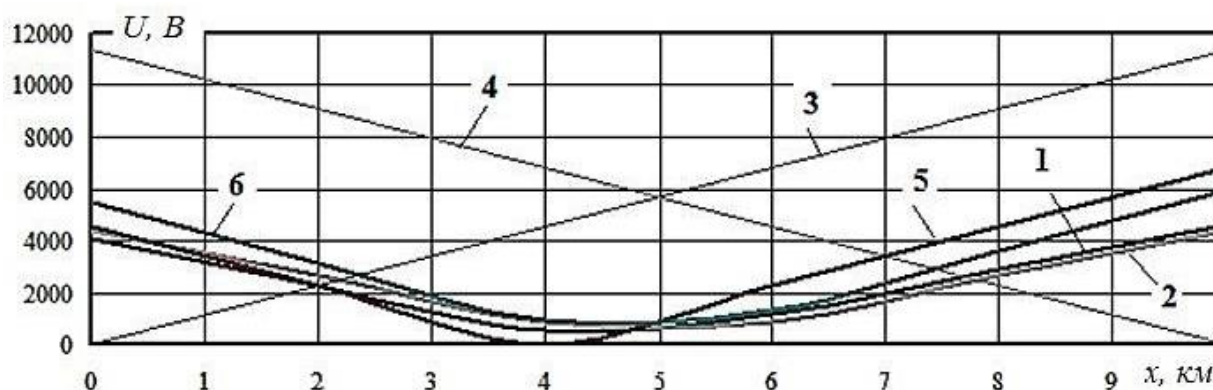


**Рис. 2. Зависимости наведенных напряжений от расстояния ( $x$ ) до питающей подстанции:**  
 а – симметричный режим линии электропередач 220 кВ (в ситуации, отвечающей строке 6 табл. 1, напряжения провод-земля лежат в пределах от 205 до 217 В); б – обрыв фазы А ЛЭП 220 кВ;  
 с – обрыв фаз В и С ЛЭП 220 кВ

**Fig. 2. Dependences of the induced voltages on the distance ( $x$ ) to the supply substation:**  
 а – a symmetric mode of 220 kV power line (in the situation corresponding to line 6 of the table 1, wire – earth voltages are within 205 – 217 V); б – open fault of the phase A of 220 kV power line;  
 с – open fault of the phases B and C of 220 kV power line



a



b

Рис. 3. Зависимости наведенных напряжений от расстояния до питающей подстанции:  
а – обрыв фазы А с одновременным замыканием на землю на отправном конце линии электропередачи 220 кВ; б – обрыв фазы А с одновременным замыканием на землю на приемном конце этой линии электропередачи

Fig. 3. Dependences of the induced voltages on the distance to the supply substation: a – open fault of the phase A with the simultaneous short circuit to earth on the sending end of 220 kV power line; b – open fault of the phase A with the simultaneous short circuit to earth on the receiving end of this power line

Нулевой потенциал в месте работ достигается при установке там переносного заземления. При использовании дополнительных заземлений по краям ЛЭП уровень наведенного напряжения в этой точке повышается до 318 В при обрыве на отправном конце и до 535 В – при обрыве на приемном конце.

## 6. НАВЕДЕННЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

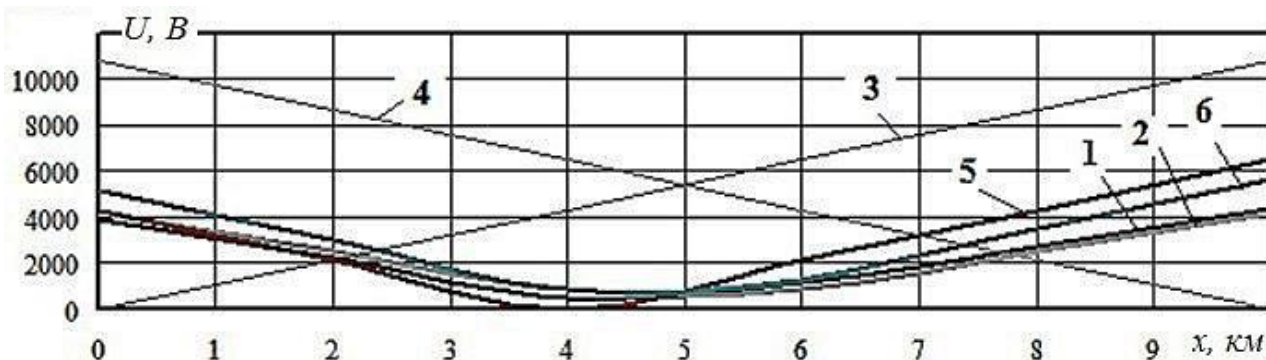
Несимметричные короткие замыкания в ЛЭП 220 кВ также относятся к режи-

мам, при которых возникают большие наведенные напряжения в смежной линии. При моделировании рассмотрены следующие виды типичных несимметричных коротких замыканий:

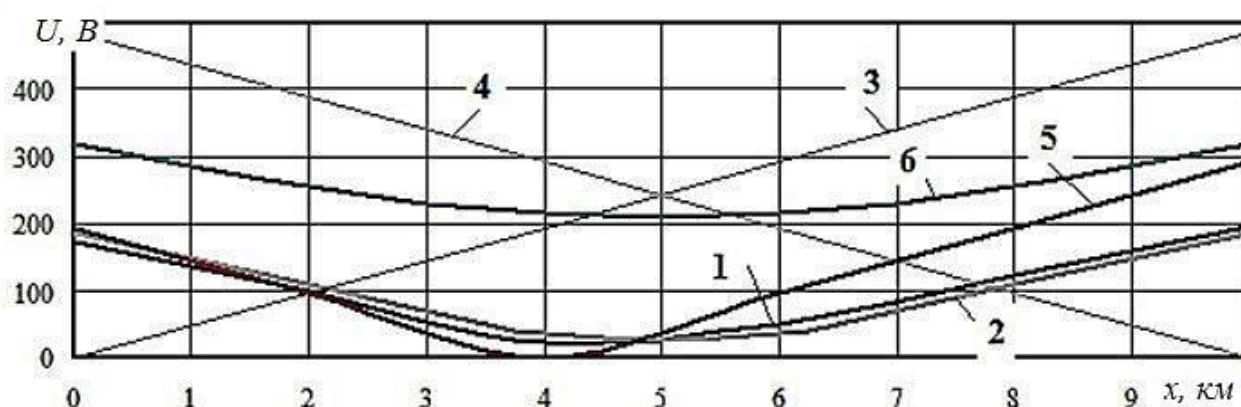
- однофазное КЗ на приемном конце ЛЭП 220 кВ;
- двухфазное КЗ в той же точке;
- двухфазное КЗ на землю в этой же точке.

Зависимости наведенных напряжений от расстояния до питающей подстанции по вариантам табл. 1 при сопротивлениях заземлителей 10 Ом показаны на рис. 4 и в табл. 2.

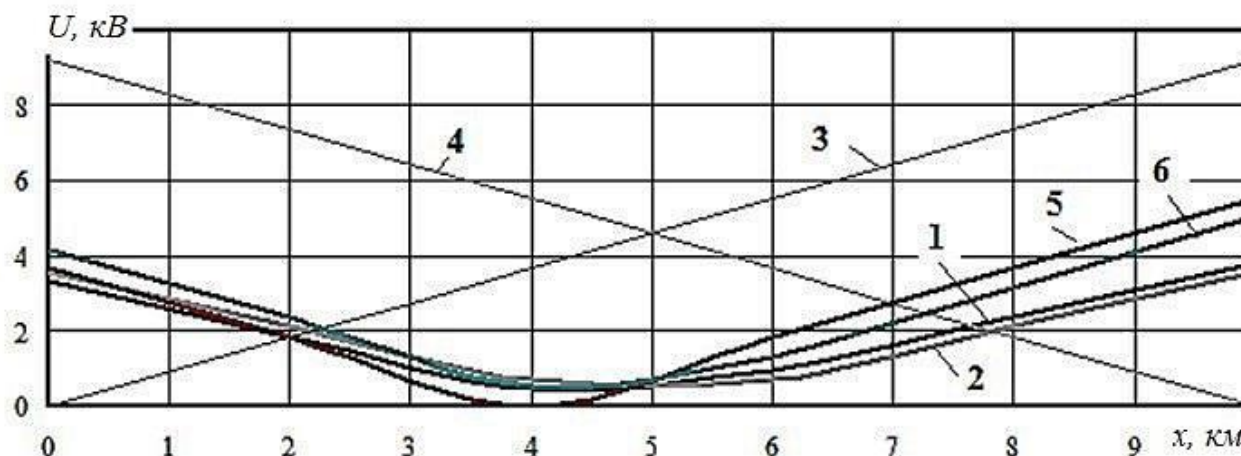




a



b



c

Рис. 4. Зависимости наведенных напряжений от расстояния до питающей подстанции:  
 а – однофазное короткое замыкание на приемном конце линии электропередачи 220 кВ;  
 б – двухфазное короткое замыкание в той же точке; с – двухфазное короткое замыкание  
 на землю в той же точке

Fig. 4. Dependences of the induced voltages on the distance to the supply substation:  
 a – a single-phase short-circuit at the receiving end of 220 kV power line; b – a two-phase short-circuit  
 in the same point; c – a two-phase short-circuit to earth in the same point





Таблица 2

Максимальные уровни наведенных напряжений, В

Table 2

Maximum levels of induced voltages, V

Способ заземления	Режим ЛЭП 220 кВ			
	Симметричный нагрузочный	Однофазное КЗ	Двухфазное КЗ	Двухфазное КЗ на землю
1	9,3	4420	197	3756
2	8,8	4180	186	3553
3	22,7	10848	485	9198
4	22,8	10848	485	9198
5	13,7	6508	291	5518
6	217	5625	320	5003

Результаты расчетов позволяют сформулировать следующие выводы.

1. В режимах несимметричных коротких замыканий максимальные значения наведенных напряжений лежат в пределах от 200 В почти до 11 кВ. Поэтому требуются специальные мероприятия по защите персонала и низковольтного оборудования линий связи, подверженные влиянию ЛЭП высокого напряжения.

2. Наибольшие уровни наведенных напряжений наблюдаются в режиме однофазного КЗ.

3. При наличии в месте работ переносного заземления и использовании дополнительных заземлений по краям линии уровень наведенного напряжения в этой точке повышается до 512 В при однофаз-

ном КЗ, до 23 В – при двухфазном КЗ и до 435 В – при двухфазном КЗ на землю.

## 7. НАВЕДЕННЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ТРЕХФАЗНОМ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ

Трехфазное короткое замыкание является симметричным, токи в земле в этом режиме не протекают, поэтому уровни наведенных напряжений незначительно превышают аналогичные показатели для двухфазного КЗ (рис. 5).

Нулевой потенциал достигается при установке в месте работ переносного заземления, при использовании дополнительных заземлений по краям линии уровень наведенного напряжения в этой точке повышается до 25 В.

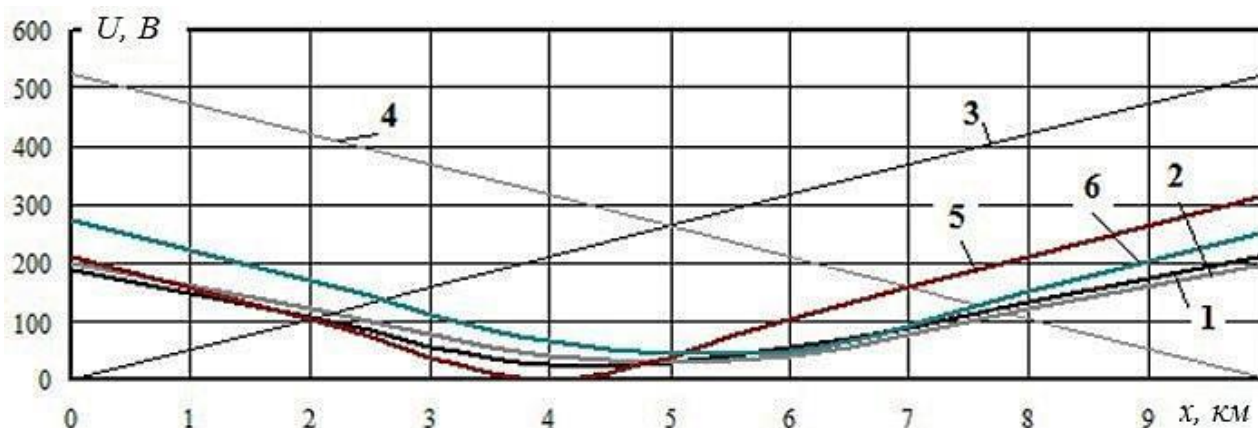


Рис. 5. Зависимости наведенных напряжений от расстояния до питающей подстанции  
Fig. 5. Dependences of the induced voltages on the distance to the supply substation

## 8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты позволяют разделить рассмотренные режимы на две группы:

- с пониженными уровнями наведенных напряжений, максимальные значения которых не превышают 600 В (рис. 6 а);
- с высокими уровнями наведенных напряжений, максимумы которых лежат в пределах 4...11 кВ (рис. 6 б).

К первой группе относятся следующие режимы: симметричный нагрузочный, двухфазное и трехфазное КЗ. Вторую груп-

пу образуют режимы, вызванные обрывами фаз и несимметричными короткими замыканиями на землю. Часть из этих режимов характеризуется длительным протеканием повышенных токов, что требует тщательного подбора мероприятий по обеспечению безопасности. К таким режимам относятся обрывы фаз без замыканий на землю. Режимы коротких замыканий, как правило, достаточно быстро ликвидируются релейной защитой. Однако крайне негативным может быть даже кратковременное воздействие высоких напряжений на персонал и низковольтные устройства телекоммуникаций.

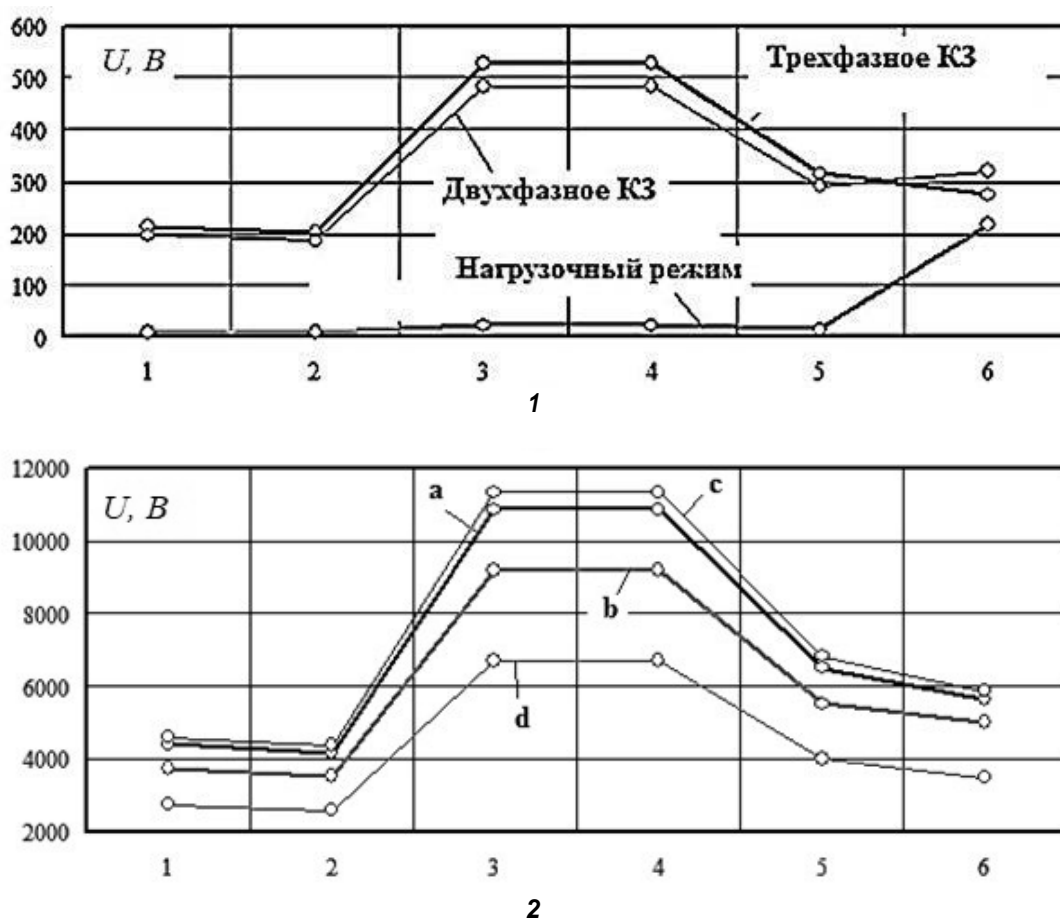


Рис. 6. Максимальные значения наведенных напряжений:

1 – режимы с пониженными значениями наведенных напряжений; 2 – режимы с высокими уровнями наведенных напряжений. Цифрами на оси абсцисс обозначены способы заземления по табл. 1, буквами на диаграмме 2 обозначены: а – однофазное КЗ; б – двухфазное КЗ на землю; с – обрыв и замыкание фазы А на землю на отправном конце ЛЭП; д – обрыв и замыкание фазы А на землю на приемном конце линии электропередачи

Fig. 6. Maximum values of induced voltages:

1 – modes with low values of induced voltages; 2 – modes with high values of induced voltages. Numbers on the abscissa axis indicate the ways of grounding according to the table 1, letters in the diagram 2 indicate: a – a single-phase short-circuit; b – a two-phase short-circuit to earth; c – open fault and short circuit of the phase A to earth at the sending end of the power line; d – open fault and short circuit of the phase A to earth at the receiving end of the power line



Как следует из рис. 6, в режимах первой группы наибольшие наведенные напряжения наблюдаются при двухфазном и трехфазном коротких замыканиях. Для второй группы наибольшими уровнями наведенных напряжений, превышающими 11 кВ, характеризуется режим обрыва и замыкания фазы на землю на отправном конце ЛЭП, а также однофазное КЗ на землю. Для остальных режимов этой группы максимумы наведенных напряжений лежат в пределах 7...9 кВ.

Предложенные методы и средства моделирования позволяют рассчитывать наведенные напряжения, создаваемые вы-

соковольтными ЛЭП в различных режимах работы, включая несимметричные, вызванные обрывами фаз с одновременными замыканиями на землю. Эта методика может использоваться в практике проектирования и эксплуатации электрических сетей и систем проводной связи для выработки мероприятий, обеспечивающих защиту персонала и оборудования от воздействия наведенных напряжений.

Кроме того, методика может быть обобщена в случае сложных траекторий сближения ЛЭП с непараллельными участками.

### Библиографический список

1. Михайлов М.И., Разумов Л.Д., Соколов С.А. Электромагнитные влияния на сооружения связи. М.: Связь, 1973. 264 с.
2. Вантеев А.И. И снова о наведенных напряжениях // Энергетик. 2017. № 8. С. 22–26.
3. Джунуев Т.А., Эралиева Г.Ш. О наведенных напряжениях на отключенных линиях электропередачи, проходящих параллельно либо вблизи действующих высоковольтных линий // Внедрение результатов инновационных разработок: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. (г. Казань, 10 января 2019 г.). Уфа: Аэтерна, 2019. С. 50–55.
4. Беляков Ю.С. Снова о наведенном напряжении // Энергетик. 2010. № 4. С. 29–30.
5. Висящев А.Н., Клепиков С.А., Щербаков А.В., Каратаев Б.Н. О безопасности производства работ на ВЛ, находящихся под наведенным напряжением // Энергетик. 2010. № 2. С. 18–22.
6. Шуманская Е.В., Голдобин Д.А. Расчет наведенных напряжений на отключенных фазах и параллельных ВЛ с помощью метода модальных волновых каналов // Энергетик. 2018. № 3. С. 35–38.
7. Солдатов В.А., Яблоков А.С. Влияние чередования фаз на наведенные напряжения антенны под линиями электропередачи 35 кВ // Труды Костромской государственной сельскохозяйственной академии: сб. ст. Кострома: Костромская государственная сельскохозяйственная академия, 2015. С. 204–208.
8. Колечицкий Е.С., Королев И.В. Анализ способов заземления проводов ремонтируемой воздушной линии под наведенным напряжением // Энергобезопасность и энергосбережение. 2015. № 5. С. 11–14.
9. Монахов А.Ф., Дегтяренко Е.А., Данилов Д.Б. О возможности снижения наведенного напряжения на месте проведения ремонтных работ // Электрические станции. 2016. № 3 (1016). С. 44–46.
10. Дмитриев М.В. Напряжения, наведенные на кабельные линии 6–500 кВ // Электроэнергия. Передача и распределение. 2017. № 6 (45). С. 86–91.
11. Куликов А.Л., Мирзаабдуллаев А.О. Об оценке наведенного напряжения на воздушных линиях электропередачи // Энергетик. 2013. № 8. С. 12–15.
12. Мисриханов М.Ш., Мирзаабдуллаев А.О. Анализ причин несчастных случаев и мер защиты от наведенного напряжения на воздушных линиях электропередачи // Электрические станции. 2008. № 11. С. 44–49.
13. Мисриханов М.Ш., Попов В.А., Медов Р.В., Костюнин Д.Ю. Моделирование воздушных линий электропередачи для расчета наведенных напряжений // Электрические станции. 2003. № 1. С. 47–55.
14. Мисриханов М.Ш., Попов В.Д., Якимчук Н.Н., Медов Р.В. Взаимовлияние двухцепных воздушных линий и их воздействие на режим электроэнергетических систем // Электрические станции. 2001. № 2. С. 52–58.
15. Мисриханов М.Ш., Попов В.Д., Якимчук Н.Н., Медов Р.В. К расчету наведенного напряжения на ремонтируемых линиях электропередачи // Электрические станции. 2000. № 2. С. 30–36.
16. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2005. 273 с.
17. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Уточненная методика определения взаимных электромагнитных влияний смежных линий электропередачи // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2015. № 3–4. С. 29–35.
18. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Determination of the induced voltages when nonparallel power lines are adjacent to one another // Power Technology and Engineering. 2015. Vol. 49. No. 4. P. 304–309. <https://doi.org/10.1007/s10749-015-0620-4>
19. Carson I.R. Wave propagation in overhead wires with ground return // Bell Systems Technical Journal. 1926. Vol. 5. Issue 4. P. 539–554. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1926.tb00122.x>
20. Мисриханов М.Ш., Рубцова Н.Б., Токарский А.Ю. Обеспечение электромагнитной безопасности электросетевых объектов. М.: Наука, 2010. 868 с.

## References

1. Mihajlov MI, Razumov LD, Sokolov SA. *Electromagnetic effects on communication facilities*. Moscow: Svyaz'; 1973. 264 p. (In Russ.)
2. Vanteev AI. And again about induced voltage. *Energetik = Power Engineer*. 2017;8:22–26. (In Russ.)
3. Dzhunuev TA, Eralieva GSh. About induced voltages on disconnected transmission lines running parallel or close to existing high-voltage lines. In: *Vnedrenie rezul'tatov innovacionnyh razrabotok: sbornik statej Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Implementation of innovative development results: collection of articles of the International scientific and practical conference*. 10 January 2019, Kazan', Ufa: Aeterna; 2019. p. 50–55. (In Russ.)
4. Belyakov YuS. Once again about induced voltage. *Energetik = Power Engineer*. 2010;4:29–30. (In Russ.)
5. Visyashchev AN, Klepikov SA, Shcherbakov AV, Karataev BN. On work safety on overhead lines under induced voltage. *Energetik = Power Engineer*. 2010;2:18–22. (In Russ.)
6. Shumanskaya EV, Goldobin DA. Calculation of induced voltages on disconnected phases and parallel overhead lines using the modal wave channel method. *Energetik = Power Engineer*. 2018;3:35–38. (In Russ.)
7. Soldatov VA, Yablokov AS. Effect of phase sequence on induced voltages of the antenna located under a 35 kV power transmission line. In: *Trudy Kostromskoj gosudarstvennoj sel'skohozyajstvennoj akademii: sbornik statej = Proceedings of the Kostroma State Agricultural Academy: collected articles*. Kostroma: Kostroma State Agricultural Academy; 2015. p. 204–208. (In Russ.)
8. Kolechitsky ES, Korolyov IV. The analysis of earthing options for a transmission line repaired under induced voltage. *Energobezopasnost' i energosberezhenie = Energy Security and Energy Saving*. 2015;5:11–14. (In Russ.)
9. Monakhov AF, Degtyarenko EA, Danilov DB. A possibility of reducing the induced voltage within a repair area. *Elektricheskiye stantsii = Electric stations*. 2016;50(3):329–331. (In Russ.)
10. Dmitriev MV. Voltages induced on cable lines 6-500 kV. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie = Electrical Energy. Transmission and distribution*. 2017;6(45):86–91. (In Russ.)
11. Kulikov AL, Mirabdullaev AO. On evaluation of induced voltage on overhead transmission lines. *Energetik = Power Engineer*. 2013;8:12–15. (In Russ.)
12. Misrihanov MS, Mirzaabdullaev AO. Analysis of accident causes and protection measures against induced voltage on overhead power lines. *Elektricheskiye stantsii = Electrical Power Stations*. 2008;11:44–49. (In Russ.)
13. Misrihanov MS, Popov VA, Meads RV, Kostyunin DY. Modeling of overhead transmission lines for induced voltage calculation. *Elektricheskiye stantsii = Electrical Power Stations*. 2003;1:47–55. (In Russ.)
14. Misrihanov MS, Popov DV, Yakymchuk NN, Meads RV. Interaction of two-chain overhead lines and their impact on the electric power system mode. *Elektricheskiye stantsii = Electrical Power Stations*. 2001;2:52–58. (In Russ.)
15. Misrihanov MS, Popov DV, Yakymchuk NN, Meads RV. To calculation of induced voltage on transmission power lines under repair. *Elektricheskiye stantsii = Electrical Power Stations*. 2000;2:30–36. (In Russ.)
16. Zakaryukin VP, Kryukov AV. *Complex asymmetric modes of electrical systems*. Irkutsk: Irkutsk State University; 2005. 273 p. (In Russ.)
17. Zakaryukin VP, Kryukov AV. The specified technique of mutual electromagnetic influence definition on adjacent power lines. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki = Power engineering: research, equipment, technology*. 2015;3-4:29–35. (In Russ.)
18. Zakaryukin VP, Kryukov AV. Determination of the induced voltages when nonparallel power lines are adjacent to one another. *Power Technology and Engineering*. 2015;49(4):304–309. <https://doi.org/10.1007/s10749-015-0620-4>
19. Carson IR. Wave propagation in overhead wires with ground return. *Bell Systems Technical Journal*. 1926;5:539–554. <https://doi.org/10.1007/s10749-015-0620-4>
20. Misrihanov MS, Rubcova NB., Tokarskij AYU. *Ensuring electromagnetic safety of power grid facilities*. Moscow: Nauka; 2010. 868 p. (In Russ.)

## Критерии авторства

Закарюкин В.П. разработал методы и алгоритмы компьютерного моделирования режимов электроэнергетических систем в фазных координатах. Крюков А.В. предложил методику моделирования наведенных напряжений, проанализировал полученные результаты, подготовил текст статьи, несет ответственность за плагиат. Нгуен Ты выполнил компьютерное моделирование и обработку результатов расчета.

## Authorship criteria

Zakaryukin V.P. has developed the methods and algorithms of computer modeling of electric power system modes in phase coordinates. Kryukov A.V. proposed a technique of induced voltage modeling, analyzed the received results, prepared the text of the article and bears the responsibility for plagiarism. Nguyen Tu performed computer modeling and processed calculation results.



### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

### Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

#### **Закарюкин Василий Пантелеймонович,**

доктор технических наук,  
профессор кафедры электроэнергетики транспорта,  
Иркутский государственный университет  
путей сообщения,  
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия;  
e-mail: zakar49@mail.ru

#### **Крюков Андрей Васильевич,**

доктор технических наук,  
академик Российской академии транспорта,  
член-корреспондент АН ВШ РФ  
и Российской инженерной академии,  
заслуженный энергетик Республики Бурятия,  
профессор кафедры электроснабжения  
и электротехники;  
профессор кафедры электроэнергетики транспорта,  
Иркутский государственный университет  
путей сообщения,  
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия;  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;  
✉ e-mail: and\_kryukov@mail.ru

#### **Нгуен Ты,**

аспирант,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;  
e-mail: nguyentu\_1991@mail.ru

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

#### **Vasily P. Zakaryukin,**

Dr. Sci. (Eng.),  
Professor of the Department of Transport  
Electrical Engineering,  
Irkutsk State Transport University,  
15 Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia;  
e-mail: zakar49@mail.ru

#### **Andrey V. Kryukov,**

Dr. Sci. (Eng.),  
Academician of the Russian Academy of Transport,  
Corresponding Member of the Academy of  
Sciences of the Higher School of the Russian  
Federation and Russian Engineering Academy,  
Honored Power Engineer of the Buryat Republic,  
Professor of the Department of Power Supply  
and Electrical Equipment;  
Professor of the Department  
of Transport Electrical Engineering,  
Irkutsk State Transport University,  
15 Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia;  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;  
✉ e-mail: and\_kryukov@mail.ru

#### **Nguyen Tu,**

Postgraduate Student,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;  
e-mail: nguyentu\_1991@mail.ru



## Анализ основных тенденций инновационного преобразования математической модели потокораспределения в газоснабжающих системах и приобретаемых ими новых свойств

© Н.И. Илькевич, Т.В. Дзюбина, Ж.В. Калинина

*Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева*

*Сибирского отделения Российской академии наук, г. Иркутск, Россия*

**Резюме:** Цель – рассмотрение предложений для возможности учета новых свойств системы газоснабжения в математической модели обобщенной задачи потокораспределения по сравнению с традиционной постановкой; введение дугового коэффициента, учитывающего изменение величины потока газа при его прохождении по дуге, вектора прироста пропускных способностей дуг и нижних ограничений на потоки газа по дугам; анализ новых условий хозяйствования (критерии оптимизации потокораспределения и установление фиктивных цен на потребление газа, позволяющих учитывать приоритетное обеспечение определенной группы потребителей). При решении задач перспективного планирования и развития газоснабжающих систем для математического моделирования оптимальных потоков газа широкое применение нашли методы сетевого анализа. Учет новых тенденций инновационного преобразования в математических моделях обусловлен современным развитием газоснабжающих систем, их реновацией и модернизацией. Использовались методы сетевого анализа, основанные на теории графов, для решения задач потокораспределения газа в системах газоснабжения при решении задач их функционирования в различных условиях. На основе традиционной задачи потокового моделирования был сформулирован обобщенный вариант решения потокораспределения с учетом новых свойств системы газоснабжения. Приведена математическая формулировка, последовательно сделана ее реализация в вычислительной программе. В качестве примера предложенных подходов предложен расчет потоков газа для агрегированной Единой системы газоснабжения на 2030 г. В этом расчете учтены приросты пропускной способности дуг газотранспортной системы и коэффициенты, показывающие уменьшение объемов подачи газа на собственные нужды и утечки. Для решения задач потокораспределения газа при оптимизации развития газоснабжающих систем были предложены следующие инновационные преобразования: введены дуговые коэффициенты, учитывающие изменение величины потока газа при его прохождении по дуге; векторы прироста пропускных способностей дуг и нижние ограничения на потоки газа по дугам, а также учтены новые условия хозяйствования (критерии оптимизации потокораспределения и фиктивные цены на потребление газа), позволяющие учитывать приоритетное обеспечение определенной группы потребителей.

**Ключевые слова:** газоснабжающая система, математическая модель, потокораспределение газа, дуговой коэффициент, прирост дуг, нижние ограничения по дугам

**Благодарности:** Исследование выполнено по проекту III.17.4.3 программы фундаментальных исследований Сибирского отделения Российской академии наук (AAAA-A17-117030310437-4).

**Информация о статье:** Дата поступления 17 июня 2019 г.; дата принятия к печати 18 августа 2019 г.; дата онлайн-размещения 31 октября 2019 г.

**Для цитирования:** Илькевич Н.И., Дзюбина Т.В., Калинина Ж.В. Анализ основных тенденций инновационного преобразования математической модели потокораспределения в газоснабжающих системах и приобретаемых ими новых свойств. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т. 23. № 5. С. 924–933. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-924-933>

## Analysis of the main trends in the innovative transformation of the mathematical model of flow distribution in gas supply systems and new properties they acquire

Nikolay I. Ilkevich, Tatiana V. Dzyubina, Zhanna V. Kalinina

*Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian branch of the Russian Academy of Science, Irkutsk, Russia*

**Abstract:** The purpose of the paper is to consider the proposals for the possible account of new properties of gas supply system in a mathematical model of the generalized problem of flow distribution as compared to the traditional formulation; to introduce an arc coefficient considering gas flow value alteration when passing through the arc, increment vector of arc flow rate and lower limits on gas flows in the arcs; to analyze new management conditions (optimization criteria of load flows and establishment of fictitious gas consumption prices allowing to take into account a high priority supply of a certain group of consumers). Network analysis methods are widely used in solving the problems of long-term planning and development of gas supply systems for mathematical modeling of optimal gas flows. The account of new trends of innovative transformation in mathematical models is caused by the modern development of gas supply systems, their renovation and modernization. To solve the problems of gas load flow in gas supply systems the network analysis methods based on the graph theory are used when dealing with the problems of gas supply system operation in various conditions. Based on the traditional problem of flow modeling a generalized solution of load flow is formulated taking into account the new properties of gas supply system. A mathematical formulation is given, its implementation is successively executed in the computational program. The gas flow calculation for the aggregate Unified gas supply system in 2030 is given as an example of the proposed approaches. This calculation takes into account the capacity increments of gas transmission system arcs and the coefficients showing a decrease in the volumes of gas supply for own needs and leakages. To solve the problems of load flows in the optimization of gas supply system development the following innovative improvements have been proposed: arc coefficients taking into account gas flow value alteration when passing through the arc are introduced; increment vectors of arc capacities and gas flow lower limits in the arcs are given, new economic conditions (flow load optimization criteria and fictitious prices on gas consumption) allowing to consider a high priority supply of a certain group of consumers are taken into account.

**Keywords:** gas supply system, mathematical model, load flow, arc coefficient, arc increment, lower arc limits

**Acknowledgements:** The research was carried out within the project III.17.4.3 of the Fundamental research program of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences (AAAA-A17-117030310437-4).

**Information about the article:** Received June 17, 2019; accepted for publication August 18, 2019; available online October 31, 2019.

**For citation:** Ilkevich NI, Dzyubina TV, Kalinina ZV. Analysis of the main trends in the innovative transformation of the mathematical model of flow distribution in gas supply systems and new properties they acquire. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2019;23(5):924–933. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-924-933>

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы данной работы обусловлена ростом масштабов и сложности газоснабжающих систем (ГСС) [1]. Стремление к диверсификации транспортных коридоров и повышению возможности маневрирования потоками газа приводят к увеличению общей протяженности и усложнению конфигурации газотранспортных систем. Совершенствуется элементная база инженерных сооружений ГСС (трубопроводы производятся из новых материалов, используется энергоэффективное компрессорное оборудование с высоким коэффициентом полезного действия, качественная запорно-регулирующая арматура и т.п.).

Таким образом, современное развитие газоснабжающих систем, их реновация и модернизация требуют учета новых тенденций инновационного преобразования и в математических моделях исследования [2].

В Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН) (г. Иркутск) разработан комплекс математических моделей сложных иерархически подчиненных задач оптимального развития систем газоснабжения на перспективу [3, 4].

Задачи решаются на трех иерархических уровнях, начиная с верхнего с последовательной детализацией решений на более низких уровнях рассмотрения. На первом уровне предложена модель оптимизации структуры системы газоснабжения. Здесь определяются оптимальные объемы добычи газа по газодобывающим центрам с выделением в каждом узле расчетной схемы действующих и новых промыслов (газодобывающих предприятий). Находятся в укрупненном виде объемы и направления межрайонных потоков газа (для каждого направления рассматриваются перетоки по агрегированным действующим





щим и новым газопроводам). Детализируются рациональные объемы потребления газа по многим регионам различных категорий потребителей. В моделях второго и третьего уровней более детально описываются территориальные и производственные связи.

Методы сетевого анализа применяются при решении задач перспективного планирования и развития систем газоснабжения как на первом уровне (обобщенная задача потокового распределения газа), так и на последующих, в частности на третьем уровне (в задаче оценки надежности функционирования сложной ГСС при расчете режима ее функционирования).

В связи с этим актуальность данной работы заключается в том, что предлагается рассматривать обобщенную задачу потокового моделирования с точки зрения анализа и учета новых свойств системы газоснабжения по сравнению с традиционной постановкой.

## 2. МЕТОДЫ СЕТЕВОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГАЗОСНАБЖАЮЩИХ СИСТЕМ

Сетевой анализ, основанный на теории графов [5], благодаря своей логичности и наглядности получил широкое применение при решении задач функционирования систем газоснабжения в различных условиях. Основу в этих задачах составляет проблема транспорта газа, т.е. наивыгоднейшего распределения потоков в устройстве газопроводов. В России достаточно плотно такими задачами стали заниматься в конце 1980-х годов<sup>1</sup> [6, 7], в т.ч. в ИСЭМ СО РАН [8, 9]. Первая программная реализация была выполнена В.А. Ефремовым для задачи относительно небольшой размерности<sup>1</sup>.

Несмотря на то, что Единая система газоснабжения (ЕСГ) России представляет собой уникальную концепцию огромного масштаба, и в мире нет соответствующего

аналога, тем не менее за рубежом также ведутся исследования развития устройства газоснабжения Европы [10, 11], в которую входят системы газоснабжения разных стран, в т.ч. учитываются и поставки газа из ЕСГ Российской Федерации [12, 13]. Моделирование развития систем газоснабжения для проведения таких исследований выполняется в схемах потоков газа. В [14, 15] проводится обзор и сравнение таких моделей, разработанных в разных странах.

В задачах потокового моделирования ГСС удобно рассматривать как совокупность трех подсистем: источников газа, сетей магистрального транспорта и потребителей.

Критерием оптимальности может служить максимум подачи газа заинтересованным субъектам или минимум затрат на добычу, транспорт и доставку газа потребителям, а ограничения – производственные мощности действующих предприятий и требования удовлетворения минимального спроса у заказчиков.

Взаимосвязи между объектами в ГСС описываются графом  $(\bar{R}, \bar{U})$  с множеством узлов сети  $\bar{R}$  и множеством дуг  $\bar{U}$ . Для дуг вводится двойное обозначение:  $u \in \bar{U}$  – номер дуги на схеме сети;  $(i, j)$  – обозначение дуги с направлением потока от узла  $i$  к узлу  $j$ ,  $(i, j \in \bar{R})$ . Если трубопровод допускает реверс потока, то рассматриваются две дуги:  $(i, j)$  и  $(j, i)$ .

Множество узлов  $\bar{R}$  разбивается на три подмножества  $R_1 \cup R_2 \cup R_3 = \bar{R}$ , где  $R_1$  соответствует узлам-источникам,  $R_2$  составляют узлы-потребители и  $R_3$  – узлы пересечения газопроводов. Каждой дуге  $u \in \bar{U}$  ставятся в соответствие величины:  $x_u(x_{ij})$  – поток газа по дуге;  $d_u(d_{ij})$  – пропускная способность данной дуги;  $c_u(c_{ij})$  – «цена» транспортировки газа по дуге. Вводятся дополнительные узлы  $s$  и  $t$  – общие источник и сток.

Одной из традиционной постановок

<sup>1</sup>Ефремов В.А. Сетевые потоковые модели для управления функционированием и развитием Единой системы газоснабжения: автореф. дис. ... канд. техн. наук: М.: ВНИИГаз, 1987. 22 с.

является задача о потоке минимальной стоимости, которая записывается в виде

$$\sum_{(i,j) \in U} c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min; \quad (1)$$

$$\sum_i x_{ij} - \sum_j x_{ji} = \begin{cases} -v, & j = s \\ 0, & j \neq s, t; \\ w, & j = t \end{cases} \quad (2)$$

$$0 \leq x_{ij} \leq d_{ij}, \quad (i, j) \in U, \quad (3)$$

где  $v$  – величина потока, выходящего из общего источника  $s$ , равная сумме потоков по дугам  $-\sum_j x_{sj}$ . Из условий (2) эта величина равна суммарному потоку  $w - \sum_j x_{jt}$ ,

поступающему в узел–сток  $t$ .

Сумма, входящая в соотношение (1), представляет общую стоимость потока. Равенства (2) выражают условие сохранения потока (баланс подачи и отбора газа в узлах сети). Условия (3) – ограничения на поток по каждой связи по ее пропускным способностям.

### 3. ОБОБЩЕННАЯ ЗАДАЧА ПОТОКОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Она используется для решения задач первого уровня [4], записывается в виде:

$$\sum_{(i,j)} (c_{ij} x_{ij} + k_{ij} y_{ij}) \rightarrow \min; \quad (4)$$

$$\sum_i \lambda_{ij} x_{ij} - \sum_j x_{ji} = \begin{cases} -v, & j = s \\ 0, & j \neq s, t; \\ w, & j = t \end{cases} \quad (5)$$

$$l_{ij} \leq x_{ij} \leq d_{ij} + y_{ij}, \quad (i, j) \in U; \quad (6)$$

$$0 \leq y_{ij} \leq g_{ij}, \quad (i, j) \in U. \quad (7)$$

Рассмотрим подробнее предложения для учета новых свойств системы газоснабжения по сравнению с традиционной постановкой задачи потокораспределения.

**1. Введение дугового коэффициента  $\lambda_{ij}$**  (5) позволяет учитывать изменение величины потока  $x_{ij}$  при прохождении по дуге. Считается, если в любую дугу  $(i, j)$  в узле  $i$  входит  $x_{ij}$  единиц потока, то из этой дуги в узле  $j$  выйдет  $\lambda_{ij} x_{ij}$  единиц потока. При  $\lambda_{ij} > 1$  этот коэффициент носит название выигрыша [16, 17] или усиления дуги. При  $\lambda_{ij} < 1$  происходит ослабление (или проигрыш) потока по дуге. В случае  $\lambda_{ij} = 1$  для всех участков сети получаем обычную потоковую задачу.

Применительно к газотранспортным системам с помощью коэффициента  $\lambda_{ij}$  традиционно учитывались расходы газа на собственные нужды или другие потери газа (например, из-за ненадежности оборудования) при его транспортировке, отборе из месторождения или подземного хранилища газа (ПХГ) ( $\lambda_{ij} < 1$ )<sup>2</sup>; однако с его помощью также можно учитывать попутные небольшие отборы (или притоки) газа ( $\lambda_{ij} > 1$ ) вместо введения дополнительных потребителей (как правило, тупиковых или самих источников) в целях сокращения размерности моделируемой системы [18].

**2. Введение вектора прироста пропускной способности дуг  $y=(y_{ij})$**  и, соответственно, вектора ограничений на прирост пропускной способности  $g=(g_{ij})$  в условиях задачи (6), (7).

Рассмотрение этих характеристик необходимо при анализе модели развития системы газоснабжения<sup>2</sup> [4]. Критерием здесь является уже кусочно-линейная выпуклая функция (см. (4), рис. 1 а). Затраты (или издержки), пропорциональные потоку  $\left( \sum_{(i,j)} c_{ij} x_{ij} \right)$ , отражают долю существующих издержек, а затраты или цены самофинан-

<sup>2</sup>Сухарев М.Г. Надежность систем энергетики и их оборудования: справочник: в 4 т. Т. 3: Надежность систем газо- и нефтеснабжения. М.: Недра, 1994. 286 с.

сирования, пропорциональные приросту пропускной способности  $\left(\sum_{(i,j)} k_{ij} y_{ij}\right)$  – долю издержек (цен) на создание новой мощности.

Иначе говоря, выпуклую дуговую функцию стоимости можно аппроксимировать с большей точностью путем разбиения на большее число линейных участков (рис. 1 б). Но в этом случае каждому «нелинейному» участку в моделируемой сети будет сопоставляться несколько параллельных дуг с соответствующими пропускными способностями и стоимостями (рис. 1 с).

**3. Введение нижних ограничений ( $l_{ij}$ ) на потоки (6) по дугам** [4] требует построения программным путем дополнительной расчетной сети с целью предварительной оценки возможности существования допустимого решения. И если нижние ограничения заданы корректно, т.е. решение существует, то их учет существенно помогает при последующем анализе поведения системы при различных конкретных ситуациях. Например, когда требуется определить, сможет ли существующая система газоснабжения обеспечить некоторых потребителей не ниже заданного уровня газопотребления либо ставится условие обязательного использования определенной доли ресурсов на некоторых месторождениях или ПХГ. Последний случай

возможен при рассмотрении отдельных районов газоснабжения как самостоятельных подсистем, стремящихся использовать прежде всего собственные ресурсы, чем привлекать ресурсы (газ) со стороны. В этом случае анализ рационального применения ресурсов можно подкрепить и разумным (вариантным) установлением цен на поставляемый извне газ.

**4. Возможность учета новых условий хозяйствования.** В потоковой модели (1)–(3) под показателями  $c_{ij}$  понимаются удельные затраты или цены самофинансирования, связанные с использованием газа  $i$ -м потребителем.

Если же в качестве показателя  $c_{ij}$  взять величину удельной прибыли от использования газа в данном узле потребления, то задачу о потоке минимальной стоимости (4)–(7) можно рассматривать как задачу максимизации прибыли, переписав критериальную функцию в виде

$$\sum_{(i,j) \in \bar{U}} c_{ij} x_{ij} + \sum_{(i,j) \in U_1} c_{ij} x_{ij} - \sum_{(i,j) \in U_2} c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min ,$$

где, как и прежде,  $\bar{U}$  – подмножество дуг  $(i, j)$  транспортной сети,  $U_1$  – подмножество дуг  $(s, j)$ , моделирующих источники газоснабжения,  $U_2$  – подмножество дополнительных дуг  $(i, t)$ , моделирующих потребителей газа [4].

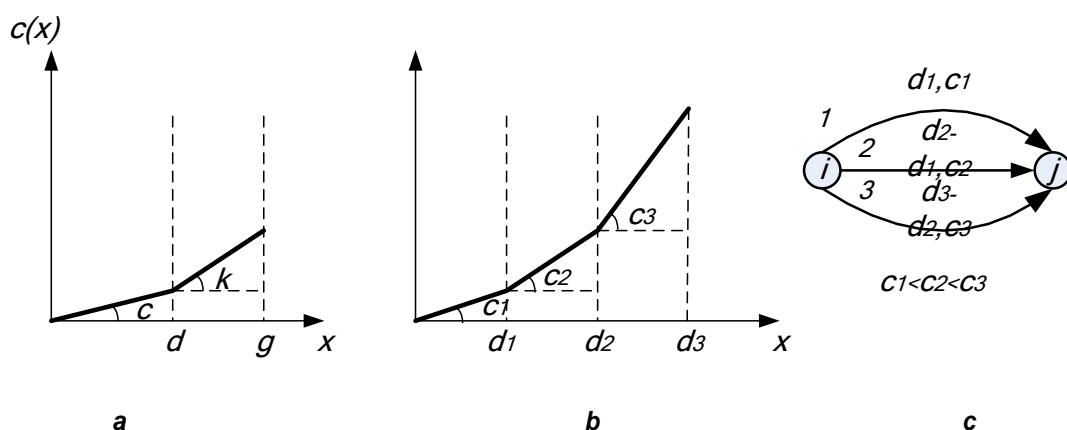


Рис.1. Кусочно-линейная выпуклая функция стоимости: а – стандартная форма из выражения (4); б – аппроксимированная большим числом линейных участков; с – представление «нелинейных» участков несколькими параллельными дугами

Fig. 1. Piecewise linear convex cost function: a – standard expression form (4); b – approximated by a large number of linear sections; c – representation of “non-linear” sections by several parallel arcs

Проблема выбора критерия является важнейшей при учете условий современного хозяйствования. Различные группы критериев предлагаются в работе<sup>2</sup>. Ни один из этих критериев не является универсальным, но их вариации позволяют отражать различные интересы. Так, например, для задачи потокового распределения на первом уровне может быть использован как первый критерий, приводящий к экономии эксплуатационных затрат, так и второй, максимизирующий экономический эффект, что очень важно при переходе предприятий к большей хозяйственной деятельности. А для задачи оценки надежности функционирования сложной ГСС на третьем уровне

при расчете режима ее функционирования в качестве критерия можно рассматривать как минимум затрат с учетом минимума дефицита поставок газа потребителям [20].

**5. Установление фиктивных цен на потребление газа** позволяет учитывать приоритетное обеспечение газом определенной группы потребителей. При этом цены для каждой приоритетной группы должны значительно (на порядок) отличаться друг от друга. Например, в каждом узле потребления можно выделить три группы потребителей газа с целью их приоритетного обеспечения (коммунально-бытовая сфера, которую необходимо обеспечить в первую очередь, затем промыш-

**Введение новых мощностей газотранспортной системы по годам**  
*Introduction of new gas transmission system capacities by years*

Связь		Производительность млрд м <sup>3</sup>			Расходуемый % на с.н. (1- $\lambda_{ij}$ )
Начальный узел	Конечный узел	2020	2025	2030	
Новопсков	Ростов-на-Дону	30	–	–	2,2
Петрозаводск	Санкт-Петербург	–	–	60	2,7
Петрозаводск	Мурманск	–	–	60	2,7
Сыктывкар	Грязовец	50	–	–	4,4
Грязовец	Санкт-Петербург	30	–	–	4,4
Грязовец	Торжок	30	–	–	4,4
Ростов-на-Дону	Майкоп	30	60	–	2,2
Новосибирск	Барнаул	60	–	–	0,4
Проскоково	Красноярск	–	–	60	2,5
Иркутск	Хабаровск	–	–	60	2,5
Ухта	Сыктывкар	60	–	–	4,4
Сургут	Вертикос	60	–	–	3,7
Вертикос	Проскоково	–	–	30	3,7
Красноярск	Иркутск	–	–	60	3,7
Якутск	Хабаровск	61	–	–	4,8
Оха	Южно-Сахалинск	–	–	60	2,6
Штокман	Мурманск	–	–	60	2,7
Ухта	Помары	60	–	120	4,8
Фролово	Ростов-на-Дону	–	30	30	1,6
Ямал	Ухта	–	140	90	4,4
Хабаровск	Владивосток	–	121	–	4,5
Починки	Петровск	–	–	60	2,6
Петровск	Фролово	30	–		2,0
Вертикос	Новосибирск	–	60	–	4,5



ленные установки и, наконец, электростанции, обеспечиваемые в последнюю очередь, по остатку). Задавая фиктивные цены (удельные показатели)  $c_1, c_2, c_3$  для каждой доли газопотребления так, что  $c_1 < c_2 < c_3$ , можно обеспечить обязательные поставки газа потребителям коммунально-бытовых предприятий при имеющемся дефиците [4].

Перечисленные инновационные преобразования были последовательно реализованы в вычислительной программе «Поток».

#### 4. ПРИМЕР РАСЧЕТА

На основе информационной базы по газоснабжающим системам Российской

Федерации [4] и энергетической стратегии России была сформирована расчетная схема ЕСГ и определена квазидинамика ее развития на 2020, 2025 и 2030 годы с учетом поставок газа в страны ближнего и дальнего зарубежья<sup>3,4</sup>. Модельные расчеты по этим годам обобщены в таблице.

Здесь приведены значения новых мощностей газотранспортной системы (векторы пропускной способности) и значения коэффициентов, показывающих уменьшение объемов подачи газа на газ на собственные нужды (с.н.) и утечек ( $1 - \lambda_{ij}$ ). На рис. 2 показаны результаты расчетов потоков газа для агрегированной ЕСГ на 2030 г.

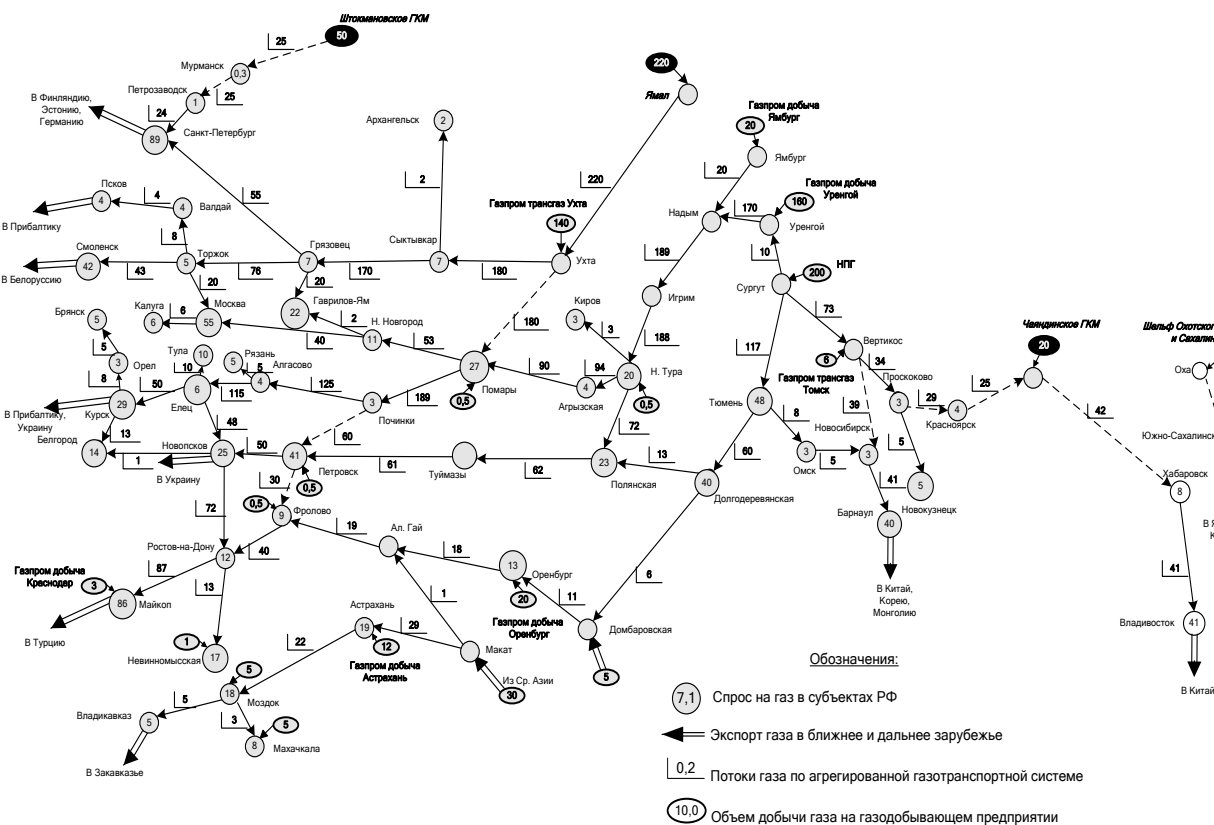


Рис. 2. Потоки газа для агрегированной ЕСГ на 2030 г.  
Fig. 2. Gas flows for the aggregated Unified gas supply system for 2030

<sup>3</sup> Энергетическая стратегия России на период до 2030 года: Распоряжение Правительства Российской Федерации № 1715-р. от 13.11.2009 г. 5836 с.

<sup>4</sup> Калинина Ж.В. Разработка методов агрегирования газоснабжающих систем и исследование на их основе направлений развития Единой системы газоснабжения России на период до 2030 года: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.01. Иркутск, 2016. 29 с.

Из рис. 2, а также таблицы понятно, что до 2030 г. в газотранспортной системе Российской Федерации необходимо ввести значительные объемы новых мощностей (производительностей) магистральных газопроводов и компрессорных мощностей. Что, в свою очередь, активизирует процессы массового применения нового высокоманевренного энергосберегающего компрессорно-силового оборудования с регулируемой скоростью вращения, трубопроводов из новых материалов и технологий для тепло- и гидроизоляции, а также надежной и качественной запорно-регулирующей арматуры.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Современное развитие газоснабжающих систем, их реновация и модернизация требуют учета новых тенденций инновационного преобразования в математи-

ческих моделях исследования.

2. Для решения задач потокораспределения газа при оптимизации развития ГСС были предложены следующие инновационные преобразования: введены дуговые коэффициенты, учитывающие изменение величины потока газа при его прохождении по дуге; векторы прироста пропускных способностей дуг и нижние ограничения на потоки газа по дугам, а также учтены новые условия хозяйствования – критерии оптимизации потокораспределения и фиктивные цены на потребление газа, позволяющие учитывать приоритетное обеспечение определенной группы потребителей.

3. В качестве иллюстрации предложенных подходов приведен расчет потоков газа для агрегированной ЕСГ на 2030 г. Здесь учтены приросты пропускной способности дуг газотранспортной системы и коэффициенты, показывающие уменьшение объемов подачи газа на с.н. и утечки.

## Библиографический список

1. Воропай Н.И. Системные исследования в энергетике: ретроспектива научных направлений СЭИ–ИСЭМ. Новосибирск: Наука, 2010. 686 с.
2. Паспорт инноваций ПАО «Газпром» до 2025 года (от 2018 г.) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gazprom.ru/f/posts/97/653302/prir-passport-2018-2025.pdf> (20.05.2018).
3. Воропай Н.И., Санеев Б.Г., Сендеров С.М., Стенников В.А., Новицкий Н.Н., Илькевич Н.И. [и др.] Энергетика будущего: комплексные проблемы инновационного развития и управления // Энергетика России в XXI веке. Инновационное развитие и управление: сб. тр. Всерос. конф. (г. Иркутск, 1–3 сентября 2015 г.). Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2015. С. 10–21.
4. Илькевич Н.И., Дзюбина Т.В., Калинина Ж.В. Многоуровневое моделирование развития систем газоснабжения. Новосибирск: Наука, 2014. 217 с.
5. Ford L.R., Jr. & Fulkerson D.R. Flows in networks. New Jersey: Princeton university press, 1962. 276 p.
6. Сухарев М.Г., Ставровский Е.Р., Брянских В.Е. Оптимальное развитие систем газоснабжения. М.: Недра, 1981. 294 с.
7. Сухарев М.Г., Ставровский Е.Р. Резервирование систем магистральных трубопроводов. М.: Недра, 1987. 168 с.
8. Илькевич Н.И., Ефремов В.А., Меренков А.П. Согласование общенергетических решений с развитием Единой системы газоснабжения // Математическое моделирование и оптимизация систем тепло, водо-, нефте- и газоснабжения: сб. ст. / под ред. А.П. Меренкова. Новосибирск: Наука, 1992. С. 372–389.
9. Madoliat R., Khanmirza E., Pourfard A. Application of PSO and cultural algorithms for transient analysis of natural gas pipeline // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2017. Vol. 149. P. 504–514.
10. Cheboub A., Yalaoui F., Smati A., Amodeo L., Younsi K., Tairi A. Optimization of natural gas pipeline transportation using ant colony // Computers & Operations Research. 2009. Vol. 36. Issue 6. P. 1916–1923.
11. Ten year network development plan 2015 [Электронный ресурс]. URL: [http://www.entsoe.eu/public/uploads/files/publications/TYNDP/2015/entsoe\\_TYNDP2015\\_main\\_report\\_lowres.pdf](http://www.entsoe.eu/public/uploads/files/publications/TYNDP/2015/entsoe_TYNDP2015_main_report_lowres.pdf) (12.04.2018).
12. Митрова Т.А., Кулагин В.А., Архипов Н.А., Галкин Ю.В., Галкина А.А., Козина Е.О. [и др.] Газовый рынок Европы: утраченные иллюзии и робкие надежды. М.: Институт энергетических исследований РАН, 2015. 86 с.
13. Hobbs B.F. Imperfect Models of Imperfect Competition in EU Gas Markets: Great Potential, Great Shortcomings. [Электронный ресурс]. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.392.2766&rep=rep1&type=pdf> (15.01.2019)
14. Smeers Y. Gas models and three difficult objectives. London: Universite Catholique de Louvain, 2008. 59 p.
15. Christofides N. Graph Theory. An Algorithmic Approach. London: Academic Press, 1975. 412 p.
16. Илькевич Н.И., Дзюбина Т.В., Ельников В.В.,



Окунева С.Т. Исследование устойчивости цен самодотфинансирования на природный газ // Экономика и математические методы. 2002. Т. 38. № 3. С. 25–30.  
17. Minioka E. Optimization algorithms for networks and graphs. New York: Basel, 1978. 499 p.

18. Гуринович В.Д., Дзюбина Т.В., Добровольская Т.В., Домышев А.В., Дьяков А.Ф., Илькевич Н.И. Надежность систем энергетики: проблемы, модели и методы их решения. Новосибирск: Наука, 2014. 284 с.

### References

1. Voropaj NI. *Systemic research in the energy sector: a retrospective of the research areas of SEI – ISEM*. Novosibirsk: Nauka; 2010. 686 p. (In Russ.)
2. *Innovation passport of PJSC Gazprom until 2025 (from 2018)*. Available from: <http://www.gazprom.ru/f/posts/97/653302/prior-passport-2018-2025.pdf> [Accessed 20th May 2018].
3. Voropaj NI, Saneev BG, Senderov SM, Stennikov VA, Novickij NN, Il'kevich NI. Energy of the future: complex problems of innovative development and management. In: *Energetika Rossii v XXI veke. Innovacionnoe razvitie i upravlenie: sbornik trudov vserossijskoj konferencii* = Energy sector of Russia in XXI century. Innovative development and management: Collected works of the All-Russian Conference, 1–3 September 2015, Irkutsk, Irkutsk: Melentiev Energy Systems Institute SB RAS; 2015. p.10–21. (In Russ.)
4. Il'kevich NI, Dzyubina TV, Kalinina ZhV. *Multilevel modeling of gas supply system development*. Novosibirsk: Nauka; 2014. 217 p. (In Russ.)
5. Ford LR, Jr. & Fulkerson DR. *Flows in networks*. New Jersey: Princeton university press; 1962. 276 p.
6. Suharev MG, Stavrovskij ER, Bryanskiy VE. *Optimal development of gas supply systems*. Moscow: Nedra; 1981. 294 p. (In Russ.)
7. Suharev MG, Stavrovskij ER. *Redundancy of trunk piping systems*. Moscow: Nedra; 1987. 168 p. (In Russ.)
8. Il'kevich NI, Efremov VA, Merenkov AP. Coordination of energy solutions with the development of the Unified Gas Supply System. *Matematicheskoe modelirovanie i optimizaciya sistem teplo-, vodo-, nefte- i gazosnabzheniya* = Mathematical modeling and optimization of heat, water, oil and gas supply systems. Novosibirsk: Nauka; 1992. p. 372–389. (In Russ.)
9. Madoliat R, Khanmirza E, Pourfard A. Application of PSO and cultural algorithms for transient analysis of natural gas pipeline. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2017;149:504–514.
10. Cheboub A, Yalaoui F, Smati A, Amodeo L, Younsi K, Tairi A. Optimization of natural gas pipeline transportation using ant colony. *Computers & Operations Research*. 2009;36(6):1916–1923.
11. *Ten year network development plan 2015*. Available from: [http://www.entsog.eu/public/uploads/files/publications/TYNDP/2015/entsog\\_TYNDP2015\\_main\\_report\\_lowres.pdf](http://www.entsog.eu/public/uploads/files/publications/TYNDP/2015/entsog_TYNDP2015_main_report_lowres.pdf) [Accessed 12nd April 2018].
12. Mitrova TA, Kulagin VA, Arhipov NA, GalkinYuV, Galkina AA, Kozina EO, et al. *The European gas market: lost illusions and timid hopes*. Moscow: The Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences; 2015. 86 p. (In Russ.)
13. Hobbs BF. Imperfect Models of Imperfect Competition in EU Gas Markets: Great Potential, Great Shortcomings. Available from: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.392.2766&rep=rep1&type=pdf> [Accessed 15th January 2019].
14. Smeers Y. *Gas models and three difficult objectives*. London: Universite Catholique de Louvain; 2008. 59 p.
15. Christofides N. *Graph Theory. An Algorithmic Approach*. London: Academic Press; 1975. 412 p.
16. Il'kevich NI, Dzyubina TV, El'nikov VV, Okuneva ST. Studying sustainability of self-financing prices for natural gas. *Ekonomika i matematicheskie metody* = Economics and Mathematical Methods. 2002;38(3):25–30. (In Russ.)
17. Minioka E. *Optimization algorithms for networks and graphs*. New York: Basel; 1978. 499 p.
18. Gurinovich VD, Dzyubina TV, Dobrovol'skaya TV, Domyshev AV, D'yakov AF, Il'kevich NI. *Reliability of energy systems: Problems, models and methods for solving them*. Novosibirsk: Nauka; 2014. 284 p. (In Russ.)

### Критерии авторства

Илькевич Н.И., Дзюбина Т.В., Калинина Ж.В. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в одинаковой мере несут ответственность за плагиат.

### Authorship criteria

Ilkevich N.I., Dzyubina T.V., Kalinina Zh.V. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.



Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Илькевич Николай Иванович,**  
доктор технических наук,  
главный научный сотрудник отдела  
трубопроводных систем энергетики,  
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева,  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия;  
✉ e-mail: ilkev@isem.irk.ru

**Дзюбина Татьяна Владимировна,**  
кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник отдела  
трубопроводных систем энергетики,  
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия;  
e-mail: tvleo@isem.irk.ru

**Калинина Жанна Вадимовна,**  
кандидат технических наук,  
научный сотрудник отдела  
трубопроводных систем энергетики,  
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия;  
e-mail: zhannochka\_k@mail.ru

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Nikolay I. Ilkevich,**  
Dr. Sci. (Eng.),  
Chief Researcher of the Department  
of Pipeline Energy Systems,  
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,  
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia;  
✉ e-mail: ilkev@isem.irk.ru

**Tatiana V. Dzyubina,**  
Cand. Sci. (Eng.),  
Senior Researcher of the Department  
of Pipeline Energy Systems,  
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,  
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia;  
e-mail: tvleo@isem.irk.ru

**Zhanna V. Kalinina,**  
Cand. Sci. (Eng.),  
Researcher of the Department  
of Pipeline Energy Systems,  
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,  
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia;  
e-mail: zhannochka\_k@mail.ru



## Математическое моделирование конденсации рабочего тела в системе отдачи тепла холодному источнику энергоустановки малой мощности

© А.Е. Кишалов, А.А. Зиннатуллин

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, Россия

**Резюме:** Цель – предложить способ понижения температуры и конденсации рабочего тела, циркулирующего в установке децентрализованной выработки энергии. Для Российской Федерации характерна неравномерная обеспеченность электричеством и тепловой энергией. Проблема дефицита энергии наиболее остро стоит в регионах Дальнего Востока и Крайнего Севера. Существующее на сегодняшний день централизованное обеспечение энергией имеет такие недостатки как большой уровень потерь при доставке и трансформации, а также возможность обесточивания большого количества потребителей при аварии на центральной электростанции. В связи с этим все большую актуальность приобретает идея децентрализованной выработки энергии, которая лишена указанных недостатков благодаря автономности и близкому месторасположению к местам потребления. Одним из методов децентрализованной выработки тепло- и электроэнергии является применение энергоустановок малой мощности, основанных на цикле Ренкина, с органическим рабочим телом. Их конструкция состоит из котла для нагревания рабочего тела, турбины для привода электрогенератора, конденсатора и насоса. Для конденсации теплоносителя процесс органического цикла Ренкина должен быть обеспечен отводом тепла в окружающую среду. В данной работе рассмотрен способ понижения температуры и конденсации рабочего тела, циркулирующего в энергоустановке (при помощи горизонтального трубопровода, помещенного в грунт на некоторую глубину). Предполагается, что имеющийся температурный потенциал грунта обеспечивает полную конденсацию рабочего тела без излишнего переохлаждения. Исследование интенсивности охлаждения и конденсации рабочего тела в трубопроводе проведено с применением гомогенной и кольцевой модели течения. Определение полей температур и степени сухости пара произведено посредством двух подходов: в программном комплексе конечно-элементного моделирования ANSYS CFX и методом конечных разностей (инженерные методики расчета). Также в работе приведен анализ результатов, полученных в ходе решения задачи средствами конечно-элементного анализа и инженерного расчета методом конечных разностей.

**Ключевые слова:** децентрализованная выработка энергии, математическое моделирование теплофизических процессов, двухкомпонентные течения, конденсация, гомогенная модель течения, кольцевая модель течения

**Информация о статье:** Дата поступления 17 мая 2019 г.; дата принятия к печати 11 июля 2019 г.; дата онлайн-размещения 31 октября 2019 г.

**Для цитирования:** Кишалов А.Е., Зиннатуллин А.А. Математическое моделирование конденсации рабочего тела в системе отдачи тепла холодному источнику энергоустановки малой мощности. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т. 23. № 5. С. 934–949. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-934-949>

## Mathematical modeling of working fluid condensation in the system of heat transfer to low-capacity power plant cold source

Aleksandr E. Kishalov, Almir A. Zinnatullin

Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia

**Abstract:** The purpose of the paper is to offer a method for reducing the temperature and condensation of the working fluid circulating in the power plant due to the fact that the Russian Federation is characterized by uneven provision of electricity and heat (the problem of energy shortage is most acute in the Far East and the Far North regions). The major shortcomings of the current centralized energy supply are great losses during energy delivery and transformation, as well as the possibility of de-energizing a large number of consumers in case of an accident at the central power plant. In this regard, the idea of decentralized energy production free from the named shortcomings due to its autonomy and proximity to the places of consumption is becoming increasingly relevant. One of the methods of decentralized generation of heat and electricity is the use of Rankine cycle-based low-capacity power plants with an organic working fluid. Their design

includes a boiler heating the working fluid, a turbine driving the electric generator, condenser and a pump. To condense the coolant the organic Rankine cycle must be provided with heat dissipation to the environment. This paper deals with the method of lowering the temperature and condensation of the working fluid circulating in the power plant (by means of a horizontal pipeline plunged to a certain depth in the ground). It is assumed that available temperature potential of the soil provides complete condensation of the working fluid without excessive overcooling. The study of intensity of working fluid cooling and condensation in the pipeline is carried out using a homogeneous and ring flow model. The temperature fields and steam dryness degree are determined by two approaches: in the software package of finite element modeling ANSYS CFX and by the finite difference method (engineering calculation methods). The paper also presents the analysis of the results obtained in the course of solving the problem by means of the finite element analysis and engineering calculation by the finite difference method.

**Keywords:** decentralized energy generation, mathematical modeling of thermal processes, two-component flows, condensation, homogeneous flow model, ring flow model

**Information about the article:** Received May 17, 2019; accepted for publication July 11, 2019; available online October 31, 2019.

**For citation:** Kishalov AE, Zinnatullin AA. Mathematical modeling of working fluid condensation in the system of heat transfer to low-capacity power plant cold source. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2019;23(5):934–949. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-934-949>

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Под децентрализованной выработкой энергии понимают генерацию тепловой и электрической энергии независимо от централизованных источников для нужд отдельного здания или небольшого поселения. Одним из перспективных методов децентрализованной выработки электричества и тепла является применение энергоустановок малой мощности. Их применение имеет ряд ключевых преимуществ. Во-первых, автономность таких установок обеспечивает решение проблемы дефицита энергии для местностей, находящихся вдали от развитой транспортной инфраструктуры. Во-вторых, при централизованном энергообеспечении в распределительных сетях установленный максимальный уровень потерь колеблется в пределах 10...12% [1], а близость потребителей к местам децентрализованной выработки практически искореняет диссипацию энергии в окружающую среду при транспортировании и трансформации. В-третьих, децентрализация позволяет смягчить последствия аварий на центральных электростанциях для объектов социального назначения посредством снабжения их резервной энергией. В-четвертых, применение энергоустановок малой мощности дает возможность включения автоматизированных средств управления процессом производства теп-

ло- и электроэнергии. В-пятых, в долгосрочной перспективе достигается низкая удельная стоимость энергии.

Проектируемая система децентрализованной выработки энергии представляет энергоустановку, основанную на органическом цикле Ренкина (ОЦР) [2]. Она состоит из последовательно расположенных предметов: котла, турбины для привода генератора электрической энергии, конденсатора и насоса. Рабочее тело, нагреваясь и превращаясь в пар в котле, попадает в турбину и совершает полезную работу. Затем оно попадает в конденсатор, конденсируется и с помощью насоса подается обратно в котел [3].

В данной работе рассматривается конструкция конденсатора системы децентрализованной выработки электро- и тепловой энергии, который представляет собой горизонтально расположенный трубопровод, помещенный в грунт. Такая система обеспечивает охлаждение и конденсацию рабочего тела (РТ) на температурном уровне окружающей среды за счет хладоресурса грунта [4]. В статье исследуются численные подходы для расчета стационарного теплообмена парожидкостной среды с грунтом через цилиндрическую стенку с учетом конденсации. Решена задача минимизации длины (необходимой для охлаждения и конденсации теплоносителя) посредством определения оптимальных раз-



меров поперечного сечения трубопровода. Для предпочтительных диаметральных размеров определено распределение массового паросодержания (отношения расхода паровой фазы к суммарной, называемой также степенью сухости пара) и температуры по длине трубопровода. Проведен сравнительный анализ подходов к описанию двухкомпонентных течений с фазовыми превращениями.

В настоящее время известен широкий спектр моделей, описывающих динамику движения двухфазных сред [5, 6]. Для численного описания парожидкостных систем, подобных рассматриваемым в данной статье, используются модели, относящиеся к гомогенным или гетерогенным классам. Гетерогенные модели требуют описания межфазной поверхности: она может быть произвольной либо детерминированной. Даже при большом количестве упрощений численная реализация гетерогенного подхода требует значительных вычислительных затрат, он целесообразен для относительно небольших систем. Несомненным достоинством гомогенной модели является простота реализации алгоритма расчета и, как следствие, минимум потребных вычислительных мощностей. Благодаря допущениям гомогенной модели, описание динамики и тепловых процессов в парожидкостных смесях становится возможным при помощи уравнений гидрогазодинамики однофазной среды<sup>1</sup>. Однако в ряде случаев она может давать отдаленное представление о реальной картине происходящего.

## 2. ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДИК РАСЧЕТА

Расчетная модель конденсатора (рис. 1) представляет собой горизонтально расположенную трубу, ось которой направлена вдоль координаты  $z$ , помещенную в

грунт на глубину  $h = 1,6$  м с наружным диаметром  $D$  и толщиной  $\delta$ . Материал конструкции – нержавеющая сталь 08Х17Т с постоянной теплопроводностью ( $\lambda$ )

$$\lambda_{\text{труб}} = 25 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}, \text{ это отражено в [7].}$$

Рабочим телом является толуол, зависимости теплофизических свойств (ТФС) его жидкой и парообразной фаз определены аппроксимацией данных из программы REFPROP и литературных источников<sup>2,3</sup>. Температура РТ на входе в трубопровод составляет  $T_{\text{вх}} = 554,83$  К, расход теплоносителя –  $m = 0,0328$  кг/с [8], значения параметров соответствуют максимальному режиму работы энергоустановки.

В качестве зависимости изменения состава грунта по глубине был взят геологический разрез грунта равнинной части в районе с. Миловка и с. Романовка Уфимского района (данные предоставлены ООО «Архстройизыскания», г. Уфа). Ввиду слоистости структуры грунт имеет переменный коэффициент теплопроводности:

$$\lambda_1 = 0,29 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}, \quad \lambda_2 = 1,86 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}},$$
$$\lambda_3 = 1,60 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \text{ (рис. 2 а).}$$

Стационарному РТ с окружающей средой предшествует нестационарный, обусловленный изменением энтальпии грунта (его прогревом) после запуска энергоустановки. Для результатов моделирования [4] расчет в первом приближении дал оценку времени выхода на стационарный режим в 14,9 ч. Следовательно, определяющей может быть принята среднесуточная температура (осредненная по дню и ночи). Среднесуточная температура грунта изменяется по глубине  $H$  ( $T(H)$ ) в соответствии

<sup>1</sup>Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: учеб. пособ.: в 10 т. Т. VI. Гидродинамика. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2017. 728 с.

<sup>2</sup>Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Государственное изд-во физ.-мат. лит., 1963. 708 с.

<sup>3</sup>Варгафтик Н.Б. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов. М: Энергоатомиздат, 1990. 352 с.

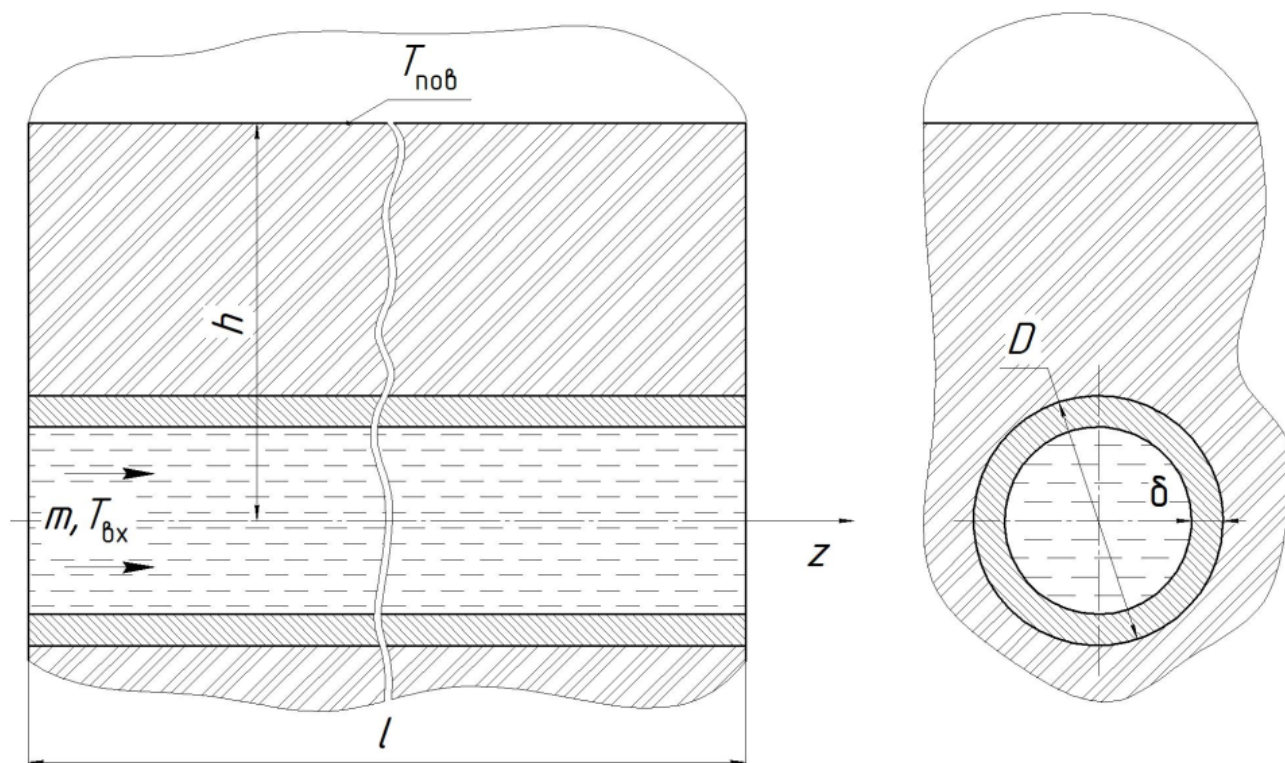


Рис. 1. Расчетная область конденсатора  
 Fig. 1. Condenser simulated area

с данными для г. Уфа в августе<sup>4</sup> (рис. 2 б). Август является одним из жарких месяцев в году, такие температуры создают наиболее тяжелые условия работы установки.

Начальное условие – зависимость температуры по глубине – получено в виде полинома, аппроксимирующего дискретные температурные данные (средняя ошибка аппроксимации  $\bar{\varepsilon} = 0,06\%$ ).

С целью упрощения моделирования приняты следующие допущения: грунт рассматривается как непрерывная среда без каких-либо пористостей и пустот, следовательно, тепловой контакт между трубопроводом и грунтом идеальный; теплообмен происходит при изобарных условиях без потерь напора из-за трения, а значит, ТФС РТ зависят только от температуры (влияние сил гравитации не учитывается).

В работе было проведено четыре

расчета:

- расчет № 1 – инженерная методика, тепловой расчет конденсатора посредством модели кольцевого течения с применением метода конечных разностей и минимизация потребной длины конденсатора итерационным подбором диаметральных размеров трубопровода;

- расчет № 2 – аналогичен расчету № 1, однако он произведен без учета процесса конденсации в пристеночной области на этапе снятия перегрева пара;

- расчет № 3 – инженерная методика, расчет с применением гомогенной модели течения;

- расчет № 4 произведен в программном продукте трехмерного численного гидрогазодинамического моделирования ANSYS CFX с применением гомогенной модели течения.

<sup>4</sup>Волков М.М., Михеев А.Л., Конев К.А. Справочник работника газовой промышленности. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Недра, 1989. 286 с.

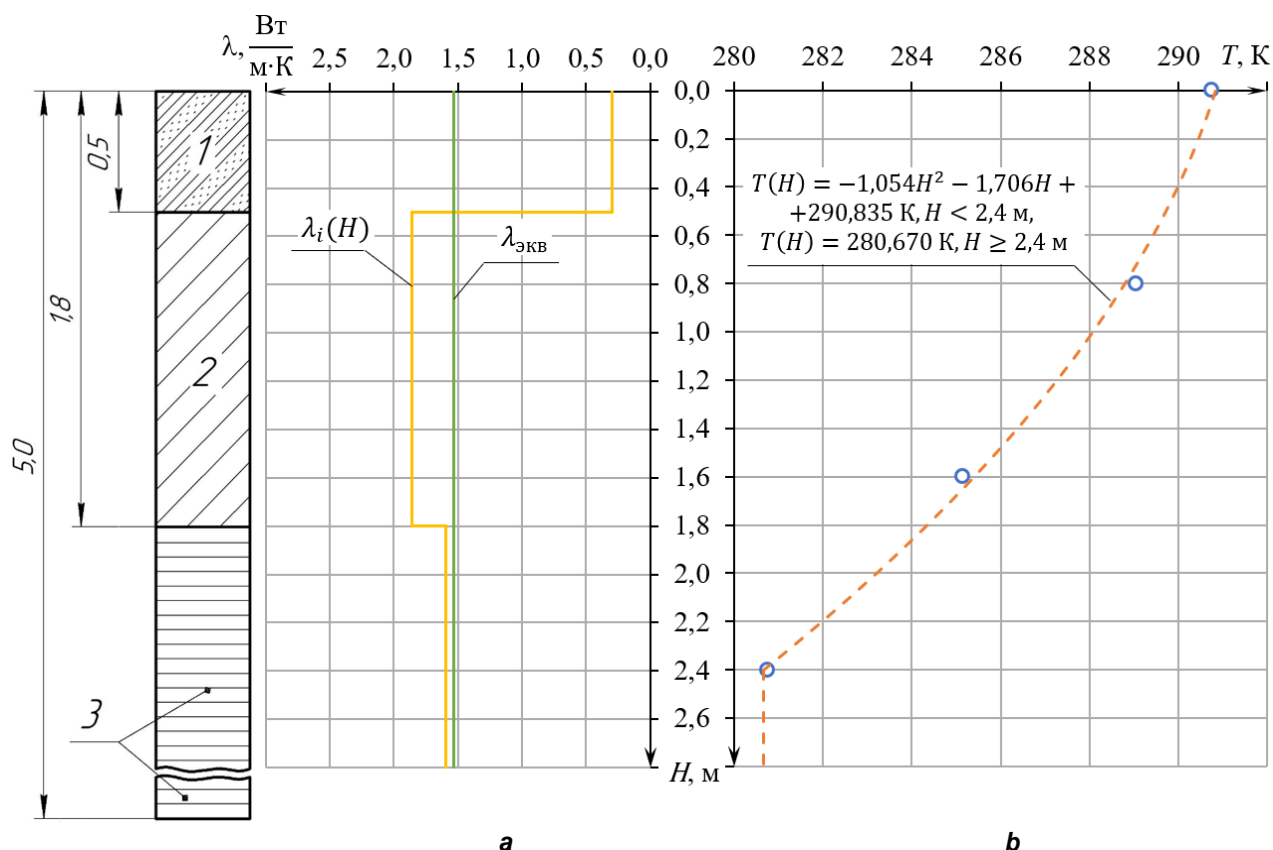


Рис. 2. Изменение коэффициента теплопроводности (а) и температуры (b) по глубине  $H$  грунта (1 – почвенно-растительный слой, 2 – суглинок, 3 – глина<sup>5</sup>): а – переменный коэффициент теплопроводности; б – температура грунта изменяется по глубине в соответствии с данными для г. Уфа в августе

Fig. 2. Thermal conductivity coefficient (a) and temperature (b) vs soil depth  $H$  (1 – topsoil, 2 – loam, 3 – clay<sup>5</sup>): а – variable coefficient of thermal conductivity; б – soil temperature varies in depth in accordance with the data for Ufa in August

**Расчет № 1 по инженерной методике с помощью модели кольцевого течения.** В отличие от гомогенного течения, в котором поток пара и конденсата рассматривается как «псевдоконтинуум» (сплошная неразрывная среда), в кольцевой модели течения фазы движутся раздельно (рис. 3,  $\Delta z$  – дискретный малый участок моделируемой области): конденсат движется по трубопроводу, диаметрально занимая область от  $d_{\text{фаз}}$  до  $D$ . Кольцевое течение, наряду с гомогенной моделью, можно охарактеризовать как идеализацию, т.к. в данной модели не происходит стекания пленки конденсата с образованием «ручья» в нижней части трубопровода. Од-

нако кольцевая модель течения является более приближенной к реальной картине течения пленки конденсата в трубопроводе.

В данной методике принят ряд предпосылок, позволяющих упростить расчет. Предполагается, что радиальные градиенты температур грунта в установившемся режиме больше осевых, тогда исходное дифференциальное уравнение, характеризующее тепловое состояние грунта, в трехмерной постановке может быть приближено к двумерному. В свою очередь, поля температур и степени сухости пара в области течения РТ моделируются в одномерной постановке [9], т.е. параметры находятся осредненными по сечению. Имеет место только термодинамическое

<sup>5</sup>Шейн Е.В. Курс физики почв: учебник. М.: Изд-во МГУ, 2005. 432 с.

взаимодействие фаз: трение между ними отсутствует, динамического срыва пленки конденсата потоком пара не происходит. Рассматривается равновесная конденсация [10]: скорости фаз одинаковы, температура поверхности раздела фаз равна температуре насыщения  $T_s = 383,75$  К, следовательно, профиль температуры в чистой паровой фазе плоский, значит, в ней отсутствует термическое сопротивление<sup>6</sup>. Параметры РТ жидкой и парообразной фаз берутся в точке насыщения. Вследствие малости и незначительности изменения в уравнении энергии не учитываются составляющие энтальпии конденсата, а также кинетической энергии конденсата и пара. Режим течения пленки конденсата – турбулентный.

Фактическая структура грунта была заменена однородной со среднеинтегральным коэффициентом теплопроводности

$$\lambda_{\text{экв}} = 1,53 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}).$$

На поверхности грунта задано граничное условие первого рода – постоянная температура  $-T_{\text{пов}} = 290,75$  К.

Расчет проводится в 2 этапа.

**Этап 1:** расчет охлаждения перегретого пара, поступающего из турбины энергоустановки до расчетного сечения, где температура пара достигает точки насыщения  $T_s$ . На данном этапе начало конденсации происходит, когда температура внутренней стенки трубы  $T_{\text{ст}}$  становится ниже температуры насыщения:  $T_{\text{ст}} < T_s$ . Определение изменения степени сухости пара  $x$  производится соотношениями для гомогенного потока.

Степень сухости пара и температура РТ в данном расчетном сечении с индексом  $n + 1$  определяются следующей системой, полученной переходом к конечным разностям:

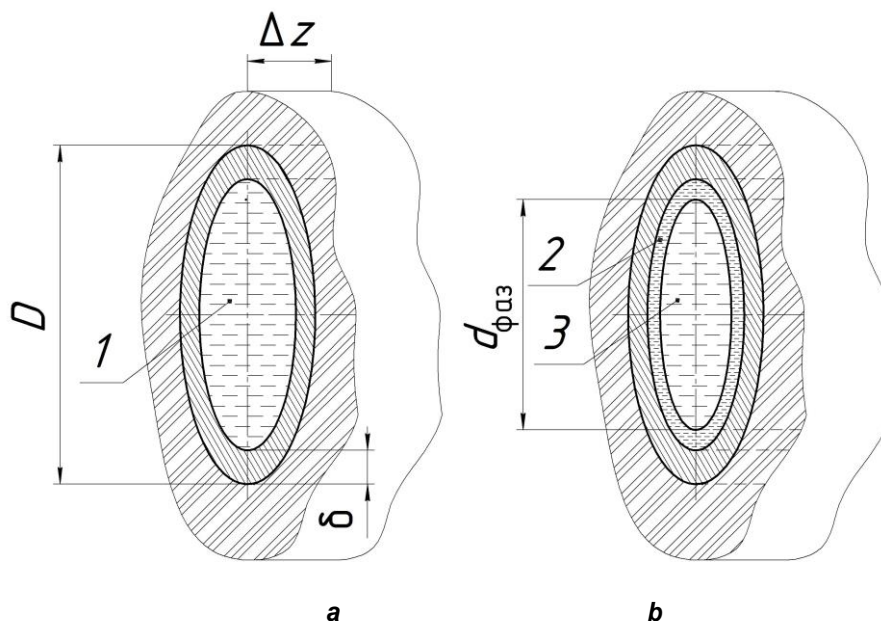


Рис. 3. Сравнение подходов к расчету двухфазных течений (1 – парожидкостная смесь, 2 – жидкая фаза, 3 – парообразная фаза): а – гомогенная модель течения;

б – модель раздельного кольцевого течения

Fig. 3. Comparison of the approaches to two-phase flows calculation (1 – vapor-liquid mixture, 2 – liquid phase, 3 – vapor phase):

a – a homogeneous flow model; b – a separate ring flow model

<sup>6</sup>Мартыненко О.Г. Справочник по теплообменникам: в 2-х т. Т. 1. / пер. с англ. Б.С. Петухов, В.К. Шиков. М.: Энергоатомиздат, 1987. 560 с.





$$x^{(n+1)} = \begin{cases} 1, & T_{\text{ст}}^{(n)} > T_s; \\ x^{(n)} - \frac{k^{(n)} \Delta z}{m(\Delta i_{\text{п}}^{(n)} + r^{(n)})} (T_s - T_{\text{пов}}), & T_{\text{ст}}^{(n)} \leq T_s; \end{cases}$$

$$0 \leq x^{(n+1)} \leq 1;$$

$$T_{\text{ст}} = T^{(n)} - \frac{k^{(n)} (T_s - T_{\text{пов}})}{\pi d \bar{\alpha}_{\text{см}}}; \quad (1)$$

$$T^{(n+1)} = T^{(n)} \left( 1 - \frac{k^{(n)} \Delta z}{m c_{p,\text{см}}^{(n)}} \right) + T_{\text{пов}} \frac{k^{(n)} \Delta z}{m c_{p,\text{см}}^{(n)}},$$

где  $k^{(n)}$  – суммарный линейный коэффициент теплоотдачи от РТ в окружающую среду через цилиндрическую стенку и полубесконечный массив (грунт),  $\Delta z$  – шаг интегрирования по длине трубопровода,  $\Delta i_{\text{п}}^{(n)} = i'''^{(n)} - i''_s$  – энтальпия перегрева пара,  $r^{(n)}$  – теплота парообразования,  $T^{(n)}$  – температура пара,  $\bar{\alpha}_{\text{см}}$  – средний на выбранном дискретном малом участке  $\Delta z$  коэффициент теплоотдачи от смеси пара и жидкости,  $d = D - 2\delta$  – внутренний диаметр трубы,  $c_{p,\text{см}}^{(n)}$  – удельная изобарная теплоемкость смеси.

Расчет проводится до тех пор, пока не будет достигнуто условие  $T^{(n)} < T_s$ . По достижении этого условия проводится суммирование дискретных участков  $\Delta z$  для определения длины участка охлаждения  $l_{\text{охл}}$ .

**Этап 2:** расчет раздельного кольцевого течения пара и конденсата.

Для второго этапа уравнение баланса энергии рассматриваемой системы с учетом предпосылок, описанных ранее, имеет следующий вид:

$$r \frac{dx}{dz} = - \frac{k(T_s - T_{\text{пов}})}{m}. \quad (2)$$

Суммарный линейный коэффициент теплоотдачи от РТ через цилиндрическую стенку в грунт определяется следующим выражением [11]:

$$k = \frac{1}{\frac{\ln \left[ \frac{2h}{D} + \sqrt{\left( \frac{2h}{D} \right)^2 - 1} \right]}{2\pi \lambda_{\text{экр}}} + \frac{\ln \left( \frac{D}{d} \right)}{2\pi \lambda_{\text{труб}}} + \frac{1}{\pi d \bar{\alpha}'}} \quad (3)$$

где  $\bar{\alpha}'$  – средний на выбранном участке  $\Delta z$  коэффициент теплоотдачи от пленки конденсата.

Средний коэффициент теплоотдачи от пленки конденсата определяется в зависимости от числа Нуссельта:

$$\bar{\alpha}' = \frac{\lambda'}{d_r} \overline{\text{Nu}}, \quad (4)$$

где  $\overline{\text{Nu}}$  – среднее на участке длины трубопровода  $\Delta z$  число Нуссельта,  $\lambda'$  – коэффициент теплопроводности жидкой фазы,  $d_r$  – гидравлический диаметр.

Число Рейнольдса  $\text{Re}$  для турбулентной пленки конденсата  $\text{Re} \geq \text{Re}_{\text{кр}} = 300 \dots 400$ . Теплообмен в турбулентной пленке можно описать с использованием аналогии теплообмена в приведенном однофазном потоке с применением  $d_r = d - d_{\text{фаз}}$  в качестве характерного размера [12]:

$$\overline{\text{Nu}} = 0,016 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,43} \left( \frac{d_r}{d} \right)^{-0,057}; \quad (5)$$

$$d_r = (1 - \sqrt{\varphi})d,$$

$$\text{где } \text{Re} = \frac{\rho' W d_r}{\mu'} = \frac{4m(1-x)(1+\sqrt{\varphi})}{\pi d \mu'},$$

$$\text{Pr} = \frac{\mu' c'}{\lambda'} - \text{число Прандтля},$$

$$\varphi = \frac{1}{1 + \left( \frac{1-x}{x} \right) \frac{\rho''}{\rho'}} - \text{доля сечения, занятая}$$

паром.

Выражения (3)–(5), с учетом граничных условий, позволяют провести численное интегрирование уравнения (2), результатом решения которого являются длины

участков конденсации РТ  $l_{\text{конд}}$ .

Суммарные длины трубопровода складываются из двух составляющих длин, определенных на первом и втором этапах.

Была составлена выборка из наружных диаметров и толщин трубопровода в соответствии с данными из Межгосударственного стандарта<sup>7</sup>. Произведен итерационный расчет, сущность которого заключается в последовательной подстановке данных геометрических размеров для получения матрицы, составленной из всех возможных длин трубопровода.

Результаты расчета представлены в виде семейства параметрических кривых (рис. 4). Расчетами выявлено, что минимум потребной длины ( $l_{\text{конд}} = 71,45$  м) трубопровода наблюдается при  $D = 219$  мм и  $\delta = 32$  мм, данные значения приняты в качестве определяющих при дальнейших расчетах.

Также построены зависимости средней температуры РТ (рис. 8) и массового паросодержания вдоль оси трубопровода

(рис. 9, кривая 1) для его оптимальной геометрической конфигурации.

**Расчет № 2. Расчет по инженерной методике с помощью модели кольцевого течения без учета конденсации на этапе охлаждения рабочего тела.** Принципиальное отличие данного расчета от расчета № 1 заключается в том, что на первом этапе не учитывается наличие конденсации, происходящей за счет достижения условий насыщения вблизи стенки трубопровода быстрее, чем близ оси при идентичных предпосылках. В данных условиях началом процесса конденсации считается наступление условия:  $T \leq T_s$  а не  $T_{\text{ст}} \leq T_s$  как это было положено в расчете № 1.

На части длины трубы, где происходит снятие перегрева пара изменения массового паросодержания, расчеты № 1 и № 2 будут отличны друг от друга. На втором этапе зависимости будут изменяться эквидистантно вследствие одинаковости принципа расчета.

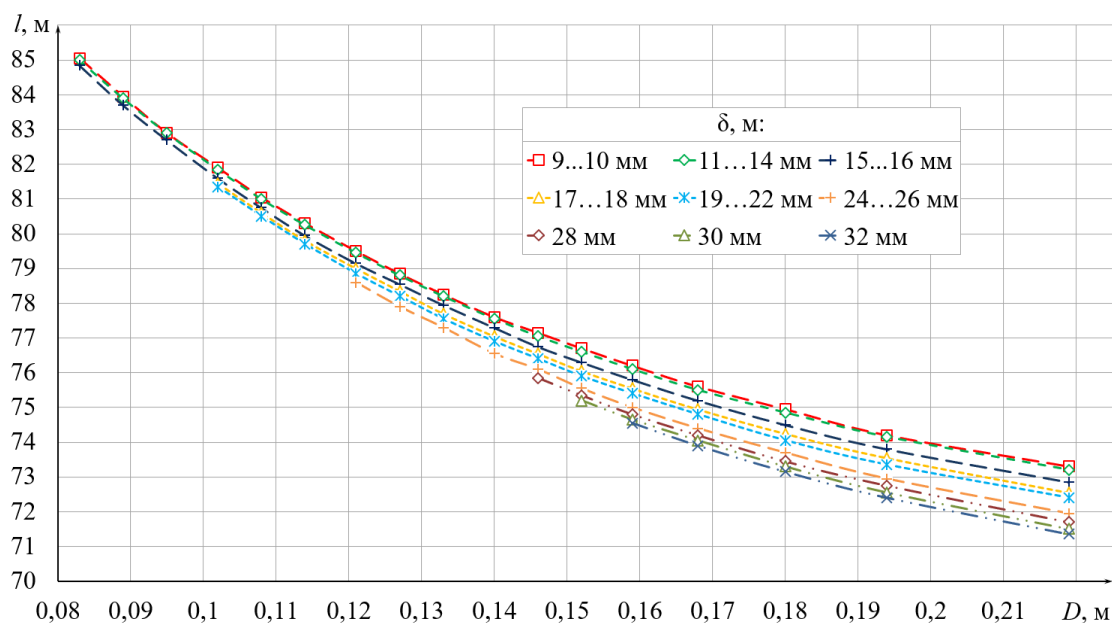


Рис. 4. Зависимость длины трубопровода, необходимой для конденсации Теплоносителя, от наружного диаметра и толщины стенки

Fig. 4. Pipeline length required for working fluid condensation vs pipeline external diameter and wall thickness

<sup>7</sup>ГОСТ 9941-81. Трубы бесшовные холодно- и теплodeформированные из коррозионно-стойкой стали. Технические условия. Введ. 01.01.1983. М.: Изд-во стандартов, 1983. 8 с.



Количественная оценка расстояния, определяющего отклонение результатов расчета № 2 от расчета № 1, сводится к нахождению разности массовых паросодержаний в сечениях, где для двух принципов расчета процесс конденсации устанавливается по всей площади.

По итогам расчета построена зависимость паросодержания от длины трубопровода (см. рис. 9, кривая 2).

**Расчет № 3 по инженерной методике с помощью гомогенной модели течения.** При моделировании использовался так называемый подход «Эйлера-Эйлера», сущность которого заключается в том, что отдельные фазы рассматриваются как взаимопроникающие континуумы, и через каждую точку пространства в разные моменты времени проходят частицы двух фаз теплоносителя, имеющие собственные значения термо- и газодинамических величин [13]. Функции, описывающие концентрации фаз в рассматриваемом объеме (массовые, объемные и мольные содержания), являются непрерывными.

Одной из моделей, относящихся к Эйлер-Эйлеровому подходу, является модель смеси (Mixture Model) [14]. Она разработана для двух или более фаз. Система основных уравнений рассматривается не для отдельных фаз, а для их смеси. Эффективные ТФС смеси получают по определенным зависимостям, их изменение происходит за счет уменьшения степени сухости пара [15]:

$$\begin{aligned}\lambda_{\text{см}} &= \lambda'(1-x) + \lambda''x; \\ c_{p,\text{см}} &= c'_p(1-x) + c''_p x; \\ \mu_{\text{см}} &= \left( \frac{1-x}{\mu'} + \frac{x}{\mu''} \right)^{-1}; \\ \rho_{\text{см}} &= \left( \frac{1-x}{\rho'} + \frac{x}{\rho''} \right)^{-1},\end{aligned}\quad (7)$$

где  $x$  – степень сухости пара;  $\lambda'$ ,  $\lambda''$ ,  $\lambda_{\text{см}}$  – коэффициенты теплопроводности,  $\mu'$ ,

$\mu''$ ,  $\mu_{\text{см}}$  – коэффициенты динамической вязкости;  $c'$ ,  $c_p''$ ,  $c_{p,\text{см}}$  – удельные теплоемкости;  $\rho'$ ,  $\rho''$ ,  $\rho_{\text{см}}$  – плотности жидкой фазы ( $'$ ), парообразной фазы ( $''$ ), их смеси (см).

В расчете использован частный случай модели смеси – гомогенного течения. В ней предполагается, что фазы движутся с одинаковой скоростью, не проскальзывая друг относительно друга. Поверхности раздела фаз не существует. Задача решалась в одномерной постановке в соответствии с алгоритмом, подробно изложенном в [4]. Член в уравнении энергии, характеризующий изменение кинетической энергии смеси, ввиду своей малости считается пренебрегаемым.

Полученное графическое описание изменения степени сухости пара для данного расчета изображено на рис. 9 (кривая 3).

**Расчет № 4. Моделирование в ANSYS CFX.** Расчетная область состоит из трех частей: грунт, трубопровод и зона течения теплоносителя (передача информации между ними осуществляется посредством специальных связей – интерфейсов). В целях минимизации времени расчета в моделировании задействована только половина области.

Расчетная область грунта представляет собой параллелепипед шириной 3,5 м, высотой 5,0 м с вырезом в форме половины цилиндра для трубопровода и области течения (см. рис. 1). Длина моделируемой области – 70 м. На данной геометрической модели построена неструктурированная тетраэдрическая сетка с замельчением по поверхности контакта грунта с трубой<sup>8</sup>. Минимальный размер элемента сетки – 80 мм, максимальный – 150 мм, в замельчении размер элемента – 40 мм. Количество элементов – порядка 3 800 000 (рис. 5 а). Стенки, образующие данный параллелепипед, установлены как адиабатически изолированные.

Для модели трубопровода, пред-

<sup>8</sup>Кудоярова В.М., Кишалов А.Е. Решение прикладных задач теплообмена и гидрогазодинамики в пакете ANSYS: учеб. пособ. Уфа: РИК УГАТУ, 2016. 219 с.

ставляющего собой половину полого цилиндра (см. рис. 1), построена неструктурированная тетраэдрическая сетка с замельчением по внутренней поверхности. В данном случае минимальный размер элемента сетки – 8 мм, максимальный – 15 мм. Число элементов – 3 400 000. Результат построения показан на рис. 5 *b*. На торцевых частях трубопровода установлено граничное условие в виде адиабатической стенки.

Для домена течения РТ построена неструктурированная тетраэдрическая сетка с замельчением по области контакта с внутренней поверхностью трубопровода и со структурированными слоями из призматических элементов (слои инфляции). Минимальный размер элемента сетки – 20 мм, максимальный – 60 мм, размер замельчения равен 10 мм, суммарная толщина слоев инфляции – 54,2 мм, число слоев – 5, максимальная толщина одного слоя составляет 13 мм. Число элементов – порядка 3 280 000 (рис. 5 *c*).

В качестве РТ была использована бинарная гомогенная смесь (Binary Homogeneous Mixture), компоненты которой – пар и конденсат толуола – были выбраны из библиотеки материалов ANSYS CFX. Фазовый переход – термический (Thermal Phase Change) – конденсация в зависимости от температуры. Установлена модель теплопереноса Thermal Energy, модель турбулентности –  $k-\varepsilon$ .

Зависимость коэффициента теплопроводности по глубине была задана в «ступенчатой» форме (см. рис. 2 *a*) с при-

менением кусочно-заданной функции (Boxcar Function) [15]. В отличие от инженерных методик расчета, для объема грунта задано начальное условие в виде зависимости температуры от глубины (см. рис. 2 *b*).

Распределения температуры РТ и массового паросодержания в моделируемой области, полученные в результате решения задачи в ANSYS CFX, изображены на рис. 8 и 9 (кривая 4), соответственно.

Установленные граничные условия для массива грунта в виде адиабатических стенок вкупе с изменяемым коэффициентом теплопроводности по глубине деформируют изотермы во всех направлениях. Температурные изолинии в радиальном направлении в контрольных сечениях (рис. 6 *b-d*) отличны от полученных ранее [17]: они имеют более «приплюснутый» вдоль вертикальной оси характер с изломом, объясняемым скачкообразным изменением коэффициента теплопроводности грунта.

Обращает на себя внимание вид эпюр степени сухости пара: в радиальном направлении они близки к параболическому распределению. При этом, как показано на рис. 7, разность между паросодержанием на оси трубопровода и в пристеночной области даже на участке начала процесса конденсации значительна, что ставит под сомнение правомерность применения одномерной постановки в инженерной методике расчета посредством гомогенной модели течения. В выходном сечении трубопровода ( $z = 70$  м) степень сухости пара

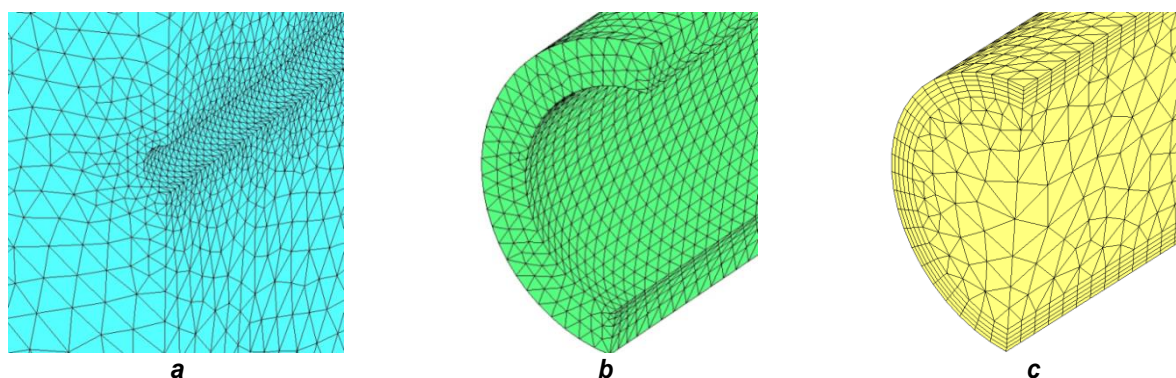
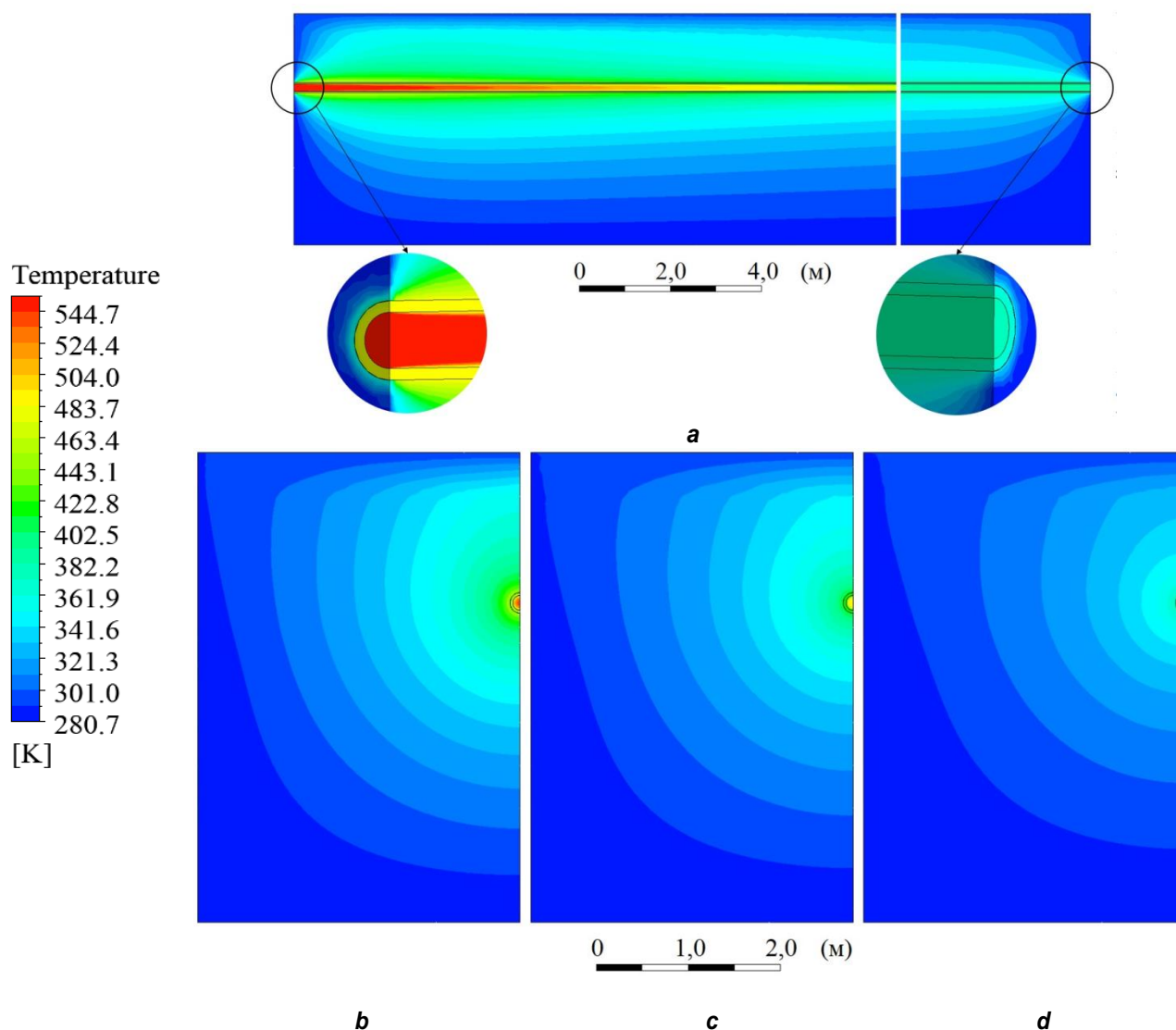


Рис. 5. Конечно-элементные модели: *a* – грунта; *b* – трубопровода; *c* – области течения рабочего тела

Fig. 5. Finite element models of: *a* – soil; *b* – pipeline; *c* – working medium flow region



**Рис. 6. Изменение температуры:** а – в осевом направлении в области входного и выходного сечений по плоскости симметрии; б, с, d – в радиальном направлении в контрольных плоскостях вдоль оси трубопровода  $z$  (4, 10, 20 м, соответственно)

**Fig. 6. Temperature change:** а – in the axial direction in input and output sections on the plane of symmetry; б, с, d – in the radial direction in the control planes along the pipeline axis  $z$  (4, 10, 20 m, respectively)

составила 0,0013 ед. степени сухости пара, данную длину моделируемой области можно считать достаточной для полной конденсации.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 8 представлены зависимости средних в поперечных сечениях трубопровода температур РТ от расстояния по оси трубопровода. Как видно из графиков, имеются количественные и качественные расхождения результатов расчетов инже-

нерными методиками (расчеты № 1–3) от моделирования в ANSYS CFX (расчет № 4): значения температур в сходственных точках в среднем отличны на 9,1 К (2,2%). Моделированием в ANSYS CFX установлено, что сечение, для которого по всей площади устанавливаются условия насыщения, имеет координату  $z = 25,7$  м, в то время как инженерные методики дали результат  $z = 31,7$  м, что на 23,3% больше. Из рис. 6 а очевидно, что на начальном этапе существуют значительные осевые температурные градиенты, наличие которых в исход-



ных дифференциальных уравнениях инженерных методик расчета не было учтено, что повлекло за собой отклонение значений температур.

На рис. 9 приведены графики распределения степеней сухости пара по результатам расчетов инженерной методикой кольцевой моделью течения (расчет № 1, кривая 1), инженерной методикой моделью кольцевого течения без учета конденсации РТ на этапе снятия перегрева за счет падения температуры стенки ниже условий насыщения (расчет № 2, кривая 2), инженерной методикой гомогенной моделью те-

чения (расчет № 3, кривая 3) и моделирования в ANSYS CFX гомогенной моделью течения (расчет № 4, кривая 4).

На этапе конденсации качественная близость характерна для кривых 1, 2 и 4. Кривая 3 изменяется под меньшим к оси абсцисс углом. Кривые 3 и 4 в концевых частях переходят от приблизительно линейной зависимости к более нелинейной.

По абсолютной величине результаты расчета № 1 отличаются от результатов расчета № 4 на 0,075, результаты расчета № 2 – на 0,192, результаты расчета № 3 – на 0,302 ед. степени сухости пара.

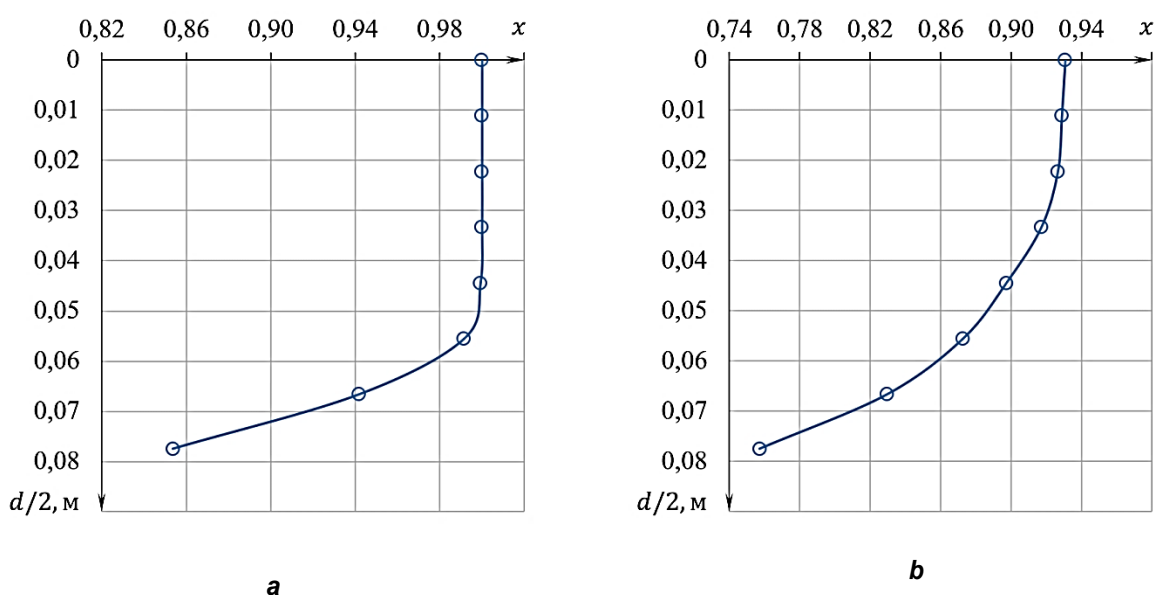


Рис. 7. Изменение степени сухости пара в зоне начала процесса конденсации по радиусу в контрольных плоскостях  $z = 25$  м (а) и  $z = 30$  м (б)

Fig. 7. Steam dryness alteration along the radius in the condensation initiation area in the control planes of  $z = 25$  m (a) and  $z = 30$  m (b)

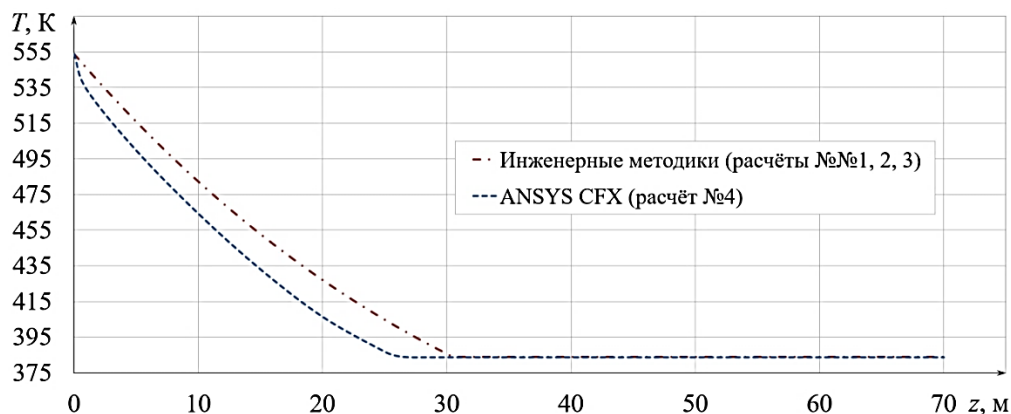
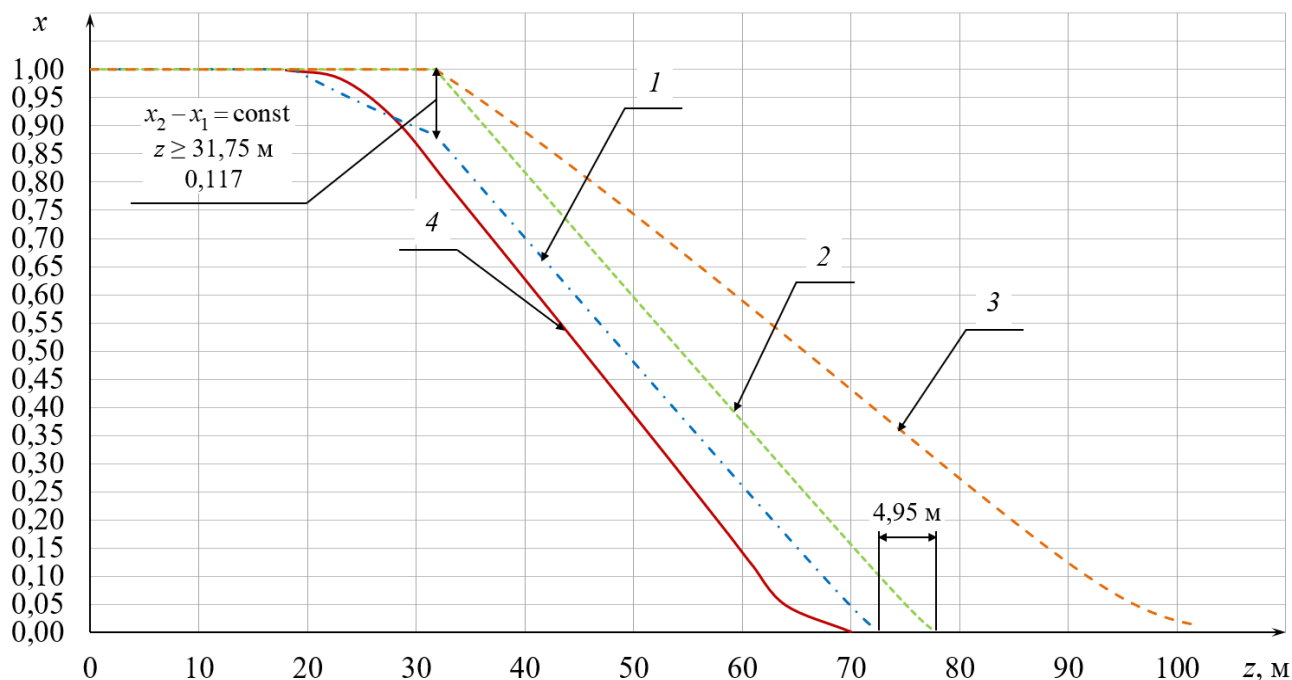


Рис. 8. Изменения средней температуры рабочего тела в сечениях трубопровода, полученные различными подходами

Fig. 8. Alterations of working fluid average temperature in pipeline sections obtained by various approaches



**Рис. 9. Изменение степени сухости пара вдоль оси трубопровода по результатам расчетов:**  
1 – расчет № 1 (инженерная методика, кольцевая модель течения); 2 – расчет № 2 (инженерная методика, кольцевая модель течения в предположении отсутствия конденсации на участке снятия перегрева пара); 3 – расчет № 3 (инженерная методика, однородная модель течения); 4 – расчет № 4 (ANSYS CFX, однородная модель течения)

**Fig. 9. Steam dryness alteration along the pipeline axis calculated by:**  
1 – computation no. 1 (engineering technique, ring flow model), 2 – computation no. 2 (engineering technique, ring flow model under the assumption that there is no condensation on the site of steam superheat removal)  
3 – computation no. 3 (engineering technique, a homogeneous flow model),  
4 – computation no. 4 (ANSYS CFX, a homogeneous flow model)

На участке конденсации РТ кривые 1 и 2 параллельны друг другу, при этом по вертикали точки кривой 2 сдвинуты относительно точек кривой 1 на постоянную по длине величину – 0,117 ед. степени сухости пара. Наличие сдвига приводит к преувеличению потребной для полной конденсации длины трубопровода на 4,95 м.

Согласно результатам расчета № 1 для полной конденсации теплоносителя необходим трубопровод длиной 71,45 м, расчет № 2 дал результат в 76,40 м, расчет № 3 – 102,20 м, расчет № 4 – 70,00 м.

Среднее относительное отличие результатов расчета № 1 относительно расчета № 4 при определении координат с одинаковым значением степени сухости составило 3,5%, для расчета № 2 – 17,4%, а для расчета № 3 – 34,3%.

Среднее уменьшение степени сухости пара вдоль оси трубопровода  $\overline{\partial x / \partial z}$

для расчетов составило:  $0,019 \text{ м}^{-1}$  (расчеты № 1 и 2),  $0,012 \text{ м}^{-1}$  (расчет № 3),  $0,021 \text{ м}^{-1}$  (расчет № 4). Таким образом, наиболее интенсивный процесс конденсации наблюдается при моделировании в ANSYS CFX.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данного исследования рассмотрен вариант отдачи тепла РТ холодному источнику, представляющему собой горизонтальный трубопровод, помещенный в грунт. Конструкция обеспечивает понижение температуры и последующую конденсацию теплоносителя, циркулирующего в энергоустановке децентрализованной выработки тепло- и электроэнергии. Произведен ряд расчетов стационарного теплообмена движущегося теплоносителя (толуола) с грунтом через цилиндрическую стенку с применением двух моделей: кольцевой (расчеты № 1–2) и однородной моде-



лей течения (расчеты № 3–4).

С целью нахождения минимальной потребной длины трубопровода был произведен итерационный расчет с применением кольцевой модели течения, где в качестве варьируемых параметров выступали толщина и наружный диаметр трубопровода. Для оптимальных поперечных размеров определено распределение температур и степени сухости пара по длине трубы.

Среднее отклонение результатов инженерных расчетов от моделирования в ANSYS CFX с т.зр. изменения температуры РТ по длине трубопровода составляет 9,1 К (2,2%).

Согласно результатам расчета № 1 для полной конденсации теплоносителя необходим трубопровод длиной 71,45 м, расчет № 2 дал результат в 76,40 м, расчет № 3 – 102,20 м, расчет № 4 – 70,00 м.

Результаты инженерного расчета кольцевой моделью течения и моделирования в ANSYS CFX наиболее близки друг к другу: в среднем взаимное отклонение

паросодержаний в данном сечении составляет 0,075 долей степени сухости пара. Результаты расчета № 2 отклоняются от расчета № 1 на 0,117 степени сухости пара, а потребная длина трубопровода превышена на 4,95 м в сравнении с расчетом № 1. Следовательно, учет конденсации на участке охлаждения РТ до температуры насыщения существенен. В свою очередь, степени сухости пара (определенные расчетами № 2 и № 3) отличаются от результатов расчета № 4 на 0,192 и 0,302 ед., соответственно.

Для моделирования в ANSYS CFX (расчет № 4) на длине трубопровода, равной 70 м, степень сухости пара составила 0,0013 ед. Таким образом, данной длиной обеспечивается полная конденсация РТ в наихудших климатических условиях и на максимальном режиме работы энергоустановки. Инженерными методиками расчета получены следующие оценки длин: 71,45 м (расчет № 1); 76,40 м (расчет № 2); 102,20 м (расчет № 3).

#### **Библиографический список**

1. Герасименко А.А., Пузырев Е.В. Определение величины нормативных потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2013. № 10. С. 220–235.
2. Карабарин Д.И., Михайленко С.А. Повышение энергоэффективности производства энергии в районах децентрализованной энергетики // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 10. С. 81–86.
3. Кишалов А.Е., Зародов Е.А. Термодинамический расчет органического цикла Ренкина для энергоустановок малой мощности с использованием биотоплива // Молодежный Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2017. № 2. С. 183–188.
4. Кишалов А.Е., Зиннатуллин А.А. Тепловой расчет горизонтального трубопровода с учетом конденсации теплоносителя // Технические науки: теория и практика: матер. IV Междунар. науч. конф. 2018 (г. Казань, 20–23 ноября 2018 г.). Казань: Изд-во «Молодой ученый», 2018. С. 27–32.
5. Бабенко А.В., Корельштейн Л.Б. Гидравлический расчет двухфазных газожидкостных течений: современный подход // Трубопроводная арматура и оборудование. 2016. № 2. С. 38–42.
6. Martin W.A. Compact Introduction to the Numerical Modeling of Multiphase Flows. Karlsruhe: Institut für Reaktorsicherheit, 2003. 38 p.
7. Характеристика материала 08X17T // Марочник стали и сплавов [Электронный ресурс]. URL: [http://www.splav-kharkov.com/mat\\_start.php?name\\_id=319](http://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=319) (10.03.2019).
8. Кишалов А.Е., Зародов Е.А. Способ конденсации рабочего тела в ОЦР за счет температуры грунта // Мавлютовские чтения: материалы XI Всерос. молод. науч. конф.: в 7 т. (г. Уфа, 17 октября 2017 г.). Уфа: РИК УГАТУ, 2017. Т. 1. С. 371–375.
9. Herbert S. Gasdynamic Aspects of Two-Phase Flow: Hyperbolicity, Wave Propagation Phenomena and Related Numerical Methods. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, 2006. 273 p.
10. Lorenzo M.De, Lafon Ph., Matteo M.Di, Pelanti M., Seynhaeve J.-M. Bartosiewicz Y. Homogeneous Two-Phase Flow Models and Accurate Steam-Water Table Look-up Method for Fast Transient Simulations // International Journal of Multiphase Flow. 2017. Vol. 95. P. 199–219. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2017.06.001>
11. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. Изд. 5-е, перераб. и доп. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.
12. Нигматуллин Р.И. Динамика многофазных сред: в 2-х ч. Ч. II. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. 360 с.
13. Crowe C.T. Multiphase Flow Handbook. Boca Ra-



ton: Taylor & Francis Group, LLC, 2006. 1156 p.

14. Overview and Limitations of the Mixture Model // ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide [Электронный ресурс]. URL: <http://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node309.htm> (06.03.2019).

15. Awad M.M., Muzychka Y.S. Effective property models for homogeneous two-phase flows // Experimental Thermal and Fluid Science. 2008. Vol. 33. No. 1. P. 106–113. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.engr.mun.ca/muzychka/ETFS2008.pdf>. (06.03.2019)

16. Boxcar Function // Wolfram MathWorld: The Web's Most Extensive Mathematics Resource [Электронный ресурс]. URL: <http://mathworld.wolfram.com/BoxcarFunction.html> (02.03.2019)

17. Кишалов А.Е., Зиннатуллин А.А. Численное моделирование конденсации теплоносителя в горизонтальном трубопроводе // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 2. С. 42–50. <https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.15.2.005>

## References

1. Gerasimenko AA, Puzyrev EV. The determination of the normative electric power loss amount in distributive electric networks. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = The Bulletin of KrasGAU. 2013;10:220–235. (In Russ.)

2. Karabarin DI, Mikhaylenko SA. Improving the energy efficiency of energy production in the areas of decentralized energy sources. = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2017;328;10:81–86. (In Russ.)

3. Kishalov AE, Zarodov EA. Thermodynamic calculation of Rankine organic cycle for low-capacity power plants using biofuels. = *Molodezhnyy vestnik UGATU*. 2017;2:183–188. (In Russ.)

4. Kishalov AE, Zinnatullin AA. Thermal calculation of a horizontal pipeline taking into account coolant condensation. In: *Tekhnicheskie nauki: teoriya i praktika: materialy IV Mezhdunarodnoy nauchnoy konferencii = Engineering sciences: theory and practice: Proceedings of IV International scientific conference*. 20–23 November 2018, Kazan, Kazan: Molodoj uchenyj; 2018. p.27–32. (In Russ.)

5. Babenko AV, Korel'shtein LB. Hydraulic calculation of two-phase gas-liquid flows: a modern approach. *Truboprovodnaya armatura i oborudovanie* = Pipe fittings and equipment. 2016; 2:38–42. (In Russ.)

6. Martin WA. *Compact Introduction to the Numerical Modeling of Multiphase Flows*. Karlsruhe: Institut für Reaktorsicherheit; 2003. 38 p.

7. Characteristics of material 08KH17T. *Grade guide of steels and alloys*. Available from: [http://www.splavkharkov.com/mat\\_start.php?name\\_id=319](http://www.splavkharkov.com/mat_start.php?name_id=319) [Accessed 10th March 2019].

8. Kishalov AE, Zarodov EA. Condensation method of the working fluid in the organic Rankine cycle by means of the soil temperature. *Mavlyutovskie chteniya: Materialy XI Vserossijskoj molodezhnoj nauchnoy konferencii* = Mavlyutov readings: Materials of XI All-Russian youth scientific conference: in volumes, 17 October 2017, Ufa,

Ufa: Ufa State Aviation Technical University; 2017, vol. 1, p.371–375. (In Russ.)

9. Herbert S. *Gasdynamic Aspects of Two-Phase Flow: Hyperbolicity, Wave Propagation Phenomena and Related Numerical Methods*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co; 2006. 273 p.

10. Lorenzo MDe, Lafon Ph, Matteo MDi, Pelanti M, Seynhaeve J-M Bartosiewicz Y. Homogeneous Two-Phase Flow Models and Accurate Steam-Water Table Look-up Method for Fast Transient Simulations. *International Journal of Multiphase Flow*. 2017;95:199–219. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2017.06.001>.

11. Kutateladze SS. *Fundamentals of the theory of heat transfer*. Moscow: Atomizdat; 1979. 416 p. (In Russ.)

12. Nigmatullin RI. *Multiphase media dynamics*. Moscow: Nauka. The Main Edition of Physical and Mathematical Literature; 1987. 360 p. (In Russ.)

13. Crowe CT. *Multiphase Flow Handbook*. Boca Raton: Taylor & Francis Group, LLC; 2006. 1156 p.

14. Overview and Limitations of the Mixture Model. *ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide*. Available from: <http://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node309.htm> [Accessed 6<sup>th</sup> March 2019].

15. Awad MM, Muzychka YS. Effective property models for homogeneous two-phase flows. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2008;33(1):106–113. Available from: <http://www.engr.mun.ca/muzychka/ETFS2008.pdf>. [Accessed 06<sup>th</sup> March 2019]

16. Boxcar Function. Wolfram MathWorld: The Web's Most Extensive Mathematics Resource. Available from: <http://mathworld.wolfram.com/BoxcarFunction.html> [Accessed 12<sup>th</sup> March 2019].

17. Kishalov AE, Zinnatullin AA. Computational modeling of heat-transfer agent condensation in horizontal pipeline. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Bulletin of Voronezh State Technical University. 2019;15;2:42–50. (In Russ.) <https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.15.2.005>

## Критерии авторства

Кишалов А.Е., Зиннатуллин А.А. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в одинаковой мере несут ответственность за плагиат.

## Authorship criteria

Kishalov A.E., Zinnatullin A.A. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

**Conflict of interests**

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Кишалов Александр Евгеньевич**,  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры авиационной теплотехники  
и теплоэнергетики,  
Уфимский государственный авиационный  
технический университет  
450008, Республика Башкортостан,  
г. Уфа, ул. К. Маркса, 12, Россия;  
✉ e-mail: kishalov@ufanet.ru

**Зиннатуллин Альмир Альбертович**,  
магистрант,  
Уфимский государственный авиационный  
технический университет,  
450008, Республика Башкортостан,  
г. Уфа, ул. К. Маркса, 12, Россия;  
e-mail: zinnatullin.almir@gmail.com

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Aleksandr E. Kishalov**,  
Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor of the Department of Aviation Heat  
Engineering and Heat Power Engineering,  
Ufa State Aviation Technical University,  
12 Karl Marks St., Ufa 450008, Republic  
of Bashkortostan, Russia;  
✉ e-mail: kishalov@ufanet.ru

**Almir A. Zinnatullin**,  
Master degree student,  
Ufa State Aviation Technical University,  
Ufa State Aviation Technical University,  
12 Karl Marks St., Ufa 450008, Republic  
of Bashkortostan, Russia;  
e-mail: zinnatullin.almir@gmail.com



## Анализ расчетов идеального и реального циклов двигателя внутреннего сгорания

© В.И. Круглов, А.Д. Хазетдинова, А.В. Щербаков

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

**Резюме:** Целью данной статьи является исследование термодинамического совершенства реального цикла двигателя внутреннего сгорания. Существуют различные методики расчета значений основных термодинамических параметров в узловых точках коэффициента полезного действия и среднего давления. В соответствии с известными данными эти результаты существенно отличаются от реальных. Наиболее рациональной представляется оценка работоспособности двигателя апробированными методами. В настоящее время разработано достаточно способов оценки работоспособности двигателя внутреннего сгорания, основными являются энтропийный и эксергетический. В качестве объекта исследования был выбран эксергетический метод, т.к. он более универсален; рассмотрен 4-тактный дизельный двигатель В-84, нашедший широкое применение в военной технике; проведены расчеты идеального и реального циклов двигателя внутреннего сгорания, исходные параметры для которых были взяты из тактико-технических характеристик двигателя В-84, а также применен эксергетический метод оценки эффективности для обоих циклов, на основе которого построены графики зависимостей энтропии и энтальпии, из них очевидно, что максимальные потери происходят в реальном цикле. На основе проведенных расчетов получены зависимости эксергии (работоспособности) объекта от уровня рассеяния энергии, энтальпии. Получен график изменения эксергии в контрольных точках цикла. Предлагается в дальнейших исследованиях оценить снижение работоспособности объекта в ходе эксплуатации, это может быть использовано при организации стратегии эксплуатации по фактическому техническому состоянию. Результаты исследований предлагается использовать при сравнении опытных данных с эталонными. Кроме того, можно осуществить прогноз изменения уровня работоспособности по обобщенному критерию, в качестве которого выступает эксергия рабочего тела.

**Ключевые слова:** двигатель внутреннего сгорания, цикл Тринклера, эффективность, энтропия, энтальпия, эксергия

**Информация о статье:** Дата поступления 24 апреля 2019 г.; дата принятия к печати 05 июня 2019 г.; дата онлайн-размещения 31 октября 2019 г.

**Для цитирования:** Круглов В.И., Хазетдинова А.Д., Щербаков А.В. Анализ расчетов идеального и реального циклов двигателя внутреннего сгорания. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т. 23. № 5. С. 950–957. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-950-957>

## Analysis of internal combustion engine ideal and real cycle calculations

Vadim I. Kruglov, Adelya D. Khazetdinova, Andrey V. Shcherbakov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

**Abstract:** The purpose of this article is to study the thermodynamic efficiency of the real cycle of the internal combustion engine. There are various methods for calculating the values of the main thermodynamic parameters of the efficiency factor and average pressure in the nodal points. According to the known data, these results significantly differ from the real ones. The most rational assessment of engine performance is the one using the proven methods. Today there are enough assessment methods of internal combustion engine efficiency, the main ones are entropy and exergy methods. The object of research is the exergy method since it is more versatile. Consideration is given to a 4-stroke diesel engine V-84, which is widely used in military equipment. The ideal and real cycles of the internal combustion engine are calculated. Their input parameters are taken from tactical and technical characteristics of the engine V-84. The exergy method applied to estimate the efficiency of both cycles serves the basis for building entropy vs enthalpy graphs. The latter demonstrate that the maximum losses occur in the real cycle. The conducted calculations allowed to obtain the dependences of the object exergy (object efficiency) on the level of energy dissipation, enthalpy. A graph of exergy variations at cycle control points is obtained. It is proposed to carry on further studies where to assess the reduction of the object performance when in operation. This can be used in the development of the actual technical condition-based operation

strategy. The study results are proposed to be used in the comparison of experimental data with reference ones. Moreover, it is possible to predict the changes in the performance level by a generalized criterion, which is the exergy of the working medium.

**Keywords:** internal combustion engine, Trinkler cycle, efficiency, entropy, enthalpy, exergy

**Information about the article:** Received April 24, 2019; accepted for publication 05 June, 2019; available online October 31, 2019.

**For citation:** Kruglov VI, Khazetdinova AD, Shcherbakov AV. Analysis of internal combustion engine ideal and real cycle calculations. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2019;23(5):950–957. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-950-957>

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие технологий двигателей внутреннего сгорания (ДВС), а также усиление конкуренции обусловили актуальность проблемы совершенствования их конструкции. При проектировании нового двигателя необходимо иметь объективные данные по результатам расчета его цикла. Как правило, на первом этапе проводится термодинамический расчет идеального цикла в соответствии с известными и хорошо апробированными методиками В.А. Кириллина, В.В. Сычева, А.Е. Шейндлина<sup>1</sup>. Однако, в связи с рядом неизбежных допущений, результаты таких расчетов существенно отличаются от действительных. Вследствие этого вводится ряд эмпирических поправок на основе опытных испытаний до тех пор, пока не будут получены объективные данные [1–17]. Это требует значительных экономических и временноресурсных затрат. Кроме того, полученные результаты пригодны только для данной конкретной марки двигателя. Для расчета цикла любого ДВС или даже модификации уже рассчитанного варианта весь процесс приходится повторять сначала<sup>2</sup>.

Работа посвящена сравнительному исследованию термодинамического совершенства идеального и реального циклов при использовании исходных данных двигателя В-84, нашедшего широкое применение в эксплуатации.

## 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящее время разработано достаточно методов оценки работоспособности ДВС, к основным относят энтропийный и эксергетический [6].

**Энтропийный метод** – полезная работа, совершаемая в цикле теплосиловой установки

$$l_{\text{пол}} = q_1 - q_2. \quad (1)$$

Поскольку температура холодного источника (окружающей среды)  $T_0$  остается неизменной, то  $q_2 = T_0 \Delta s_{\text{хол}}$ , где  $\Delta s_{\text{хол}}$  – увеличение энтропии холодного источника. Тогда

$$l_{\text{пол}} = q_1 - T_0 \Delta s_{\text{хол}}. \quad (2)$$

При завершении цикла все параметры рабочего тела принимают первоначальные значения независимо от обратимых или необратимости процессов. Энтропия горячего источника уменьшается, т.к. отдает тепло на величину  $\Delta s_{\text{гор}}$ . В обратимом цикле  $\Delta s_{\text{хол}} = \Delta s_{\text{гор}}$ , что соответствует получению максимально возможной полезной работы. Следовательно, можно записать:

$$l_{\text{пол}}^{\text{max}} = q_1 - T_0 \Delta s_{\text{гор}}. \quad (3)$$

Из уравнений (1) и (2) следует:

$$l_{\text{пол}}^{\text{max}} - l_{\text{пол}} = T_0 (\Delta s_{\text{хол}} - \Delta s_{\text{гор}}). \quad (4)$$

<sup>1</sup>Кириллин В.А., Сычёв В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика: учебник для вузов. Изд. 5-е, перераб. и доп. М.: Изд. дом МЭИ, 2016. 496 с.

<sup>2</sup>Круглов В.И., Султанов В.А., Вареник В.В. Методические указания к выполнению расчетных заданий по курсу «Термодинамика и теплопередача». Казань: Изд-во КФУ, 2017. 46 с.



Обозначим величину потерь работоспособности системы –  $\Delta l^*$ , увеличение энтропии системы –  $\Delta S_{\text{сист}}$ . Для необратимых циклов получим  $\Delta l^* = T_0 \Delta S_{\text{сист}}$ , представляющее уравнение Гюи-Стодолы.

Максимальную работу можно получить от тепла  $q_1$  в обратимом цикле Карно, т.е.  $l_{\text{пол}}^{\text{max}} = \eta_t^{\text{K}} q_1$ .

Поскольку  $\eta_t^{\text{K}} = \frac{T - T_0}{T}$ , где  $T$  – температура горячего источника, то

$$l_{\text{пол}}^{\text{max}} = q_1 \left(1 - \frac{T_0}{T}\right). \quad (5)$$

Для реального необратимого цикла полезная работа

$$l_{\text{пол}} = q_1 \eta_e^{\text{уст}}, \quad (6)$$

где  $\eta_e^{\text{уст}}$  – эффективный абсолютный КПД установки.

Следовательно, из формул (3) и (5) получим

$$\Delta l^* = q_1 (\eta_t^{\text{K}} - \eta_e^{\text{уст}}). \quad (7)$$

Таким образом, потери работоспособности установки в целом можно определить по известным  $\eta_t^{\text{K}}$  и  $\eta_e^{\text{уст}}$ .

Изменение энтропии системы  $\Delta S_{\text{сист}}$  равно сумме изменений энтропии ее элементов:

$$\Delta S_{\text{сист}} = \sum_i^n \Delta S_i. \quad (8)$$

Умножив обе части на температуру холодного источника из уравнения Гюи-Стодолы, получим  $\Delta l_{\text{сист}}^* = \sum_i^n \Delta l_i^*$ , т.е. потеря работоспособности системы равна сумме потерь работоспособности ее элементов.

**Эксергетический метод.** Величина максимальной полезной работы определяется соотношением

$$l_{\text{пол}}^{\text{max}} = (u_1 - u_2) - T_0(s_1 - s_2) - p_0(v_2 - v_1). \quad (9)$$

Величину  $l_{\text{пол}}^{\text{max}}$  называют «работо-

способностью» или «эксергией» –  $e_x$ .

В энтропийном методе теплосиловые установки рассматриваются как изолированная система. При этом определяется работоспособность всей установки (тепла, выделяемого горячим источником), а затем рассчитываются потери работоспособности в отдельных элементах установки [3, 6, 14]. Степень термодинамического совершенства элемента оценивается путем сравнения величины потерь работоспособности в этом элементе с величиной работоспособности всей системы в целом.

Эксергетический метод рассматривает каждый элемент как самостоятельную термодинамическую систему. Эффективность работы элемента оценивается путем сравнения работоспособности рабочего тела на входе в элемент с величиной потерь работоспособности из-за необратимости процессов, происходящих в элементе. Работоспособность в обоих методах оценивается по отношению к окружающей среде с параметрами  $p_0$  и  $T_0$ .

Преимущество эксергетического метода заключается в том, что он позволяет оценить степень термодинамического совершенства отдельного элемента без предварительной оценки работоспособности всей установки и потерь работоспособности во всех элементах.

В большинстве теплосиловых установок приходится иметь дело с потоком рабочего тела. При определении потерь работоспособности в каком-либо элементе теплосиловой установки определяют:

- параметры потока на входе  $p_1$  и  $T_1$ ;
- параметры потока на выходе  $p_2$  и  $T_2$ .

Если внутри этого элемента теплосиловой установки поток производит полезную работу  $l_{\text{пол}}$ , то потеря работоспособности будет равна

$$\Delta l^* = (e_{x1} - e_{x2}) - l_{\text{пол}}. \quad (10)$$

В этом заключается основная идея эксергетического метода, который позволяет судить о степени необратимости процессов внутри аппарата по внешней харак-

теристике – разности эксергий на входе и на выходе.

Величина эксергии потока определяется параметрами его состояния ( $p, T$ ) и окружающей среды ( $p_0, T_0$ ). Эксергию потока можно определить по  $h, s$  – диаграмме (рис. 1).

Точка 1 отображает состояние рабочего тела при давлении  $p$  и температуре  $T$ , а точка 0 – состояние рабочего тела при параметрах среды  $p_0, T_0$ . Следовательно, отрезок 1-В равен разности энтальпий ( $h_1 - h_0$ ). Из точки 0 под углом  $\alpha$  проведена прямая.

Поскольку  $\left(\frac{\partial h}{\partial s}\right)_p = T$ , то на диаграмме  $tg\alpha = T$ .

$$(h = u + pv, dh = du + pdv + vdp, dh = Tds + vdp). \quad (11)$$

Прямая, проведенная через точку 0 под этим углом, называется «прямой среды». Из уравнения  $\left(\frac{\partial h}{\partial s}\right)_p = T$  следует, что прямая среды – касательная к изобаре  $p_0 = const$  в точке, соответствующей состоянию среды. Очевидно, что длина отрезка 1-А = 1-В – А-В равна величине  $(h_1 - h_2) - T_0(s_1 - s_0)$ , т.е. эксергии:

$$e = (h_1 - h_2) - T_0(s_1 - s_0). \quad (12)$$

Таким образом, эксергия потока (рабочего тела) с параметрами  $p, T$  относительно среды с параметрами  $p_0, T$  равна на  $h, s$  – диаграмме расстоянию по вертикали между точкой, отображающей состояние потока и прямой среды.

Для количественной оценки степени термодинамического совершенства теплового аппарата используют эксергетический КПД.

$$\eta_{\text{экс}} = \frac{l_{\text{пол}}}{e_{x_{\text{вх}}} - e_{x_{\text{вых}}}}. \quad (13)$$

Если процессы в аппарате обратимы, то

$$l_{\text{пол}} = l_{\text{пол}}^{\text{max}} \text{ и } \eta_{\text{экс}} = 1.$$

В том случае, если в тепловом аппарате полезная работа не производится, потеря работоспособности составит

$$\Delta l^* = (e_{x_1} - e_{x_2}) - l_{\text{пол}}, \quad (14)$$

при отсутствии потерь  $\Delta l^* = 0$ , следовательно, совершается максимальная полезная работа

$$l_{\text{пол}}^{\text{max}} = e_{x_{\text{вх}}} - e_{x_{\text{вых}}}. \quad (15)$$

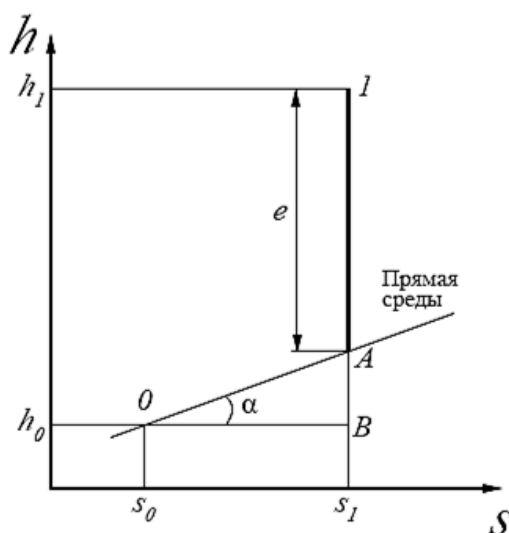


Рис. 1. Определение эксергии потока:  $h, s$  – диаграмма  
 Fig. 1. Determination of flow exergy:  $h, s$  – diagram





Был выбран эксергетический метод оценки эффективности, т.к. он позволяет оценить степень термодинамического совершенства отдельного элемента без предварительной оценки работоспособности всей установки и потерь работоспособности во всех элементах [5, 8, 12].

### 3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

В данном диапазоне параметров наиболее удобным оказался выбор начала отсчета с температурой  $T_0 = 293 \text{ K}$ , давлением  $p_0 = 0,1 \text{ МПа}$ , при этом (условно) полагали, что энтропия  $s_0 = 0 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ , энтальпия  $h_0 = 0 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$  и внутренняя энергия  $u_0 = 0 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ .

Величина эксергии определяется с

помощью формулы:

$$e_a = (h_a - h_0) - T_0 \cdot (s_0 - s_a) \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}, \quad (16)$$

т.к.  $h_0 = 0$  и  $s_0 = 0$ , то

$$e_a = h_a - T_0 \cdot (-s_a) \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}. \quad (17)$$

Представлены  $e, s$ ;  $e, h$  – диаграммы реального и идеального циклов (рис. 2–4), а также график изменения эксергии в контрольных точках цикла. Диаграммы построены по результатам расчетов идеального и реального циклов. При этом исходные данные были взяты из тактико-технических характеристик двигателя В-84.

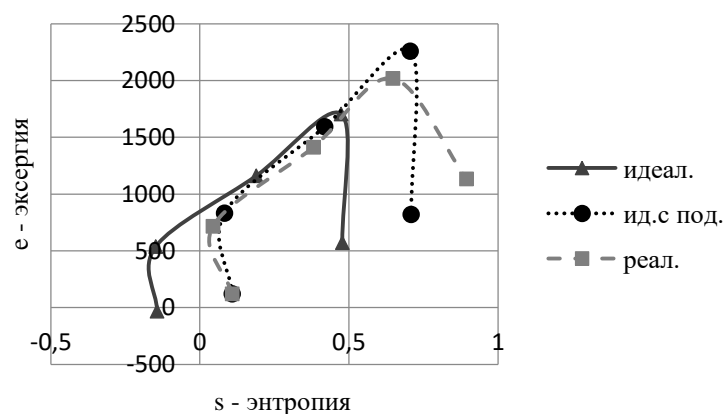


Рис. 2. Изменение эксергии относительно энтропии:  $e, s$  – диаграмма  
Fig. 2. Exergy variations vs entropy:  $e, s$  – diagram

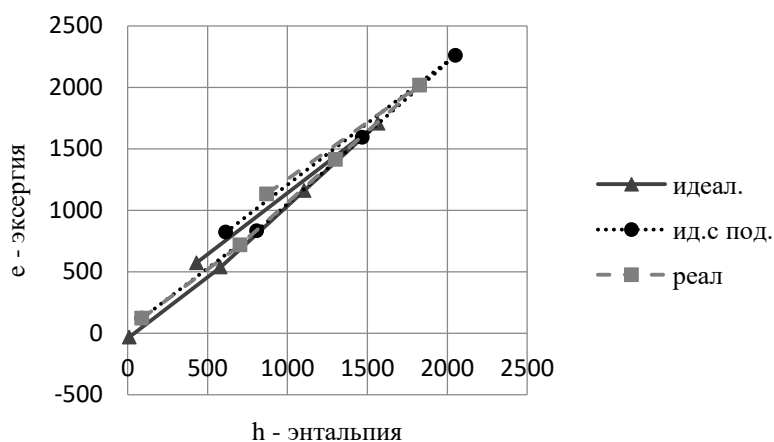


Рис. 3. Изменение эксергии относительно энтальпии:  $e, h$  – диаграмма  
Fig. 3. Exergy variations vs enthalpy:  $e, h$  – diagram

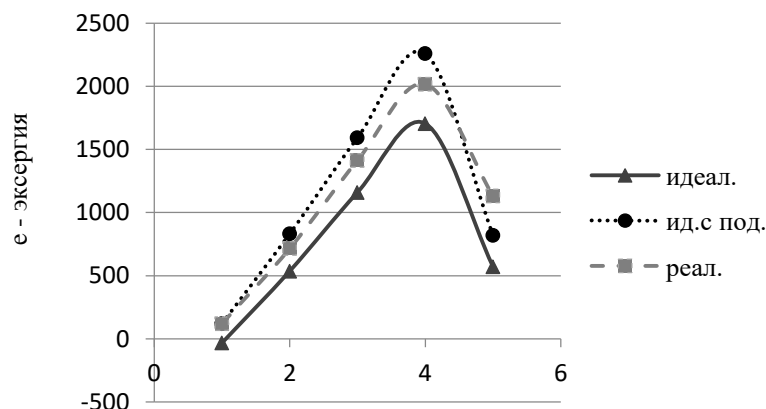


Рис. 4. Изменение эксергии в узловых точках  
 Fig. 4. Exergy variations in nodal points

Процесс изменения работоспособности (эксергии) можно разделить на два этапа:

1) при сжатии и подводе тепла происходит ее накопление для совершения работы, поэтому лучшим является тот цикл, у которого значения эксергии выше;

2) при расширении запас эксергии преобразуется в механическую работу, здесь предпочтительнее является цикл, в котором удастся наиболее полно осуществить этот процесс [9].

Следовательно, показателем наиболее эффективного использования накопленной энергии является положение конечной точки относительно оси ординат (минимальное значение эксергии соответствует наиболее эффективному циклу), расположение конечной точки относительно оси абсцисс свидетельствует о необратимом рассеивании энергии в цикле. Из графиков видно, что максимальные потери происходят в реальном цикле.

Сплошной линией с треугольными маркерами показана зависимость эксергии идеального цикла относительно энтропии (см. рис. 2). Для идеального цикла она сравнивалась с результатами реального цикла (штриховая линия с квадратными

маркерами), однако при этом не учитывалось, что рабочее тело в реальном цикле проходит предварительную подготовку (подогрев воздуха). Пунктирная кривая с круглыми маркерами отображает результаты расчета идеального цикла с учетом подогрева воздуха.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований был сделан анализ существующих подходов к расчету идеального и реального циклов ДВС, в ходе анализа выбран эксергетический метод оценки работоспособности двигателя. Он показал, что полезная работа цикла двигателя В-84 выше по сравнению с идеальным циклом.

На основе тактико-технических характеристик двигателя В-84 получены зависимости эксергии (работоспособности) объекта от уровня рассеяния энергии, энтропии. Получен график изменения эксергии в контрольных точках цикла. Предлагается в дальнейших исследованиях оценить снижение работоспособности объекта в ходе эксплуатации с целью прогноза времени отказа и определения сроков необходимого технического обслуживания.

#### Библиографический список

1. Дорохов А.Ф., Каргин С.А., Попов Н.Ф. Анализ термодинамических процессов в дизельных двигателях // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника

и технология. 2019. № 1. С. 46–52. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2019-1-46-52>  
 2. Розанов М.Н. Двигатели В-84, В-84М. Техническое описание. М.: Воениздат, 1983. 136 с.



3. Латыпов А.Ф. Эксергия потока газа при подводе тепла и диссипации кинетической энергии // Теплофизика и аэромеханика. 2016. № 1. С. 149–151.  
4. Filippov S. New Technological Revolution and Energy Requirements // Foresight and STI Governance. 2018. vol. 12. No. 4. P. 20–33. <https://doi.org/10.17323/2500-2597.2018.4.20.33>  
5. Хлебалин Ю.М. Эксергетический метод оценки эффективности бинарных ПГУ-ТЭЦ // Промышленная энергетика. 2010. № 1. С. 9–11.  
6. Зейнетдинов Р.А. Эксергетический метод анализа выпускных газов ДВС с учетом необратимости термодинамических процессов // Известия Международной академии аграрного образования. 2013. Вып. 16. Т. 4. С. 101–105.  
7. Абрамчук Ф.И., Харченко А.И., Воронков А.И., Никитченко И.Н. Использование эксергетического метода при термодинамическом анализе газовых процессов в тепловых машинах // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2011. № 53. С. 32–44.  
8. Смирнова У.И. Применение разностного метода эксергетического анализа для оценки эффективности работы ТЭЦ на биогазе // Энергосбережение и водоподготовка. 2011. № 6. С. 69–71.  
9. Крохта Г.М. Эксергетический метод и критерии оценки готовности дизельного двигателя к пуску // Вестник Новосибирского государственного аграрного университета. 2012. № 1-2. С. 132–135.  
10. Григорьева О.В., Круглов В.И. Использование структурных параметров при оценке энергетических систем эксергетическим методом // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2008. № 1-2. С. 127–131.  
11. Зейнетдинов Р.А. Использование эксергетиче-

ского метода при термодинамическом анализе неравновесных процессов в поршневых двигателях // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2015. № 40. С. 234–239.  
12. Rakopoulos C.D., Giakoumis E.G. Second-law analyses applied to internal combustion engines operation // Progress in Energy and Combustion Science. 2006. Vol. 32. No. 1. P. 2–47.  
Nomura T., Akiyama T. High-temperature latent heat storage technology to utilize exergy of solar heat and industrial exhaust heat // Green Energy and Technology. 2018. Vol. 7. P. 1207–1224. <https://doi.org/10.1002/er.3611>  
13. Gjennestad M.A., Aursand E., Magnanelli E., Pharoah J. Performance analysis of heat and energy recovery ventilators using exergy analysis and nonequilibrium thermodynamics // Energy and Buildings. 2018. Vol. 170. P. 195–205. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.04.013>  
14. Thyageswaran S. Regeneration in an internal combustion engine: thermal-hydraulic modeling and analysis // Applied Thermal Engineering. 2016. Vol. 93. P. 174–191. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.09.033>  
15. Hosseini S.S., Aghbashlo M., Tabatabaei M., Younesi H., Najafpour G. Exergy analysis of biohydrogen production from various carbon sources via anaerobic photosynthetic bacteria (*rhodospirillum rubrum*) // Energy. 2015. Vol. 93. P. 730–739.  
16. Cheng Qinglin, Gan Yifan, Su Wenkun, Liu Yang, Sun Wei, Xu Ying. Research on exergy flow composition and exergy loss mechanisms for waxy crude oil pipeline transport processes // Energies. 2017. Vol. 10. No. 12. P. 1956. <https://doi.org/10.3390/en10121956>

## References

1. Dorohov AF, Kargin SA, Popov NF. Analysis of thermodynamic processes in diesel engines. *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya* = Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technology. 2019;1:46–52. (In Russ.) <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2019-1-46-52>  
2. Rozanov MN. *Engines V-84, V-84M. Technical specification*. Moscow: Voenizdat; 1983. 136 p. (In Russ.)  
3. Latypov AF. Gas-flow exergy at heat supply and kinetic energy dissipation. *Teplofizika i aeromehanika* = Thermophysics and Aeromechanics. 2016;1:149–151. (In Russ.)  
4. Filippov S. New technological revolution and energy requirements. *Foresight and STI Governance*. 2018; 12(4):20–33. <https://doi.org/10.17323/2500-2597.2018.4.20.33>  
5. Hlebalin YM. Exergy method estimating the efficiency of binary CCP-TPP. *Promyshlennaya energetika*. 2010;1:9–11. (In Russ.)  
6. Zejnetdinov R.A. Exergy analysis of exhaust gas of

combustion engines with consideration of irreversibility of thermogasdynamic processes. *Izvestiya mezhdunarodnoj akademii agrarnogo obrazovaniya* = Bulletin of the International Academy of Agricultural Education. 2013;16(4):101–105.  
7. Abramchuk FI, Harchenko AI, Voronkov AI, Nikitchenko IN. On utilization of exergetic method in thermodynamic analysis of gas processes in heat engines. *Vestnik har'kovskogo nacional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta* = Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University. 2011;53:32–44. (In Russ.)  
8. Smirnova UI. Application of the difference method of exergy analysis for biogas TPP efficiency estimation. *Energoberezhenie i vodopodgotovka* = Energy conservation and water treatment. 2011;6:69–71. (In Russ.)  
9. Krohta GM. Exergy method and assessment criteria for diesel engine readiness to start. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Bulletin of the Novosibirsk State Agrarian University. 2012;1-2:132–135. (In Russ.)  
10. Grigor'eva OV, Kруглов VI. Use of structural param-

eters in evaluation of energy systems by an exergy method. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Problemy energetiki* = Power engineering: research, equipment, technology. 2008;1-2:127–131. (In Russ.)

11. Zejnetdinov RA. Use of an exergetic method in the thermodynamic analysis of the nonequilibrium processes in piston engines. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Proceedings of St. Petersburg State Agrarian University. 2015. 2015;40:234–239. (In Russ.)

12. Rakopoulos CD, Giakoumis EG. Second-law analyses applied to internal combustion engines operation. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2006;32(1):2–47.

Nomura T, Akiyama T. High-temperature latent heat storage technology to utilize exergy of solar heat and industrial exhaust heat. *Green Energy and Technology*. 2018;7:1207–1224. <https://doi.org/10.1002/er.3611>

13. Gjennestad MA, Aursand E, Magnanelli E,

Pharoah J. Performance analysis of heat and energy recovery ventilators using exergy analysis and nonequilibrium thermodynamics. *Energy and Buildings*. 2018;170:195–205.

<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.04.013>

14. Thyageswaran S. Regeneration in an internal combustion engine: thermal-hydraulic modeling and analysis. *Applied Thermal Engineering*. 2016;93:174–191. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.09.033>

15. Hosseini SS, Aghbashlo M, Tabatabaei M, Younesi H, Najafpour G. Exergy analysis of biohydrogen production from various carbon sources via anaerobic photosynthetic bacteria (*Rhodospirillum rubrum*). *Energy*. 2015;93:730–739.

16. Cheng Qinglin, Gan Yifan, Su Wenkun, Liu Yang, Sun Wei, Xu Ying. Research on Exergy Flow Composition and Exergy Loss Mechanisms for Waxy Crude Oil Pipeline Transport Processes. *Energies*. 2017;10(12):1956. <https://doi.org/10.3390/en10121956>

#### **Критерии авторства**

Круглов В.И., Хазетдинова А.Д., Щербаков А.В. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в одинаковой мере несут ответственность за плагиат.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

#### **Authorship criteria**

Kruglov V.I., Khazetdinova A.D., Shcherbakov A.V. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

#### **Conflict of interests**

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

##### **Круглов Вадим Игоревич,**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры теоретических основ теплотехники,  
Казанский государственный энергетический университет,  
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, Россия;  
✉ e-mail: Tot-kgeu@mail.ru

##### **Хазетдинова Аделя Джаилиевна,**

магистрант,  
Казанский государственный энергетический университет,  
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, Россия;  
e-mail: Adelya.khazetdinova@mail.ru

##### **Щербаков Андрей Вячеславович,**

магистрант,  
Казанский государственный энергетический университет,  
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, Россия;  
e-mail: scheba27@gmail.com

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

##### **Vadim I. Kruglov,**

Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor of the Department  
of Theoretical Bases of Heat Engineering,  
Kazan State Power Engineering University,  
51, Krasnoselskaya St., Kazan 420066, Russia;  
✉ e-mail: Tot-kgeu@mail.ru

##### **Adelya D. Khazetdinova,**

Master degree student,  
Kazan State Power Engineering University,  
51, Krasnoselskaya St., Kazan 420066, Russia;  
e-mail: Adelya.khazetdinova@mail.ru

##### **Andrey V. Shcherbakov,**

Master degree student,  
Kazan State Power Engineering University,  
51, Krasnoselskaya St., Kazan 420066, Russia;  
e-mail: scheba27@gmail.com



## Построение стохастической модели бытовой нагрузки на примере водонагревателя

© Б.Ф. Кузнецов, Ю.Ю. Клибанова, С.В. Сукьясов, В.В. Луговнина

Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского,  
Иркутская обл., п. Молодежный, Россия

**Резюме:** Цель – представить разработанную модель, реализованную в среде программы Mathcad, которая позволяет генерировать поток событий, имитирующий работу реального водонагревателя. Проведен анализ характеристик режимов работы нагрузки энергосистемы, моделируемой случайными величинами и процессами. Для получения вероятностно-статистической модели потребления электрической энергии отдельной нагрузки проведено экспериментальное исследование работы бытового водонагревателя мощностью 2 кВт. Данные режимов работы водонагревателя получены разработанным устройством для измерения и фиксации потребляемой мощности однофазной электрической нагрузки до 5 кВт. Используемое устройство реализовано на основе микроконтроллера ATmega328 и позволяет измерять и записывать полученные значения на SD-карту. Функциональная схема данного устройства рассмотрена в работе. В результате проведенного экспериментального исследования длительностью 30 дней получена числовая последовательность событий, которая послужила основой для построения модели. Статистический анализ дает основание полагать, что законы распределения вероятностей последовательности длительности включенного состояния и пауз могут быть отнесены к экспоненциальному распределению. Исходя из этой предпосылки, создана модель, реализованная в среде программы Mathcad. На основе двух сгенерированных последовательностей, имеющих экспоненциальное распределение с заданными параметрами, генерируется поток событий, моделирующий работу водонагревателя. В заключении работы дается уточнение относительно длительности интервалов моделирования. В частности, при интервалах моделирования от 24 ч и более модель позволяет получить достоверные результаты, но при моделировании малых интервалов (от 20 ч и менее) необходимо учитывать изменение режима работы водонагревателя в зависимости от времени суток. В качестве примера приведены оценки параметров экспоненциального распределения для дневного и ночного режимов работы водонагревателя.

**Ключевые слова:** стохастическая модель, моделирование энергопотребления, измерение потребляемой мощности, режим работы водонагревателя

**Информация о статье:** Дата поступления 19 мая 2019 г.; дата принятия к печати 27 июля 2019 г.; дата онлайн-размещения 31 октября 2019 г.

**Для цитирования:** Кузнецов Б.Ф., Клибанова Ю.Ю., Сукьясов С.В., Луговнина В.В. Построение стохастической модели бытовой нагрузки на примере водонагревателя. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т. 23. № 5. С. 958–966. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-958-966>

## Building a stochastic model of residential load on example of a water heater

Boris F. Kuznetsov, Yulia Yu. Klibanova, Sergey V. Sukyasov, Viktoria V. Lugovnina

Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky, Irkutsk region, Molodezhny settlement, Russia

**Abstract:** The purpose of the article is to present the developed model implemented in the Mathcad environment enabling to generate a stream of events simulating the operation of a real water heater. The characteristics of the operation modes of power system loads modeled by random variables and processes are analyzed. An experimental study of the operation of a 2 kW domestic water heater is carried out to obtain a probabilistic and statistical model of consumption of a separate load electric energy. The data of water heater operation modes are obtained by the device developed for measuring and recording of the intake power of a single-phase electric load up to 5 kW. The device used is implemented on the basis of the ATmega328 microcontroller and allows to measure and record the obtained values on a SD-card. The functional diagram of the developed device is described in the article. The experimental study lasting 30 days has resulted in obtaining a numerical sequence of events, which served the basis for model construction. Statistical analysis suggests that the distribution laws of sequence probabilities of on-duty state and pauses duration can be attributed to the

exponential distribution. Based on this premise, a model implemented in Mathcad environment was created. On the basis of two generated sequences with exponential distribution with the specified parameters the event flow simulating water heater operation is generated. Finally, the paper refines the duration of modeling intervals. In particular, if modeling intervals are 24 hours and more, the model provides reliable results. However, modeling of small intervals (20 hours and less) requires to take into account the change in the heater operation mode depending on the time of day. As an example the estimates of the exponential distribution of parameters for day and night operation modes of the water heater are given.

**Keywords:** stochastic model, energy consumption modeling, intake power measurement, water heater operation mode

**Information about the article:** Received May 19, 2019; accepted for publication July 27, 2019; available online October 31, 2019.

**For citation:** Kuznetsov BF, Klibanova YuYu, Sukyasov SV, Lugovnina VV. Building a stochastic model of residential load on example of a water heater. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2019;23(5):958–966. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-958-966>

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В современном технологическом обществе с каждым днем растет потребление электроэнергии. При этом большой интерес представляет эффективность ее использования в быту и на производстве. Конкретное и детальное рассмотрение параметров потребления электрической энергии позволяет получить полную информацию об эффективности и рациональности ее использования. Развернутый анализ по потребителям позволяет более точно выявлять места потерь или нерационального расхода электроэнергии. Предшественниками в данной области исследований накоплено огромное количество теоретического и экспериментального материалов. Особое внимание уделяется сложной, но очень важной задаче вероятностного прогноза электрической нагрузки [1]. Метод математического моделирования, построенный на вероятностном подходе, используется во многих исследованиях надежности и эффективности функционирования различных энергосистем [2, 3].

Кроме того, вероятностные характеристики различных элементов электрических систем, описывающие процессы электропотребления на больших интервалах времени, могут быть использованы для прогноза режимов в задачах управления [4, 5]. С т.зр. прогнозирования, большой интерес вызывает коммунальная (бытовая) нагрузка [6]. Анализ статистических характеристик этой нагрузки способствует образованию моделей, позволяющих оценивать режимы работы распределительных сетей

населенных пунктов. С т.зр. развития применения альтернативных источников энергии, большой интерес вызывают работы, связанные со статистическим анализом и моделированием систем «генератор – накопитель – потребитель».

Следует отметить, что в работе [7] достаточно подробно рассматривается вопрос оценки спектральных мер случайных процессов, соответствующих потреблению электроэнергии. Развитие данного направления сопряжено с решением задач моделирования случайных процессов с заданными вероятностными и спектральными мерами, основная проблематика этого направления моделирования изложена, например, в работе [8]. Реализация имитационных моделей этого класса требует привлечения специальных методов, что сопряжено с рядом проблем.

Основные данные о режимах потребления в энергосистемах получают посредством специализированных измерительных устройств – счетчиков потребления электроэнергии, массовые модели которых не всегда обладают достаточной точностью, разрешающей способностью производить запись измеренных значений с заданной дискретностью по времени. Использование микропроцессорных и вычислительных устройств позволяет совместить измерения с процедурой обработки их результатов, автоматизировать их проведение, что, в свою очередь, дает возможность создать приборы достаточно надежные, адаптированные к электронно-вычислительной технике и простые в эксплуатации.

В настоящей статье (с помощью ве-

роятностно-статистической модели характеристик режимов работы нагрузки энергосистемы) анализируются данные потребляемой мощности бытового водонагревателя. Данные измерений получены с помощью разработанного устройства, которое укомплектовано различными датчиками и другим дополнительным оборудованием.

Одной из современных программ для математического моделирования и анализа является программа MathCAD, она позволяет моделировать сложные объекты, характеризующиеся различными вероятностными метриками<sup>1</sup> [9].

## 2. УСТРОЙСТВО ИЗМЕРЕНИЯ И ЗАПИСИ ПОТРЕБЛЯЕМОЙ МОЩНОСТИ

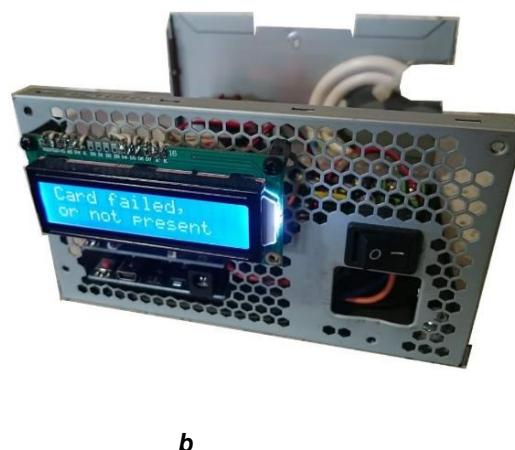
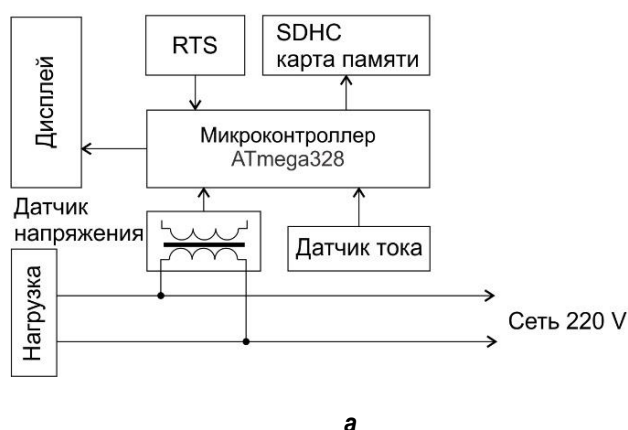
В настоящее время для измерения электроэнергии существует достаточно большой выбор специализированных решений, описанных, например, в работах [10, 11]. Но авторами было решено воспользоваться концепцией построения измерителя, изложенной в работе [12]. Для проведения экспериментальных исследований был разработан и собран измерительный прибор на микроконтроллере ATmega328 (рис. 1). Прибор состоит из двух измерительных каналов: измерения тока (применен датчик Холла) и напряжения. В состав прибора также входят часы реаль-

ного времени (RTS - Real Time Clock, см. рис. 1) для датирования измеренных значений.

Для сохранения измеренных данных применена SD-карта (см. рис. 1), прибор включается между сетью и исследуемой нагрузкой, дискретность измерений 1 мин. Для отображения состояния прибора и хода измерений применен дисплей. Потребляемая нагрузкой полная мощность вычисляется и записывается на SD-карту. К метрологическим параметрам измерительного прибора требований не предъявлялось, т.к. на первом этапе исследований планировались объекты с фиксированной мощностью потребления (водонагреватели, насосы водоснабжения, электрические котлы обогрева и т.д.).

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ, ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА И СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

В качестве объекта исследований был выбран бытовой водонагреватель объемом 80 л и потребляемой мощностью 2 кВт. Водонагреватель расположен в загородном доме, в котором постоянно проживают два человека. Длительность наблюдения составила 30 дней. Значения, записанные измерительным прибором, были



**Рис. 1. Функциональная схема (а) и внешний вид (б) разработанного измерительного прибора**  
**Fig. 1. Functional diagram (a) and external view (b) of the developed measuring device**

<sup>1</sup>Кузнецов Б.Ф., Бородин Д.К., Шишкина С.В. Использование системы MathCAD в статистических исследованиях: учеб. пособ. Изд-во: АНГТУ, 2013. 74 с.



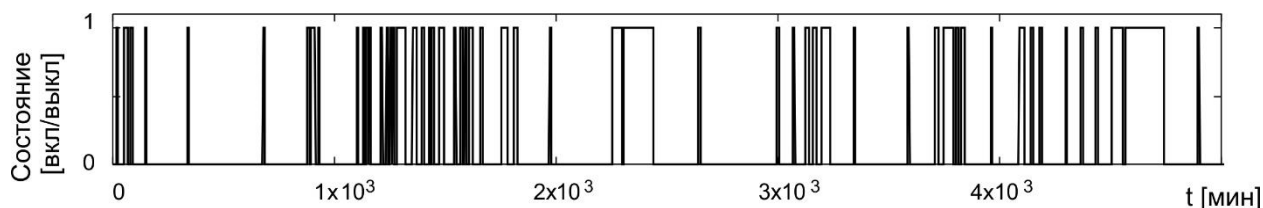


Рис. 2. Исходный нормированный поток событий  
Fig. 2. Initial normalized flow of events

нормированы в диапазоне от 0 до 1, здесь 0 соответствует выключенному состоянию нагревателя, 1 – включенному состоянию (рис. 2). Полученные таким образом данные можно интерпретировать как поток событий разной длительности и с различными интервалами. Длительность событий и интервалов между событиями являются случайными величинами [13].

Объектом анализа в полученном потоке событий являются длительности включенного и выключенного состояний нагревателя. С помощью несложного программного кода преобразуем поток событий в две числовые последовательности

(рис. 3): последовательность длительности событий (состояние включено, далее вектор  $T1$ ) и последовательность длительности пауз (состояние выключено, далее вектор  $T0$ ).

Коэффициент корреляции между векторами  $T1$  и  $T0$  равен  $\rho = 0,123$ , что говорит об отсутствии статистической связи между ними. Результаты расчета оценок автокорреляционной функции для обеих последовательностей приведены на рис. 4. Как видно из приведенного рисунка, обе последовательности можно считать случайными типа процесса «белый шум».

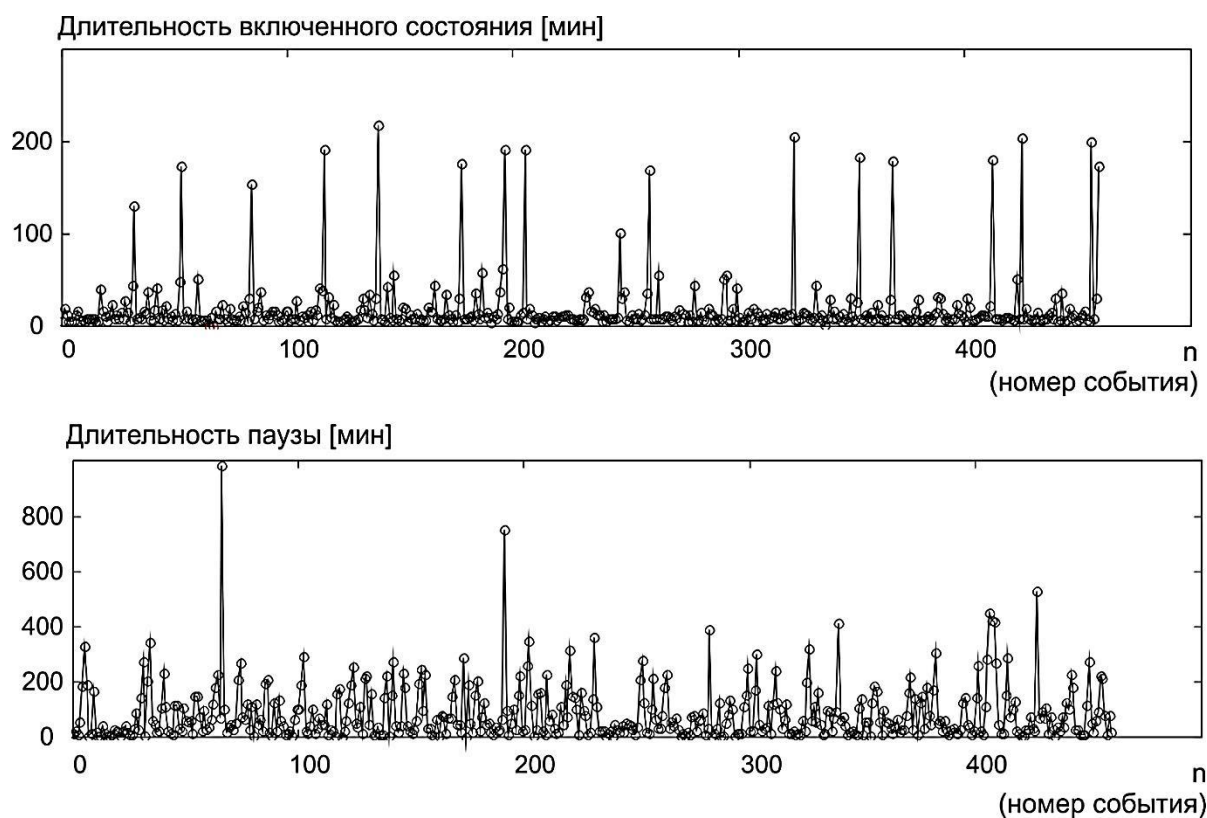


Рис. 3. Графики последовательностей длительности работы (верхний график) и длительности пауз (нижний график)  
Fig. 3. Graphs of sequences of operation duration (upper graph) and pause duration (lower graph)

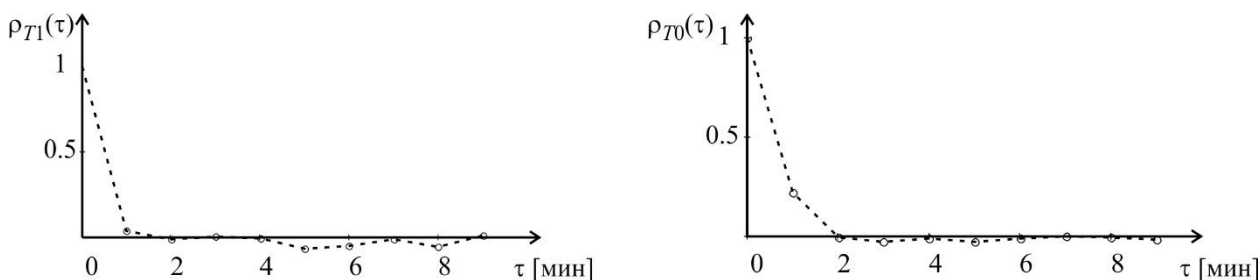


Рис. 4. Графики оценок автокорреляционных функций для последовательности T1 и T0

Fig. 4. Graphs of autocorrelation function estimates for the sequence T1 and T0

На рис. 5 приведены эмпирические функции распределения для случайных последовательностей T1 и T0, по внешнему виду которых можно предположить, что они принадлежат к экспоненциальному закону распределения. Оценка параметра экспоненциального распределения определяется как  $\hat{\lambda} = 1/\hat{\mu}$ , где  $\hat{\mu}$  – оценка среднего значения для анализируемых последовательностей. Сплошными линиями на рис. 5 показаны теоретические экспоненциальные функции плотности вероятности при рассчитанных значениях параметра распределения.

Проведенный анализ по критерию согласия  $\chi^2$  показывает, что нет оснований отвергнуть гипотезу о принадлежности к экспоненциальному распределению.

#### 4. ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЯ

Рассмотрим построение имитационной модели водонагревателя на основе

вычисленных характеристик в среде программы Matcad. На первом шаге моделирования задается общее количество событий (рис. 6). Исходными последовательностями для моделирования являются равномерно распределенные на интервале  $[0,1]$  случайные последовательности  $\zeta_1$  и  $\zeta_0$ , генерируемые на 2-м шаге моделирования. Проверка на статистическую взаимосвязь (шаг 3 на рис. 6) является необязательной, но несмотря на многочисленные положительные тестирования датчика случайных чисел системы Mathcad [14], такая проверка дает уверенность в достоверности получаемых результатов [15].

На четвертом шаге определяются параметры распределения, и далее выполняется нелинейное преобразование (шаг номер 5 на рис. 6) равномерно распределенных случайных последовательностей  $\zeta_1$  и  $\zeta_0$  для формирования последовательностей  $\xi_1$  и  $\xi_0$  с экспоненциальным распределением [16]. Следующим этапом (шаг 6 на рис. 6) является проверка оценок

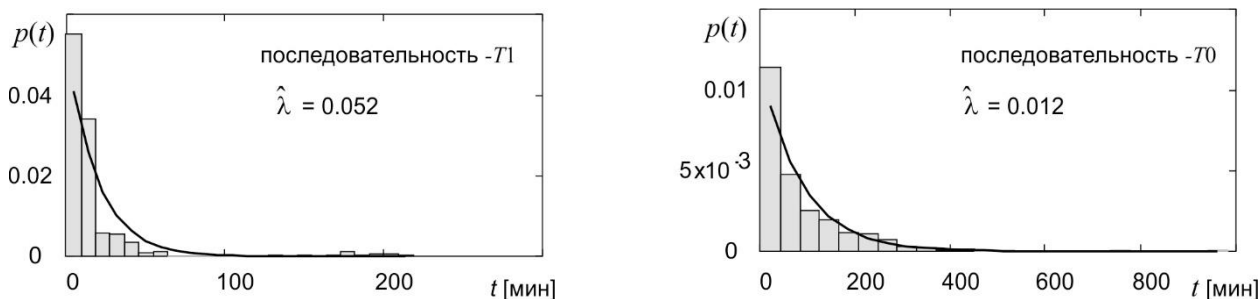


Рис. 5. Графики эмпирических и предполагаемых теоретических функций распределения вероятностей для последовательности T1 и T0

Fig. 5. Graphs of empirical and hypothetical theoretical probability distribution functions for the sequence T1 and T0

1	$m := 100$ $i := 0..m-1$ количество событий
2	$\zeta_1 := \text{runif}(m, 0, 1)$ $\zeta_0 := \text{runif}(m, 0, 1)$ векторы с равномерным распределением в интервале $[0, 1]$
3	$\text{corr}(\zeta_1, \zeta_0) = -8.424 \times 10^{-3}$ проверка на статистическую независимость
4	$\lambda_1 := 0.052$ $\lambda_0 := 0.012$ параметры экспоненциальных распределений
5	$\xi_1 := -\frac{1}{\lambda_1} \cdot \ln(\zeta_1)$ $\xi_0 := -\frac{1}{\lambda_0} \cdot \ln(\zeta_0)$ преобразование в экспоненциальное распределение
6	$\text{mean}(\xi_1) = 20.217$ $\frac{1}{\lambda_1} = 19.231$ $\text{mean}(\xi_0) = 88.862$ $\frac{1}{\lambda_0} = 83.333$ оценки параметров сгенерированных случайных последовательностей
7	$\xi_1 := \text{ceil}(\xi_1)$ $\xi_0 := \text{ceil}(\xi_0)$ округление до целого (дискретность моделирования 1 мин)
8	$\text{lenght} := \sum_i \xi_{1i} + \sum_i \xi_{0i}$ $\text{lenght} = 1.1 \times 10^4$ расчет длины результирующего вектора
9	$P\_WH := \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..m-1 \\ \quad \begin{array}{l} \text{for } l_1 \in 0..\xi_{1k}-1 \\ \quad \begin{array}{l} t \leftarrow t+1 \\ D_t \leftarrow 1 \end{array} \\ \quad \text{for } l_0 \in 0..\xi_{0k}-1 \\ \quad \quad \begin{array}{l} t \leftarrow t+1 \\ D_t \leftarrow 0 \end{array} \end{array} \\ D \end{array}$ <div style="text-align: right;">цикл заполнения результирующего вектора нормированными значениями</div>

Рис. 6. Модель водонагревателя  
Fig. 6. Water heater model

параметров сформированных случайных последовательностей и сравнение их с заданными. Значительные отклонения оценок от заданных параметров распределения объясняются малым объемом выборки, в данном случае всего 100 элементов. Из-за того, что исходные данные представлены измерениями с дискретизацией по времени в 1 мин, то и модель должна воспроизводить процесс с той же дискретностью, следовательно, элементы последовательно-

стей  $\xi_1$  и  $\xi_0$  должны быть целыми числами. На шаге 7 производится округление элементов последовательностей до ближайшего целого числа. После расчета размера результирующего вектора (шаг 8) в цикле производится заполнение выходной последовательности нормированными значениями (1/0 – включено / выключено).

Частный результат моделирования (поток событий) приведен на рис. 7.

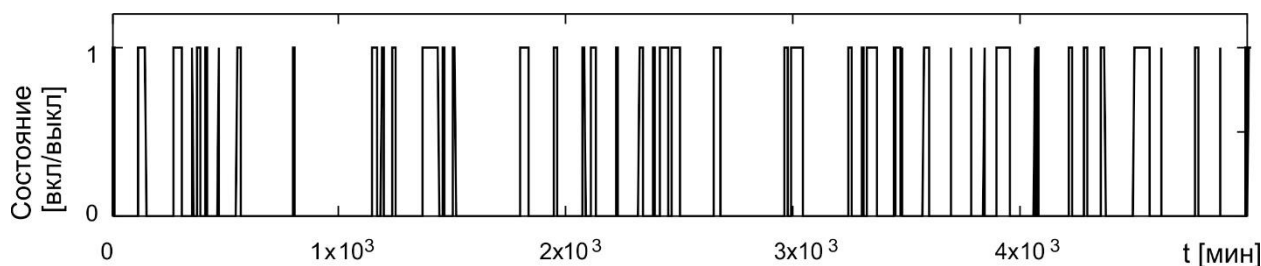


Рис. 7. Смоделированный поток событий  
Fig. 7. Simulated stream of events

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная модель позволяет генерировать поток событий, имитирующий работу реального водонагревателя; в совокупности с моделями других потребителей электроэнергии может быть получена общая схема потребления дома и далее масштабирована на план потребления отдельной улицы или поселка. Однако следует отметить, что схема в представленном (в данной работе) виде имеет одно существенное допущение: в ней не учтено изменение характера потока событий от времени суток. Если интерес представляют некоторые усредненные результаты моделирования на интервале более 24 ч, то допущенное упрощение не будет влиять на точность моделирования, при котором на

интервалах времени (составляющих единицы часов) изменение характера нагрузки необходимо учитывать. Проведенный анализ для разделенной исходной последовательности событий на дневную и ночную части показал следующие результаты: расчет статистик критерия согласия  $\chi^2$  также позволяет не отвергать гипотезу о принадлежности законов распределения анализируемых последовательностей к экспоненциальному закону; для дневной поочередности событий получены следующие оценки параметра распределения:  $\hat{\lambda}_1 = 0.055$  и  $\hat{\lambda}_0 = 0.016$ , соответственно, длительности интервалов работы и паузы. Для ночной последовательности событий аналогичные параметры получили следующие оценки распределения:  $\hat{\lambda}_1 = 0.031$  и  $\hat{\lambda}_0 = 0.009$ .

## Библиографический список

1. Hong Tau, Fan Shu. Probabilistic electric load forecasting: A tutorial review // International Journal of Forecasting. 2016. Vol. 32. Issue 3. P. 914–938.
2. Grandjean A., Adnot J., Binet G. A review and an analysis of the residential electric load curve models // Renewable and Sustainable energy reviews. 2012. Vol. 16. Issue 9. P. 6539–6565.
3. Кобелев А.В., Кочергин С.В., Кагдин А.Н. Вопросы анализа и моделирования развития электроэнергетических систем // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2014. № S(52). С. 83–86.
4. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Ле Конг Зань. Математические модели узлов нагрузки электроэнергетических систем, построенные на основе фазных координат. Иркутск: ИрГУПС, 2013. 176 с.
5. Фокин Ю.А., Пономаренко И.С., Павликов В.С. Экспериментальное исследование вероятностно-статистических характеристик нагрузок в электропитающей системе // Электричество. 1983. № 9. С. 9–15.
6. Heunis S.W., Herman R. A probabilistic model for residential consumer loads // IEEE Transactions on Power Systems. 2002. Vol. 17. No. 3. P. 621–625.
7. Доброго К.В. Модель электрической нагрузки жилищно-коммунального объекта для исследования систем «генератор-накопитель-потребитель» методом Монте-Карло // Наука и техника. 2017. Т. 16. № 2. С. 160–170. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-2-160-170>
8. Пригарин С.М. Методы численного моделирования случайных процессов и полей. Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, 2005. 259 с.
9. Jaffe R.C. Random Signals for Engineers Using MATLAB and Mathcad. Netherlands: Springer Science & Business Media, 2000. 374 p.
10. Orsi E., Nesmachnow S. Smart home energy planning using IoT and the cloud // IEEE URUCON. IEEE. 2017. P. 1–4.
11. Shi Biao, Lin Xiao-Kang, Zhang Sheng. Design of Intelligent Meter Reading System in Green Sensor Network // Electrical Measurement & Instrumentation.

2011. Vol. 8. [Электронный ресурс]. URL: [http://en.cnki.com.cn/Article\\_en/CJFDTotale-DCYQ201108003.htm](http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTotale-DCYQ201108003.htm) (17.10.2018).  
12. Madalamootoo L., Shamachurn H. Experimental Performance Assessment of a low-cost single-phase Arduino-based Power Meter // ADBU Journal of Engineering Technology (AJET). 2018. Vol. 7. Issue 1. P. 1–7.  
13. Кузнецов Б.Ф. Стохастические модели и методы анализа информационно-измерительных систем АСУ ТП. Ангарск: АНГТУ, 2007. 180 с.  
14. Дубницкий В.Ю., Проценко А.Г. Сравнительный анализ датчиков случайных чисел систем Stat-

graphics и Mathcad // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. 2009. № 7. С. 85–88.  
15. Кузнецов Б.Ф. Исследование алгоритмических первичных датчиков случайных чисел. М., 2003. Деп. в ВИНТИ 17.12.2003. № 2191 – В2003.  
16. Saucier R. Computer generation of statistical distributions // Army research lab Aberdeen proving ground MD. 2000. No. ARL-TR-2168. P. 115. [Электронный ресурс]. URL: [https://pdfs.semanticscholar.org/bbe3/732917ee9d0f5af8a621025ce83cc2c4388c.pdf?\\_ga=2.113113603.64923162.1570516160-1184340112.1570516160](https://pdfs.semanticscholar.org/bbe3/732917ee9d0f5af8a621025ce83cc2c4388c.pdf?_ga=2.113113603.64923162.1570516160-1184340112.1570516160). (15.07.2018). <https://doi.org/10.21236/ada374109>

## References

1. Hong Tau, Fan Shu. Probabilistic electric load forecasting: A tutorial review. *International Journal of Forecasting*. 2016;32(3):914–938.  
2. Grandjean A, Adnot J, Binet G. A review and an analysis of the residential electric load curve models. *Renewable and Sustainable energy reviews*. 2012;16(9):6539–6565.  
3. Kobelev AV, Kochergin SV, Kagdin AN. Questions of Analysis and Modeling of Development of Electrical Power Systems. *Voprosy sovremennoj nauki i praktiki Universitet im VI Vernadskogo* = Issues of modern science and practice. University named after V.I. Vernadsky. 2014;S(52):83–86. (In Russ.)  
4. Zakaryukin VP, Kryukov AV, Le Kong Zan'. *Mathematical models of electric power system load units based on phase coordinates*. Irkutsk: Irkutsk State Transport University; 2013. 176 p. (In Russ.)  
5. Fokin YuA, Ponomarenko IS, Pavlikov VS. Experimental study of probabilistic and statistical characteristics of loads in the power supply system. *Elektrichestvo* = Electricity. 1983;9:9–15. (In Russ.)  
6. Heunis SW, Herman RA. Probabilistic model for residential consumer loads. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2002;17(3):621–625.  
7. Dobrego KV. Model for Electric Load of Community Housing Projects to Investigate “Generator – Accumulator – Consumer” System while Using Monte-Carlo Method. *Nauka i tehnika* = Science and Technology. 2017;16(2):160–170. (In Russ.) <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-2-160-170>  
8. Prigarin SM. *Methods of numerical modeling of random processes and fields* Novosibirsk: Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2005. 259 p. (In Russ.)

9. Jaffe RC. Random Signals for Engineers Using MATLAB and Mathcad. Netherlands: Springer Science & Business Media; 2000. 374 p. (In Russ.)  
10. Orsi E, Nesmachnow S. Smart home energy planning using IoT and the cloud. *IEEE URUCON. IEEE*. 2017:1–4.  
11. Shi Biao, Lin Xiao-Kang, Zhang Sheng the Design of Intelligent Meter Reading System in Green Sensor Network [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*. 2011;8.  
12. Madalamootoo L, Shamachurn H. Experimental Performance Assessment of a low-cost single-phase Arduino-based Power Meter. *ADBU Journal of Engineering Technology (AJET)*. 2018;7(1):1–7.  
13. Kuznecov BF. *Stochastic models and analysis methods of information and measurement systems of automated process control systems*. Angarsk: Angarsk State Technical University; 2007. 180 p. (In Russ.)  
14. Dubnickij VYu, Procenko AG. Comparative analysis of random number sensors of Statgraphics and Mathcad systems. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи* = Radio electronics and computer systems. 2009;7:85–88.  
15. Kuznecov BF. *Study of algorithmic primary sensors of random numbers*. Moscow, 2003. Deposited All-Russian Institute of scientific and technical information of the Russian Academy of Sciences 17.12.2003. No. 2191 – V2003.  
16. Saucier R. Computer generation of statistical distributions. *Army research lab Aberdeen proving ground MD*. 2000. No. ARL-TR-2168. P. 115. Available from: [https://pdfs.semanticscholar.org/bbe3/732917ee9d0f5af8a621025ce83cc2c4388c.pdf?\\_ga=2.113113603.64923162.1570516160-1184340112.1570516160](https://pdfs.semanticscholar.org/bbe3/732917ee9d0f5af8a621025ce83cc2c4388c.pdf?_ga=2.113113603.64923162.1570516160-1184340112.1570516160). [Accessed 15th July 2018]. <https://doi.org/10.21236/ada374109>

## Критерии авторства

Кузнецов Б.Ф., Клибанова Ю.Ю., Сукиясов С.В., Луговнина В.В. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в одинаковой мере несут ответственность за плагиат.

## Authorship criteria

Kuznetsov B.F., Klibanova Yu.Yu., Sukyasov S.V., Lugovnina V.V. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.



### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

### Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

#### Кузнецов Борис Федорович,

доктор технических наук,  
профессор кафедры электрооборудования  
и физики,  
Иркутский государственный аграрный  
университет имени А.А. Ежевского,  
664038, Иркутская обл.,  
п. Молодежный, 1/А, Россия;  
✉ e-mail: kuznetsovbfb@gmail.com

#### Клибанова Юлия Юрьевна,

кандидат физико-математических наук,  
доцент кафедры электрооборудования и физики,  
Иркутский государственный  
аграрный университет имени А.А. Ежевского,  
664038, Иркутская обл.,  
п. Молодежный, 1/А, Россия;  
e-mail: malozemova81@mail.ru

#### Сукьясов Сергей Владимирович,

кандидат технических наук,  
доцент кафедры электрооборудования и физики,  
Иркутский государственный аграрный  
университет имени А.А. Ежевского,  
664038, Иркутская обл.,  
п. Молодежный, 1/А, Россия;  
e-mail: sukyasov@mail.ru

#### Луговнина Виктория Владимировна,

старший преподаватель кафедры  
менеджмента, предпринимательства  
и экономической безопасности в АПК,  
Иркутский государственный аграрный  
университет имени А.А. Ежевского,  
664038, Иркутская обл.,  
п. Молодежный, 1/А, Россия;  
e-mail: v.lugovnina@mail.ru

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

#### Boris F. Kuznetsov,

Dr. Sci. (Eng.),  
Professor of the Department of Electrical  
Equipment and Physics,  
Irkutsk State Agrarian University named  
after A.A. Ezhevsky,  
1/A Molodezhny settlement,  
Irkutsk region 664038, Russia;  
✉ e-mail: kuznetsovbfb@gmail.com

#### Yulia Yu. Klibanova,

Cand. Sci. (Physics and Mathematics),  
Associate Professor of the Department  
of Electrical Equipment and Physics,  
Irkutsk State Agrarian University named  
after A.A. Ezhevsky,  
1/A Molodezhny settlement,  
Irkutsk region 664038, Russia;  
e-mail: malozemova81@mail.ru

#### Sergey V. Sukyasov,

Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor of the Department  
of Electrical Equipment and Physics,  
Irkutsk State Agrarian University named  
after A.A. Ezhevsky,  
1/A Molodezhny settlement,  
Irkutsk region 664038, Russia;  
e-mail: sukyasov@mail.ru

#### Viktoria V. Lugovnina,

Senior Lecturer of the Department of Management,  
Entrepreneurship and Economic Security in Agriculture,  
Irkutsk State Agrarian University named  
after A.A. Ezhevsky,  
1/A Molodezhny settlement,  
Irkutsk region 664038, Russia;  
e-mail: v.lugovnina@mail.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.311.1.003.13

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-967-977>

## Оценка существующего энергетического потенциала регионов России

© В.В. Труфанов, П.С. Драчев

*Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения  
Российской академии наук, г. Иркутск, Россия*

**Резюме:** Цель – представить анализ существующего состояния Единой энергетической системы России для выявления дефицитных, избыточных и «узких мест» по мощности региональных энергосистем, приоритетных мест роста потребления электроэнергии и определения технического потенциала электрической сети по передаче электроэнергии. Для данного анализа сформулированы оптимизационные модели на максимум избытка мощностей в целом по Единой энергосистеме России и для отдельных регионов страны при существующей структуре генерирующих мощностей и межрегиональной электрической сети. Проведены расчеты для условий, соответствующих отчетным показателям Единой энергосистемы России в 2016 г. Выявлено, что Межрегиональная электрическая сеть Единой энергосистемы России вполне обеспечивает покрытие потребностей в мощности всех энергосистем страны и почти везде имеет значительные свободные пропускные способности линий электропередач.

**Ключевые слова:** Единая энергосистема России, регион, генерация, электрическая сеть, анализ, модель

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках Программы Сибирского отделения РАН III.17.4 «Методология обоснования развития интеллектуальных энергетических систем и управления ими».

**Информация о статье:** Дата поступления 07 июня 2019 г.; дата принятия к печати 19 августа 2019 г.; дата онлайн-размещения 31 октября 2019 г.

**Для цитирования:** Труфанов В.В., Драчев П.С. Оценка существующего энергетического потенциала регионов России. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т. 23. № 5. С. 967–977. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-967-977>

## Assessment of current energy potential of regions of Russia

Viktor V. Trufanov, Pavel S. Drachev

*Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia*

**Abstract:** The purpose of the paper is to analyze the current state of the Unified Energy system of Russia in order to identify the deficits, surpluses and bottlenecks in the capacity of regional power systems as well as priority places of electricity consumption growth; to determine the technological capacity of an electric network in electrical energy transmission. To perform this analysis the authors formulate optimization models for the maximum surplus power in the Unified energy system of Russia as a whole and for individual regions of the country for the existing structure of generating capacities and the interregional electric network. Calculations are made for the conditions relevant to the key indicators of the Unified Energy System of Russia in 2016. It has been found out that the interregional electric network of the Unified Energy System of Russia successfully meets the power demands of all electric power systems of the country and almost everywhere has significant free transmission capacities of power lines.

**Keywords:** Unified Energy System of Russia, region, generation, electric network, analysis, model

**Acknowledgments:** The work is carried out within the framework of the program of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences III.17.4 Substantiation methodology for intelligent energy system development and management.

**Information about the article:** Received June 07, 2019; accepted for publication August 19, 2019; available online October 31, 2019.

**For citation:** Trufanov VV, Drachev PS. Assessment of current energy potential of regions of Russia. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2019;23(5):967–977. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-967-977>



## 1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных этапов при формировании стратегий развития электроэнергетических систем [1–3] является анализ их существующего состояния. В процессе этого анализа требуется определить «узкие места» в системе, дефицитные и избыточные энергосистемы, технический потенциал электрической сети по передаче электроэнергии, возможные места роста потребления электроэнергии и др. [4–7]. Результаты этого анализа используются для формирования альтернативных вариантов уровней и территориального распределения потребления электроэнергии, сооружения электростанций и развития электрической сети. Эта информация нужна и для оценки уровня энергетической безопасности регионов страны [8].

Важность количественного анализа потенциала существующей электроэнергетики России в настоящее время определяется и сложившейся ситуацией – наличием существенных избытков генерирующих мощностей в стране.

Оценка технологического потенциала существующей электрической сети определяется возможностями передачи электроэнергии для покрытия дополнительной потребности в электроэнергии в узлах сети, потенциал генерирующих мощностей определяется соотношением потребности в мощности и величиной располагаемых мощностей электростанций в регионах страны.

Рассмотрим задачу определения максимально возможного потребления электроэнергии в энергосистемах страны в целом без развития сети и генерирующих мощностей (задача 1).

Формулировка задачи: требуется определить максимальный суммарный избыток мощности (или максимальную генерацию) в системе

$$\max \sum_i (g_i - s_i), \quad (1)$$

где  $g_i$  – покрытие нагрузки в узле  $i$ .

$$g_i = p_i + \sum_k t_{ki}(1 - d_{ki}) - \sum_k t_{ki}, i \in I. \quad (2)$$

При обеспечении потребности в электроэнергии всех узлов

$$g_i \geq s_i, i \in I. \quad (3)$$

При заданной максимальной генерации в узлах

$$0 \leq p_i \leq P_i, i \in I \quad (4)$$

и ограничениях перетоков мощности

$$0 \leq t_{ik} \leq T_{ik}, ik \in J. \quad (5)$$

Здесь оптимизируемые переменные  $p_i$ ,  $g_i$ ,  $t_{ik}$  (нагрузка электростанций, покрытие нагрузки и переток мощности из узла  $i$  в узел  $k$ ) неотрицательные.

Заданы:  $s_i$  – существующее потребление в узлах;  $P_i$  – предельная нагрузка действующих электростанций в узлах;  $T_{ik}$  – пропускные способности существующих линий электропередачи (ЛЭП);  $d_{ik}$  – удельные потери электроэнергии при передаче из узла  $i$  в узел  $k$ .

Полученные значения избытков мощности определяют места возможного роста нагрузки потребителей в системе без усиления сети и вводов электростанций. ЛЭП, в которых перетоки мощности оказались на пределе пропускной способности, образуют множество загруженных сетевых элементов – возможных претендентов на развитие.

В нормальных (бездефицитных) условиях максимум суммарного избытка мощности будет достигаться при минимуме потерь в сети, т.е. эти критерии идентичны.

Близкие по формулировкам математические модели используются для минимизации дефицитов мощности в процессе анализа балансовой надежности энергосистем [9–16].

Критерий оптимизации (1) в рассматриваемой модели предполагает одинаковую значимость возможного роста



нагрузки во всех узлах системы. При необходимости выделения отдельных регионов в силу их особой важности (например, регионы Дальнего Востока) в критерий (1) можно ввести соответствующие весовые коэффициенты.

Наряду с этой задачей (размещения новых потребителей с целью максимального увеличения суммарного потребления в системе с учетом возможностей существующей генерации и электрической сети при минимальном энергетическом строительстве) возможна и другая постановка. А именно: требуется максимально увеличить потребление в отдельно взятом узле системы с учетом возможностей сети, при этом потери в сети будут, разумеется, больше, чем при решении первой задачи. Формулировка этой задачи: определить максимум избытка мощности в отдельном  $i$ -м узле (задача 2):

$$\max(g_i - s_i) \quad (6)$$

при ограничениях (1)–(4). Эта задача решается для всех узлов расчетной схемы энергосистемы.

## 2. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Указанные выше постановки задач использованы для соответствующего анализа Единой электроэнергетической системы (ЕЭС) России. Для проведения расчетов составлена расчетная схема ЕЭС (рис. 1).

Схема включает в себя 71 узел (каждый из которых соответствует энергосистеме субъекта Российской Федерации) и связывающие их межсистемные (межрегиональные) линии электропередач (напряжением 220 кВ и выше). Рассматривалось состояние ЕЭС на 2016 г. Вследствие малых темпов роста электропотребления за период 2017–2019 гг. существенных изменений в структуре генерирующих мощностей и межсистемных электрических сетей не произошло.

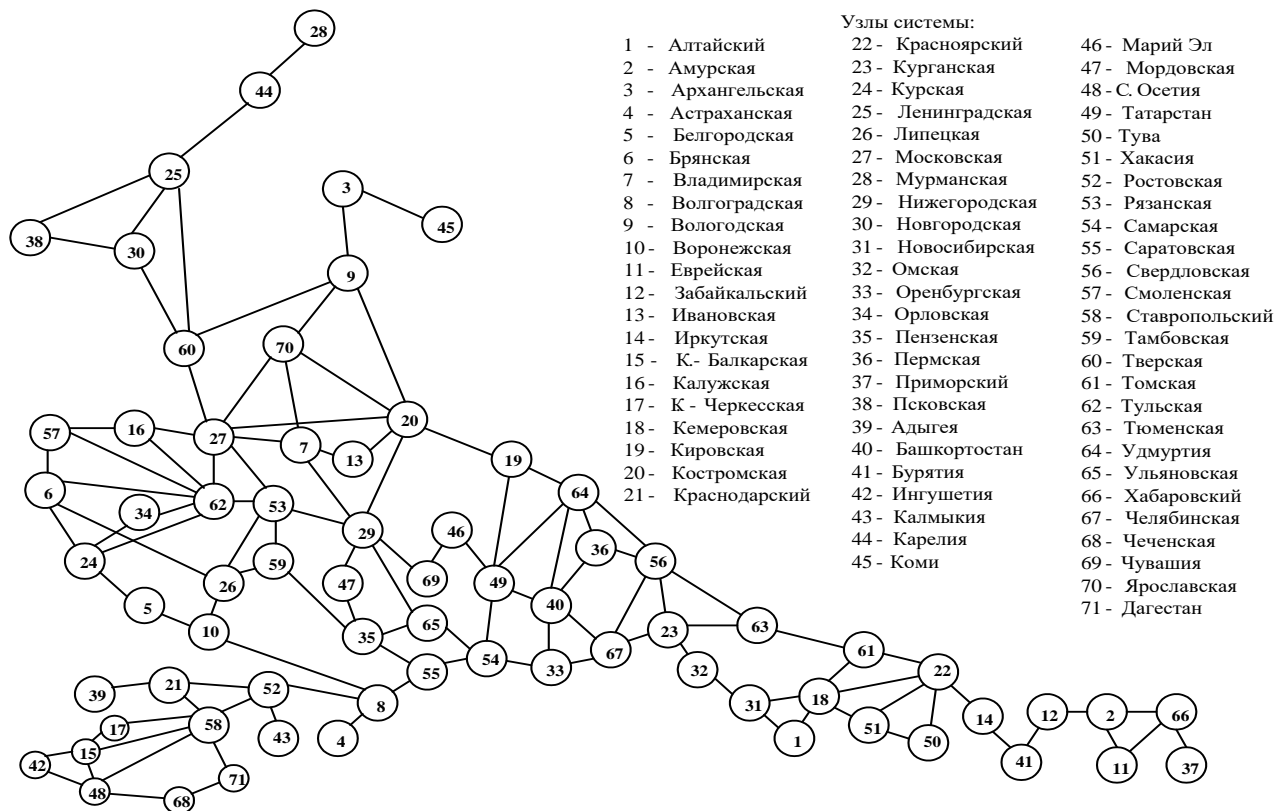


Рис. 1. Расчетная схема Единой электроэнергетической системы России  
Fig. 1. Calculation scheme of the Unified Electric Power System of Russia

Исходная информация по генерации и линиям электропередач взята из «Схемы и программы развития Единой энергетической системы России на 2017–2023 годы»<sup>1</sup>. В качестве нагрузки узлов  $s_i$  принята отчетная нагрузка, суммированная с резервом мощности в 20% нагрузки, одинаковым для всех узлов. Предельная нагрузка электростанций  $P_i$  принималась равной отчетной располагаемой мощности в узлах расчетной схемы. Пропускная способность линий электропередач  $T_{ik}$  принята равной натуральной мощности линий соответствующих напряжений, сниженная на 20% для обеспечения статической устойчивости. Величина удельных потерь мощности при передаче электроэнергии принята величиной 6% на 1000 км, одинаковой для всех типов ЛЭП.

Основные результаты расчетов модели 1 (1)–(5) на максимум суммарного избытка энергосистем России приведены на рис. 2. Показаны только энергосистемы с

положительными значениями расчетных избытков мощности, в остальных системах избыток равен нулю. Приведены значения расчетных и начальных избытков мощности и пропускной способности, подходящих к энергосистемам линий электропередач, оставшихся свободными для перетоков мощности.

Суммарная генерирующая мощность энергосистем России, принятая в расчете, составляла 234,8 ГВт, суммарная нагрузка потребителей – 192,5 ГВт, их разница или начальный избыток мощности равен 42,3 ГВт.

Расчетный суммарный избыток мощности всех энергосистем России составил 42,0 ГВт или 18% от суммарной генерирующей мощности. Это на 0,3 ГВт меньше суммарного начального избытка из-за необходимости покрытия нагрузки изначально дефицитных энергосистем и соответствующих потерь мощности в межрегиональных электрических связях.

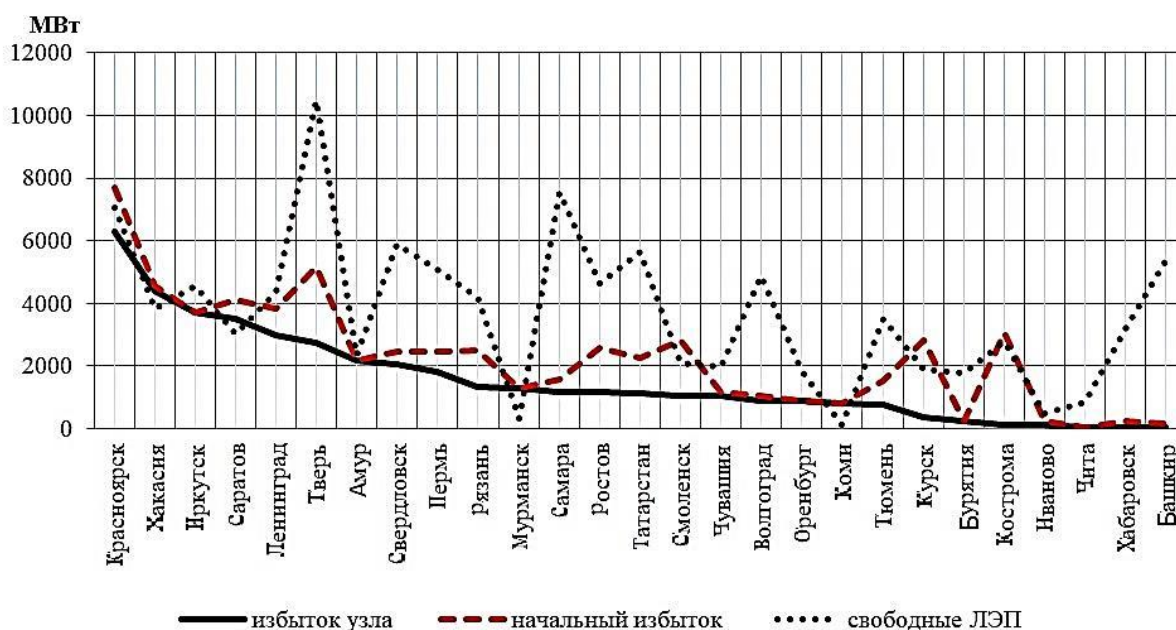


Рис. 2. Избытки мощности энергосистем России (МВт) в расчете на максимум суммарного избытка Единой электроэнергетической системы России  
Fig. 2. Power surpluses of Russian power systems (MW) per maximum of the total surplus of the Unified Electric Power System of Russia

<sup>1</sup> Об утверждении схемы и программы развития Единой энергетической системы России на 2017–2023 годы: Приказ Министерства энергетики Российской Федерации № 143 от 01.03.2017 г.



В табл. 1 показаны региональные энергосистемы с наибольшими значениями расчетных избытков мощности (первые десять из них).

Максимальный расчетный избыток мощности приходится на энергосистему Красноярского края: 6,3 ГВт. Приведенные в табл. 1 энергосистемы – основные претенденты на возможный рост нагрузки без дополнительных вводов генерирующих мощностей и с минимальным развитием электрической сети. Суммарная мощность этих десяти узлов (31,0 ГВт) составляет большую часть (74%) избытка всех энергосистем России.

Состав этих систем и систем с наибольшими начальными избытками мощности частично совпадает; первые 6 входят в оба эти списка. То есть большой расчетный избыток мощности определяется, как правило, наличием значительного начального избытка. Положительный

начальный избыток был в 33 системах (из 71), остальные 38 были изначально дефицитны по мощности. Расчетный положительный избыток оказался в 27 системах, все они имели положительный начальный избыток. В остальных 44 системах расчетный избыток равен нулю. Во всех системах с положительным расчетным избытком его величина оказалась меньше начального избытка, а после выдачи части избытков мощности в смежные узлы почти во всех избыточных узлах остались свободные пропускные способности присоединенных линий электропередач.

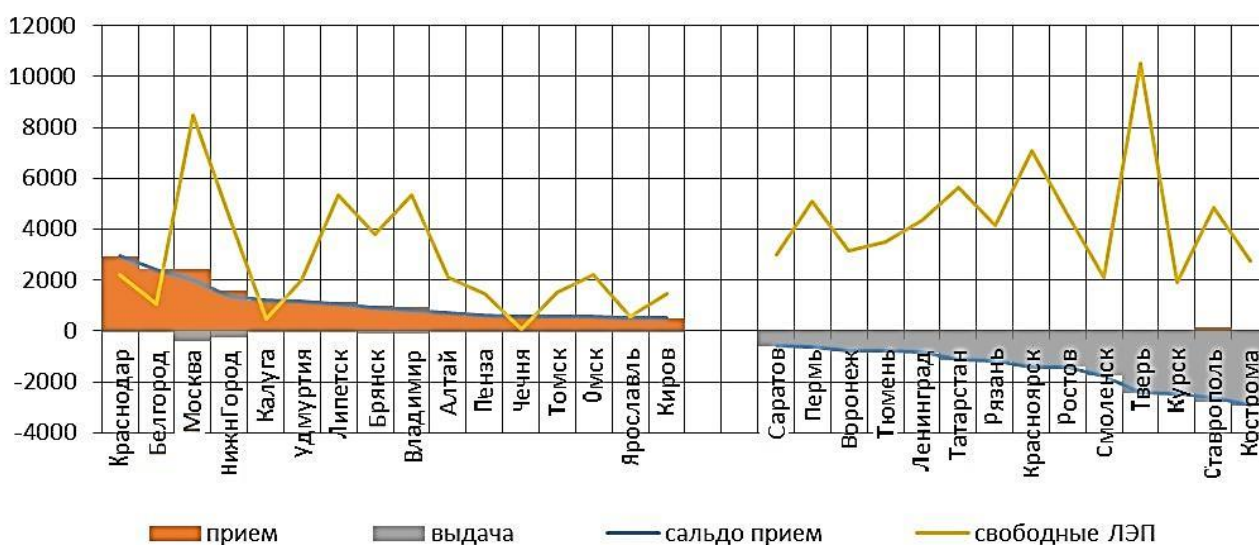
Для покрытия нагрузки изначально дефицитных систем сформировались потоки мощности, обобщенно показанные на рис. 3.

В левой части рис. 3 показаны изначально дефицитные системы, принимающие потоки извне, в правой части – избыточные системы, системы с относительно

**Таблица 1**  
**Table 1**

**Избытки мощности (ГВт) в первых 10 узлах с наибольшими избытками**  
**Power surpluses (GW) in the first 10 nodes with the largest surpluses**

Красноярск	Хакасия	Иркутск	Саратов	Ленинград	Тверь	Амур	Свердловск	Пермь	Рязань	Сумма	ЭЭС РФ
6,3	4,4	3,7	3,5	3,0	2,7	2,2	2,1	1,8	1,3	31,0	42,0



**Рис. 3. Межсистемные перетоки мощности (МВт)**  
**Fig. 3. Intersystem power flows (MWt)**

небольшими потоками в центре рисунка не приведены. Как видно из представленного материала, наибольший прием мощностей нужен в системах Краснодарского края, Белгородской и Московской областей, наибольшая выдача – из систем Костромской области, Ставропольского края, Курской области. При этом почти во всех системах имеется свободная пропускная способность подходящих к ним линий электропередач.

Величина свободной пропускной способности подходящих к региональным системам линий электропередач, показанная на рис. 4, определяет энергосистемы, которые в наибольшей степени пригодны для размещения генерирующих мощностей с последующей выдачей мощности в соседние системы без существенного развития электрической сети. Это системы Тверской, Московской и Самарской областей, Красноярского края и др.

В целях определения энергосистем с наиболее низкими затратами на подключение новых потребителей проведена серия расчетов с критерием максимума избытков отдельных систем (модель 2). Результаты этих расчетов показаны на рис. 5.

Приведены значения избытков мощности при локальной оптимизации региональных энергосистем, их значения при оп-

тимизации суммарного избытка по России (из предыдущего расчета) и разница этих значений – прирост избытка.

Как видно из рис. 5, максимальные избытки мощности есть в системах Красноярского края, Тверской, Самарской, Свердловской областей и других регионов. Первая десятка лучших из этих энергосистем лишь частично (6 из 10) совпадает с составом лучших систем по результатам глобальной оптимизации (см. рис. 2), изменения в этом составе определяются возможностями подходящих к данным узлам линий электропередач.

Наибольшие значения прироста локальных избытков мощности относительно избытков в случае глобальной оптимизации есть в системах (Тверская, Московская, Костромская области и др.) с максимальной выдачей мощности и наибольшей свободной пропускной способностью присоединенных линий, показанных на рис. 3, 4.

В результате проведенного исследования выявлено, что Межрегиональная электрическая сеть Единой энергосистемы России вполне обеспечивает покрытие потребностей в мощности всех энергосистем страны и почти везде имеет значительные свободные пропускные способности линий электропередач (табл. 2).

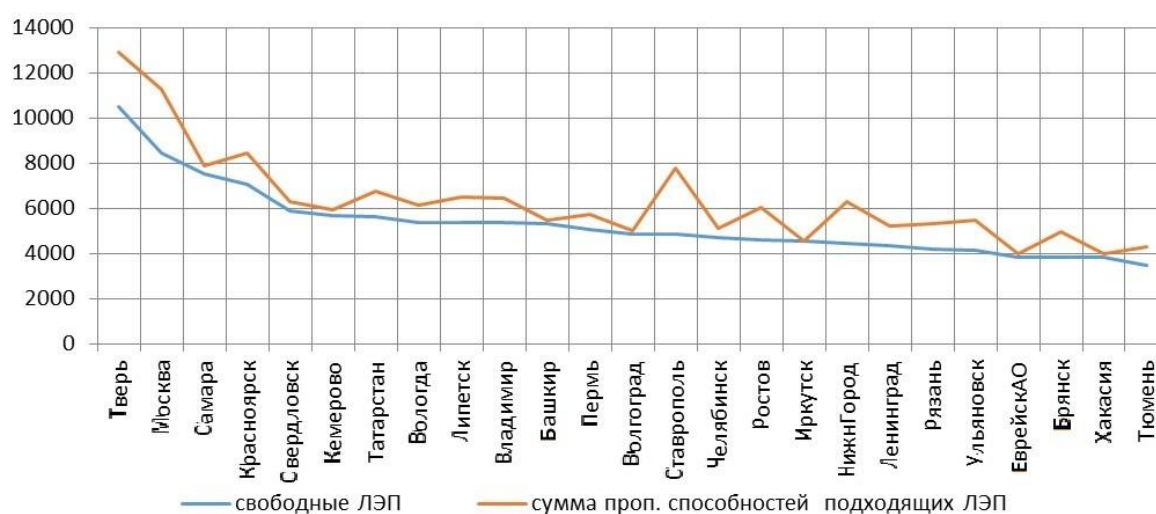


Рис. 4. Пропускные способности подходящих линий электропередач (MWt)  
Fig. 4. Transmission capacities of suitable transmission lines (MWt)



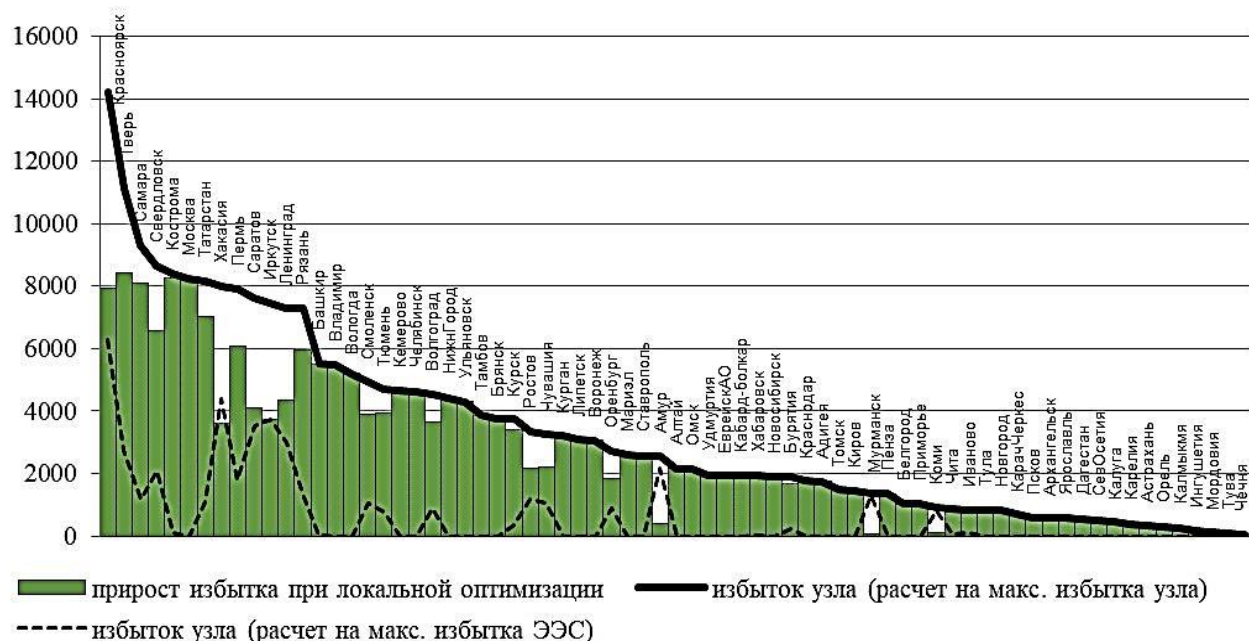


Рис. 5. Результаты локальной оптимизации избытков мощности региональных систем (MWt)  
Fig. 5. Results of local optimization of regional system power surplus (MWt)

Таблица 2

Результаты расчетов

Table 2

Calculation results

№ узла	$s_i$	$P_i$	Изб_0	Изб_1	свЛЭП	Изб_2
1	2258	1559	-699	0	2115	2155
2	1676	3846	2170	2170	2349	2549
3	1444	1650	206	0	158	563
4	893	744	-149	0	580	350
5	2663	251	-2412	0	1058	1028
6	906	12	-894	0	3818	3750
7	1441	608	-833	0	5350	5476
8	2978	4017	1039	888	4871	4517
9	2362	1940	-422	0	5383	5194
10	2094	2877	783	0	3145	3062
11	120	0	-120	0	3849	1950
12	1536	1594	58	58	850	864
13	750	982	232	111	486	836
14	9523	13249	3726	3726	4536	7463
15	364	210	-154	0	1466	1940
16	1336	124	-1212	0	449	434
17	269	328	59	0	589	704
18	5327	5522	195	0	5663	4664
19	1469	961	-508	0	1477	1432
20	774	3824	3050	121	2781	8386
21	5399	2443	-2956	0	2188	1758
22	8160	15842	7682	6278	7061	14207
23	908	700	-208	0	3275	3213
24	1511	4321	2810	353	1890	3745
25	9102	12916	3814	2971	4354	7305

26	2216	1137	-1079	0	5364	3082
27	20683	18653	-2030	0	8458	8251
28	2322	3606	1284	1284	324	1351
29	4133	2782	-1351	0	4441	4417
30	839	422	-417	0	879	817
31	3281	2992	-289	0	1939	1888
32	2182	1607	-575	0	2220	2131
33	2778	3649	871	871	1863	2705
34	580	396	-184	0	302	300
35	1031	435	-596	0	1485	1350
36	4458	6906	2448	1811	5073	7903
37	2701	2617	-84	0	1090	1022
38	496	446	-50	0	598	592
39	120	16	-104	0	1759	1742
40	4974	5122	148	25	5345	5535
41	1132	1363	231	231	1782	1879
42	163	0	-163	0	161	161
43	120	21	-99	0	265	262
44	1469	1098	-371	0	399	382
45	1667	2461	794	794	121	909
46	557	240	-317	0	2599	2578
47	642	388	-254	0	110	108
48	468	107	-361	0	716	484
49	5272	7510	2238	1111	5636	8151
50	192	40	-152	0	91	88
51	2599	7157	4558	4404	3815	8004
52	3616	6187	2571	1158	4621	3329
53	1298	3795	2497	1322	4172	7290
54	4364	5915	1551	1186	7533	9297
55	2502	6601	4099	3510	3016	7628
56	7944	10420	2476	2073	5874	8646
57	1230	4033	2803	1041	2113	4924
58	2022	4640	2618	0	4836	2557
59	739	381	-358	0	3050	3854
60	1642	6796	5154	2721	10500	11130
61	1621	1044	-577	0	1529	1489
62	1844	1632	-212	0	1076	820
63	15354	16898	1544	748	3497	4698
64	1910	742	-1168	0	1991	1954
65	1274	944	-330	0	4150	4298
66	1858	2106	248	40	3193	1925
67	6136	5735	-401	0	4702	4628
68	592	1	-591	0	57	54
69	1034	2187	1153	1031	1985	3241
70	1642	1117	-525	0	569	557
71	1512	1904	392	0	580	549
сумма	192469	234769	42300	42036		
max	20683	18653	7682	6278	10500	14207
min	120	0	-2956	0	57	54

*Примечание / Note.* Изб\_0 – начальный избыток мощности ( $P_i - s_i$ ); Изб\_1 – избыток мощности ( $g - s_i$ ) в задаче 1; свЛЭП – свободные пропускные способности подходящих ЛЭП; Изб\_2 – избытки мощности в задаче 2 / Изб\_0 – initial power surplus ( $P_i - s_i$ ); Изб\_1 – power surplus ( $g - s_i$ ) in the problem 1; свЛЭП – free transmission capacities of suitable power lines; Изб\_2 – power surplus in the problem 2.





### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подведены следующие итоги проделанной работы.

1. Предложена методика оценки энергетического потенциала регионов России с использованием математических моделей расчета избытков мощности энергосистем.

2. При принятых исходных условиях в существующей Единой энергосистеме страны по состоянию на конец 2016 г. имеется значительный избыток мощности – порядка 42 ГВт или 18% от суммарной располагаемой мощности электростанций.

3. Проведенные расчеты выявили следующие регионы с наибольшим энерге-

тическим потенциалом: Красноярский край, Тверская, Самарская, Свердловская, Костромская, Московская области и др. Суммарный потенциал 10 лучших по этому показателю узлов велик и составляет порядка 75% суммарного потенциала энергосистем России.

4. Наименьший потенциал наблюдается в регионах Чеченской Республики, Мордовии, Ингушетии, Калмыкии, Орловской, Астраханской областей и др.

5. Межрегиональная электрическая сеть ЕЭС России вполне обеспечивает покрытие потребностей в мощности всех энергосистем страны и почти везде имеет значительные свободные пропускные способности линий электропередач.

### Библиографический список

1. Воропай Н.И., Подковальников С.В., Труфанов В.В. Обоснование развития электроэнергетических систем: методология, модели, методы, их использование. Новосибирск: Наука, 2015. 448 с.
2. Труфанов В.В. Моделирование развития основной электрической сети в условиях рынка // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 3. С. 117–122.
3. Драчев П.С. Рыночная модель развития основной электрической сети // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 1. С. 125–134.
4. Mazzi N., Baosen Zhang, Kirschen D.S. An Online Optimization Algorithm for Alleviating Contingencies in Transmission Networks // IEEE Transactions on Power Systems. 2018. Vol. 33. Issue 5. P. 5572–5582. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2808456>
5. Falugi P., Konstantelos I., Strbac G. Planning With Multiple Transmission and Storage Investment Options Under Uncertainty: A Nested Decomposition Approach // IEEE Transactions on Power Systems. 2018. Vol. 33. Issue 4. P. 3559–3572. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2017.2774367>
6. Dehghan S., Amjady N., Conejo A.J. Adaptive Robust Transmission Expansion Planning Using Linear Decision Rules // IEEE Transactions on Power Systems. 2017. Vol. 32. Issue 5. P. 4024–4034. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2017.2652618>
7. Karimi E., Ebrahimi A. Inclusion of Blackouts Risk in Probabilistic Transmission Expansion Planning by a Multi-Objective Framework // IEEE Transactions on Power Systems. 2015. Vol. 30. Issue 5. P. 2810–2817. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2370065>
8. Баринов В.А., Бушуев В.В., Волков Э.П., Раппопорт А.Н., Воропай Н.И., Кучеров Ю.Н. [и др.]. Безопасность России. Правовые, социально-

- экономические и научно-технические аспекты // Энергетическая безопасность (Проблемы функционирования и развития электроэнергетики): сб. статей / под ред. Е.А. Телегиной. М.: МГФ «Знание» им. акад. К.В. Фролова, 2001. 480 с.
9. Чукреев Ю.Я. Модели обеспечения надежности электроэнергетических систем. Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 1995. 176 с.
10. Ковалев Г.Ф., Воропай Н.И. Учет фактора надежности при оценке системных эффектов в электроэнергетике. Новосибирск: Наука, 2018. 217 с.
11. Воропай Н.И., Труфанов В.В. Математическое моделирование развития электроэнергетических систем в современных условиях // Электричество. 2000. № 10. С. 6–13.
12. Воропай Н.И. Системные исследования в энергетике: ретроспектива научных направлений СЭИ-ИСЭМ. Новосибирск: Наука, 2010. 686 с.
13. Воропай Н.И., Стычински З.А., Шушпанов И.Н., Фам Чунг Шон, Суслов К.В. Модель режимной надежности «активных» распределительных электрических сетей // Известия Российской Академии наук. Энергетика. 2013. № 6. С. 70–79.
14. Воропай Н.И. Иерархическое моделирование при обосновании развития электроэнергетических систем // Exponenta Pro. Математика в приложениях. 2003. № 4. С. 24–27.
15. Бушуев В.В., Воропай Н.И., Мастепанов А.М., Шафраник Ю.К. Энергетическая безопасность России. Новосибирск: Наука, 1998. 302 с.
16. Ковалев Г.Ф., Труфанов В.В., Федотова Г.А. ПВК для планирования развития и исследования надежности ЭЭС // Методы управления физико-техническими системами энергетики в новых условиях: сб. статей / под ред. Н.И. Воропая, А.П. Меренкова. Новосибирск: Наука, 1995. С. 298–302.

## References

1. Voropaj NI, Podkoval'nikov SV, Trufanov VV. *Rationale for electric power system development: methodology, models, methods, use*. Novosibirsk: Nauka; 2015. 448 p. (In Russ.)
2. Trufanov VV. Main Electrical Network Development Modeling in Market Conditions. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2013;3:117–122. (In Russ.)
3. Drachev PS. Market-based transmission system development model. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2013;1:125–134. (In Russ.)
4. Mazzi N, Baosen Zhang, Kirschen DS. An Online Optimization Algorithm for Alleviating Contingencies in Transmission Networks. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2018;33(5):5572–5582. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2808456>
5. Falugi P, Konstantelos I, Strbac G. Planning with Multiple Transmission and Storage Investment Options under Uncertainty: A Nested Decomposition Approach. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2018;33(4):3559–3572. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2017.2774367>
6. Dehghan S, Amjady N, Conejo AJ. Adaptive Robust Transmission Expansion Planning Using Linear Decision Rules. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2017;32(5):4024–4034. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2017.2652618>
7. Karimi E, Ebrahimi A. Inclusion of Blackouts Risk in Probabilistic Transmission Expansion Planning by a Multi-Objective Framework. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2015;30(5):2810–2817. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2370065>
8. Barinov VA, Bushuev VV, Volkov EP, Rappoport AN, Voropaj NI, Kucherov YuN, et al. The security of Russia. Legal, socio-economic and scientific-technical aspects. In: Telegina EA (eds.). *Energeticheskaya bezopasnost' (Problemy funkcionirovaniya i razvitiya elektroenergetiki)* = Energy Security (Problems of Electric Power Industry Operation and Development). Moscow: International humanitarian public Fund "Znanie" named after the academician K.V. Frolov; 2001. 480 p. (In Russ.)
9. Chukreev YuYa. *Models ensuring reliability of electric power systems*. Syktyvkar: Komi scientific center of the Ural branch of Russian Academy of Sciences; 1995. 176 p. (In Russ.)
10. Kovalev GF, Voropaj NI. *Consideration of the reliability factor in assessment of system effects in electric power industry*. Novosibirsk: Nauka; 2018. 217 p. (In Russ.)
11. Voropaj NI, Trufanov VV. Mathematical modeling of electric power system development in modern conditions. *Elektrichestvo* = Electricity. 2000;10:6–13. (In Russ.)
12. Voropaj NI. System researches in power engineering: retrospective scientific directions of Melentiev Energy Systems Institute. Novosibirsk: Nauka; 2010. 686 p. (In Russ.)
13. Voropaj NI, Stychinski ZA, Shushpanov IN, Fam Chung Shon, Suslov KV. Model of regime reliability of "active" distribution electric networks. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Energetika* = Proceedings of The Russian Academy of Sciences. Power Engineering. 2013;6:70–79. (In Russ.)
14. Voropaj NI. Hierarchical modeling in justification of development of electric power systems. *Exponenta Pro. Matematika v prilozheniyah* = Exponenta Pro. Mathematics in Applications. 2003;4:24–27. (In Russ.)
15. Bushuev VV, Voropaj NI, Mastepanov AM, Shafaranik YuK. *Energy security of Russia*. Novosibirsk: Nauka; 1998. 302 p. (In Russ.)
16. Kovalev GF, Trufanov VV, Fedotova GA. Internal control rules for planning EPS development and study their reliability. In: Voropaj NI, Merenkov AP (eds.). *Metody upravleniya fiziko-tekhnicheskimi sistemami energetiki v novyh usloviyakh* = Control methods of physico-technical systems of power engineering in new conditions. Novosibirsk: Nauka; 1995. p. 298–302. (In Russ.)

## Критерии авторства

Труфанов В.В., Драчев П.С. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в одинаковой мере несут ответственность за плагиат.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

## Authorship criteria

Trufanov V.V., Drachev P.S. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

## Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.



СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Труфанов Виктор Васильевич,**

доктор технических наук,  
ведущий научный сотрудник,  
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева,  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия;  
e-mail: truf@isem.irk.ru

**Драчев Павел Сергеевич,**

кандидат технических наук,  
младший научный сотрудник,  
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева,  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия;  
✉ e-mail: drachev@isem.irk.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Viktor V. Trufanov,**

Dr. Sci. (Eng.),  
Leading Researcher,  
Melentiev Energy Systems Institute,  
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia;  
e-mail: truf@isem.irk.ru

**Pavel S. Drachev,**

Cand. Sci. (Eng.),  
Junior Researcher,  
Melentiev Energy Systems Institute,  
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia;  
✉ e-mail: drachev@isem.irk.ru



## Комплексная оптимизация теплосиловой части энергоблока атомных электростанций с водо-водяным энергетическим реактором с целью повышения их эффективности

© Э.А. Тюрина\*\*\*, З.Р. Корнеева\*, П.Ю. Елсуков\*

\*Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения  
Российской академии наук, г. Иркутск, Россия

\*\*Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

**Резюме:** Целью работы является проведение комплексных оптимизационных исследований теплосиловой части энергоблока атомных электростанций, получение оптимальных термодинамических, расходных и конструктивных параметров с учетом энергетической эффективности. Применялись усовершенствованные в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева программно-вычислительные комплексы построения математических моделей различных энергетических установок, методы математического моделирования теплоэнергетических установок, приемы оптимизации их параметров. Разработана расчетная схема теплосиловой части энергоблока атомных электростанций. На основе этой схемы проведен выбор состава новых процессов и элементов. Показана вариативность оптимизируемых способов, ограничений на термодинамические и конструктивные параметры и критерии оптимизации. Получены оптимальные конструктивные решения по элементам, схемам и условиям конкурентоспособности установок с учетом энергетической эффективности функционирования атомных электростанций. Полученная математическая модель теплосиловой части атомной электростанции с водо-водяным энергетическим реактором ВВЭР-1000 при учете дополнительных факторов (изменение тепловой мощности данного реактора) позволит провести исследование оптимальных сочетаний параметров I-го и II-го контуров энергоблока с учетом энергетической, экономической эффективности атомных электростанций.

**Ключевые слова:** атомная энергетика, атомная электростанция, математическое моделирование, комплексная оптимизация

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках проекта государственного задания III.17.1.1. (рег. № AAAA-A17-117030310433-6) по программе фундаментальных исследований СО РАН.

**Информация о статье:** Дата поступления 23 апреля 2019 г.; дата принятия к печати 18 июня 2019 г.; дата онлайн-размещения 31 октября 2019 г.

**Для цитирования:** Тюрина Э.А., Корнеева З.Р., Елсуков П.Ю. Комплексная оптимизация теплосиловой части энергоблока атомных электростанций с водо-водяным энергетическим реактором с целью повышения их эффективности. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т. 23. № 5. С. 978–985. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-978-985>

## Integrated optimization of thermal power part of PWR nuclear power units to increase their efficiency

Elina A. Tyurina, Zaituna R. Korneeva, Pavel Yu. Elsukov

Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Irkutsk, Russia  
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

**Abstract:** The purpose of the work is carrying out complex optimization studies of the thermal power part of the nuclear unit, obtaining optimal thermodynamic, flow and design parameters with regard to energy efficiency. The study employs improved at Melentiev Energy Systems Institute software and computer systems for construction of mathematical models of various power plants, methods of mathematical modeling of heat power plants, optimization methods of their parameters. The design diagram of the thermal power part of nuclear units is developed. Based on the developed diagram the structure of new processes and elements is selected. The variability of the optimized methods, restrictions on thermodynamic and design parameters and optimization criteria are shown. The optimal design solutions for the elements, diagrams and marketability conditions of plants are obtained taking into account energy efficiency of nuclear power plant operation. The obtained mathematical model of the thermal power part of the nuclear unit with a pressurized water reac-

tor PWR-1000 considering additional factors (variation of PWR thermal power) will enable future studies of optimum combinations of the parameters of the 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> circuits of the power unit taking into account energy and economic efficiency of nuclear power plants.

**Keywords:** nuclear power engineering, nuclear power plant, mathematical modeling, integrated optimization

**Acknowledgments:** The work was carried out in the frameworks of the project of the state assignment III.17.1.1. (Reg. No. AAAA-A17-117030310433-6) under the basic research program of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.

**Information about the article:** Received April 23, 2019; accepted for publication June 18, 2019; available online October 31, 2019.

**For citation:** Tyurina EA, Korneeva ZR, Elsukov PYu. Integrated optimization of thermal power part of PWR nuclear power units to increase their efficiency. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2019;23(5):978–985. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-978-985>

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Атомная энергетика имеет огромный потенциал в России и мире, позволяя обеспечить будущую потребность в энергии, не расходуя органическое топливо и не увеличивая при этом выбросы в атмосферу диоксида углерода (CO<sub>2</sub>) и других загрязняющих веществ. Правительство Российской Федерации отнесло атомную энергетику к числу приоритетов в развитии России<sup>1</sup> [1]. Вместе с тем конкурентоспособность атомных электростанций (АЭС) по сравнению с электростанциями на органическом топливе и, в первую очередь, на природном газе падает из-за быстрого роста удельных капиталовложений в энергоблоки АЭС [2]. В этих условиях особую актуальность приобретают исследования, направленные на оптимизацию схем и параметров АЭС по критериям экономической эффективности при соблюдении требований по безопасности.

В конце 80-х – начале 90-х гг. XX в. в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева (ИСЭМ СО РАН) проводились исследования по оптимизации тепловой мощности водо-водяного энергетического реактора (ВВЭР) заданного типоразмера, термодинамических параметров I-го контура и параметров теплосиловой части (ТСЧ) АЭС. Основная идея этих исследований состояла в том, что снижая температуру воды в I-м контуре за счет увеличения тем-

пературного напора в реакторе, можно увеличить его тепловую мощность, не нарушая ограничений по предельным температурам оболочки и центра тепловыделяющих элементов. Однако такое увеличение мощности реактора потребует снижения параметров пара во втором контуре и вызовет падение электрического коэффициента полезного действия (КПД) энергоблока. Поэтому предлагалось искать оптимальное сочетание параметров I-го и II-го контуров, при котором электрическая мощность станции будет максимальной. Было показано, что эти оптимальные параметры отличаются от проектных параметров энергоблока с реактором ВВЭР-1000. Однако при этих исследованиях не учитывались изменения параметров систем защиты реактора при увеличении его тепловой мощности, что снижало ценность полученных результатов. Кроме того, при описании паротурбинной установки использовались упрощенные модели проточной части, в которых проводился расчет турбинных ступеней, что также снижало обоснованность оптимизации по сравнению с расчетами, которые проводились бы с использованием указанных расчетов [3–15].

Поэтому возникает необходимость кардинального совершенствования ранее разработанных математических моделей и постановки задачи оптимизации параметров теплосиловой части АЭС, а также проведения оптимизационных исследований

<sup>1</sup>Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие атомного энергопромышленного комплекса»: постановление Правительства Российской Федерации № 506-12 от 02.06.2014 г., изм. 28.03.2019 г.



применительно к перспективным реакторам и современным соотношениям цен на топливо и оборудование.

## 2. ЦЕЛЬ НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель данного этапа работы: проведение комплексных оптимизационных исследований теплосиловой части энергоблока АЭС; получение оптимальных термодинамических, расходных и конструктивных параметров с учетом энергетической эффективности.

## 3. ЗАДАЧИ НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Предполагается решить следующие задачи:

1) разработка математической модели отдельных элементов теплосиловой части АЭС;

2) постановка вопроса комплексной оптимизации параметров теплосиловой части энергоблока АЭС, а также назначение оптимизируемых параметров, ограничений на термодинамические и конструктивные параметры, функции цели;

3) получение оптимальных конструктивных решений по элементам и схемам установок с учетом их энергетической эффективности.

## 4. МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Для построения математических моделей различных энергетических установок в ИСЭМ СО РАН разработан программно-вычислительный комплекс (ПВК), который на основании информации о математических моделях отдельных элементов и технологических связях между ними автоматически генерирует математическую модель установки в виде программы расчета на языке Fortran. Данный комплекс не имеет аналогов в мире и России. Создана методика и ее программная реализация для схемно-параметрической оптимизации сложных теплоэнергетических установок различных типов с учетом переменных

условий их функционирования. Разработаны методы математического моделирования теплоэнергетических установок и приемы оптимизации их параметров. Для решения задач нелинейного программирования используется также созданный в ИСЭМ СО РАН метод «с памятью», основанный на сочетании известных методов «погружения» и «возможных направлений», показавший высокую эффективность в применении.

Разработан методический подход к оптимизации параметров теплоэнергетических установок (включая АЭС) с учетом переменных условий их функционирования, основанный на проведении согласованного конструкторского и поверочных расчетов и позволяющий улучшить технико-экономические показатели и обеспечить допустимость работы на всей области возможных режимов.

Таким образом, для выполнения исследований по заявленной теме существует значительный методический задел и программное обеспечение [3, 4].

## 5. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе исследования разработана расчетная схема ТСЧ энергоблока АЭС. На основе этой схемы проведен выбор состава новых процессов и элементов. При этом математические модели ориентированы на выполнение расчетов технологических схем установок и проведение конструкторских расчетов их отдельных элементов. Модели элементов включают в себя полные материальные, энергетические балансы, расчет гидравлических и аэродинамических сопротивлений и т.д. Математические модели в целом позволяют на их основе проводить оптимизационные исследования с целью нахождения оптимальных конструктивных решений по элементам, схемам и условиям конкурентоспособности установок с учетом неопределенности условий функционирования.

Назначен состав оптимизируемых параметров, ограничений на термодинами-

ческие и конструктивные параметры и критерии оптимизации. В результате чего получены оптимальные конструктивные решения по элементам, схемам и условиям конкурентоспособности установок с учетом энергетической эффективности функционирования АЭС.

## 6. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ

**Оптимизационные исследования теплосиловой части энергоблока атомных электростанций с водоводяным энергетическим реактором.** Математическая формулировка задачи оптимизации параметров ТСЧ энергоблока АЭС с ВВЭР (как задачи нелинейного математического программирования) представлена ниже.

Максимизация КПД нетто

$$\max \left( \frac{(N_{\text{бл}} - N_{\text{сн}}) \cdot \alpha_{\text{м}}}{B_{\text{бл}} \cdot Q_{\text{н}}^p} \right). \quad (1)$$

при условиях:

$$H(x, y, z) = 0; \quad (2)$$

$$G(x, y, z) \geq 0; \quad (3)$$

$$B_{\text{бл}} = f_{\text{Б}}(x, y, z); \quad (4)$$

$$N_{\text{бл}} = f_{\text{Н}}(x, y, z); \quad (5)$$

$$N_{\text{сн}} = f_{\text{сн}}(x, y, z); \quad (6)$$

$$K_{\text{бл}} = f_{\text{к}}(x, y, z, N_{\text{бл}}, B_{\text{бл}}); \quad (7)$$

$$N_{\text{бл}}^{\min} \leq N_{\text{бл}} \leq N_{\text{бл}}^{\max}; \quad (8)$$

$$\underline{x} \leq x \leq \bar{x}, \quad (9)$$

где  $K_{\text{бл}}$  – капиталовложения в энергоблок;  
 $N_{\text{бл}}$  – полная мощность энергоблока;  $N_{\text{сн}}$  – мощность собственных нужд энергоблока;  
 $H$  –  $l$ -мерная функция ограничений-

равенств;  $x$  –  $n$ -мерный вектор независимых оптимизируемых параметров;  $y$  –  $l$ -мерный вектор вычисляемых (зависимых) параметров;  $z$  – вектор, задающий внешние условия работы энергоблока и некоторые неоптимизируемые конструктивные параметры;  $G$  –  $m$ -мерная векторная функция ограничений-неравенств;  $B_{\text{бл}}$  – расход топлива энергоблоком (в единицах натурального топлива);  $N_{\text{бл}}^{\min}$ ,  $N_{\text{бл}}^{\max}$  – величины, задающие нижнюю и верхнюю границы диапазона изменения полной мощности энергоблока;  $\underline{x}$ ,  $\bar{x}$  – векторы, компоненты которых задают нижнюю и верхнюю границы диапазона изменения соответствующих компонент вектора  $x$ ,  $Q_{\text{н}}^p$  – низшая теплота сгорания топлива;  $\alpha_{\text{м}}$  – множитель, зависящий от используемых единиц измерения мощности, расхода топлива и низшей теплоты сгорания (например, если мощность измеряется в кВт, расход – в кг/с, а  $Q_{\text{н}}^p$  – в кДж/кг, то коэффициент  $\alpha_{\text{м}}$  будет равен 1).

Резкий рост возможностей вычислительной техники за последние годы в сочетании с разработкой специальных методов «подавления» влияния погрешностей, возникающих при итерационном решении нелинейных систем алгебраических и трансцендентных уравнений на процесс оптимизации, позволил рассматривать подход, основанный на использовании единой модели установки, в которой осуществляется подробный конструкторский расчет в номинальном режиме. Для этого в моделях выделяют независимые конструктивные оптимизируемые параметры, которые определяют конструктивные характеристики установки. К ним относятся: давление острого пара, а также пара промежуточного перегрева в расчетном режиме и др. Причем изменение данных параметров влияет на работу во всех режимах работы энергоблока.

На значение целевой функции, в качестве которой выступает один из возможных критериев экономической или энергетической эффективности, влияют результа-





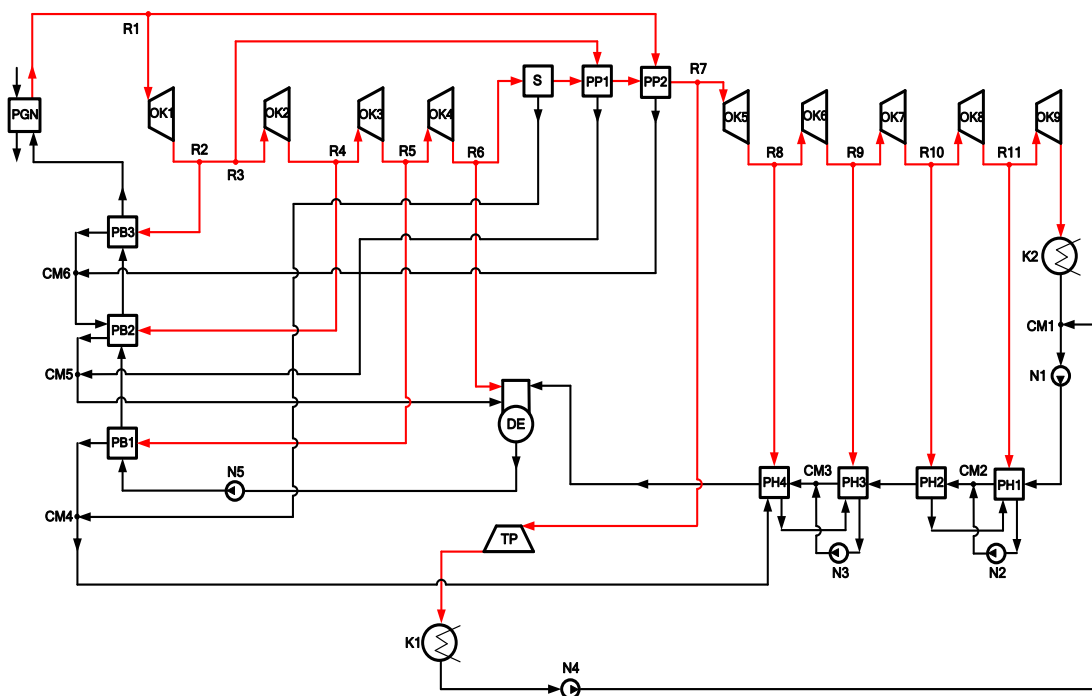
ты конструкторского расчета, на его основе определяются конструктивные характеристики энергоблока.

**Пример оптимизации параметров атомных электростанций с водо-водяным энергетическим реактором.** С помощью разработанного в ИСЭМ СО РАН ПВК «Система машинного построения программ» была сформирована единая расчетная программа, в которой с использованием подробных математических моделей установки проводился один конструкторский расчет в номинальном режиме (изображен на рисунке).

В математических моделях элементов установки, используемых в настоящей работе, реализуется расчетная методика

определения площадей поверхностей нагрева конвективных теплообменников, их гидравлического и аэродинамического сопротивления (производится на основе действующих в России нормативных методов), расчет паровой турбины осуществляется по отсекам с учетом зависимости внутреннего относительного КПД отсека от влажности пара.

Для решения задач оптимизации параметров ТСЧ энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 была построена математическая модель, включающая 585 задаваемых параметров и 484 вычисляемых. Тепловая мощность реактора ВВЭР-1000 задана. При решении оптимизационной задачи 1 – мак-



**Расчетная технологическая схема теплосиловой части энергоблока атомных электростанций с водо-водяным энергетическим реактором:** PGN – парогенератор;

OK1–OK9 – отсеки турбины; R1–R11 – раздвоители потока пара;

S – сепаратор; PP1 – пароперегреватель I ступени; PP2 – пароперегреватель II ступени;

K1, K2 – конденсаторы; N1–N5 – насосы; DE – деаэрактор;

PH1–PH4 – регенеративные подогреватели низкого давления; PB1–PB3 – регенеративные подогреватели высокого давления; TP – приводная турбина питательного насоса;

CM1–CM6 – смесители потоков воды

**Design flow diagram of the thermal power part of a nuclear unit with a pressurized water reactor:** PGN – steam generator; OK1–OK9 – turbine compartments; R1–R11 – steam flow splitters;

S – separator; PP1 – first stage superheater; PP2 – second stage superheater;

K1, K2 – condensers; N1–N5 – pumps; DE – deaerator; PH1–PH4 – low pressure regenerative heaters;

PB1–PB3 – high pressure regenerative heaters; TP – feed pump drive turbine;

CM1–CM6 – water flow mixers

симизация КПД нетто – в качестве независимых оптимизируемых было принято 25 параметров, включающих давление острого пара, давление пара промперегрева, подогрев пара в первой и второй ступенях промежуточного пароперегревателя, давление пара во всех отборах на регенеративные подогреватели. Для всех теплообменников учитываются ограничения на неотрицательность температурных напоров, для всех отсеков паровой турбины – ограничения на неотрицательность перепадов давлений. Для последней ступени паровой турбины принимается ограничение на влажность пара на выходе:

$$x_{\text{вых}} \leq x_{\text{вых}}^{\text{max}},$$

где  $x_{\text{вых}}$  – влажность пара на выходе из по-

следней ступени;  $x_{\text{вых}}^{\text{max}}$  – максимально допустимая (по условиям эрозии лопаток) влажность пара.

При оптимизации учитывалось 97 ограничений-неравенств (включающих ограничения на концевые температурные напоры теплообменников) на влажность на выходе из последнего отсека турбины и др.

#### **Результаты решения задачи 1.**

Максимизация КПД нетто теплосиловой части АЭС с ВВЭР-1000: при моделировании расчетной технологической схемы задан расход пара в конденсаторы паровой турбины; в качестве функции цели принята величина оптимального КПД теплосиловой части энергоблока. В результате решения задачи 1 получены следующие оптимальные параметры ТСЧ АЭС с ВВЭР-1000, которые представлены в таблице.

### **Проектные и оптимальные параметры энергоблока атомных электростанций с водо-водяным энергетическим реактором**

#### **Design and optimal parameters of a nuclear power unit with a pressurized water reactor**

Наименование величин	Параметры	
	проектные	оптимальные
КПД нетто, %	32,883	37,183
Давление острого пара на входе в паровую турбину, МПа	5,884	6,802
Расход острого пара на входе в паровую турбину, кг/с	1735,344	2021,018
Энтальпия острого пара на входе в паровую турбину, кДж/кг	2810,599	2795,108
Давление пара промежуточного перегрева I ступени, МПа	2,354	2,371
Давление пара, МПа, на:		
подогреватель высокого давления 3	2,354	2,371
подогреватель высокого давления 2	1,687	1,559
подогреватель высокого давления 1	1,178	0,954
деаэратор	1,178	0,953
подогреватель низкого давления 4	0,576	0,552
подогреватель низкого давления 3	0,252	0,224
подогреватель низкого давления 2	0,092	0,089
подогреватель низкого давления 1	0,069	0,031
в конденсаторе паровой турбины	0,005	0,004
Мощность собственных нужд турбоустановки, МВт	0,586	0,626
Полезная электрическая мощность паровой турбины, брутто, МВт	1115,213	1212,482



## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученная математическая модель ТСЧ АЭС с ВВЭР-1000 при учете дополнительных факторов (изменение тепловой

мощности реактора ВВЭР) позволит провести исследования оптимальных сочетаний параметров I-го и II-го контуров энергоблока с учетом энергетической, экономической эффективности и безопасности АЭС.

### Библиографический список

1. Фишов А.Г., Ландман А.К., Сердюков О.В. SMART-технологии для подключения к электрическим сетям и управления режимами малой генерации // Электроэнергетика глазами молодежи: материалы VIII Междунар. науч.-техн. конф. (г. Самара, 02–06 октября 2017 г.). Самара: Изд-во СамГТУ, 2017. Т. 1. С. 27–34.
2. Государственная корпорация по атомной энергии // «Росатом» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rosatom.ru/> (28.04.2018).
3. Клер А.М., Деканова Н.П., Щеголева Т.П., Корнеева З.Р., Лачкова Т.И. Методы оптимизации сложных теплоэнергетических установок. Новосибирск: ВО «Наука», Сибирская издательская фирма, 1993. 116 с.
4. Клер А.М., Деканова Н.П., Тюрин Э.А., Корнеева З.Р., Маринченко А.Ю., Михеев А.В. [и др.] Теплосиловые системы: оптимизационные исследования Новосибирск: Наука, 2005. 236 с.
5. Клер А.М. Эффективные методы схемно-параметрической оптимизации сложных теплоэнергетических установок: разработка и применение. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2018. 145 с. <https://doi.org/10.21782/B978-5-6041446-0-2>
6. Клер А.М., Тюрин Э.А. Оптимизационные исследования энергетических установок и комплексов. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2016. 298 с.
7. Схема территориального планирования Российской Федерации в области энергетики // Техэксперт [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/420369441> (27.03.2018)
8. Хрусталева В.А., Новикова М.В. Перспективные гаранты базовой загрузки АЭС в энергосистемах // Атомная энергия. 2018. Т. 125. № 6. С. 357–358.
9. Bangham J.A. Data-sieving hydrophobicity plots // Analytical Biochemistry. 1988. Vol. 174. P. 142–145.
10. Guo Zhangpeng, Zhao Yang, Zhu Yaoxuan, Niu Fenglei, Lu Daogang. Optimal design of supercritical CO<sub>2</sub> power cycle for next generation nuclear power conversion systems // Progress in Nuclear Energy. 2018. Vol. 108. P. 111–121. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene>
11. Chen Hongli, Zhang Xilin, Zhao Yongsing, Cao Liankai, Shi Kangli, Fang Haitao, Zeng Qin. Preliminary design of a medium-power modular lead-cooled fast reactor with the application of optimization methods // International Journal of Energy Research. 2018. Vol. 42. No. 11. P. 3643–3657.
12. Ju Ping, Wu Feng, Chen Qian, Han Jingdong, Dai Ruhui, Wu Guoyang, Tang Yong. Model simplification of nuclear power plant for power system dynamic simulation. Paper presented at the Proceedings - 2018 // International Conference on Control, Artificial Intelligence, Robotics and Optimization, ICCAIRO (Athens, 8–10 December, 2019). Athens: IEEE, 2019. P. 260–266.
13. Hao Zhang, Liqiang Zhang, Yanfeng Qin, Tao Jiang, Ning Cao, Chuangbin Zhou, Huiming Che. Modeling and simulation of loss of power in nuclear power plant // Paper presented at the 2018 International Conference on Power System Technology, POWERCON 2018: Proceedings (Guangzhou 6–8 November 2018). Guangzhou: IEEE, 2018. P. 4708–4714.
14. Redfoot E.K., Borrelli R.A. Analysis of nuclear renewable hybrid energy systems modeling and nuclear fuel cycle simulators // Nuclear Technology. 2018. Vol. 204. No. 3. P. 249–259.
15. Осика Л.К. Управление инвестпроектами строительства ТЭС. Прединвестиционная фаза. М.: Вершина, 2009. 344 с.

### References

1. Fishov AG, Landman AK, Serdyukov OV. SMART technology for connection to electric networks and small generation regime control. In: *Elektroenergetika glazami molodeji: materiali VIII Mejdunarodnoi molodejnoi nauchno-tehnicheskoi konferencii* = Electrical engineering through the eyes of youth: Proceedings of VIII International scientific and technical conference, 02–06 October 2017, Samara, Samara: Samara State Technical University; 2017, vol. 1, p. 27–34. (In Russ.)
2. State Atomic Energy Corporation. “Rosatom”. Available from: <http://www.rosatom.ru/> [Accessed 28th April 2018].
3. Kler AM, Dekanova NP, Shchegoleva TP, Korneeva ZR, Lachkova TI. *Optimization methods of complex thermal power plants*. Novosibirsk: “Nauka”. Siberian publishing company; 1993. 116 p. (In Russ.)
4. Kler AM, Dekanova NP, Tyurina EA, Korneeva ZR, Marinchenko AJu, Miheev AV, et. al. *Thermal power systems: optimization studies*. Novosibirsk: Nauka; 2005. 236 p. (In Russ.)
5. Kler AM. *Effective methods of circuit-parametric optimization of complex heat power plants: development and application*. Novosibirsk: Academic publishing house “Geo”; 2018. 145 p. (In Russ.) <https://doi.org/10.21782/V978-5-6041446-0-2>
6. Kler AM, Tyurina EA. *Optimization studies of power plants and complexes*. Novosibirsk: Academic publishing house “Geo”; 2016. 298 p. (In Russ.)
7. Diagram of territorial planning of the Russian Federation in the field of the energy sector. *Tekhekspert*.

Available from: <http://docs.cntd.ru/document/420369441>  
[Accessed 27th March 2018].

8. Hrustalev VA, Novikova MV. Perspective guarantors of base load NPPs in power systems. *Atomnaya energiya* = Nuclear Energy. 2018;125(6):357–358. (In Russ.)
9. Bangham JA. Data-sieving hydrophobicity plots. *Analytical Biochemistry*. 1988;174:142–145.
10. Guo Zhangpeng, Zhao Yang, Zhu Yaoxuan, Niu Fenglei, Lu Daogang. Optimal design of supercritical CO<sub>2</sub> power cycle for next generation nuclear power conversion systems. *Progress in Nuclear Energy*. 2018;108:111–121.  
<https://doi.org/10.1016/j.pnucene>
11. Chen Hongli, Zhang Xilin, Zhao Yongsing, Cao Liankai, Shi Kangli, Fang Haitao, Zeng Qin. Preliminary design of a medium-power modular lead-cooled fast reactor with the application of optimization methods. *International Journal of Energy Research*. 2018;42(11):3643–3657.
12. Ju Ping, Wu Feng, Chen Qian, Han Jingdong, Dai

#### **Критерии авторства**

Тюрина Э.А., Корнеева З.Р., Елсуков П.Ю. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в одинаковой мере несут ответственность за плагиат.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

##### **Тюрина Элина Александровна,**

доктор технических наук,  
ведущий научный сотрудник,  
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева,  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия;  
заведующая кафедрой теплоэнергетических систем,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;  
e-mail: tyurina@isem.irk.ru

##### **Корнеева Зайтуна Равильевна,**

кандидат технических наук,  
главный специалист,  
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева,  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия;  
e-mail: korneeva@isem.irk.ru

##### **Елсуков Павел Юрьевич,**

кандидат технических наук,  
научный сотрудник,  
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева,  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия;  
✉ e-mail: els@isem.irk.ru

- Ruhui, Wu Guoyang, Tang Yong. Model simplification of nuclear power plant for power system dynamic simulation. In: *Paper presented at the Proceedings – 2018. International Conference on Control, Artificial Intelligence, Robotics and Optimization, ICCAIRO*, 8–10 December, 2019, Athens, Athens: IEEE; 2019, p.260–266.
13. Hao Zhang, Liqiang Zhang, Yanfeng Qin, Tao Jiang, Ning Cao, Chuangbin Zhou, Huiming Che. Modeling and simulation of loss of power in nuclear power plant. In: *Paper presented at the 2018 International Conference on Power System Technology, POWERCON: Proceedings*, 6–8 November 2018, Guangzhou, Guangzhou: IEEE, 2018. p.4708–4714.
14. Redfoot EK, Borrelli RA. Analysis of nuclear renewable hybrid energy systems modeling and nuclear fuel cycle simulators. *Nuclear Technology*. 2018;204(3):249–259.
15. Osika LK. *Management of TPP construction investment projects. A pre-investment phase*. Moscow: Vershina; 2009. 344 p. (In Russ.)

#### **Authorship criteria**

Tyurina E.A., Korneeva Z.R., Elsukov P.Yu. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

#### **Conflict of interests**

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

##### **Elina A. Tyurina,**

Dr. Sci. (Eng.),  
Leading Researcher,  
Melentiev Energy Systems Institute,  
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia;  
Irkutsk National Research Technical University,  
Head of the Department of Heat and Power Systems,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;  
e-mail: tyurina@isem.irk.ru

##### **Zaituna R. Korneeva,**

Cand. Sci. (Eng.)  
Chief Specialist,  
Melentiev Energy Systems Institute,  
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia;  
e-mail: korneeva@isem.irk.ru

##### **Pavel Yu. Elsukov,**

Cand. Sci. (Eng.)  
Researcher,  
Melentiev Energy Systems Institute,  
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia;  
✉ e-mail: els@isem.irk.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.311.001; 621.316.1; 621.311.2

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-986-998>

## Полигон для тестирования алгоритмов автоматического вторичного регулирования частоты и активной мощности в энергосистеме

© Р.А. Уфа, А.С. Васильев, А.С. Ропперт, И.А. Разживин

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*

**Резюме:** Цель – в рамках данной статьи представить результаты разработки полигона для тестирования алгоритмов автоматического вторичного регулирования частоты и активной мощности в энергосистеме. В качестве инструментальной основы использован Всережимный моделирующий комплекс реального времени электроэнергетических систем, в котором реализована схема тестовой электроэнергетической системы, в то время как модель системы автоматического вторичного регулирования частоты и активной мощности реализована в программном комплексе MATLAB с применением библиотеки Simulink Desktop Real-Time. Для полигона разработано программное обеспечение на языке программирования C# для организации обмена данными между моделирующим комплексом и MATLAB/Simulink. В качестве теста платформы подготовлены и проведены эксперименты по воспроизведению процессов регулирования частоты и активной мощности при возникновении возмущений в электроэнергетической системе, в частности увеличение потребления мощности, которое приводит к небалансу активной мощности при использовании различных типов регуляторов системы автоматического вторичного регулирования частоты и мощности. В экспериментах создаваемый первичный небаланс мощности приводит к снижению частоты, не вызываящей действия противоаварийной автоматики. В процессе регулирования частоты, в зависимости от типов и настроек используемых регуляторов, по-разному осуществляется загрузка генераторов и элементов электрической сети. Соответственно, на основании исследований может быть проведена настройка регуляторов для обеспечения соответствия требованиям стандартов, действующих на территории Российской Федерации. Полученные результаты отражают корректность работы полигона и возможность использования его для решения задач модернизации и проверки алгоритмов автоматического вторичного регулирования частоты и перетоков мощности.

**Ключевые слова:** электроэнергетическая система, автоматическое вторичное регулирование частоты и активной мощности, алгоритм, полигон для тестирования

**Благодарности:** Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, грант №МК-2150.2019.9

**Информация о статье:** Дата поступления 24 апреля 2019 г.; дата принятия к печати 11 июня 2019 г.; дата онлайн-размещения 31 октября 2019 г.

**Для цитирования:** Уфа Р.А., Васильев А.С., Ропперт А.С., Разживин И.А. Полигон для тестирования алгоритмов автоматического вторичного регулирования частоты и активной мощности в энергосистеме. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т. 23. № 5. С. 986–998. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-986-998>

## Testing ground for the algorithms of automatic secondary regulation of frequency and active power flows in the electric power system

Ruslan A. Ufa, Aleksey S. Vasiliev, Alexander S. Roppert, Igor A. Razzhivin

*National research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia*

**Abstract:** The purpose of this article is to present the development results of a test site for testing algorithms of automatic secondary control of frequency and active power in the electric power system. The instrumental basis is formed by a hybrid real time simulator of electric power systems where the test electric power system circuit is implemented, while the model of the system of automatic secondary regulation of frequency and active power is implemented in the MATLAB software package using the Simulink Desktop Real-Time library. Software in the C# programming language is developed for the testing ground in order to organize the data exchange between the modeling complex and MATLAB/Simulink. To test the ground the authors have prepared and carried out the experiments on reproduction of frequency and active power flows.

er regulation processes that occur in case of disturbances in the electric power system, in particular, the increase in power consumption which leads to the imbalance of active power when using different types of automatic regulators of the automatic secondary frequency and power regulation system. In experiments, the primary power imbalance created decreases frequency that does not actuate automatic emergency response system. In the process of frequency control generators and elements of the electrical network are loaded in different ways depending on the types and settings of the regulators used. Therefore, the regulators can be adjusted in accordance with the research results to ensure compliance with the standards applicable in the territory of the Russian Federation. The obtained results reflect the correctness of the testing ground operation and the possibility of its use to solve the problems of modernization and testing of algorithms for automatic secondary control of frequency and power flows.

**Keywords:** *electric power system, automatic secondary regulation of frequency and active power flows, algorithm, testing ground.*

**Acknowledgements:** The work is performed under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, grant no. MK-2150.2019.9.

**Information about the article.** Received April 24, 2019; accepted for publication June 11, 2019; available online October 31, 2019.

**For citation.** Ufa RA, Vasiliev AS, Roppert AS, Razzhivin IA. Testing ground for the algorithms of automatic secondary regulation of frequency and active power flows in the electric power system. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2019;23(5):986–998. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-986-998>

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие и совершенствование электроэнергетической системы (ЭЭС), в основном связанное с реализацией концепции интеллектуальных ЭЭС, определяют необходимость в модернизации и проверке алгоритмов централизованной системы автоматического вторичного регулирования частоты и перетоков мощности (АВРЧМ).

Потребность в развитии централизованной системы автоматического регулирования частоты и активной мощности в энергосистеме обоснована изменением рыночных условий и повышением уровня информатизации в энергетике, развитием вычислительной техники и появлением большого числа векторных измерительных преобразователей (PMU – Phasor Measurement Unit), необходимостью повышения надежности энергосистем и изменением состава генерирующего оборудования [1–3] и т.д. В России функционирование АВРЧМ реализовано на базе оперативного информационного комплекса (ОИК СК-2007).

При этом внесение изменений в настройки АВРЧМ и добавление новых алгоритмов требуют их тестирования на адекватной модели ЭЭС. Специфика данных работ определяет следующие требо-

вания к системам моделирования [4, 5]:

- трехфазное моделирование ЭЭС с возможностью его воспроизведения большой размерности;

- полное и детальное воспроизведение оборудования ЭЭС, участвующего в процедуре первичного и вторичного регулирования (с учетом первичного двигателя, реакции котлоагрегатов, необходимой автоматики);

- неограниченный интервал воспроизведения процессов.

Кроме этого дополнительными факторами являются возможность взаимодействия с внешними устройствами и реальное время моделирования для осуществления при необходимости тестирования в замкнутом цикле (close-loop testing) [6–8].

Анализ существующих комплексов показывает, что в полной мере данным требованиям соответствуют современные «гибридные» (co-simulation) программно-аппаратные средства моделирования зарубежных компаний («RDTs», «HyperSim», «ADPSS»), свойства и возможности которых представлены в [9–12]. В России одним из таких комплексов является всережимный моделирующий комплекс реального времени электроэнергетических систем (ВМК РВ ЭЭС) [13–15]. Отличительная особенность ВМК РВ ЭЭС – применение гибридного подхода моделирования, который



заключается в использовании сразу трех его уровней (аналоговый, физический, цифровой).

## 2. ОПИСАНИЕ КОНЦЕПЦИИ И ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ ВСЕРЕЖИМНОГО МОДЕЛИРУЮЩЕГО КОМПЛЕКСА РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

ВМК РВ ЭЭС реализован на применении и объединении следующих уровней моделирования.

**Аналоговый** – для устранения методической погрешности интегрирования. Весь спектр значимых процессов в оборудовании полно и достоверно описывается теоретически строго обоснованными и надежно проверенными системами дифференциальных уравнений, поэтому оборудование ЭЭС (кроме коммутационных элементов) воспроизводится путем математического моделирования.

Решение обозначенных систем дифференциальных уравнений математических моделей оборудования ЭЭС осуществляется с помощью метода непрерывного (аналогового), неявного, точного интегрирования в реальном времени и на неограниченном интервале, позволяющем разрабатывать эффективные средства, исключающие необходимость применения упрощений математических моделей, ограничения интервала решения, методическую ошибку вычисления.

**Физический** – для обеспечения адекватного воспроизведения всего спектра коммутационных процессов, в т.ч. силовых полупроводниковых ключей. Ввиду отсутствия надежных теоретических основ для разработки адекватных математических моделей, достаточно полно и достоверно описывающих спектр коммутационных процессов, моделирование различных коммутаций силовых полупроводниковых ключей, линейных выключателей и разнообразных коротких замыканий наиболее эффективным является их воспроизведение на модельном физическом уровне.

Для связи аналогового и физического уровней моделирования, непрерывные математические переменные входных/выходных токов математических моделей преобразуются с помощью преобразователей напряжение-ток в соответствующие им модельные физические токи, благодаря чему обеспечивается естественное взаимодействие моделируемого оборудования.

**Цифровой** – осуществление цифро-аналогового, аналого-цифрового преобразования и применение IT-технологии для обеспечения всех необходимых информационно-управляющих функций, включая моделирование систем автоматического управления и релейной защиты, автоматизированное и автоматическое управление, в т.ч. функциональное с параметрами моделируемого оборудования ЭЭС, преобразование и отображение информации. Рассмотрим рис. 1.

Основным элементом ВМК РВ ЭЭС являются специализированные процессоры (СП), с помощью которых реализуются физико-математические модели оборудования ЭЭС. Как отмечалось ранее, в структуре ВМК РВ ЭЭС естественное функциональное взаимодействие СП в узлах ЭЭС обеспечивается на модельном физическом уровне с помощью коммутатора трехфазных узлов (КТУ). Информационно-управляющее взаимодействие СП осуществляется посредством микропроцессорного узла (МПУ), связанного по локальной компьютерной сети (ЛКС) с сервером ВМК РВ ЭЭС через сетевой коммутатор (СК).

В базе данных сервера (или МПУ каждого СП) хранятся начальные данные параметров решаемых физико-математических моделей оборудования ЭЭС.

Для пользователей ВМК РВ ЭЭС создано профессионально-ориентированное программное обеспечение (ПО) автоматизированного рабочего места (АРМ) клиента, без ограничений устанавливаемое на сервере и на компьютерах пользователей во внешних компьютерных сетях (ВКС) и информационно взаимодействующих с сервером.



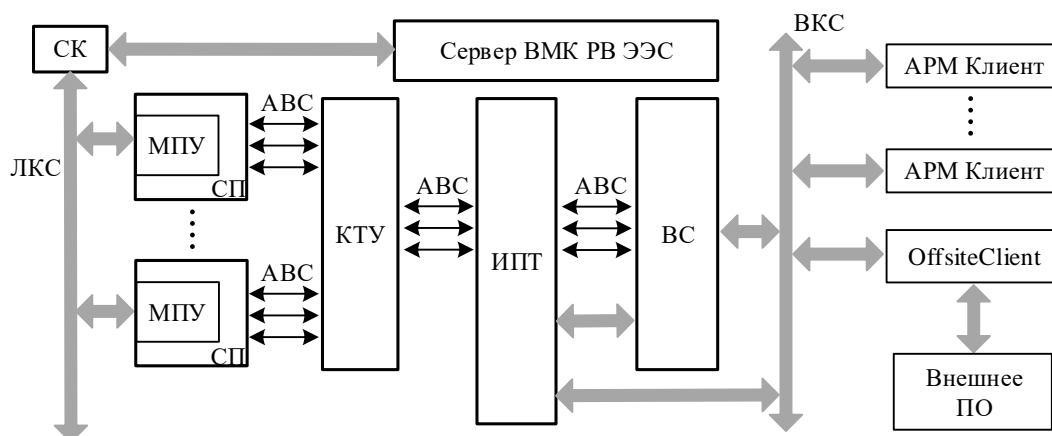


Рис. 1. Структурная схема всережимного моделирующего комплекса реального времени электроэнергетических систем

Fig. 1. Block diagram of the hybrid real time simulator of electric power systems

ПО OffsiteClient позволяет осуществлять взаимосвязь между сервером и внешним ПО.

Для информационно-управляющего и физического взаимодействия с реальным оборудованием – станциями управления устройствами, различными информационно-управляющими системами и другими внешними средствами (ВС) – разработаны и используются соответствующие интерфейсные программные и программно-технические средства (ИПТ), имеющие для физического взаимодействия с внешними средствами согласующие усилители и информационные взаимосвязи с сервером и СП по локальной и внешним компьютерным сетям.

Более подробная информация о

принципах построения СП и ВМК РВ ЭЭС в целом представлена в [15, 16].

### 3. ОПИСАНИЕ ПОЛИГОНА ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВТОРИЧНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ И ПЕРЕТОКОВ МОЩНОСТИ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

Установка для проведения необходимых экспериментов включает в себя модель ЭЭС, которая реализована в ВМК РВ ЭЭС, и модель системы АВРЧМ, алгоритм которой реализован в программном комплексе MATLAB с применением библиотеки Simulink Desktop Real-Time (рис. 2) [17].

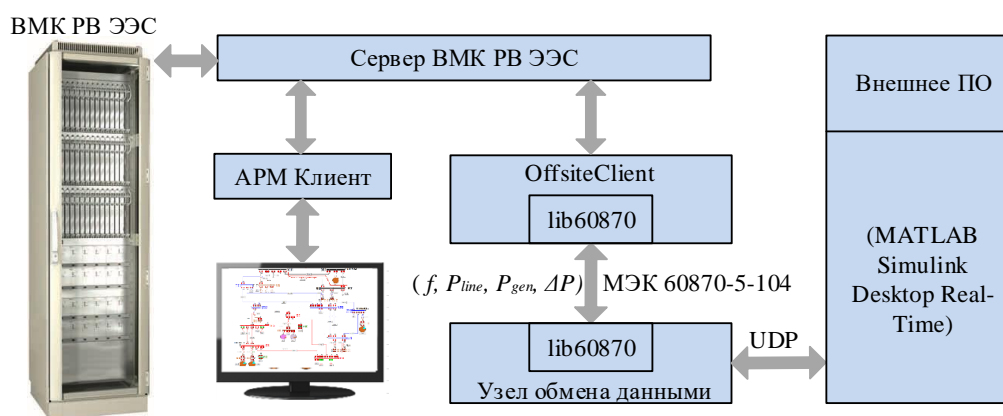


Рис. 2. Структурная схема полигона для тестирования алгоритмов автоматического вторичного регулирования частоты и перетоков мощности

Fig. 2. Structural diagram of a testing ground for the algorithms of automatic secondary regulation of frequency and power flows



Обмен данными между ВМК РВ ЭЭС и MATLAB осуществляется следующим образом:

1) ПО OffsiteClient выполняется запрос и получение от сервера ВМК РВ ЭЭС оперативной информации (значение частоты ( $f$ ), перетоков активной мощности по линиям ( $P_{line}$ ) и трансформаторам, текущее значение и величину резерва на увеличение/снижение выдаваемой активной мощности электростанций  $P_{gen}$  и  $\Delta P$ ) с объектов ЭЭС;

2) эта оперативная информация передается в MATLAB через узел обмена

данными, который конвертирует полученные по протоколу Международной электротехнической комиссии (МЭК) 60870-5-104 сведения в UDP (User Datagram Protocol), поддерживаемые MATLAB<sup>1</sup>;

3) формируемые в MATLAB управляющие воздействия от АВРЧМ на электростанции передаются обратно в ВМК РВ ЭЭС через узел обмена данными, OffsiteClient и сервер ВМК РВ ЭЭС.

Графический редактор конфигурации узла обмена данными и конфигуратор протокола передачи данных в ВМК РВ ЭЭС для OffsiteClient показаны на рис. 3, 4.

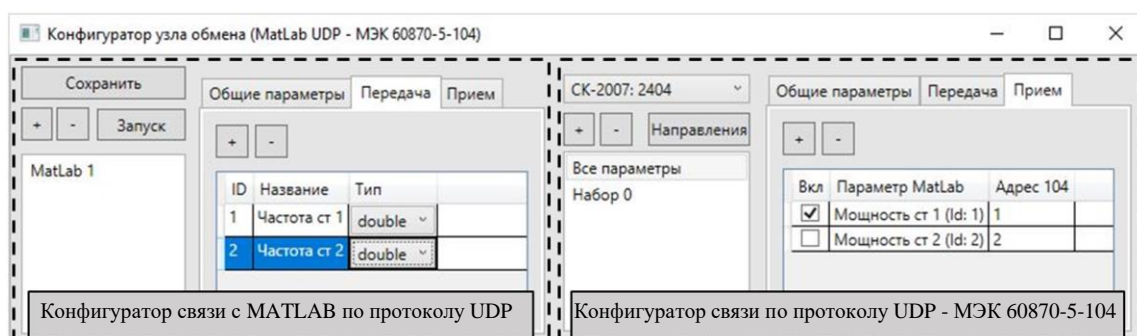


Рис. 3. Конфигуратор узла обмена данными с моделью реального времени по протоколу Международной электротехнической комиссии 60870-5-104

Fig. 3. Configurator of the data exchange node with the real-time model via the International electrotechnical commission protocol 60870-5-104

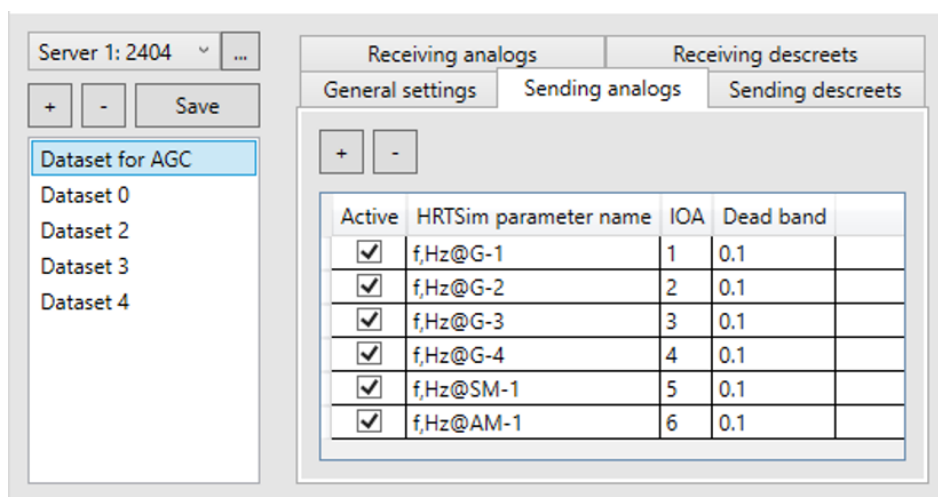
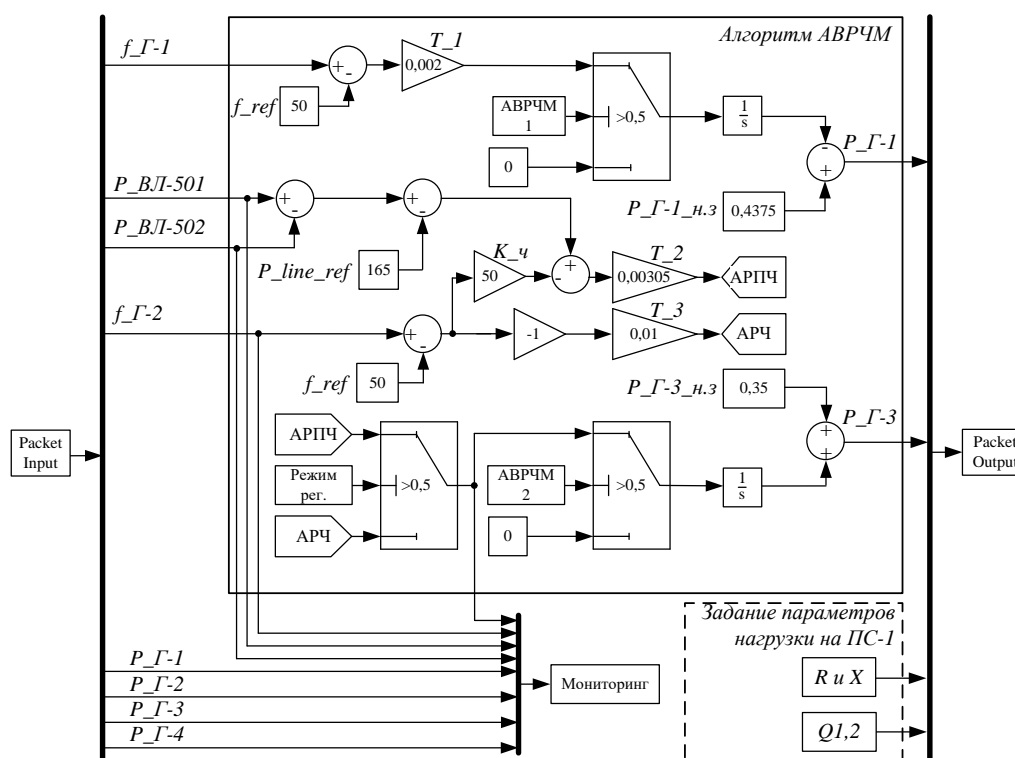


Рис. 4. Конфигуратор протокола передачи данных всережимного моделирующего комплекса реального времени электроэнергетических систем

Fig. 4. Configurator of the data transfer protocol of the hybrid real time simulator of electric power systems

<sup>1</sup>ГОСТ Р МЭК 60870-5-104-2004. Устройства и системы телемеханики. Введ. 01.07.2005. М.: Изд-во стандартов, 2004.



**Рис. 5. Структурная схема формирования возмущающих воздействий в электроэнергетических системах и управляющих воздействиях алгоритмов автоматического вторичного регулирования частоты и перетоков мощности**

**Fig. 5. Block diagram of disturbance formation in electric power systems and control actions of algorithms of automatic secondary frequency and power flow control**

Поддержка протокола МЭК 60870-5-104 была реализована при помощи библиотеки lib60870.NET, написанной на языке C++. На рис. 5 представлена структурная схема АВРЧМ, реализованная в Matlab Simulink.

На рис. 5 приняты следующие обозначения:  $f_{Г-1}$  и  $f_{Г-2}$  – частота, измеряемая в смежной энергосистеме и на генераторе Г-2, соответственно;  $f_{ref}$  – заданное значение частоты в ЭЭС;  $P_{line\_ref}$  – заданное значение суммарного внешнего (сальдо) перетока (мощность Г-1);  $P_{ВЛ-501}$  и  $P_{ВЛ-502}$  – величина фактического перетока мощности в контролируемом сечении;  $T_1$  – постоянная времени интегрирования регулятора частоты в смежной энергосистеме;  $T_2$  – постоянная времени интегрирования в контуре автоматического регулирования перетока с коррекцией по частоте (АРПЧ);  $T_3$  – постоянная времени интегрирования по отклонению частоты в контуре автоматического вторичного регулирования частоты в энергосистеме (АРЧ);

$K_ч$  – заданный коэффициент коррекции по частоте области регулирования;  $P_{Г-1\_н.з.}$  и  $P_{Г-3\_н.з.}$  – начальное значение генерируемой мощности;  $P_{Г-1}$  и  $P_{Г-3}$  – начальное значение генерируемой мощности. Константа «Режим рег.», переключает режимы работы автоматического регулятора между АРПЧ (0) и АРЧ (1). Константы «АРЧМ 1», «АРЧМ 2» включают (1) / отключают (0) АВРЧМ.

#### 4. ПОДГОТОВКА К ПРОВЕДЕНИЮ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Процесс тестирования АВРЧМ выполняется в два этапа: подготовительный и основной.

На первом этапе выполняется подготовка объекта испытаний и средств проведения испытаний:

- конфигурация модели ЭЭС;
- настройка встроенных стандартных средств ВМК РВ ЭЭС регистрации режимных параметров модели ЭЭС и управ-



ляющих воздействий АВРЧМ;

– формирование и проверка набора сценариев, выполнение которых с заданными характеристиками качества регулирования позволяет сделать вывод об эффективности алгоритмов и о корректности работы АВРЧМ в целом;

– подготовка АВРЧМ (трансляция существующей системы АВРЧМ на полигон тестирования и ввод новых параметров и алгоритмов);

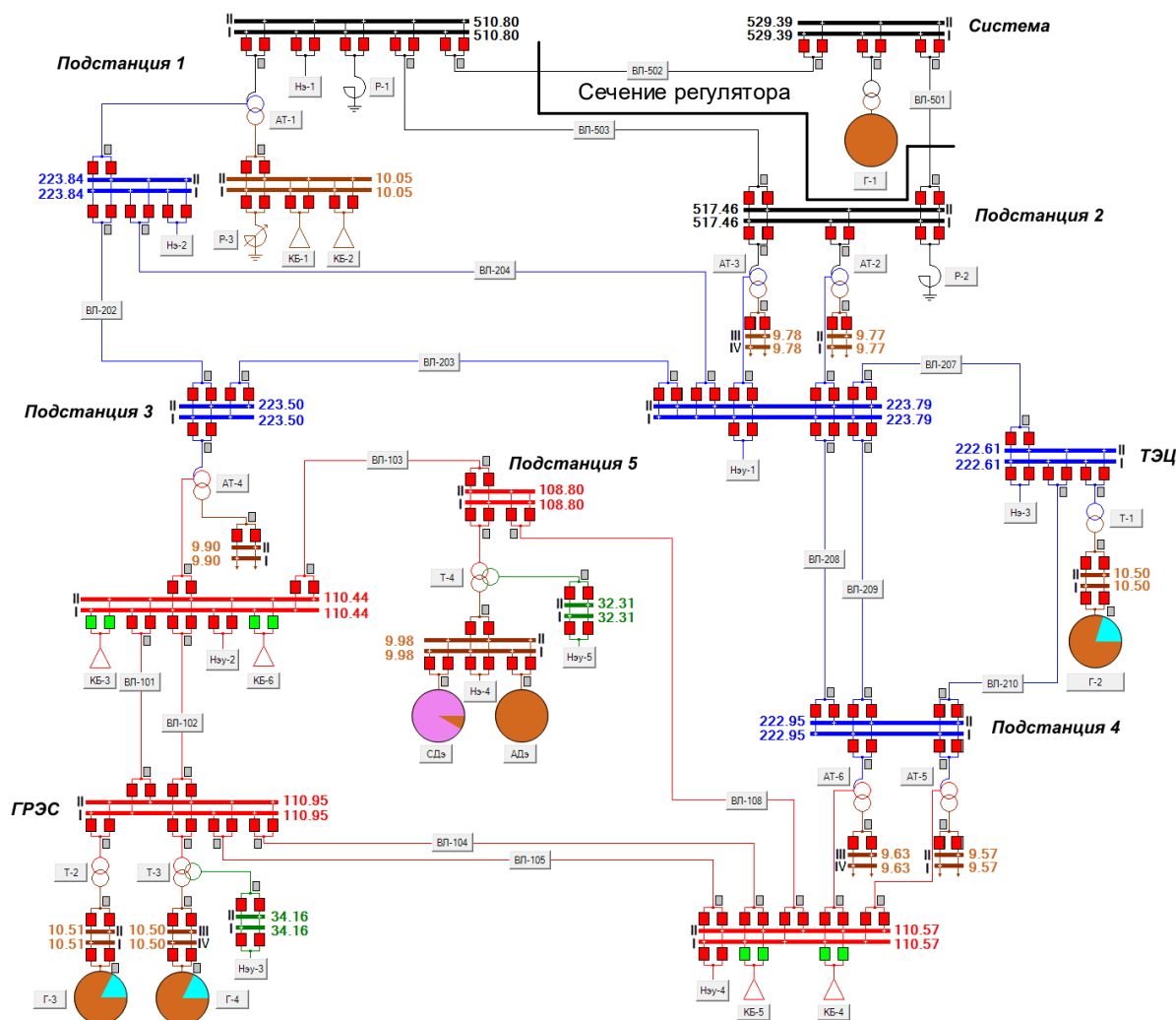
– конфигурация протокола двусто-

ронного обмена данными.

На втором этапе проводится непосредственно последовательный запуск всех тестовых сценариев, фиксируются результаты, которые подвергаются анализу, и формируется заключение о готовности и применимости АВРЧМ.

## 5. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 6 представлена схема реализованной в ВМК РВ ЭЭС модели ЭЭС.



**Рис. 6. Моделируемая тестовая схема в электроэнергетических системах (однолинейный вид всережимного моделирующего комплекса реального времени электроэнергетических систем):**

**Г** – генераторы; **СД, АД** – синхронный и асинхронный двигатели;

**АТ** – автотрансформаторы; **Т** – трансформаторы; **ВЛ** – линии электропередачи;

**Н** – статические нагрузки; **КБ** – конденсаторные батареи; **Р** – реакторы

**Fig. 6. Simulated test circuit in electric power systems (single-line view of the hybrid real time simulator of electric power systems):** **Г** – generators; **СД, АД** – synchronous and induction motors; **АТ** – autotransformers; **Т** – transformers; **ВЛ** – transmission lines; **Н** – static loads; **КБ** – capacitor banks; **Р** – reactors

Согласно рис. 6 в модели ЭЭС представлены эквивалентная модель смежной энергосистемы (Г-1) и три модели энергоблоков (Г 2-4), которые могут участвовать в АВРЧМ.

Согласно сценарию, в момент времени равный 10 с происходит возмущение воздействия (подключение нагрузки на ПС-1), которое приводит к небалансу активной мощности. При этом величина небаланса подобрана такая, чтобы отклонение частоты не вызывало срабатывания противоаварийной автоматики.

Далее проводится четыре эксперимента, при которых меняется режим работы системы АВРЧМ:

1) на всех энергоблоках (Г 1-4) есть только первичное регулирование;

2) на всех энергоблоках (Г 1-4) есть первичное регулирование, автоматическое регулирование частоты реализовано на Г-1 и Г-3;

3) на всех энергоблоках (Г 1-4) есть

первичное регулирование, АРЧ реализовано на Г-3 и АРПЧ на Г-3 конденсационной электростанции (ГРЭС);

4) то же самое, что и в 3 опыте, только при внешнем возмущении (вместо подключения нагрузки на ПС-1 снижается генерация во внешней системе).

Результаты экспериментов представлены в таблице и на рис. 7 (ТЭЦ – тепловая электростанция).

## 6. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

По полученным результатам видно:

1) в первом эксперименте (рис. 7 а) отклонения частоты и вырабатываемой мощности генераторов в установившемся режиме от заданных значений определяются только действием первичных регуляторов скорости всех генераторов (заданными коэффициентами статизма регулирования частоты) и величиной возникшего небаланса;

**Значения мощностей в электроэнергетических системах**  
**Capacity values in electric power systems**

№ эксперимента	Тип регуляторов	Переток мощности из Г-1, МВт	Мощность Г-2, МВт	Мощность Г-3, МВт	Мощность Г-4, МВт	Частота, Гц	Время завершения переходного процесса по частоте / по активной мощности, с
Исходное значение		165,5	106,9	68,5	44,0	50,00	–
1	Без АВРЧМ	219,4/ 196,3	126,6/ 122,2	88,8/ 84,0	54,1/ 52,5	49,34/ 49,58	-/-
2	АРЧ на Г-1 и Г-3	219,8/ 211,1	127,0/ 107,4	92,7/ 91,4	54,7/ 44,9	49,35/ 50,00	300/-
3	АРЧ на Г-1 и АРПЧ на Г-3	221,0/ 167,8	126,6/ 110,0	135,7/ 134,7	54,4/ 44,1	49,35/ 50,01	90/430
4	АРЧ на Г-1 и АРПЧ на Г-3	121,4/ 158,6	124,5/ 108,5	88,5/ 72,7	53,5/ 46,1	49,46/ 49,96	468/870

*Примечание / Note.* Значения мощностей указаны через дробь: при максимальном ее отклонении / через 10 мин после возникновения небаланса / The values of capacities are indicated through a slash: at their maximum deviation / in 10 minutes after imbalance occurrence

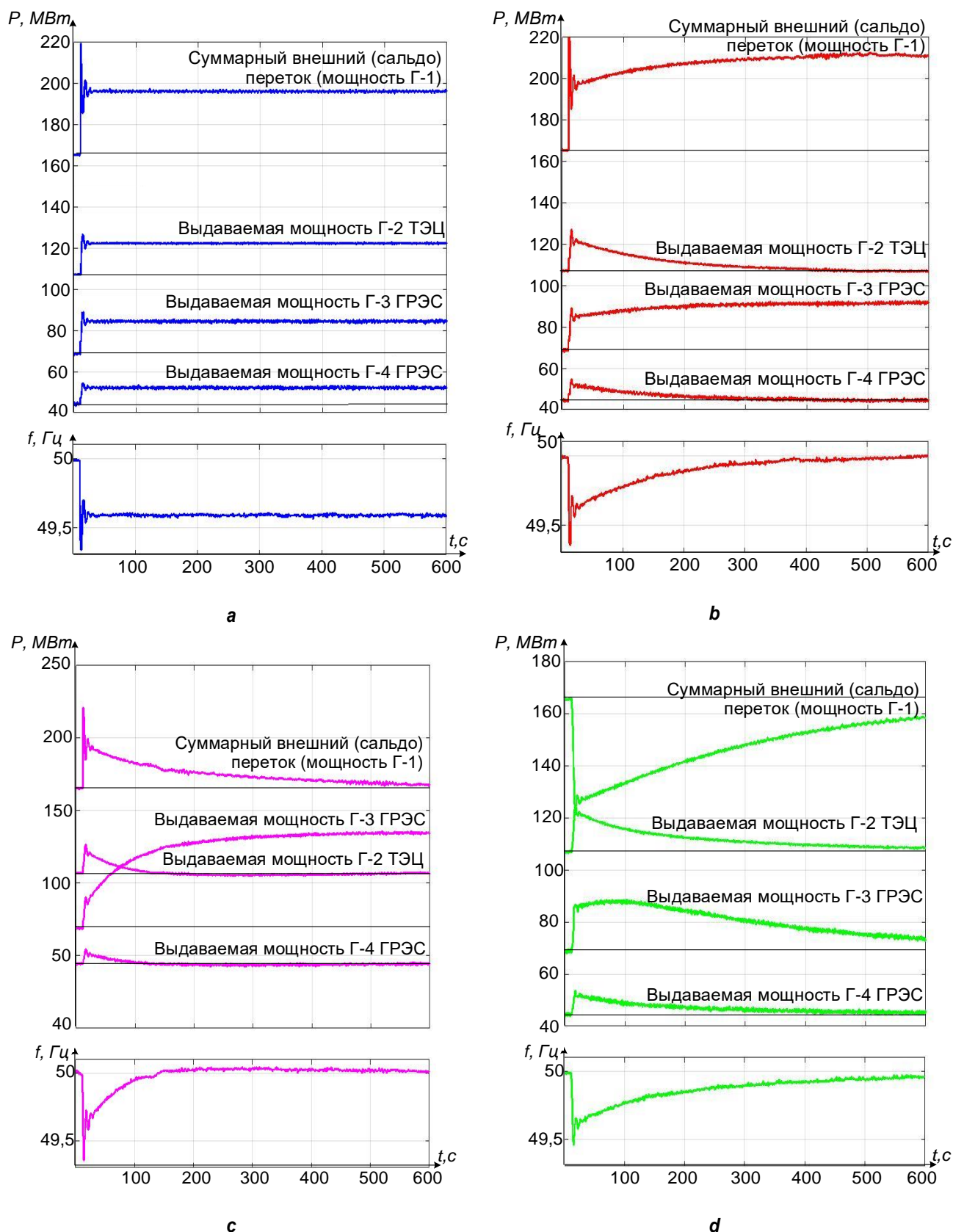


Рис. 7. Осциллограммы мощности и частоты в электроэнергетических системах в первом (а), втором (b), третьем (c) и четвертом (d) экспериментах  
Fig. 7. Oscillograms of power flow and frequency in electric power system in the first (a), second (b), third (c) and forth (d) experiments

2) во втором эксперименте, когда во вторичном регулировании частоты участвуют генераторы смежной энергосистемы (Г-1) и генератор Г-3, по мере восстановления частоты происходит восстановление резерва первичного регулирования. Возникший небаланс компенсируется за счет вторичных резервов активной мощности смежной энергосистемы (Г-1) и генератора Г-3, однако суммарный внешний переток по сечению отклоняется от начального значения, что может привести к перегрузке сечения. Согласно принципу регулирования частоты небаланс должен быть скомпенсирован резервами той энергосистемы, в которой он возник. Этому принципу соответствуют третий и четвертый эксперимент, которые отличаются только местом возникновения небаланса;

3) в третьем эксперименте знаки отклонений перетока и частоты свидетельствуют о возникновении небаланса в исследуемой энергосистеме, и вторичные резервы мощности быстро мобилизуются для восстановления перетока с учетом коррекции по частоте. По мере восстановления частоты восстанавливаются резервы первичного регулирования. Однако пока существующее отклонение по частоте АРЧ смежной энергосистемы успевает изменить выдаваемую мощность электростанций смежной энергосистемы (Г-1), что приводит к тому, что переток еще не восстанавливается до заданного значения, а частота уже превышает его. При этом АЧР смежной энергосистемы (Г-1) начинает восстанавливать резервы вторичного регулирования, а АРПЧ исследуемой энергосистемы продолжает увеличивать нагрузку генератора Г-3, что постепенно приводит к восстановлению перетока и частоты до заданного значения;

4) в четвертом эксперименте генератор Г-3 задействуется в регулировании частоты практически только за счет статиз-

ма первичного регулирования частоты, поскольку регулятор перетока с коррекцией по частоте и не мобилизует вторичную мощность. Восстановление частоты при этом происходит медленнее, поскольку в регулировании частоты участвует только генератор внешней энергосистемы (Г-1).

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Свойства и возможности ВМК РВ ЭЭС, а также представленные результаты исследований показывают возможности использования ВМК РВ ЭЭС в качестве полигона для тестирования алгоритмов АВРЧМ в энергосистеме.

2. Согласно проведенным экспериментам при возникновении возмущений в ЭЭС и применении различных способов регулирования частоты и мощности можно отметить:

- частота успевает восстановиться до нормальных значений в течение 15 мин., что соответствует требованиям стандартов<sup>2,3</sup>;

- переток мощности по контролируемому сечению при действии регулятора в режиме АРПЧ восстанавливается до планового значения с учетом коррекции по частоте;

- при возмущении внутри энергосистемы и действии АРПЧ частота восстанавливается до нормальных значений быстрее перетока мощности (опыт 3);

- АРПЧ реагирует на небаланс мощности в собственной энергосистеме (опыт 3), и не реагирует на возмущения в районах регулирования других систем АВРЧМ (опыт 4);

- так как при внешнем небалансе восстановление частоты происходит только за счет АРЧ системы (опыт 4), частота восстанавливается медленнее, чем во 2 опыте.

3. В дальнейшем для исследований и анализа процессов в ЭЭС при управле-

<sup>2</sup>ГОСТ Р 55890-2013. Оперативно-диспетчерское управление регулирование частоты и перетоков активной мощности. Нормы и требования. Введ. 01.09.2014. М.: Стандартинформ, 2014. 41 с.

<sup>3</sup>СТО 59012820.27.100.003-2012. Регулирование частоты и перетоков активной мощности в ЕЭС России. Нормы и требования. Введ. 05.12.2012. М.: Стандартинформ, 2012.





нии спросом на электроэнергию (power demand) при реализации функции АВРЧМ планируется задействовать управляе-

мую/регулируемую нагрузку в соответствии с моделью агрегаторов управления спросом.

### Библиографический список

1. Bucher R. Smart grid functionality for the high-voltage transmission grid: On the market readiness of Digital Substation 2.0 technology // Conference Saudi Arabia Smart Grid (SASG). (Jeddah, 12–14 December 2017). New Jersey: IEEE, 2017. <https://doi.org/10.1109/SASG.2017.8356487>
2. Kazičková T., Buhnova B. ICT architecture for the Smart Grid: Concept overview // Smart Cities Symposium Prague (SCSP). (Prague, 26–27 May 2016). New Jersey: IEEE, 2016. <https://doi.org/10.1109/SCSP.2016.7501035>
3. Vineetha C.P., Babu C.A. Smart grid challenges, issues and solutions // International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG). (Taipei, 23–25 April 2014). New Jersey: IEEE, 2014. <https://doi.org/10.1109/IGBSG.2014.6835208>
4. Qi Dacai. Defense schema against large disturbances in China Southern Power Grid // Electra. 2011. Vol. 257. P. 4–16.
5. Ou Kaijian, Rao Hong, Cai Zexiang, Guo Haiping, Lin Xuehua, Guan Lin, Maguire T., Warkentin B., Chen Yuan. MMC-HVDC simulation and testing based on real-time digital simulator and physical control system // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. 2014. Vol. 2. No. 4. P. 1109–1116. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2014.2337512>
6. Jin-Hong Jeon, Jong-Yul Kim, Hak-Man Kim, Seul-Ki Kim, Changhee Cho, Jang-Mok Kim, Jong-Bo Ahn, Kee-Young Nam. Development of Hardware In-the-Loop Simulation System for Testing Operation and Control Functions of Microgrid // IEEE Transactions on Power Electronics. 2010. Vol. 25. No. 12. P. 2919–2929. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2010.2078518>
7. Iracheta-Cortez R., Flores-Guzman N. Developing automated Hardware-In-the-Loop tests with RTDS for verifying the protective relay performance // IEEE 36th Central American and Panama Convention (CONCAPAN XXXVI) (San Jose, 9–11 November 2016). New Jersey: IEEE, 2016. <https://doi.org/ieeexplore.ieee.org/document/7942388>
8. Leite H., Almeida E., Silva N. Real-time closed-loop test to adaptive protection in a smart-grid context // 13th International Conference on Development in Power System Protection (DPSP) (Edinburgh, 1 January 2016). Stevenage: Institution of Engineering and Technology, 2016. P. 1–5. <https://doi.org/10.1049/cp.2016.0061>
9. Forsyth P., Kuffel R. Utility applications of a RTDS® Simulator // International Power Engineering Conference (IPEC) (Singapore, 3–6 December 2007, Singapore). New Jersey: IEEE, 2007. P. 112–117.
10. Shu Dewu, Xie Xiaorong, Jiang Qirong, Huang Qiuhua, Zhang Chunpeng. A novel interfacing technique for distributed hybrid simulations combining EMT and transient stability models // IEEE Transactions on Power Delivery. 2018. Vol. 33. No. 1. P. 130–140. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2017.2690145>
11. Dubey A., Chakrabarti S., Sharma A., Panigrahy N. Real-time Implementation of Synchrophasor Based Linear State Estimator in OPAL-RT HYPERSIM // International Conference and Utility Exhibition on Green Energy for Sustainable Development (ICUE) (Phuket, 24–26 October 2018). New Jersey: IEEE, 2018. P. 1–8. <https://doi.org/10.23919/ICUE-GESD.2018.8635713>
12. Tang Yonghong, Xu Lin, Jiang Zhenchao, Liu Junyong, Shen Xiaodong, Xu Lixiong, Sun Xiaoyan. AVC testing platform design and implementation for the regional power grid based on advanced digital power system simulator // The 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT) (Changsha, 26–29 November 2015). New Jersey: IEEE, 2015. P. 340–345. <https://doi.org/10.1109/DRPT.2015.7432254>
13. Andreev M.V., Gusev A.S., Ruban N.Yu., Suvorov A.A., Ufa R.A., Askarov A.B., Bemš J., Králík T. Hybrid real-time simulator of large-scale power systems // IEEE Transactions on Power Systems. 2019. Vol. 34. No. 2. P. 1404–1415. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2876668>
14. Andreev M., Borovikov Yu., Gusev A., Sulaymanov A., Ruban N., Suvorov A., Ufa R., Bemš J., Králík T. Application of hybrid real-time power system simulator for research and setting a momentary and sustained fast turbine valving control // IET Generation, Transmission and Distribution. 2018. Vol. 12. No. 1. P. 133–141. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.0356>
15. Андреев М.В., Боровиков Ю.С., Гусев А.С., Сулайманов А.О., Суворов А.А., Рубан Н.Ю., Уфа Р.А. Концепция и базовая структура всережимного моделирующего комплекса // Газовая промышленность. 2017. № 5. С. 18–27.
16. Андреев М.В., Боровиков Ю.С., Гусев А.С., Сулайманов А.О., Суворов А.А., Рубан Н.Ю., Уфа Р.А. Практическое применение всережимного моделирующего комплекса электроэнергетических систем // Газовая промышленность. 2017. № 6. С. 94–104.
17. Simulink Desktop Real-Time. User's Guide // MathWorks. 2015, 116 p. [Электронный ресурс]. URL: [https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/845043405443236/rtwin\\_target\\_ug\\_r2015a.pdf](https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/845043405443236/rtwin_target_ug_r2015a.pdf) (15.03.2018).



## References

1. Bucher R. Smart grid functionality for the high-voltage transmission grid: On the market readiness of Digital Substation 2.0 technology. In: *Conference Saudi Arabia Smart Grid (SASG)*, 12–14 December 2017, Jeddah. New Jersey: IEEE; 2017. <https://doi.org/10.1109/SASG.2017.8356487>
2. Kazičková T, Buhnova B. ICT architecture for the Smart Grid: Concept overview. In: *Smart Cities Symposium Prague (SCSP)*, 26–27 May 2016, Prague. New Jersey: IEEE; 2016. <https://doi.org/10.1109/SCSP.2016.7501035>
3. Vineetha CP, Babu CA. Smart grid challenges, issues and solutions. In: *International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG)*, 23–25 April 2014, Taipei. New Jersey: IEEE; 2014. <https://doi.org/10.1109/IGBSG.2014.6835208>
4. Qi Dacai. Defense schema against large disturbances in China Southern PowerGrid. *Electra*. 2011;257:4–16.
5. Ou Kaijian, Rao Hong, Cai Zexiang, Guo Haiping, Lin Xuehua, Guan Lin, Maguire T., Warkentin B., Chen Yuan. MMC-HVDC simulation and testing based on real-time digital simulator and physical control system. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2014;2(4):1109–1116. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2014.2337512>
6. Jin-Hong Jeon, Jong-Yul Kim, Hak-Man Kim, Seul-Ki Kim, Changhee Cho, Jang-Mok Kim, Jong-Bo Ahn, Kee-Young Nam. Development of Hardware In-the-Loop Simulation System for Testing Operation and Control Functions of Microgrid. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2010;25(12):2919–2929. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2010.2078518>
7. Iracheta-Cortez R, Flores-Guzman N. Developing automated Hardware-In-the-Loop tests with RTDS for verifying the protective relay performance. In: *IEEE 36th Central American and Panama Convention (CONCAPAN XXXVI)*, 9–11 November 2016, San Jose. New Jersey: IEEE; 2016. <https://doi.org/10.1109/ieexplore.2016.7942388>
8. Leite H, Almeida E, Silva N. Real-time closed-loop test to adaptive protection in a smart-grid context. In: *13th International Conference on Development in Power System Protection (DPSP)*, 1 January 2016, Edinburgh, Edinburgh: Institution of Engineering and Technology; 2016, p. 1–5. <https://doi.org/10.1049/cp.2016.0061>
9. Forsyth P, Kuffel R. Utility applications of a RTDS® Simulator. In: *International Power Engineering Conference (IPEC)*, 3–6 December 2007, Singapore. New Jersey: IEEE; 2007, p. 112–117.
10. Shu Dewu, Xie Xiaorong, Jiang Qirong, Huang Qihua, Zhang Chunpeng. A novel interfacing technique for distributed hybrid simulations combining EMT and transient stability models. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2018;33(1):130–140. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2017.2690145>
11. Dubey A, Chakrabarti S, Sharma A, Panigrahy N. Real-time Implementation of Synchrophasor Based Linear State Estimator in OPAL-RT HYPERSIM. In: *International Conference and Utility Exhibition on Green Energy for Sustainable Development (ICUE)*, 24–26 October 2018, Phuket. New Jersey: IEEE; 2018, p. 1–8. <https://doi.org/10.23919/ICUE-GESD.2018.86357>
12. Tang Yonghong, Xu Lin, Jiang Zhenchao, Liu Junyong, Shen Xiaodong, Xu Lixiong, Sun Xiaoyan. AVC testing platform design and implementation for the regional power grid based on advanced digital power system simulator. In: *The 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*, 26–29 November 2015, Changsha. New Jersey: IEEE; 2015, p. 340–345. <https://doi.org/10.1109/DRPT.2015.7432254>
13. Andreev MV, Gusev AS, Ruban NYu, Suvorov AA, Ufa RA, Askarov AB, Bemš J, Králík T. Hybrid real-time simulator of large-scale power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2019;34(2):1404–1415. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2876668>
14. Andreev MV, Borovikov YuS, Gusev AS, Sulaymanov AO, Ruban NYu, Suvorov AA, Ufa RA, Bemš J, Králík T. Application of hybrid real-time power system simulator for research and setting a momentary and sustained fast turbine valving control. *IET Generation, Transmission and Distribution*. 2018;12(1):133–141. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.0356>
15. Andreev MV, Borovikov YuS, Gusev AS, Sulaimanov AO, Suvorov AA, Ruban NYu, Ufa RA. Concept and basic structure of the all-mode modeling complex. *Gas Industry of Russia*. 2017;5:18–27. (In Russ.)
16. Andreev MV, Borovikov YuS, Gusev AS, Sulaimanov AO, Suvorov AA, Ruban NYu, Ufa RA. Practical application of the hybrid real-time power system simulator. *Gas Industry of Russia*. 2017;6:94–104. (In Russ.)
17. Simulink Desktop Real-Time. User's Guide. *MathWorks* 2015, 116 p. Available from: [https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/845043405443236/rtwin\\_target\\_ug\\_r2015a.pdf](https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/845043405443236/rtwin_target_ug_r2015a.pdf) [Accessed 15th March 2018].

## Критерии авторства

Уфа Р.А., Васильев А.С., Ропперт А.С., Разживин И.А. провели разработку полигона, подготовку и анализ результатов представленных исследований, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

## Authorship criteria

Ufa R.A., Vasiliev A.S., Roppert A.S., Razzhivin I.A. developed a testing ground, prepared and analyzed the results of the presented studies. They have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.



#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

#### Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

##### Уфа Руслан Александрович,

кандидат технических наук,  
доцент отделения электроэнергетики  
и электротехники,  
Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет,  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия;  
✉ e-mail: hecn@tpu.ru

##### Васильев Алексей Сергеевич,

кандидат технических наук,  
доцент отделения электроэнергетики  
и электротехники,  
Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет,  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия;  
e-mail: vasilevas@tpu.ru

##### Ропперт Александр Сергеевич,

студент,  
Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет,  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия;  
e-mail: roppert1995@mail.ru

##### Разживин Игорь Андреевич,

ассистент,  
Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет,  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия;  
e-mail: lionrash@tpu.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

##### Ruslan A. Ufa,

Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor of the Department of Electrical  
Power Engineering and Electrical Engineering,  
National Research Tomsk Polytechnic University,  
30 Lenin pr., Tomsk 634050, Russia,  
✉ e-mail: hecn@tpu.ru

##### Aleksey S. Vasiliev,

Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor of the Department of Electrical  
Power Engineering and Electrical Engineering,  
National Research Tomsk Polytechnic University,  
30 Lenin pr., Tomsk 634050, Russia,  
e-mail: vasilevas@tpu.ru

##### Alexander S. Roppert,

Student,  
National Research Tomsk Polytechnic University,  
30 Lenin pr., Tomsk 634050, Russia,  
e-mail: roppert1995@mail.ru

##### Igor A. Razzhivin,

Assistant Lecturer,  
National Research Tomsk Polytechnic University,  
30 Lenin pr., Tomsk 634050, Russia,  
e-mail: lionrash@tpu.ru



## Технологические особенности изготовления отливок деталей печного оборудования литьем по газифицируемым моделям

© С.К. Аринова, А.З. Исагулов, Т.В. Ковалёва

Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда, Казахстан

**Резюме:** Целью работы является исследование литейных свойств сплава с повышенными жаропрочными свойствами на основе Fe-Cr-Ni для изготовления детали «ролик печной». Широко используемое в металлургической, нефтехимической, машиностроительной и других областях промышленности печное оборудование изготавливается из жаропрочных сталей, это связано с особенностями условий эксплуатации: высокая температура, значительные нагрузки и длительность эксплуатации. Развитие металлургических технологий приводит к ужесточению условий работы, что требует совершенствования свойств жаропрочных материалов для изготовления деталей металлургического оборудования. Для этого определяли влияние температуры заливки на пористость слитка, жидкотекучесть сплава и технологические параметры изготовления отливки методом литья по газифицированным моделям. Предложен состав жаропрочного сплава на основе системы Fe-Cr-Ni-легирующий элемент. Исследована жидкотекучесть опытного сплава. Установлено, что жидкотекучесть экспериментального образца стали при температуре заливки 1720°C на 5–10% выше жидкотекучести стали 20X25H20C2. Проведенный анализ программ показал, что оптимальной с т.зр. распределения пор является температура заливки 1720°C, выполнены расчеты литниковой системы для отливки детали «ролик печной». Предложенная технология изготовления отливок печного оборудования из опытного жаропрочного сплава литьем по газифицируемым моделям позволяет получать отливки высокого качества, отвечающие требованиям эксплуатации в условиях высоких температур и длительных нагрузок.

**Ключевые слова:** печное оборудование, жаропрочность, отливка, жидкотекучесть, ролик, сплав

**Информация о статье:** Дата поступления 30 июля 2019 г.; дата принятия к печати 05 августа 2019 г.; дата онлайн-размещения 31 октября 2019 г.

**Формат цитирования:** Аринова С.К., Исагулов А.З., Ковалёва Т.В. Технологические особенности изготовления отливок деталей печного оборудования литьем по газифицируемым моделям. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т. 23. № 5. С. 999–1006. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-999-1006>

## Technological features of furnace equipment part casting by gasified models

Saniya K. Arinova, Aristotel Z. Isagulov, Tatiana V. Kovalyova

Karaganda state technical University, Karaganda, Republic of Kazakhstan

**Abstract:** The purpose of the work is to study the casting characteristics of a Fe-Cr-Ni-based alloy with improved heat-resistant properties for the production of a kiln roller part. The furnace equipment widely used in the metallurgical, petrochemical, machine-building and other branches of industry is made of heat-resistant steels. It is determined by the operation conditions: high temperature, significant loads, and duration of operation. Development of metallurgical technologies toughens working conditions and requires the properties of heat-resistant materials used for the manufacture of parts of metallurgical equipment to be improved. For this purpose, the influence of pouring temperature on the ingot porosity, alloy fluidity and the technological parameters of casting by gasified model casting have been determined. The composition of the heat-resistant alloy based on the Fe-Cr-Ni-alloying system is proposed. The fluidity of the experimental alloy is studied. It has been found that the fluidity of the experimental sample of steel at the pouring temperature of 1720 °C is 5–10% higher than the fluidity of steel 20Kh25N20S2. The conducted analysis of the programs has shown that the pouring temperature of 1720 °C is optimal in terms of pore distribution. The gating system for casting the part “kiln roller” is calculated. The proposed technology of furnace equipment casting manufacturing from an experimental heat-resistant alloy by gasified models casting allows to obtain high-quality castings that meet the requirements of operation at high temperatures and long-term loads.

**Keywords:** furnace equipment, heat resistance, casting, fluidity, roller, alloy

**Information about the article:** Received July 30, 2019; accepted for publication 05 August, 2019; available online October 31, 2019.

**For citation:** Arinova SK, Issagulov AZ, Kovalyova TV. Technological features of furnace equipment part casting by gasified models. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2019;23(5):999–1006. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-999-1006>

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Эффективность деятельности различных отраслей промышленности (авиационной, космической, машиностроительной, атомной, нефтехимической, металлургической и др.) во многом определяется использованием жаропрочных и жаростойких сплавов. Из них изготавливают различные детали и конструкции ответственного назначения, эксплуатируемые в условиях высоких нагрузок и температур [1–6].

При этом (помимо химического состава сплава) важное значение имеет способ изготовления самих деталей [7, 8]. Основным методом получения деталей печного оборудования является литье, в т.ч. по газифицируемым моделям (ЛГМ) [9–12].

Сущность данного способа получения отливок заключается в том, что модель изготавливается из выжигаемого материала (пенополистирола) и не извлекается из формы перед заливкой. Это способствует сокращению времени изготовления литейной формы, исключает необходимость в формовочных уклонах модели, минимизируется вероятность брака отливки из-за осыпания литейной формы. Особенностью используемого в исследованиях материала модели является применение крошки строительного пенополистирола наряду с литейным полистиролом. Такое сочетание разных видов полистирола удешевляет модель.

К важным технологическим параметрам заливки относятся температура заливки, скорость заливки и время выдержки отливки в литейной форме [13]. Все они в значительной мере влияют на процесс кристаллизации металла и, следовательно, способствуют формированию основных свойств будущей детали [14–17].

## 2. ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РАБОТ

Были проведены эксперименты по изготовлению отливки «ролик печной» из жаропрочной стали опытного сплава (табл. 1).

Для обеспечения требуемого состава легирующих элементов использовались ферросплавы, которые вводились в плавильную печь после образования в ней жидкого расплава. Температуру заливки измеряли с помощью пирометра «Сталь С-3000.1» (Россия). Определяли пористость слитка в зависимости от температуры заливки. Заливка проводилась методом литья по газифицируемым моделям. Данный метод достаточно широко применяется на предприятиях Карагандинского региона Республики Казахстан. Известно, что ЛГМ (в отличие от других методов литья) не зависит от процесса получения жидкого металла, плавильное отделение и шихтоподготовка не требуют изменения. Пористость определяли с помощью пирометра PoreMaster 60 (TermoFisherScientific Inc, Италия). Результаты исследования представлены в табл. 2.

Порограмма отливки [14], залитой при температуре заливки 1720°C, представлена на рис. 1.

Анализ порограмм, полученных при различных температурах заливки (в диапазоне от 1680°C до 1760°C), показал, что плотное тело формируется при температуре 1720–1740°C. Именно в этом интервале температур наблюдается наиболее благоприятный характер распределения пор по размерам: наибольший объем пор приходится на поры радиусом от 1 до 100 нм, практически отсутствуют поры радиусом больше 10 000 нм [14].



Основное процентное содержание пор в отливке, разлитой при температуре 1680°C, находится в диапазоне 10–30 мкм. Диапазон пор отливок, полученных при температуре заливки 1740°C, находится в пределах 2–10 мкм.

Очевидно, что при температуре заливки ниже 1700°C происходит относительно быстрое образование твердой корочки в

отливке, и газы не успевают в полном объеме выйти из расплава. Температура заливки выше 1740°C также сопровождается повышенным газообразованием, что негативно сказывается на сплошности металла. Таким образом, рекомендованным диапазоном заливки для экспериментального сплава принята температура 1720–1740°C.

Таблица 1

**Химический состав экспериментального сплава**

Table 1

**Chemical composition of an experimental alloy**

Элемент	C	Ni	Cr	Al	Mo	Nb	B	Co	Fe
Содержание, % масс.	0,07–0,08	35–37	18–20	2,5–3	0,9–1,2	2,5–3,2	0,9–1,1	18–19,5	Ост.

Таблица 2

**Влияние температуры заливки на открытую пористость слитка**

Table 2

**Effect of pouring temperature on the ingot open porosity**

Температура заливки, °C	1680	1700	1720	1740	1760
Пористость, %	3,4	3,1	1,7	2,1	2,9

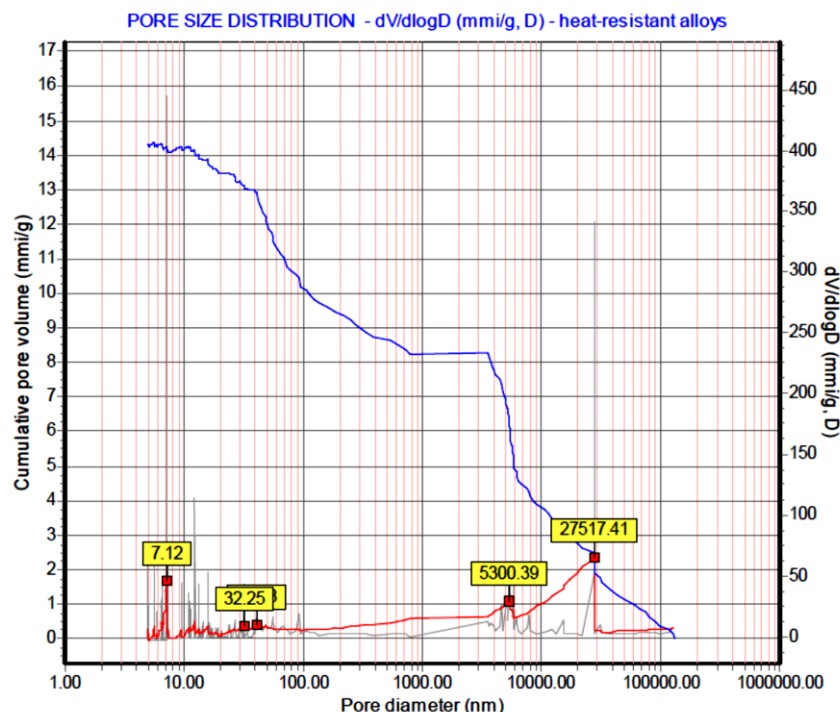


Рис. 1. Порограмма отливки из экспериментального сплава, залитой в форму при температуре 1720°C

Fig. 1. Pore size distribution in a casting from the experimental alloy poured in the mold at a temperature of 1720°C

Как известно, жидкотекучесть является основным показателем литейных свойств сплава. При этом важным фактором, который определяет охлаждение металла при разливке, является температура расплава в печи перед выпуском. При выпуске металла из печи в ковш его теплота теряется за счет охлаждения поверхности потока в желобе и струе.

Для повышения жидкотекучести необходимо использовать перегрев стали на 20–40°C, а также повысить содержание углерода и кремния в стали до максимально допустимого предела.

Исследовалась жидкотекучесть экспериментального сплава в сравнении со сталью 20Х25Н20С2 литьем в газифицируемые формы. Исследование жидкотекучести проводили по ГОСТ 16438-701. Определено, что жидкотекучесть опытной стали при температуре заливки на 5–10% выше, чем у образца из стали 20Х25Н20С2 (табл. 3). Таким образом, опытный сплав позволяет получать тонкостенные отливки и отливки со сложной конфигурацией.

Важным фактором качества литой заготовки является оптимально выбранная литниково-питающая система. Она обязана гарантировать спокойное и беспрепятственное заполнение полости формы жид-

ким металлом и питать отливку по мере ее кристаллизации; обеспечивать получение литой заготовки точных геометрических размеров и направленное затвердевание отливки. При этом количество металла, расходуемого на саму литниково-питающую систему, должно являться минимальным. Рассчитывается литниковая система по методу Я. Шкленника.

В соответствии с данным расчетом сумма площадей питателя определяется по следующей формуле:

$$\sum F_{num} = \frac{1000 \cdot m}{\mu \cdot \tau \cdot \rho \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_p}}, \quad (1)$$

где  $m$  – масса отливок с литниковой системой, кг;  $\mu$  – коэффициент, характеризующий сопротивление литейной формы,  $\mu = 0,32$ ;  $\tau$  – время заливки, с;  $\rho$  – плотность расплава,  $\rho = 7,8 \text{ г/см}^3$ ;  $H_p$  – гидростатический напор, мм.

Продолжительность заливки формы можно определить как

$$\tau = S \cdot \sqrt[3]{\delta \cdot m}, \quad (2)$$

где  $S$  – коэффициент времени,  $S = 1,5$ ;  $\delta$  – средняя толщина стенок литой заготовки, мм.

**Таблица 3**

**Сравнение жидкотекучести экспериментального сплава и стали 20Х25Н20С2 литьем в литье по газифицируемым моделям**

**Fluidity comparison of the experimental alloy and steel 20Kh25N20S2 by casting in gasified model molds**

**Table 3**

Заполняемость пробы, %		Температура заливки, °C
Сталь 20Х25Н20С2	Экспериментальный сплав	
87	91	1680
90	95	1700
96	100	1720
98	100	1740
100	100	1760

<sup>1</sup>ГОСТ 16438-70. Формы песчаная и металлическая для получения проб жидкотекучести металлов. Введ. 01.01.1972. М.: Изд-во стандартов, 1999.



Так как в литейной форме одновременно располагается 4 отливки, и, принимая массу литниково-питающей системы 10% от массы всех отливок, суммарная металлоемкость формы составит 53 кг.

$$\tau = 1,5 \cdot \sqrt[3]{20 \cdot 53} = 15,3 \text{ с.}$$

Среднюю скорость подъема металла в форме определяют как

$$v = \frac{c}{\tau} = \frac{210}{15,3} = 13,72 \text{ мм/с,}$$

где  $c$  – высота отливки, мм.

Скорость подъема металла в форме способствует снижению науглероживания поверхности отливки:

$$\begin{aligned} \Sigma F_{\text{nut}} &= \\ &= \frac{1000 \cdot 48}{0,32 \cdot 13,72 \cdot 7,8 \cdot \sqrt{2 \cdot 981 \cdot 100}} = \\ &= 3,16 \text{ см}^2; \end{aligned}$$

$$\Sigma F_{\text{nut}} : \Sigma F_{\text{шл}} : F_{\text{ст}} = 1 : 1,1 : 1,2;$$

$$\Sigma F_{\text{шл}} = 3,16 \times 1,1 = 3,48 \text{ см}^2;$$

$$\Sigma F_{\text{ст}} = 3,16 \times 1,2 = 3,79 \text{ см}^2.$$

Следовательно, учитывая полученные значения площадей, определяем габариты стояка, питателя и шлакоуловителя (рис. 2).

После процесса заполнения формы металлом для кристаллизации отливки ей необходимо охладиться и затвердеть вместе с формой. Известно, что отливка, извлеченная раньше времени из формы, может привести к возникновению различных видов брака и изменениям в структуре. Стальные отливки рекомендуется выбивать при температуре 350–450°C.

Время выдержки литых заготовок в форме можно определить по следующей зависимости:

$$\tau = k \cdot \sqrt{G_{\text{отл}}} = 20 \cdot \sqrt{0,048} = 4,4 \text{ ч,}$$

где  $k$  – коэффициент, зависящий от конфигурации отливки и толщины ее стенки, равный 20;  $G$  – вес отливки, т.

Деталь «ролик печной» показана на рис. 3.

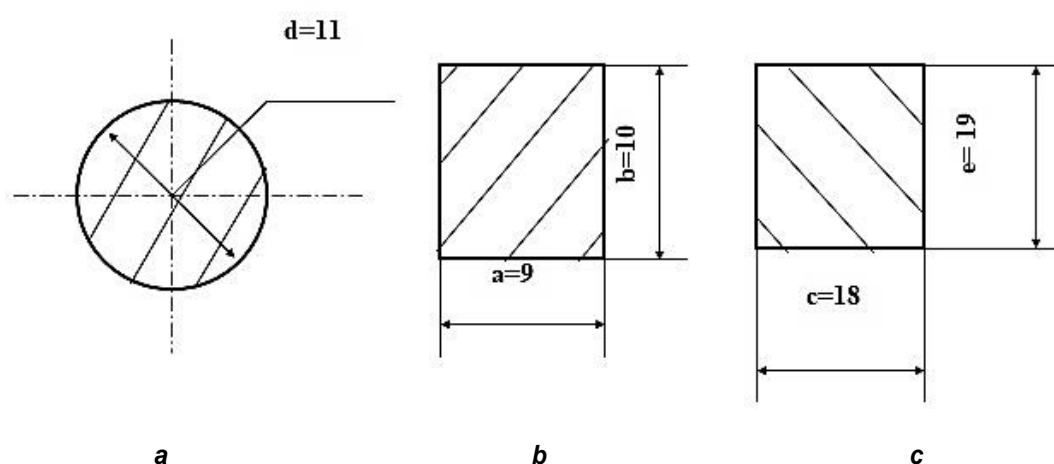


Рис. 2. Элементы литниковой системы отливки «ролик печной»: а – стояк ( $d$  – диаметр стояка, мм); б – питатель ( $a$ ,  $b$  – ширина и высота питателя, мм); с – шлакоуловитель ( $c$ ,  $e$  – ширина и высота шлакоуловителя, мм)

Fig. 2. Elements of a gate system of a kiln roller casting, а – riser ( $d$  – riser diameter, mm); б – feeder ( $a$ ,  $b$  – feeder width and height, mm); с – slag trap ( $s$ ,  $e$  – slag trap width and height, mm)





Рис. 3. Готовая деталь «ролик печной»  
Fig. 3. Finished part “kiln roller”

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предложенная технология изготовления отливок из жаропрочного сплава литьем по газифицируемым моделям для изготовления печного оборудования показала следующие преимущества сплошность закристаллизованного слитка, обеспечиваемая за счет технологически правильного режима заливки и частичного вакуумирования литейной формы в процессе литья;

– высокая геометрическая точность изготавливаемых отливок любых конфигураций;

– качественная чистота поверхности отливок «ролик печной» (шероховатость 40–50 мкм), что минимизирует или полно-

стью исключает механическую обработку;

– полная идентичность отливок в серии.

Литье по газифицируемым моделям в целом требует тщательного соблюдения необходимых операций по всей технологической цепочке – от подготовки материалов до получения отливки. При этом количество дефектов литья значительно ниже, чем при использовании других способов (песчано-смоляные, песчано-глинистые формы).

Полученные таким способом отливки деталей печного оборудования вполне могут заменить детали импортного производства, которые в настоящее время преобладают в металлургическом оборудовании предприятий Казахстана.

### Библиографический список

1. Поварова К.Б. Жаропрочные конструкционные сплавы на основе вольфрама // Тяжелое машиностроение. 2009. № 7. С. 35–39.
2. Kvon S.V., Kulikov V.Y., Filippova T.S., Omarova A.E. Using high-chromium iron as material for production of the equipping components of mine shafts // Metallurgija. 2016. Vol. 55. No. 2. P. 206–208.
3. Крушенко Г.Г., Решетникова С.Н. Жаропрочные сплавы и некоторые технологии в аэрокосмическом машиностроении // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2009. № 2. С. 216–217.
4. Kovalev P.V., Ryaboshuk S.V., Issagulov A.Z., Kuli-

- kov V.Y., Kvon S.S., Chsherbakova Y.P., et al. Improving production technology of tube steel grades in converter process // Metallurgija. 2016. Vol. 55. No. 4. P. 715–718.
5. Nemchinova N.V., Leonova M.S., Tyutrin A.A., Bel'skii S.S. Optimizing the charge pelletizing parameters for silicon smelting based on technogenic materials // Metallurgist. 2019. Vol. 63. Issue 1–2. P. 115–122. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00800-3>
6. Nemchinova N.V., Timofeev A.K., Salov V.M. Effect of Charge Composition on Metallurgical Silicon Smelting Indices in Electric-Arc Furnaces // Metallurgist. 2017. Vol. 60. No. 11–12. P. 1243–1249.



<https://doi.org/10.1007/s11015-017-0435-7>

7. Деев В.Б., Юдин А.С., Пономарева К.В., Цецорина С.А., Алхимов В.Н. Влияние способа формовки на качество алюминиевых сплавов, изготовленных методом ЛГМ // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. 2014. № 32. С. 94–97.
8. Исагулов А.З., Куликов В.Ю., Ковалёва Т.В., Щербакова Е.П. О реологических свойствах песчано-смоляных форм // Литейное производство. 2015. № 2. С. 15–17.
9. Нестеров Н.В., Воронцов Б.С., Савиных Л.М. Система создания разряжения в опоках для литья по газифицируемым моделям // Литейное производство. 2016. № 7. С. 30–34.
10. Куksа А.В., Кидалов Н.А., Щипанов В.Ф. Универсальная лабораторная установка для получения гранул пенополистирола и изготовления из них газифицируемых моделей для ЛГМ // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2010. № 4. С. 61–65.
11. Дорошенко В.С., Болух В.А. Получение крупных стальных отливок по газифицируемым моделям с использованием наливной формовки // Тяжелое машиностроение. 2010. № 10. С. 16–20.
12. Исагулов А.З., Куликов В.Ю., Твердохлебов Н.И., Щербакова Е.П., Ковалёва Т.В. Влияние краски на качество чугунных и стальных отливок сложной конфигурации при ЛГМ // Литейное производство. 2015. № 7. С. 17–19.
13. Квон С.С., Куликов В.Ю., Исагулов А.З., Аринова С.К., Ковалёва Т.В. Исследование структуры пенополистирола при литье по газифицируемым моделям // Литейное производство. 2017. № 7. С. 18–20.
14. Аринова С.К., Исагулов А.З., Квон С.С., Куликов В.Ю., Щербакова Е.П., Достоева А.М. Влияние температуры заливки на структуру отливок из жаропрочных сплавов // Металлургия: технологии, инновации, качество. «МЕТАЛЛУРГИЯ – 2017»: труды XX Междунар. науч.-практ. конф.: в 2-х ч. (г. Новокузнецк, 15–16 ноября 2017 г.). Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2017. Ч. 1. С. 222–227.
15. Квон С.С., Филиппова Т.С., Куликов В.Ю. Исследование неметаллических включений в стали 45ХЛ, раскисленной ферросиликобарием // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 8-4. С. 659–663.
16. Квон С.С., Куликов В.Ю., Щербакова Е.П., Аринова С.К. Исследование влияния состава оболочки на ее свойства при литье по выплавляемым моделям // Литейное производство. 2019. № 5. С. 19–22.
17. Овчаренко П.Г., Лещев А.Ю. Литье по газифицируемым моделям композиционных отливок твердотельных теплообменников // Литейное производство. 2015. № 5. С. 26–28.

## References

1. Povarova KB. High temperature structural tungsten-based alloys. *Tyazheloye mashinostroyeniye* = Heavy Engineering. 2009;7:35–39. (In Russ.)
2. Kvon SvS, Kulikov VY, Filippova TS, Omarova AE. Using high-chromium iron as material for production of the equipping components of mine shafts. *Metallurgiya*. 2016;55(2):206–208.
3. Krushenko GG, Reshetnikova SN. The heat-resistant alloys and some technology in aerospace industry. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M.F. Reshetneva* = Bulletin of Reshetnev Siberian State Aerospace University. 2009;2:216–217. (In Russ.)
4. Kovalev PV, Ryaboshuk SV, Issagulov AZ, Kulikov VYu, Kvon SvS, Chsherbakova YP, et al. Improving production technology of tube steel grades in converter process. *Metallurgiya*. 2016;55;4:715–718.
5. Nemchinova NV, Leonova MS, Tyutrin AA, Bel'skii SS. Optimizing the charge pelletizing parameters for silicon smelting based on technogenic materials. *Metallurgist*. 2019;63(1-2):115–122. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00800-3>
6. Nemchinova NV, Timofeev AK, Salov VM. Effect of charge composition on metallurgical silicon smelting indices in electric-arc furnaces. *Metallurgist*. 2017;60(11-12):1243–1249. <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0435-7>
7. Deev VB, Yudin AS, Ponomareva KV, Tsetsorina SA, Alkhimov VN. Effect of molding method on the quality of aluminum alloys produced by the lost-foam casting method. *Vestnik gorno-metallurgicheskoy sekcii Rossiyskoy akademii yestestvennykh nauk. Otdeleniye metallurgii* = Bulletin of the Mining and Metallurgical Department of the Russian Academy of Natural Sciences. Metallurgical Division. 2014;32:94–97. (In Russ.)
8. Isagulov AZ, Kulikov VYu, Kovaleva TV, Scherbakova EP. On rheological properties of resin-bonded sand. *Liteynoye proizvodstvo* = Foundry. 2015;2:15–17. (In Russ.)
9. Nesterov NV, Vorontsov BS, Savinykh LM. System vacuum creating in casting molds by gasified models. *Liteynoye proizvodstvo* = Foundry. 2016;7:30–34. (In Russ.)
10. Kuksa AV, Kidalov NA, Schipanov VF. A universal laboratory installation for producing polystyrene foam granules for making lost-foam gasified models. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Bulletin of Volgograd State Technical University. 2010;4:61–65. (In Russ.)
11. Doroshenko VS, Bolyukh VA. Production of large steel castings by gasified models using bulk molding. *Tyazheloye mashinostroyeniye* = Heavy Engineering. 2010;10:16–20. (In Russ.)
12. Isagulov AZ, Kulikov VYu, Tverdokhlebov NI, Scherbakova EP, Kovaleva TV. Effect of paint on the quality of cast iron and steel castings of complex configuration at LFM. *Liteynoye proizvodstvo* = Foundry.

2015;7:17–19. (In Russ.)

13. Kvon SvS, Kulikov VYu, Isagulov AZ, Arinova SK, Kovaleva TV. Studying expanded polystyrene structure under LFM casting. *Liteynoye proizvodstvo* = Foundry. 2017;7:18–20. (In Russ.)

14. Arinova SK, Isagulov AZ, Kvon SvS, Kulikov VYu, Scherbakova EP, Dostaeva AM. Effect of casting temperature on the structure of mold from heat-resistant alloys. In: *Metallurgiya: tekhnologii, innovatsii, kachestvo «METALLURGIYA-2017»: trudy XX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* = Metallurgy: Technology, Innovation, Quality. "METALLURGY - 2017": proceedings of XX International scientific and practical Conference, 15–16 November 2017, Novokuznetsk, Novokuznetsk: Siberian State Industrial

University; 2017, part 1, p. 222–227. (In Russ.)

15. Kvon SvS, Filippova TS, Kulikov VYu. Investigation of nonmetallic inclusions in steel 45 Cr-M, deoxidated by ferrosilicobarium. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* = International Journal of Applied and Fundamental Research. 2015;8-4:659–663. (In Russ.)

16. Kvon SvS, Kulikov VYu, Scherbakova EP, Arinova SK. Study of the effect of shell composition on its properties when casting by melted models. *Liteynoye proizvodstvo* = Foundry. 2019;5:19–22. (In Russ.)

17. Ovcharenko PG, Leshchev AYU. Casting of composite castings of solid-state heat exchangers by gasified models. *Liteynoye proizvodstvo* = Foundry. 2015;5:26–28. (In Russ.)

#### **Критерии авторства**

Аринова С.К., Исагулов А.З., Ковалёва Т.В. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в одинаковой мере несут ответственность за плагиат.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

##### **Аринова Сания Каскатаевна**

докторант,  
Карагандинский государственный  
технический университет,  
10000, г. Караганда,  
пр. Н. Назарбаева, 56, Казахстан;  
✉ e-mail: sanya\_kazah@mail.ru

##### **Исагулов Аристотель Зейнуллинович**

доктор технических наук, профессор,  
первый проректор,  
Карагандинский государственный  
технический университет,  
10000, г. Караганда, пр. Н. Назарбаева, 56,  
Казахстан;  
e-mail: a.isagulov@kstu.kz

##### **Ковалёва Татьяна Викторовна**

докторант,  
Карагандинский государственный  
технический университет,  
10000, г. Караганда, пр. Н. Назарбаева, 56,  
Казахстан;  
e-mail: sagilit@mail.ru

#### **Authorship criteria**

Arinova S.K., Isagulov A.Z., Kovalyova T.V. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

#### **Conflict of interests**

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

##### **Saniya K. Arinova,**

Doctoral student,  
Karaganda State Technical University,  
56, Nursultan Nazarbayev av., Karaganda 10000,  
the Republic of Kazakhstan;  
✉ e-mail: sanya\_kazah@mail.ru

##### **Aristotel Z. Isagulov,**

Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
First Vice Rector,  
Karaganda State Technical University,  
56, Nursultan Nazarbayev av., Karaganda 10000,  
the Republic of Kazakhstan;  
e-mail: a.isagulov@kstu.kz

##### **Tatiana V. Kovalyova,**

Doctoral student  
Karaganda State Technical University,  
56, Nursultan Nazarbayev av., Karaganda 10000,  
the Republic of Kazakhstan;  
e-mail: sagilit@mail.ru



Обзорная статья / Review article

УДК 620.181.4, 666.3-135

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-1007-1022>

## Развитие технологии инертных катодов. Часть 1. Компактные изделия и адгезионные пасты на основе диборида титана

© Е.С. Горланов

ООО «ЭКСПЕРТ-АЛ», г. Санкт-Петербург, Россия

**Резюме:** Цель – определение уровня развития и текущего статуса технологии смачиваемых алюминием катодов; придание импульса в развитии и проектировании алюминиевых электролизеров нового поколения с горизонтальными и вертикальными инертными электродами; рассмотрение достижений мировых исследовательских центров в развитии технологии инертных катодов. Выявлено, что совершенствование существующих конструкций и проектирование электролизеров нового поколения специалисты связывают с развитием новых материалов. С начала 50-х годов прошлого столетия разрабатывается концепция смачиваемой алюминием катодной поверхности со свойствами повышенной стойкости по отношению к агрессивной среде. К смачиваемому алюминием материалу для футеровки катода предъявляют требования удовлетворительной прочности и стойкости к растрескиванию, реагентам электролита, алюминия и окислительной среде. Из большого числа испытанных за 65 лет материалов и изделий для дренированных катодов поисковая и исследовательская работа сконцентрировалась на диборидтитановых материалах в виде катодных элементов (плиток, цилиндров) или адгезионных паст/композитов на поверхности угольной подины, но в промышленности эти изделия и покрытия до сих пор не находят коммерческого использования. Основная причина и сдерживающий фактор делового оборота – высокая стоимость порошков и компактных изделий, что является следствием экстремальных свойств диборида титана и необходимости применения сложного оборудования для синтеза и прессования катодов заданной формы.

**Ключевые слова:** диборид титана, дренированный катод, коррозия материалов, электрохимический синтез, неоднородная поверхность, микро-борирование

**Информация о статье:** Дата поступления 22 августа 2019 г.; дата принятия к печати 27 сентября 2019 г.; дата онлайн-размещения 31 октября 2019 г.

**Для цитирования:** Горланов Е.С. Развитие технологии инертных катодов. Часть 1. Компактные изделия и адгезионные пасты на основе диборида титана. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т. 23. № 5. С. 1007–1022. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-1007-1022>

## Development of inert cathode technology. Part 1. Titanium diboride-based compact products and adhesive pastes

Evgeniy S. Gorlanov

EXPERT-AL LLC, Saint Petersburg, Russia

**Abstract:** The purpose is to determine the development level and current status of aluminum wetted cathode technology; to promote the development and design of new generation of aluminum electrolyzers with horizontal and vertical inert electrodes; to review the achievements of research centers around the world in the development of inert cathode technology. It is revealed that experts associate the improvement of existing structures and design of a new generation of electrolyzers with the development of new materials. Since 1950s the concept of an aluminum wetted cathode surface with increased resistance to aggressive environment has been developed. The aluminum wetted material for cathode lining should have satisfactory strength and resistance to cracking, electrolyte reagents, aluminum and an oxidizing medium. Of the large number of materials and products for drained cathodes tested over 65 years, the research has been focused on titanium diboride materials in the form of cathode elements (tiles, cylinders) or adhesive pastes/composites on the surface of the coal bed. Unfortunately, these products and coatings still do not have wide industrial application. The main reason and limiting factor of commercial turnover is the high cost of powders and compact products, which results from the extreme properties of titanium diboride and the need to use complex equipment for synthesis and pressing of cathodes of a given shape.

**Keywords:** titanium diboride, drained cathode, corrosion of materials, electrochemical synthesis, heterogeneous surface, micro-boriding

**Information about the article:** Received August 22, 2019; accepted for publication September 27, 2019; available online October 31, 2019.

**For citation:** Gorlanov ES. Development of inert cathode technology. Part 1. Titanium diboride-based compact products and adhesive pastes. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2019;23(5):1007–1022. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-1007-1022>

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Первые промышленные алюминиевые электролизеры в г. Нейгаузен, Швейцария (П. Эру) и в г. Питтсбург, США (Ч. Холл) требовали свыше 40 кВт·ч/кг полученного алюминия и имели выход по току в пределах от 75–78% [1]. Вся дальнейшая история развития алюминиевой промышленности свидетельствует о непрерывном снижении расхода электроэнергии на осуществление процесса электролиза. На протяжении всего XX в. удельный расход электроэнергии снижался до 15÷13 кВт·ч/кг Al (рис. 1), а выход по току на новых сериях повышался и остановился в пределах 95±1%.

На основании этих достижений в 1997 г. Американская Алюминиевая Ассоциация подготовила «Aluminum Industry Technology Roadmap» [3]. В соответствии с планом на ближайшую перспективу предполагалось снизить энергопотребление на производство алюминия ниже 13 кВт·ч/кг Al. Долгосрочные цели определили достиже-

ние этого показателя в 11 кВт·ч/кг Al. Их реализация в 2 кВт·ч/кг Al требует снижения напряжения на электролизере на 0,6–0,7 В, что соответствует потерям напряжения примерно в слое электролита 2,5 см. При существующем уровне технологии электролиза флуктуация поверхности алюминия составляет около 2 см. Поэтому уменьшение междупольного расстояния (МПР) с 4–5 см до 2,0–2,5 см возможно только при кардинальном изменении конструкции катода и внедрении новых материалов. И это требовало от проектировщиков закладывать в конструкцию электролизеров технологию дренированных катодов или вертикально расположенных электродов с тонким распределенным слоем алюминия на смачиваемой подине и уменьшенным МПР «анод-катод» (рис. 2). В настоящее время однозначно установлено многими исследованиями и испытаниями [1, 2], что эта технология позволяет снизить расход электроэнергии на 17–20% от лучших достигнутых значений.

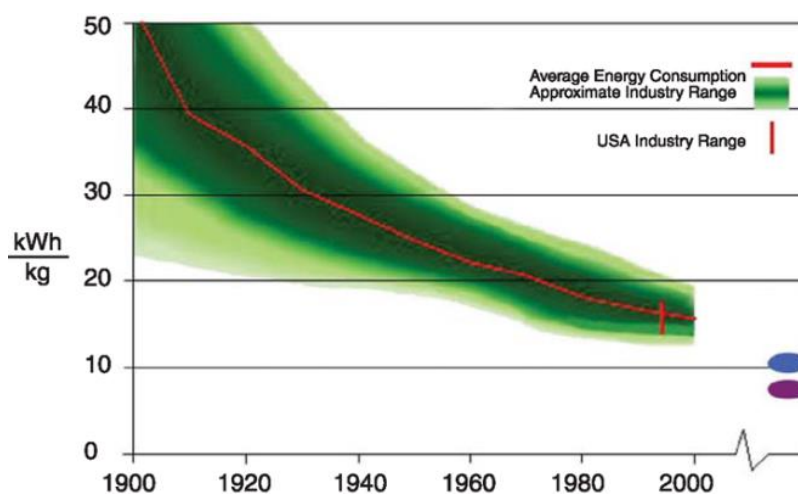


Рис. 1. Удельный расход электроэнергии на производство алюминия [2]  
Fig. 1. Specific energy consumption for aluminum production [2]

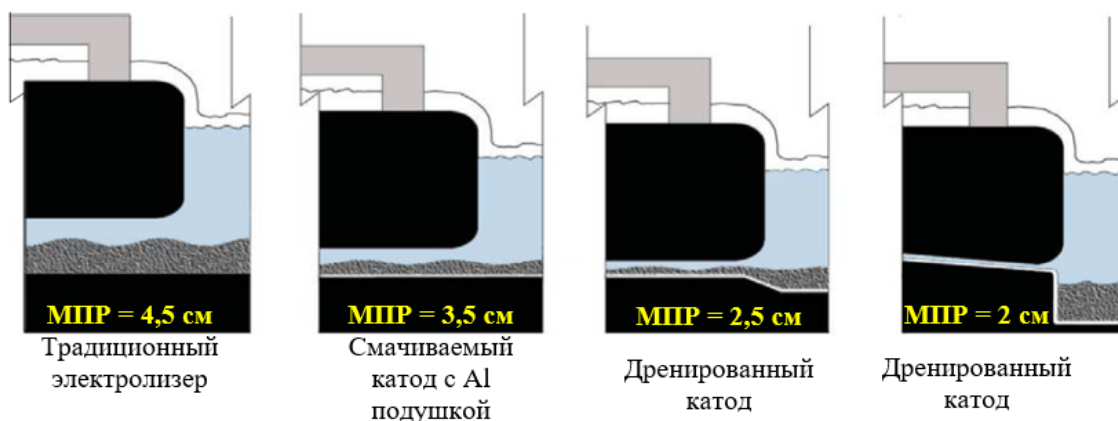


Рис. 2. Концептуальные схемы электролизеров с дренированным катодом [2]  
Fig. 2. Conceptual diagrams of the cells with a drained cathode [2]

Из большого числа испытанных за последние 65 лет материалов и изделий для инертных катодов поисковая и исследовательская работа сконцентрировалась на диборидтитановых материалах в виде катодных элементов (плиток, цилиндров) или адгезионных паст/композитов на поверхности угольной подины. Но в алюминиевой промышленности изделия и покрытия на основе диборида титана до сих пор не находят применения. В связи с этим с 1990-х годов в исследовательских центрах различных стран предприняты интенсивные попытки электрохимического синтеза покрытий  $TiB_2$  на катодных углеродных поверхностях. Эти попытки ограничивались лабораторными исследованиями, а коммерческого выхода не получили по причине отсутствия прогресса и доказанных положительных результатов длительной работы  $TiB_2$ -катодов в виде поликристаллических изделий или покрытия на углеродной или металлической основе.

Основные этапы развития, успехи и проблемы огромной работы над продвижением катодов из диборида титана или композитов на его основе представлены в этом обзоре.

## 2. РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ СМАЧИВАЕМЫХ АЛЮМИНИЕМ КАТОДОВ

Об инертных катодных материалах заговорили в 1950-х годах. Опубликованные в период 1952–1957 гг. французские и

английские патенты Британской алюминиевой компании под авторством Рэнсли [4] стали сигналом ведущим алюминиевым компаниям к интенсивной поисковой и исследовательской работе по замене угольных катодных материалов на более стойкие в агрессивной среде тугоплавкие огнеупорные материалы (RHM) (от англ. «refractory hard materials»).

Базовый английский патент Рэнсли 1958 г. с приоритетом 1954 г. [4], а затем и его американский вариант [5], опубликованный в 1962 г., представляют преимущества работы электролизеров на низком МПР, в т.ч. с дренированным катодом без слоя алюминия на поверхности подины. В патентах Рэнсли описывает электролизеры с катодными узлами из борида титана, смеси карбида титана и борида титана, в котором борид титана присутствует в соотношениях от 5 до 25% по массе, а также из боридов и карбидов циркония, тантала и ниобия. При этом в формуле патента фиксируется растворимость диборида титана до содержания в алюминии титана от 0,001 до 0,005% масс. и бора от 0,001 до 0,003% масс. Растворимость титана в алюминии из композиции  $TiC-TiB_2$  составляет от 0,04% масс. для чистого  $TiC$ ; до 0,005% масс. – для  $TiB_2$ .

В эти же 50-е годы компания «Kaiser Aluminum» патентует компактные изделия на основе тугоплавких материалов [6]. В этом патенте 1959 г. Льюис описывает применение боридов, карбидов и нитридов



титана, циркония, ванадия, тантала, ниобия и гафния в качестве отрицательного проводника для алюминиевых электролизеров в виде пластин или стержней (поз. 18, рис. 3), погруженных в слой расплавленного алюминия (поз. 14, см. рис. 3).

Их применение обосновано автором необходимостью замены углеродного катода материалами, которые способны устойчиво работать в калиевых электролитах и алюминии при температуре около 940°C. Именно низкая температура декларируется главным преимуществом способа электролиза. Другим достоинством является возможность футеровки ванны углеродными катодно-неполяризованными материалами, что обеспечивает их коррозионную устойчивость в калиевых электролитах.

В следующем патенте фирмы «Kaiser Aluminum» [7] авторы Льюис и Гильдебрандт раскрывают конструкцию электро-

лизера с дренированной поверхностью катода (рис. 4). Дренирование катода достигается наклоном смачиваемой алюминием поверхности, выполненной из электропроводной композитной смеси огнеупорных тугоплавких соединений не менее чем с 5% углерода.

Обязательным условием стабильности этого покрытия является его ограниченное до 3% расширение и низкая растворимость в алюминии. Предполагается, что этими свойствами обладают карбиды, бориды, силициды и нитриды переходных металлов. Предпочтительными являются бориды титана и циркония. Утверждается, что наклон катода около 2° обеспечивает наличие на поверхности только тонкого стабильного слоя алюминия, что дает возможность существенно снизить МПР до 1,25–2,54 см и уменьшить потери мощности.

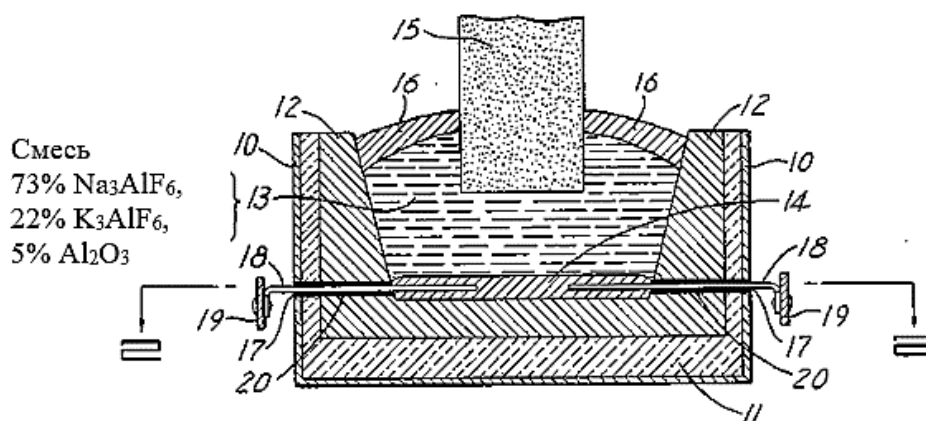


Рис. 1. Схема электролизера с катодными тугоплавкими материалами [6]  
 Fig. 3. Diagram of the cell with cathode refractory materials [6]

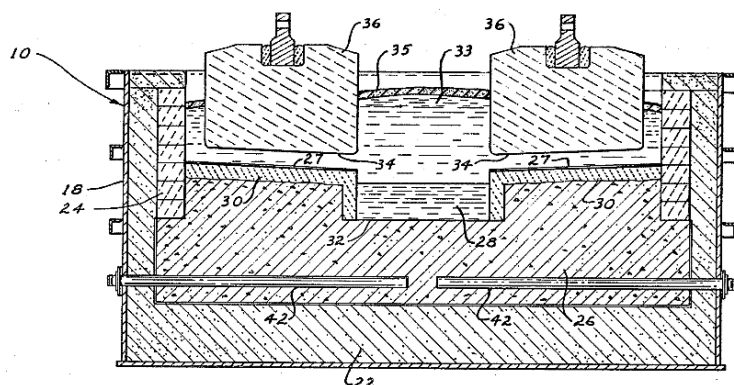


Рис. 4. Электролизер с дренированным катодом [7]  
 Fig. 4. Cell with a drained cathode [7]



Примечательно, что с 1962 г. качество тугоплавких металлов и особенно горячепрессованных изделий из  $TiB_2$  улучшилось, но трещинообразование, связанное с межзеренной коррозией, оставалось основной проблемой. Качественные, бездефектные и высокоплотные  $TiB_2$  растрескивались после 6 мес. работы в электролизерах. В конце 60-х годов развитие компактных боридных изделий было приостановлено.

С 1983 по 1987 год «Alcan International Ltd.» и «Eltech Systems Ltd.» объединились в развитии RHM катодов и угольной футеровки электролизеров. Три доклада было представлено в 1987 г. на конференции «Transactions of The Metallurgical Society of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers» (TMS-AIME), где описывались технология и испытательная программа [8, 9]. Представлено много патентов по этой тематике. Интересно, что экономические расчеты объединенной команды показали эффективность применения тугоплавких смачиваемых материалов в случае отсутствия углеродной футеровки при повторно используемой подине электролизера и катодных покрытиях из RHM. То есть была продублирована концепция построения электролизеров фирмы «Reynolds» конца 50-х, начала 60-х годов [3] с некоторыми конструктивными изменениями катодов.

В 1970-х годах основными сдерживающими факторами для использования  $TiB_2$  в качестве катода была большая стоимость – примерно 55 долл./кг (по сравнению с традиционными углеродистыми композициями, стоимость которых составляла около 1,32 долл./кг), а также ее чувствительность к тепловому шоку. Авторы способа [10] предлагают решить эту проблему созданием специальной диборидтитано-графитовой композиции ( $TiB_2$ -G), смачиваемой алюминием. При этом появляется возможность уменьшить МПР до 2 см, в результате чего экономия электроэнергии составит 20%.

Компания «Great Lakes Research Corporation» (GLRC) развивала два запа-

тентованных титан-диборид-графитовых продукта с 1980 г. С 1985 по 1986 год GLRC и компания «Reynolds Metals Company» (RMC) кооперировались в ценодолевой программе с фирмой «Mellon Institute's Center» по заказу «Metals Production» (R&D Application Center Electric Power Research Institute). В этих исследованиях изучались изделия GLRC из  $TiB_2$ -G в виде пластин и цилиндров, которые испытывались в электролите и алюминии электролизеров «Reynolds» в течение 10 мес. [11]. Показано, что эти материалы имеют хороший потенциал для использования и функционирования в течение длительного периода в агрессивной среде алюминиевого электролизера. Представленный в 1987 г. на TMS-AIME доклад обсуждает подход GLRC в катодной технологии использования  $TiB_2$ -элементов и описывает более детально коммерческие испытания с 1985 по 1986 год [12].

Исследование GLRC материалов типа  $TiB_2$ -G и их применение в качестве смачиваемых катодных элементов в электролизере продолжилось в период 1987–1990 гг. по совместной программе с RMC и министерства энергетики США (от англ. «Department of Energy US») (DOE). Пилотный электролизер 2,8 кА работал с элементами грибовидной формы диаметрами 152 и 254 мм [13] при 965–975°C, плотности тока 1,3 А/см<sup>2</sup>, рабочем напряжении 5,5 В и МПР 2,5 см (рис. 5).

Выводы этих испытаний следующие:

- материал обладает отличными термоударными свойствами;
- продемонстрирована приемлемая скорость износа.

Указывается, что карбидокремниевые держатели  $TiB_2$ -G катодов разрушались в контакте с криолитом.

Свою активную деятельность по разработке электролизеров нового поколения компания «Alcoa» по заказу DOE продолжила почти одновременным запуском двух программ исследований. Первая из них – Программа совершенствования анодов и катодов – разделена на несколько фаз. В течение 1 фазы программы компания «Alcoa» развивала концепцию коммер-



ческого электролизера с вертикальными инертными электродами с целью снижения энергопотребления на 30%. Специалисты «Alcoa» считают, что только совместное использование малорасходуемых анодов и смачиваемых катодов вертикального расположения с МПР = 2,5 см, напряжением на электролизере 3,8 В даст возможность уменьшить удельный расход электроэнергии с 15,8 до 12,8 кВт·ч/кг Al, а стоимость производства алюминия на 13%. И это будет главным шагом к достижению долгосрочной цели – удельному расходу электроэнергии 11,0 кВт·ч/кг Al, который возмо-

жен при напряжении на электролизере 3,4 В и МПР около 1–1,2 см.

На второй стадии работы испытаниями двух пилотных электролизеров на 1–5 кА решались конструктивные и технологические вопросы (рис. 6 а).

В процессе третьей фазы испытаниями трех пилотных электролизеров [14] решались материальные проблемы электродов, возникших на предыдущих стадиях работы. Одни из них связаны с совершенствованием состава керметных анодов  $\text{NiO-NiFe}_2\text{O}_4\text{-Cu}$ , другие – со стабильностью смачивания катодов алюминием.

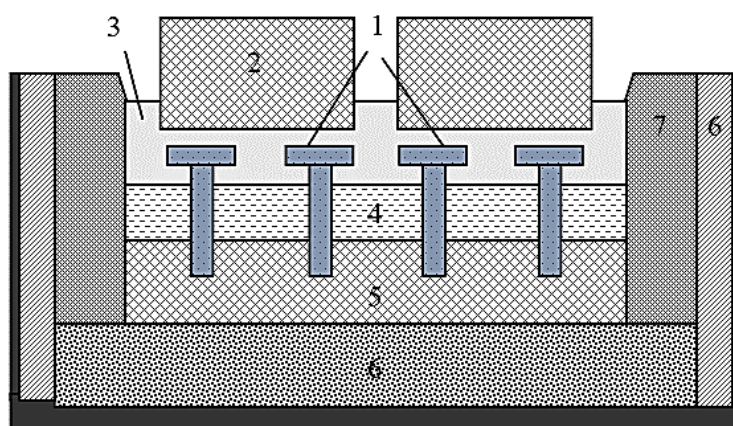
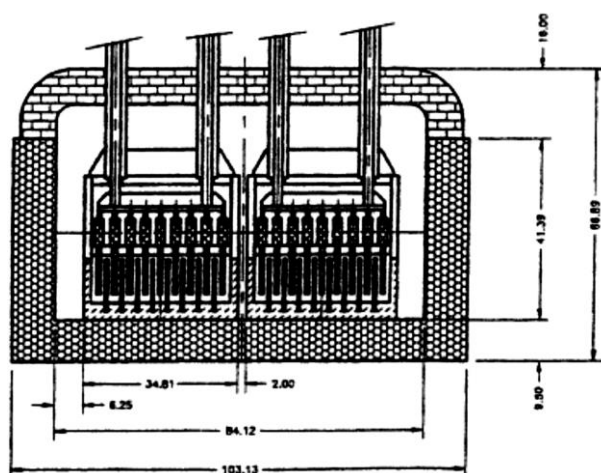
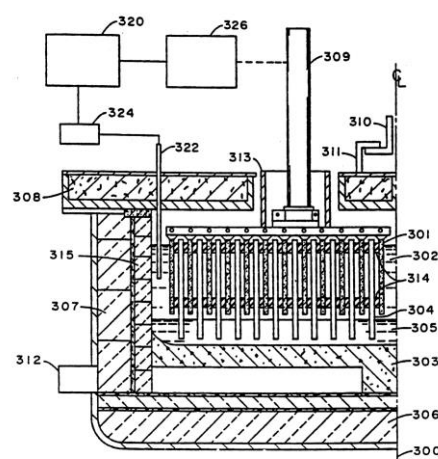


Рис. 5. Схема электролизера с  $\text{TiB}_2\text{-G}$  элементами [13]: 1 –  $\text{TiB}_2\text{-G}$ ; 2 – анод; 3 – электролит; 4 – алюминий; 5 – катод; 6 – термоизоляция; 7 – боковая футеровка

Fig. 5. Diagram of the cell with  $\text{TiB}_2\text{-G}$  elements [13]: 1 –  $\text{TiB}_2\text{-G}$ ; 2 – anode; 3 – electrolyte; 4 – aluminum; 5 – cathode; 6 – thermal insulation; 7 – side lining



a



b

Рис. 6. Схема электролизеров «Alcoa» с вертикальными электродами:

a – схема электролизера 1 [14]; b – схема электролизера 2 [15]

Fig. 6. Diagram of Alcoa cells with vertical electrodes: a – cell 1 schematic [14]; b – cell 2 schematic [15]



Что касается катодной части проекта, исследователи столкнулись с проблемой плохой смачиваемости катодов алюминием в процессе работы электролизеров. Было высказано предположение, что на стадии изготовления и разогрева происходит окисление поверхности катодных пластин. В этой связи далее производили исследования смачиваемости диборидтитано-углеродной композиции ( $TiB_2-C$ ) катодных материалов.

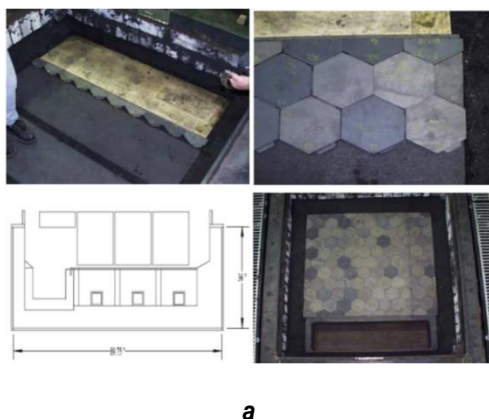
В [15] представлена конструкция электролизера с вертикальными электродами (рис. 2 б). Эта конструкция имеет аноды и катоды, расположенные в виде чередующихся плоских пластин, подвешенных в ванне расплавленного электролита, причем катодные пластины соприкасаются с расплавленным алюминием. Электролит состоит из 64% масс. фторида алюминия и 36% масс. натрия для работы при более низкой температуре (750–850°C). Катод-углерод, а анод-металлокерамика с ~17% меди, остальная часть – оксид никеля и оксид железа.

Сравнение этого дизайна и дизайна ванны Холла-Эру подразумевает, что существует множество конфигураций для решения одной и той же основной технологии, и что новый проект имеет потенциал для повышения производительности, более простого уровня обслуживания и сокращения выбросов загрязняющих веществ. Воз-

можно, передовые керамические материалы могут обеспечить улучшенный дизайн, который невозможен с использованием предыдущих материалов.

В другой программе компания «Alcoa» кооперировалась с фирмами «Kaiser Aluminum» и «M/A Com» (ранее «Advanced Refractory Technologies, Inc.»). Разрабатывалась концепция работы дренажного электролизера с горизонтальным расположением электродов [16]. После лабораторной стадии изготовления и испытания компактных катодных материалов для работы в условиях пилотного электролизера выбрано 312 материалов в виде плитки на основе  $TiB_2$  с добавками углерода и новый материал  $Ti_3SiC_2$ . Все эти изделия были смонтированы на углеродной подине пилотного электролизера на силу тока 23 кА фирмы «Kaiser» (рис. 7).

Этот первый электролизер работал 21 день и предназначался для выбора наиболее стойких изделий и предварительной отработки технологии. Было установлено, что керамический катод позволяет работать в обычном (со слоем металла около 5 см, МПР = 3,7 см) и дренажном (МПР = 1,2 см) нормальном технологическом режиме. Отмечается высокое содержание титана в алюминии (0,2–0,4%), что указывало на растворение материала катодного покрытия (рис. 8).



a



b

Рис. 7. Пилотный электролизер «Алcoa» на силу тока 23–25 кА с горизонтальными электродами [16]:

a – монтаж катодных плиток; b – работа электролизера

Fig. 7. Pilot 23–25 kA cell Alcoa with horizontal electrodes [16]:

a – installation of cathode tiles; b – cell operation



**Рис. 8. Вид подины 1-го электролизера после периода работы 21 сут**  
**Fig. 8. View of the 1st cell bottom after the operation period of 21 days**

Лучшим материалом для футеровки поверхности катода признан  $TiB_2$  с небольшими добавками углерода.

В альтернативу компактным материалам и изделиям, имея ввиду прежде всего их высокую стоимость и растрескиваемость, развивались смачиваемые катодные покрытия по трем различным направлениям:

- композит  $TiB_2$  на связке коллоидного раствора оксида алюминия ( $Tinor^{TM}$  and  $Thicknor^{TM}$ ), предлагаемый фирмой «Moltech» [17–19];

- плазменное нанесение на углерод, разрабатываемое компанией «SGL Carbon» [20];

- покрытие  $TiB_2$  на углеродсодержащей связке, осуществляемое фирмой «Comalco».

Существуют многочисленные сведения о заводских испытаниях покрытий компании «Moltech» по улучшению параметров катодов, особенно по уменьшению внедрения натрия [21]. Активно обсуждаются детали по испытанию покрытия «Comalco» [22] (несмотря на наличие публикаций по плазменным аналогам), началу развития которого дал патент США 1968 г., выданный Р. Лэвис и Р. Хилдебрандт и принадлежащий фирме «Kaiser». Этот патент описывает RHM-углеродный композит на поверхности дренированного катода [7]. Наибольших успехов в развитии покрытий этого типа ( $TiB_2$ -G) добились в компании «Martin Marietta Aluminum». Эта компания в 1984 г. на конференции «TMS-AIME» представила  $TiB_2$  – углеродное покрытие, испы-

танное на заводских электролизерах с обычным уровнем металла [23]. Смесь  $TiB_2$ , углеродного материала и других составляющих в виде пасты наносилась толстым слоем в 1 см на углеродную подину. Позднее, в 1985 г., представленный фирмой «Martin Marietta Aluminum» доклад свидетельствует о преимуществах работы электролизеров с дренированной без алюминия подиной и улучшенным распределением тока [24].

После приобретения фирмой «Comalco» технологии «Martin Marietta Aluminum» развитие этого покрытия продолжилось в течение следующих 10 лет. Существуют статьи о попытках коммерциализации технологии дренированных катодов в Австралии. Браун в 1998 г. [22] сообщил об электролизерах с дренированным катодом и покрытием, которое является комбинацией диборидных титановых частиц и углерода с новым фенольным связующим на основе смолы. Ключевое свойство покрытия – смачивание алюминием. Электролизер был спроектирован на силу тока 92 кА. Зафиксирован износ покрытия между 2 и 6 мм/год, что в потенциале означает его срок службы около 2000 дней, но опытные электролизеры (10 шт.) работали не более 700 дней. Достигнуто среднее потребление энергии – 13,3 кВт·ч/кг Al при плотности тока 0,99 А/см<sup>2</sup>.

В отчете [22] явным образом не указывается на случаи полной непригодности покрытия, но отмечается, что состав и свойства покрытия  $TiB_2$ -G могут подбираться для создания на подине густого и вязко-



пластичного слоя частиц, т.е. заранее предусматривается и оговаривается один из пунктов патента фирмы «Comalco» 1997 г. [25], что нанесенный слой будет разрушаться с образованием налета суспензии  $\text{Al/TiB}_2$ . Предполагается, что эта тонкая прослойка между углеродной поверхностью и алюминием имеет защитно-смачивающие свойства. Но в примерах реализации этого патента указывается, что проводимые аутопсии катодов опытных электролизеров после работы в течение 8 мес., с предварительно созданным покрытием  $\text{TiB}_2\text{-G}$ , указало на существование смачиваемого слоя суспензии  $\text{Al/TiB}_2$  на поверхности разрушающего композитного покрытия. Именно это наблюдение и послужило поводом к созданию патента. Но оно же свидетельствует о разрушении  $\text{TiB}_2\text{-G}$  покрытий не более чем через 8 мес.

В 2000 г. компания «Credit Suisse First Boston Corporation» публикует обзор наиболее значимых разработок инертных анодов и смачиваемых катодов мировыми производителями алюминия. Анализируя состояние и кондиции этих разработок, автор [26] объявляет неизбежной Алюминиевую революцию в течение 5–10 лет и предлагает модернизацию заводов с переходом на технологию, использующую инертные электроды. Прогнозируется значительное снижение себестоимости металла, в частности, вклад электролизеров с дренированными катодами в снижение себестоимости составит до 250 долл./т алюминия (20–25% от затрат в 2000 г.). Значимыми и успешными, опробованными на большом количестве пилотных электролизеров, справедливо можно считать смачиваемые покрытия дренированных катодов фирм «Moltech» и «Comalco». И именно поэтому высказывается предположение, что «Comalco» первыми объявят о коммерческом использовании дренированных катодов через 1–1,5 года, т.е. в 2002 г.

Не менее значимые прогнозы относительно дренированных катодов делают авторы обзора 2002 г. [1] – «...если такие катоды позволят увеличить избыток фтористого алюминия до 15%, а температуру

снизить до  $940^\circ\text{C}$ , то станет возможным достичь и выхода по току в 97%. Если покрытие на основе  $\text{TiB}_2$  позволит снизить напряжение в катоде вдвое, а межэлектродное расстояние сократить до 22 мм, то энергопотребление составило бы 11 кВт·ч/кг  $\text{Al}$ ».

Китайские производители алюминия с большим вниманием наблюдали за работой своих коллег на Западе. Оптимистические публикации по инертным катодам мировых исследовательских центров их заинтересовали, и с 1980 г. под руководством Яхиянг Лю в «Central South University» начались работы по данному направлению в КНР. Первые публикации этих исследований появились в 1992–1993 годах. Х. Ванг и его сотрудники [27] изучали композиты на основе  $\text{TiB}_2$ , такие как  $\text{TiB}_2\text{-TiC}$ ,  $\text{TiB}_2\text{-SiC}$ ,  $\text{TiB}_2\text{-SiC-TiC}$ ,  $\text{TiB}_2\text{-AlN-TiC}$  и др. Холоднопрессованные образцы спекались при  $1600\text{--}2000^\circ\text{C}$ . Пористость образцов составляла 4–10%. В последующем направление работ сконцентрировалось на  $\text{TiB}_2$ -покрытиях углеродных катодов по технологии самотвердеющего при комнатной температуре покрытия (от англ. «Ambient Temperature Cured») (ATC) [28–30]. В конце 2001 г. катодное покрытие (60%  $\text{TiB}_2$ ) толщиной 2–3 мм по технологии ATC наносили на катоды четырех электролизеров с предварительно обожженными анодами на силу тока 160 кА фирмы «Aluminum Corporation of China Ltd», завод «Guangxi Branch». Рассмотрим рис. 9, 10.

Электролизеры с покрытием выдерживалось при комнатной температуре 24 ч, после чего проводился обжиг на коксике. Результаты показали, что испытания были недорогими и успешными, удобными в подготовке покрытия. Электролизеры работали с пониженным напряжением и повышенным выходом по току. На пуске зафиксировано уменьшение на 700 кг расхода  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , криолитовое отношение находилось в нормальном рабочем интервале. Это доказывало, что покрытие может действительно замедлить и уменьшить проникновение натрия в футеровку электролизера. Вид поверхности катодов после



1 года работы представлен на рис. 10.

На заводе «Yichuan» [31] испытывали электролизеры на силу тока 300 кА с катодным виброформованным покрытием  $TiB_2$ -С. Его состав, % масс.: антрацит 40–60, графит 5–20, каменноугольный пек 15–20, диборид титана 30–60. Зеленый катодный блок с покрытием  $TiB_2$ -С толщиной 8–12 мм представлен на рис. 11.

Испытывалось шесть электролизеров с покрытием  $TiB_2$ -С катодных блоков со

слоем алюминия на катоде. Данные электролизеры работали при стабильном напряжении электролизера, дренированной без алюминия подиной и стабильным боковым гарнисажем. В сравнении с электролизерами-свидетелями, пущенными в то же самое время, эти электролизеры имели меньший перепад напряжения в подине на 50–100 мВ и расход электроэнергии на 400 кВт·ч/т Al; выход по току мог быть увеличен на 1–2,5% (таблица).



Рис. 9. Катод с покрытием  $TiB_2$  по технологии «Ambient Temperature Cured»  
Fig. 9.  $TiB_2$  coated cathode using Ambient Temperature Cured technology

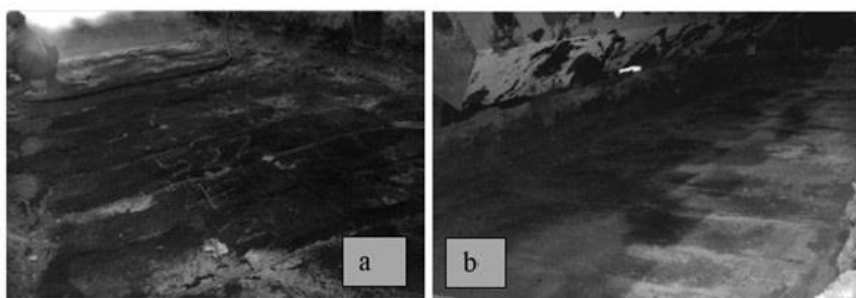


Рис. 10. Като́ды электролизеров на 160 кА после одного года работы; а – без покрытия; б – с покрытием  $TiB_2$   
Fig. 10. 160 kA cell cathodes after one year of operation; a – coating-free; b –  $TiB_2$  coated

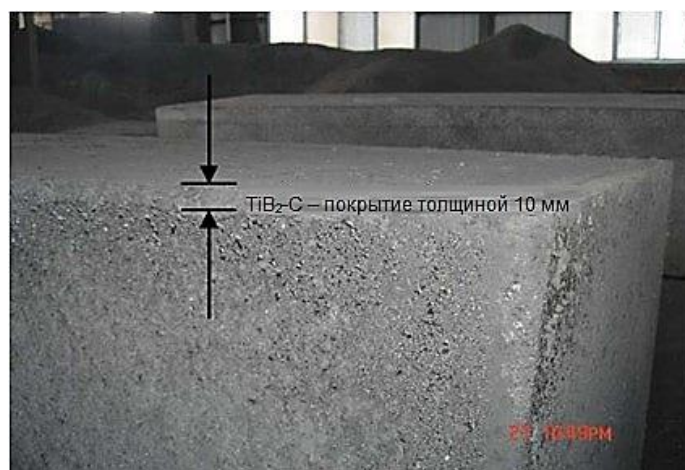


Рис. 11. Катодный блок с покрытием  $TiB_2$ -G  
Fig. 11.  $TiB_2$ -G coated cathode block

**Параметры полуграфитовых катодов с покрытием  $TiB_2$ -С и без него**  
**Parameters of  $TiB_2$ -C coated and coating-free semi-graphite cathodes**

Параметры	$TiB_2$ -С катоды	Графитовые катоды	Баланс
Перепад напряжения в подине, мВ	354,6	394,6	-40
Выход по току, %	95,5	93,5	+2
Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т Al	12949,7	13354,2	-404,5



Среднее электрическое сопротивление катодных блоков с виброформованным покрытием  $TiB_2$ -C ниже на 1,05 мкОм, чем у графитового катода. Лучший перепад напряжения катода составляет 261 мВ, в то время как содержание титана в первичном металле – 0,0025% масс.

Авторы [32] поставили своей целью получить катодный композит  $TiB_2$ -C с хорошими термомеханическими свойствами и сопротивляемостью к воздействию агрессивной среды в условиях электролиза. Они обратились к опыту изготовления и применения функциональных градиентных материалов (от англ. «Function Gradient Materials») (FGM) в аэрокосмической отрасли. Суть FGM состоит в переходной (градиентной) области поверхностного слоя изделий, в котором состав, микроструктура и свойства изменяются по глубине. Это может уменьшить деформацию и напряжение, вызванное несоответствующими свойствами между различными материалами.

$TiB_2$ -C FGM исследовались на предмет использования в катоде алюминиевых электролизеров в виде 10 мм  $TiB_2$  – обогащенного, смачиваемого алюминием слоя с градиентной прослойкой  $TiB_2$ -C. Измерялись деформации FGM (медленное изменение свойств и натриевое расширение) на модифицированной установке Раппопорта.

До экспериментальных исследований производились моделирование и расчеты необходимых параметров градиентного слоя. Основываясь на теории расщепленной пластины и правилах эластичной

механики, была принята одномерная модель асимметричной релаксации напряжений для  $TiB_2$ -C FGM катода (рис. 12).

После принятия ряда допущений моделированием установлено, что оптимальным проектом FGM катодного блока размером 560x515x400 мм будет:

- число слоев FGM – 3 или 4;
- толщина функционального слоя 10 мм состава C + 30%  $TiB_2$ ;
- толщина каждого градиентного слоя 5 мм состава C + 21%  $TiB_2$ ;
- остальное – углеродный блок.

Резюмируется, что по совокупности данных натриевого расширения и деформации ползучести катод FGM со слоем градиента имеет лучшие свойства сопротивляемости агрессивным условиям процесса электролиза.

Н. Фенг с коллегами [33] представили результаты испытания электролизера на 1350 А с дренированным катодом (рис. 13, 14).

Испытание электролизера в течение 100 ч с анодной плотностью тока 1,2 А/см<sup>2</sup> проводили на заводе «Fushun Smelter». Стабильность покрытия  $TiB_2$ -C оценивали по динамике содержания титана в алюминии, которое в равновесии составляло 0,019% масс. (на электролизерах мощностью 200 кА – 0,0021% масс.). Исходя из этого и наработки металла расчетная скорость эрозии покрытия составила 1 г/ч·м<sup>2</sup> (т.е. около 4 мм/год). Аутопсия катода после испытаний показала незначительный износ покрытия.

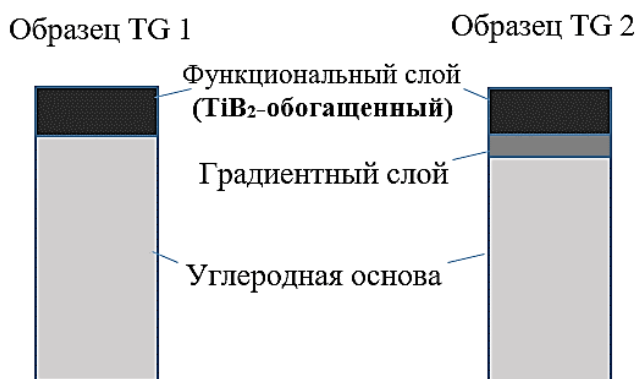


Рис. 12. Схема двух катодных структур функциональных градиентных материалов  
Fig. 12. Diagram of two cathode structures functional gradient materials

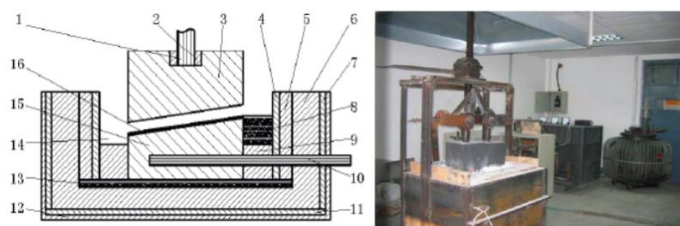


Рис. 13. Эскиз опытного электролизера (a) и вид в сборе (b)  
Fig. 13. Schematic design of the experimental cell and an assembled view

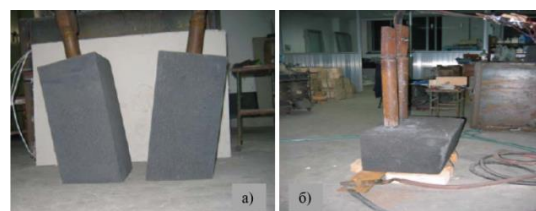


Рис. 14. Вид анодов (a) и катодов (b) после обжига и монтажа  
Fig. 14. View of anodes (a) and cathodes (b) after firing and mounting

Таким образом, внимание китайских научно-исследовательских центров и алюминиевой промышленности сосредоточено в основном на покрытиях  $TiB_2$ -C толщиной от 2 до 15 мм, наносимых на поверхность углеродной подины до пуска электролизера в эксплуатацию. Несмотря на отсутствие представительных пилотных и промышленных испытаний, наиболее перспективным считается так называемое FGM-покрытие (функциональный градиентный материал), сопрягаемое с углеродной основой блока на стадии его изготовления методом вибропрессования. Учитывая параметры FGM-покрытия [31–33] и цену порошка  $TiB_2$  в пределах 40–50 долл./кг (начало 2000-х годов), стоимость такого покрытия составит 650–800 долл./т блоков или будет удорожание монтажа электролизера средней мощности на 12–15 тыс. долл. Сегодня эти цены и расходы на изделия на порядок выше.

С другой стороны, не отрицая перспектив развития дренированных катодов, Дж. Кенери [34] высказывает критические соображения по их жизнеспособности:

«Дренированный электролизер подвергает углеродный компонент покрытия агрессивному воздействию электролита, что приводит к его разрушению. Степень износа должна быть относительно равномерной по всему электролизеру, а любое локальное разрушение покрытия из-за особенностей конструкции, пуска или методов эксплуатации может неблагоприятно воздействовать на ресурс всего электролизера. Хотя электролизеры с дренируемыми катодами доказали свою жизнеспособность, их промышленное применение вызывает сомнения до тех пор, пока не будет увеличена экономическая прибыль, чтобы компенсировать операционный риск».

Следует признать, что ни одним из мировых алюминиевых производителей и научно-исследовательских центров эти вопросы пока еще не решены окончательно. Чтобы заполнить данный пробел, объявлена новая алюминиевая революция – создание новой компании анонсировано электронным изданием международного научного журнала «Nature» (рис. 15) в мае 2018 г. [35].



Рис. 15. Рекламная заставка компании Elysis Ltd [36]  
Fig. 15. Elysis Ltd advertising screen saver [36]



Алюминиевые гиганты «Alcoa Corporation» и «Rio Tinto Aluminum» объявили о создании совместного предприятия «Elysis», которое займется внедрением экологически чистой технологии инертных электродов – анодов и катодов. Специалисты компании утверждают, что новая разработка сократит эксплуатационные расходы на 15% и увеличит выпуск алюминия на такой же процент.

Основанная в Монреале (Канада) к 2024 г. «Elysis» планирует внедрить революционную технологию на территории Канады, называя ее «малоуглеродистой». Переход всех заводов в Канаде на подобную технологию позволит снизить выбросы примерно на 6,5 млн т в год. Для реализации проекта «Elysis» привлечен в общей сложности 120 млн долл., в том числе «Alcoa» и «Rio Tinto Aluminum» будут инвестировать 43 млн долл., «Apple» – 13 млн долл. и правительство Канады – остальное. Премьер-министр Канады Джастин Трюдо назвал день утверждения проекта «поистине историческим днем для алюминиевой промышленности».

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Из большого числа испытанных за 65 лет материалов и изделий для дренированных катодов поисковая и исследовательская работа сконцентрировалась на  $TiB_2$ -материалах в виде катодных элементов (плиток, цилиндров) или адгезионных паст/композитов на поверхности угольной подины. Но в промышленности эти изделия и покрытия до сих пор не находят коммерческого использования.

2. Причинами сложной адаптации диборида титана к эксплуатационным условиям являются:

- керамика на основе боридов и карбидов подвержена терморастрескиванию;
- при движении подины смачиваемый защитный слой разрушается и отслаивается;
- даже незначительное несоответ-

ствие в коэффициентах термического линейного расширения покрытий и углеграфитовой основы на любом из локальных участков подины приводит к растрескиванию и деградации покрытий;

- с течением времени защитный слой неравномерно по площади подины растворяется в алюминии и электролите;

- не решены вопросы технологического обеспечения работы электролизеров с дренированными катодами;

- кризис ожидаемой перспективы или отсутствие подтверждения целевых показателей работы дренированных катодов ни в одном из многочисленных пилотных испытаний не обозначен.

Тем не менее, равноценной альтернативы дибориду титана в настоящее время не существует.

3. Основная причина и сдерживающий фактор коммерческого использования – высокая стоимость порошков и компактных изделий, что является следствием экстремальных свойств  $TiB_2$  и необходимости применения сложного оборудования для синтеза и прессования. Кроме того, высокая реакционная способность исходных компонентов и конечного продукта к материалам тиглей и малейшему присутствию кислорода в атмосфере создает трудности получения чистых продуктов.

4. Перспективными направлениями разработки технологии смачиваемых катодов алюминиевых электролизеров следует считать следующие:

- развитие малобюджетной технологии низкотемпературного синтеза индивидуальных порошков диборида титана и методов его компактирования;

- производство композиционных материалов диборид титана-углеграфита ( $TiB_2$ -CG) в условиях, приближенных к технологическим нормам производства углеграфитовых блоков;

- электрохимический синтез диборида титана на катодной углеграфитовой поверхности непрерывен в процессе работы электролизера.



**Библиографический список**

1. Haupin W., Frank W. Current and energy efficiency of Hall-Heroult cells - past, present and future // *Light Metal Age*. 2002. No. 5–6. P. 6–8, 10–13.
2. Choate W.T., Green J.A.S. U.S. Energy Requirements for Aluminum Production: Historical Perspective, Theoretical Limits and New Opportunities // *Special Review for U.S. Department of Energy*. 2003. 117 p.
3. Kenchington H.S., Eisenhauer J.L., Green J.A.S. A technology roadmap for the U.S. aluminum industry // *The Journal of The Minerals*. 1997. Vol. 49. Issue 8. P. 18–21. URL: [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2013/11/f4/al\\_roadmap.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2013/11/f4/al_roadmap.pdf) (15.05.2018).
4. Patent no. 802905, Great Britain, Int. Cl. B23n. C22d. Improvements in or relating to Electrolytic Cells for the Production of Aluminium / C.E. Ransley. No. 1155/54. Declared 14.01.1954; filed 14.01.1955; published 15.10.1958. 8 p.
5. Patent no. 3028324, U.S., Int. Cl. 204-67. Producing or Refining Aluminum / C.E. Ransley; British Aluminium Company. No. 660994. Declared 23.05.1957; published 23.04.1962. 34 p.
6. Patent no. 2915442, U.S., Cl. 204-67. Production of Aluminum / R.A. Lewis; Kaiser Aluminum & Chemical Corporation. No. 549347. Filed 28.11.1955; published 01.12.1959. 5 p.
7. Patent no. 3400061, U.S., Cl. 204-67. Electrolytic Cell for Production of Aluminum and Method of Making the Same / R.A. Lewis and R.D. Hildebrandt; Kaiser Aluminum & Chemical Corporation. No. 325228. Filed 21.11.1963; published 3.09.1968. 6 p.
8. Hudson T.J. Cathode Technology for Aluminum Electrolysis Cells // *Light Metals*. 1987. P. 321–325.
9. Gessing A.J., Wheeler D.J. Screening and Evaluation Methods of Cathode Materials for Use in Aluminum Reduction Cells in Presence of Molten Aluminum and Cryolite up to 1000°C // *Light Metals*. 1987. P. 327–334.
10. Patent no. 4376029, U.S., Int. Cl. C25B 11/04, C25C 3/12. Titanium diboride-graphite composites / L.A. Joo, K.W. Tucker, F.E. McCown; Great Lakes Carbon Corporation. No. 186181. Filed 11.09.1980; published 08.03.1983. 5 p.
11. McIntyre J., Mitchell D.N. and Simpson S. Performance Testing of Cathodic Materials and Designs in a 16 kA Cell and a Test Bed // *Light Metals*. 1987. P. 335–344.
12. Tucker K.W., Gee J.T., Shaner J.R., Joo L.A., Taberoux A.T., Stewart D.V. and Richards N.E. Stable TiB<sub>2</sub>-Graphite Cathode for Aluminium Production // *Light Metals*. 1987. P. 345–349.
13. Alcorn T.R., Stewart D.V., Tabereaux A.T., Joo L.A. and Tucker K.W. Pilot Reduction Cell Operation Using TiB<sub>2</sub>-G Cathodes // *Light Metals*. 1990. P. 413–418.
14. Christini R.A., Dawless R.K., Ray S.P., Weirauch D.A. Advanced Anodes and Cathodes Utilized in Energy Efficient Aluminum Production Cells // *Final Technical Progress Report for Phase III. Cooperative Agreement Number DE-FC07-98ID13666*. 2001. No. 5. 92 p.
15. Patent no. 5279715, U.S., Cl.<sup>5</sup> C25C 3/00, C25C 3/04, C25C 3/06. Process and apparatus for low temperature electrolysis of oxides / A.F. Camera, K.M. Tomaswick, S.P. Ray, D.P. Ziegler. No. 761414. Filed: 17.09.1991; published 18.01.1994. 17 p.
16. Bruggeman J.N., Alcorn T.R., Jeltsch R., Mroz T.J. Wettable Ceramic-Based Drained Cathode Technology for Aluminum Electrolysis // *Final Technical Progress Report for the Period October 1997 to December 2002 for DE-FC07-97ID13567*. December 31, 2002.
17. Øye H.A., de Nora V., Duruz J.-J., Johnston G. Properties of Colloidal Alumina-Bonded TiB<sub>2</sub> Coating on Carbon Cathode Materials // *Light Metals*. 1997. P. 1171–1178.
18. Patent no. 5364513, U.S., Cl.<sup>5</sup> C25C 3/08, C25C 3/16, B05D 5/12, B05D 1/36. Electrochemical cell component or other material having oxidation preventive coating / J.A. Sekhar, V. Nora; Moltech Invent SA. Appl. No. 898052. Filed: 12.06.1992; 15.11.1994. 9 p.
19. Patent no. 6783655, U.S., Cl.<sup>7</sup> C25C 3/06, C25C 3/08, C25C 3/12. Slurry and Method for Producing Refractory Borides and Coatings for Use in Aluminium Electrowinning Cells / J.A. Sekhar, J.-J. Duruz, J.J. Liu. Moltech Invent SA. No. 10/183269. Filed 27.06.2002; published 31.08.2004. 7 p.
20. Hiltmann F., Seitz K. Titanium Diboride Plasma Coating of Carbon Cathode Materials // *Light Metals*. 1997. P. 379–390.
21. Øye H.A., Thonstad J., Dahlqvist K., Handå S. and de Nora V. Reduction of Sodium Induced Stresses in Hall Heroult Cells // *Aluminium*. 1996. № 72. P. 23–27.
22. Brown G.D., Taylor M.P., Hardie G.J., Shaw R.W. TiB<sub>2</sub> Coated Aluminium Reduction Cells: Status and Future Direction of Coated Cells in Comalco // *Proc. 6th Australasian Aluminium Smelter Technology Conf. and Workshop*, ed. B.J. Welch and M. Skyllas-Kazacos (Queenstown, 22–27 November 1998). Sydney, N.S.W., Australia: University of New South Wales, 1998. P. 499–508.
23. Boxall L.G., Cooke A. V., Hayden W. Use of TiB<sub>2</sub> Cathode Materials: Application and Benefits in Conventional VSS Cells // *Light Metals*. 1984. P. 573–588.
24. Cooke A.V., Buchta W.M. Use of TiB<sub>2</sub> Cathode Materials: Demonstrated Energy Conservation in VSS Cells // *Light Metals*. 1985. P. 545–566.
25. Patent no. 5658447, U.S., Cl.<sup>6</sup> C25C 3/00, C25C 3/06, C25C 3/08, C25C 7/00. Electrolysis Cell and Method for Metal Production / K.D. Watson, D.D. Juric, R.W. Shaw, G.J. Houston; Comalco Aluminium Limited. No. 454183. Filed 17.12.1993; published 19.08.1997. 14 p.
26. Leeuwen T.M. An Aluminum Revolution // *Equity Research Report (Credit Suisse First Boston Corporation)*. 2000. No. 22. P. 110.
27. Liao Xianan, Liu Yexiang and Mao Zhengping. Development and Application of TiB<sub>2</sub>-C Composite Coated Cathodes // *Material Guide*. 1995. No. 2. P. 17–19.
28. Huang Yongzhong, Liu Yexiang, Wang Huazhang.



TiB<sub>2</sub> Coating Technology in Aluminum Reduction Cells // Transactions of Non-ferrous Metals Society of China. 1996. Vol. 2. No. 6. P. 19–22.

29. Wang Yaowu, Feng Naixiang, You Jing, Peng Jianping, Su Shijie, Duan Xueliang et al. Study on expansion of TiB<sub>2</sub>/C compound cathode and sodium penetration during electrolysis // Light Metals. 2007. P. 1067–1070.

30. Qing-yu Li, Yan-qing Lai, Yong-gang Liu, Lie Li, Jian-hong Yang, Jing Fang, Ye-xiang Liu. Laboratory Test and Industrial Application of An Ambient Temperature Cured TiB<sub>2</sub> Cathode Coating for Aluminum Electrolysis Cells // Light Metals. 2004. P. 327–331.

31. Bijun Ren, Junli Xu, Zhongning Shi. Application of TiB<sub>2</sub> Coating Cathode Blocks Made by Vibration Molding for 300 kA Aluminum Reduction Cell // Light Metals. 2007. P. 1047–1050.

32. Jilai Xue and Øye H.A. Structure Design and Deformation Measurements of C/TiB<sub>2</sub> Function Gradient

Materials for Aluminum Reduction Cathode // Light Metals. 2010. P. 895–900.

33. Feng Nai-xiang, Qi Xi-quan, Peng Jian-ping. Electrolysis test of a 1350 A drained cathode reduction cell with TiB<sub>2</sub>-coated cathode // Light Metals. 2006. P. 505–509.

34. Keniry J. Future directions for aluminium reduction cell technology // 7th Australasian Aluminium Smelting Technology conference and Workshop (Melbourne, 11–16 November 2001). Sydney: Centre for Electrochemical and Minerals Processing, 2001. P. 14.

35. Editorial. Aluminium producers promise a cleaner smelting pot // International journal of science «Nature» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nature.com/articles/d41586-018-05158-1> (30.05.2018).

36. Elysis Ltd [Электронный ресурс]. URL: <https://elysis.com> (24.04.2018)

### References

1. Haupin W, Frank W. Current and energy efficiency of Hall-Heroult cells - past, present and future. *Light Metal Age*. 2002;5–6:6–8,10–13.

2. Choate WT, Green JAS. U.S. Energy Requirements for Aluminum Production: Historical Perspective, Theoretical Limits and New Opportunities. *Special Review for U.S. Department of Energy*. 2003;117.

3. Kenchington HS, Eisenhower JL, Green JAS. A technology roadmap for the U.S. aluminum industry. *The Journal of the Minerals*. 1997; 49(8):18–21. Available from: [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2013/11/f4/al\\_roadmap.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2013/11/f4/al_roadmap.pdf) [Accessed 15th May 2018].

4. Ransley CE. *Improvements in or relating to Electrolytic Cells for the Production of Aluminium*. Patent Great Britain, no. 802905; 1958.

5. Ransley CE. *Producing or Refining Aluminum*. Patent U.S., no. 3028324; 1962.

6. Lewis RA. *Production of Aluminum*. Patent U.S., no. 2915442; 1959.

7. Lewis RA, Hildebrandt RD. *Electrolytic Cell for Production of Aluminum and Method of Making the Same*. Patent U.S., no. 3400061; 1968.

8. Hudson TJ. Cathode Technology for Aluminum Electrolysis Cells. *Light Metals*. 1987;321–325.

9. Gessing AJ, Wheeler DJ. Screening and Evaluation Methods of Cathode Materials for Use in Aluminum Reduction Cells in Presence of Molten Aluminum and Cryolite up to 1000°C. *Light Metals*. 1987;327–334.

10. Joo LA, Tucker KW, McCown FE. *Titanium diboride-graphite composites*. Patent U.S., no. 4376029; 1983.

11. McIntyre J, Mitchell DN and Simpson S. Performance Testing of Cathodic Materials and Designs in a 16 kA Cell and a Test Bed. *Light Metals*. 1987;335–344.

12. Tucker KW, Gee JT, Shaner JR, Joo LA, Taberoux AT, Stewart DV and Richards NE. Stable TiB<sub>2</sub>-Graphite Cathode for Aluminium Production. *Light Metals*. 1987;345–349.

13. Alcorn TR, Stewart DV, Tabereaux AT, Joo LA and Tucker KW. Pilot Reduction Cell Operation Using TiB<sub>2</sub>-G Cathodes. *Light Metals*. 1990;413–418.

14. Christini RA, Dawless RK, Ray SP, Weirauch DA. Advanced Anodes and Cathodes Utilized in Energy Efficient Aluminum Production Cells. *Final Technical Progress Report for Phase III*. Cooperative Agreement Number DE-FC07-98ID13666. 2001;5:92.

15. Camera AF, Tomaswick KM, Ray SP, Ziegler DP. *Process and apparatus for low temperature electrolysis of oxides*. Patent U.S., no. 5279715; 1994.

16. Bruggeman JN, Alcorn TR, Jeltsch R, Mroz TJ. Wettable Ceramic-Based Drained Cathode Technology for Aluminum Electrolysis. *Final Technical Progress Report for the Period October 1997 to December 2002* for DE-FC07-97ID13567. 2002.

17. Øye HA, de Nora V, Duruz J-J, Johnston G. Properties of Colloidal Alumina-Bonded TiB<sub>2</sub> Coating on Carbon Cathode Materials. *Light Metals*. 1997;1171–1178.

18. Sekhar JA, Nora V. *Electrochemical cell component or other material having oxidation preventive coating*. Patent U.S., no. 5364513; 1994.

19. Sekhar JA, Duruz J-J, Liu JJ. *Slurry and Method for Producing Refractory Borides and Coatings for Use in Aluminium Electrowining Cells*. Patent U.S., no. 6783655; 2004.

20. Hiltmann F, Seitz K. Titanium Diboride Plasma Coating of Carbon Cathode Materials. *Light Metals*. 1997;379–390.

21. Øye HA, Thonstad J, Dahlqvist K, Handå S and de Nora V. Reduction of Sodium Induced Stresses in Hall Heroult Cells. *Aluminium*. 1996;72:23–27.

22. Brown G.D., Taylor M.P., Hardie G.J., Shaw R.W. TiB<sub>2</sub> Coated Aluminium Reduction Cells: Status and Future Direction of Coated Cells in Comalco. *Proc. 6th Australasian Aluminium Smelter Technology Conf. and Workshop*, ed. B.J. Welch and M. Skyllas-Kazacos, 22–

27 November 1998, Queenstown, Sydney, N.S.W., Australia: University of New South Wales; 1998, p. 499–508.

23. Boxall LG, Cooke AV, Hayden W. Use of  $TiB_2$  Cathode Materials: Application and Benefits in Conventional VSS Cells. *Light Metals*. 1984;573–588.

24. Cooke AV, Buchta WM. Use of  $TiB_2$  Cathode Materials: Demonstrated Energy Conservation in VSS Cells. *Light Metals*. 1985;545–566.

25. Watson KD, Juric DD, Shaw RW, Houston GJ. *Electrolysis Cell and Method for Metal Production*. Patent U.S., no. 5658447; 1997.

26. Leeuwen TM. An Aluminum Revolution. *Equity Research Report* (Credit Suisse First Boston Corporation). 2000; 22:110.

27. Liao Xianan, Liu Yexiang and Mao Zhengping. Development and Application of  $TiB_2$ -C Composite Coated Cathodes. *Material Guide*. 1995;2:17–19.

28. Huang Yongzhong, Liu Yexiang, Wang Huazhang.  $TiB_2$  Coating Technology in Aluminum Reduction Cells. *Transactions of Non-ferrous Metals Society of China*. 1996;2(6):19–22.

29. Wang Yaowu, Feng Naixiang, You Jing, Peng Jianping, Su Shijie, Duan Xueliang et al. Study on expansion of  $TiB_2/C$  compound cathode and sodium penetration during electrolysis. *Light Metals*. 2007;1067–1070.

#### Критерии авторства

Горланов Е.С. получил и оформил научные результаты и несет ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**Горланов Евгений Сергеевич,**  
кандидат технических наук,  
заместитель генерального  
директора ООО «ЭКСПЕРТ-АЛ»,  
199106, г. Санкт-Петербург,  
Средний просп. В.О., 86/А, Россия;  
✉ e-mail: gorlanove@yandex.ru

30. Qing-yu Li, Yan-qing Lai, Yong-gang Liu, Lie Li, Jian-hong Yang, Jing Fang, Ye-xiang Liu. Laboratory Test and Industrial Application of an Ambient Temperature Cured  $TiB_2$  Cathode Coating for Aluminum Electrolysis Cells. *Light Metals*. 2004;327–331.

31. Bijun Ren, Junli Xu, Zhongning Shi. Application of  $TiB_2$  Coating Cathode Blocks Made by Vibration Molding for 300 kA Aluminum Reduction Cell. *Light Metals*. 2007;1047–1050.

32. Jilai Xue and Øye HA. Structure Design and Deformation Measurements of C/ $TiB_2$  Function Gradient Materials for Aluminum Reduction Cathode. *Light Metals*. 2010;895–900.

33. Feng Nai-xiang, Qi Xi-quan, Peng Jian-ping. Electrolysis test of a 1350 A drained cathode reduction cell with  $TiB_2$ -coated cathode. *Light Metals*. 2006;505–509.

34. Keniry J. Future directions for aluminium reduction cell technology. *7th Australasian Aluminium Smelting Technology conference and Workshop*, 11–16 November 2001, Melbourne, Sydney: Centre for Electrochemical and Minerals Processing; 2001, p. 14.

35. Editorial. Aluminium producers promise a cleaner smelting pot. *International journal of science "Nature"*. Available from: <https://www.nature.com/articles/d41586-018-05158-1> [Accessed 30th May 2018].

36. Elysis Ltd. Available from: <https://elysis.com> [Accessed 24th April 2018].

#### Authorship criteria

Gorlanov E.S. has obtained and formalized the scientific results and bears the responsibility for plagiarism.

#### Conflict of interests

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by the author.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Evgeniy S. Gorlanov,**  
Cand. Sci. (Eng.),  
Deputy General Director of EXPERT-AL LLC,  
86/A, Sredniy pr., V.O., Saint-Petersburg 199106,  
Russia;  
✉ e-mail: gorlanove@yandex.ru



## Сернокислотное выщелачивание меди и свинца из золотосодержащих катодных осадков

© В.В. Жмурова

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

**Резюме:** Цель – изучение химического состава катодных осадков, получаемых при переработке золотосодержащих руд по цианисто-сорбционной технологии; проведение экспериментальных исследований по сернокислотному выщелачиванию меди и свинца из золотосодержащих катодных осадков; рассмотрение влияния концентрации серной кислоты на степень перехода меди и свинца в раствор. Использовались для математической обработки экспериментальных данных метод корреляционного анализа, для изучения химического состава осадков – атомно-абсорбционный анализ, рентгеноспектральный микроанализ. Изучен химический состав катодных осадков; установлено, что основными примесями (оказывающими влияние на их дальнейшую аффинажную переработку) являются медь и свинец, которые необходимо удалять перед последующим получением сплава лигатурного золота. Проведены экспериментальные исследования по сернокислотной обработке катодных осадков, показавшие следующие результаты: степень перехода меди в раствор – 45,98%, свинца – 3,65%, оптимальная концентрация серной кислоты – 165,4 кг/м<sup>3</sup>. Результаты сернокислотного выщелачивания примесей из катодных осадков показали низкую эффективность, т.к. свинец не удалось извлечь в раствор по причине пассивации его поверхности пленкой PbSO<sub>4</sub>. При математической обработке экспериментальных данных методом корреляционного анализа установлено, что концентрация серной кислоты влияет на степень перехода меди и свинца в раствор.

**Ключевые слова:** катодные осадки, сернокислотное выщелачивание, примеси, лигатурное золото, корреляционный анализ, медь, свинец

**Информация о статье:** Дата поступления 22 августа 2019 г.; дата принятия к печати 19 сентября 2019 г.; дата онлайн-размещения 31 октября 2019 г.

**Для цитирования:** Жмурова В.В. Сернокислотное выщелачивание меди и свинца из золотосодержащих катодных осадков. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т. 23. № 5. С. 1023–1031. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-1023-1031>

## Sulfuric acid leaching of copper and lead from gold-bearing cathode deposits

Viktoria V. Zhmurova

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

**Abstract:** The purpose of the paper is to study the chemical composition of cathode deposits obtained at gold-bearing ore processing by the cyanide-sorption technology; to conduct experimental studies of the sulfuric acid leaching of copper and lead from gold-bearing cathode deposits; to consider the effect of sulfuric acid concentration on the transition degree of copper and lead into solution. Mathematical processing of experimental data is performed by the correlation method. Chemical composition of the cathode deposits is studied by the atomic absorption analysis and X-ray spectral microanalysis. Having studied the chemical composition of the cathode deposits the main impurities influencing their further refining is identified. They are copper and lead, which should be removed before the following production of base gold bullion. The results of the experimental studies on sulfuric acid treatment of cathode deposits are as follows: the transition degree of copper into solution is 45.98%, lead – 3.65%, the optimal concentration of sulfuric acid is 165.4 kg/m<sup>3</sup>. The results of sulfuric acid leaching of impurities from the cathode deposits appears to be of low efficiency as lead can not be extracted into the solution due to the passivation of its surface with PbSO<sub>4</sub> film. The mathematical processing of experimental data by the correlation analysis has showed that the concentration of sulfuric acid affects the degree of copper and lead transition into the solution.

**Keywords:** cathode deposits, sulfuric acid leaching, impurities, base gold, correlation analysis, copper, lead

**Information about the article:** Received August 22, 2019; accepted for publication September 19, 2019; available online October 31, 2019.

**For citation:** Zhмурова VV. Sulfuric acid leaching of copper and lead from gold-bearing cathode deposits. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2019;23(5):1023–1031. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-1023-1031>

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Россия является одним из лидеров по добыче и производству золота. Однако истощение запасов (богатых по содержанию золота и серебра) руд приводит к необходимости вовлечения в переработку комплексных золотополиметаллических рудных источников, различных отходов, содержащих драгоценные металлы, с применением как традиционных, так и новых технологий [1–8].

Конечной продукцией большинства золотоизвлекательных фабрик является сплав лигатурного золота, который в последующем отправляется на аффинажную переработку. Чем выше массовая доля золота и серебра в нем, тем ниже будет стоимость аффинажных услуг и выше извлечение золота. Исходным сырьем для сплава золота и серебра являются катодные осадки (КО), образующиеся путем десорб-

ции угля и электролиза растворов, полученных по цианисто-сорбционной технологии при переработке золотосодержащих руд (рис. 1). Данные материалы помимо драгоценных металлов содержат также Cu, Zn, Fe, Pb, SiO<sub>2</sub>, CaO и др.<sup>1</sup> [9, 10]. Наличие в КО примесных металлов приводит к несоответствию ТУ 117-2-3-78 «Золото катодное на углеграфитной основе» их химического состава, а также возникновению следующих проблем: недостоверному опробованию сплава при приемной плавке, возникновению аффинажной разницы выше установленных пределов, повышенной стоимости аффинажных услуг в случае содержания свинца выше 5% и т.д. [11]. Таким образом, для снижения затрат на аффинаж необходимо повысить содержание Au и Ag. Одним из способов повышения качества продуктов, содержащих драгоценные металлы, является кислотное выщелачивание примесей из них [12, 13].

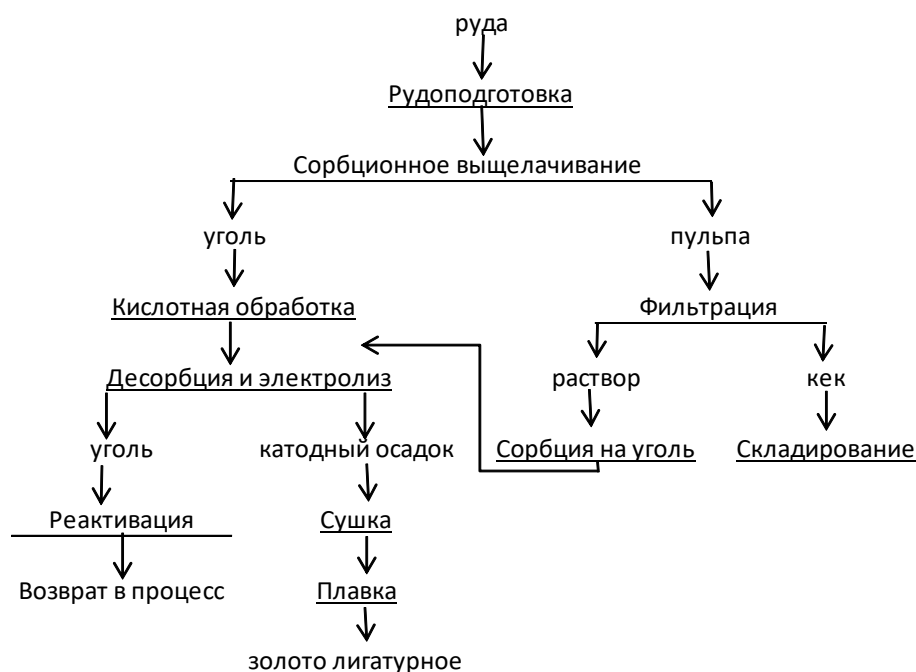


Рис. 1. Технологическая схема переработки золотосодержащих руд  
Fig. 1. Flow diagram of gold ore processing

<sup>1</sup>Масленицкий И.Н., Чугаев Л.В., Борбат В.Ф., Никитин М.В., Стрижко Л.С. Металлургия благородных металлов: учебник. Изд-е 2. М.: Металлургия. 1987. 432 с.



Состав КО зависит в первую очередь от примесей, находящихся в руде, которые при выщелачивании переходят в раствор совместно с драгоценными металлами. Содержание золота в катодных осадках варьируется от 10 до 80%, что сказывается в дальнейшем на качестве извлеченных из них сплавов лигатурного золота, для получения которых используется технология плавки с флюсами: добавляется 30–40% по массе кальцинированной соды и 50% технической буры. Иногда для окисления содержащихся в катодных осадках железа, меди и других металлов добавляют до 10% селитры [14]. Тяжелые цветные металлы, такие как Cu, Pb, Zn и другие, при плавке переходят в золотосеребряный слиток. Для повышения содержания драгоценных металлов в сплаве лигатурного золота, снижения стоимости последующего аффинажа предложен способ сернокислотного выщелачивания примесей из катодных осадков [15].

## 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Химический состав образца исходного катодного осадка, полученного при переработке золотосодержащей руды одного из месторождений Амурской области, определялся атомно-абсорбционным методом на оптико-эмиссионном спектрометре VARIAN 730-ES («CCS Services», Швейцария), представленном в табл. 1.

На карте распределения характерного рентгеновского излучения (полученной

при изучении образца катодного осадка рентгеноспектральным микроанализом на микроанализаторе JXA-8200 фирмы «JEOL», Япония) показано, что элементы, присутствующие в исследуемой пробе, не образуют друг с другом соединений, что позволяет использовать методы кислотного выщелачивания для их разделения (рис. 2).

Из данных табл. 1 и рис. 2 очевидно, что основными примесями в катодных осадках являются медь и свинец, другие элементы не оказывают значительного влияния на получение из КО сплава лигатурного золота, т.к. включают в себя оксиды, при плавке переходящие в шлак.

Для экспериментов использовались растворы  $H_2SO_4$  (с концентрацией от 51,6 до 697,5 кг/м<sup>3</sup>), с которыми большинство металлов (Cu, Pb, Fe, Zn), находящихся в катодном осадке, образуют растворимые соединения<sup>2,3</sup>. Масса навески составляла 100 г; продолжительность выщелачивания – 2 ч; Ж:Т = 3:1. Исследования осуществлялись в двух параллельных пробах. После проведения выщелачивания кек промывался водой, высушивался и (совместно с растворами) анализировался на содержание меди и свинца.

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам данных химического состава кеков выщелачивания и растворов был произведен расчет степени перехода меди и свинца в раствор. Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Таблица 1

*Химический состав исходного катодного осадка*

Table 1

*Chemical composition of the initial cathode deposit*

Содержание, % масс.						
Au	Ag	Cu	Zn	Pb	Fe	Прочие примеси
21,5	20,9	41,3	0,8	4,6	1,3	9,6*

Примечание/Note: \* – неметаллические примеси (SiO<sub>2</sub>, CaO и др.)/ Non-metallic impurities (SiO<sub>2</sub>, CaO and others).

<sup>2</sup>Худяков И.Ф., Кляйн С.Э., Агеев Н.Г. Металлургия меди, никеля, сопутствующих элементов и проектирование цехов: учебник. М.: Металлургия, 1993. 431 с.

<sup>3</sup>Валиев Х.Х., Романтеев Ю.П. Металлургия свинца, цинка и сопутствующих металлов: учебник. Алматы: Айкос, 2000. 441 с.

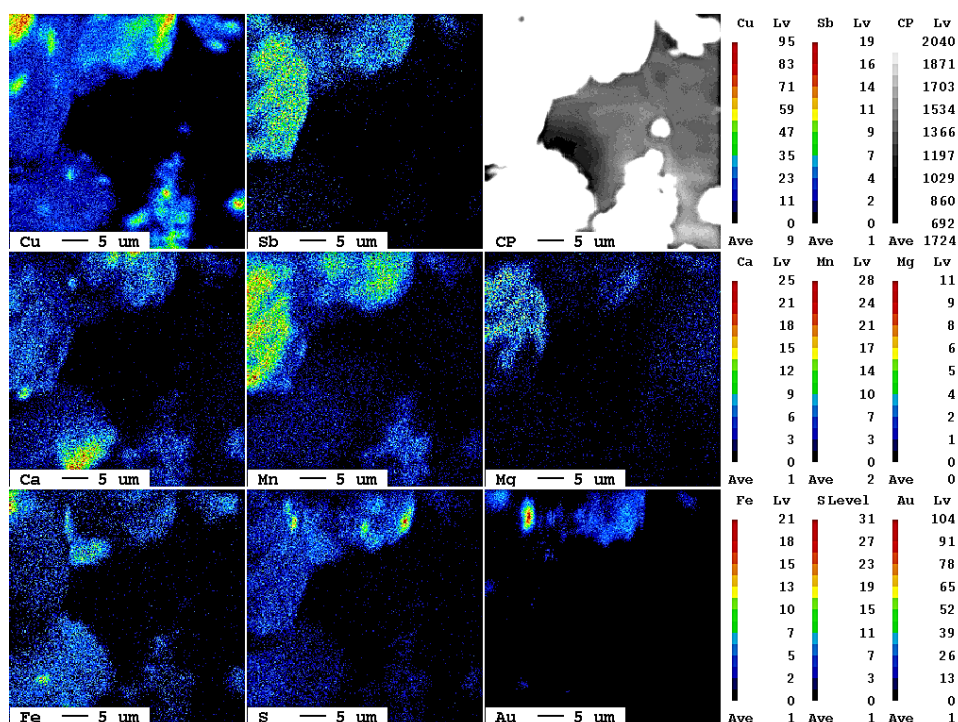


Рис. 2. Карта распределения характеристического рентгеновского излучения образца катодного осадка, полученного при переработке золотосодержащей руды Амурской области  
Fig. 2. Distribution map of the characteristic x-ray radiation of a cathode deposit sample obtained when processing the gold-bearing ore from the Amur region

Таблица 2

Степень перехода меди и свинца в раствор

Table 2

Degree of copper and lead transition into solution

№ опыта	Степень перехода элементов в раствор, % масс.		Концентрация $H_2SO_4$ , кг/м <sup>3</sup>
	Cu	Pb	
1	30,50	2,47	51,6
2	32,43	3,12	106,6
3	45,98	3,65	165,4
4	17,94	0,32	227,9
5	5,00	0,32	365,6
6	21,40	0,74	521,1
7	11,81	0,62	697,5

Из данных табл. 2 видно, что максимальная степень перехода меди в раствор (45,98%) наблюдалась при концентрации серной кислоты 165,4 кг/м<sup>3</sup>; дальнейшее увеличение концентрации растворителя не привело к росту выщелачивания меди из катодных осадков. Таким образом, для удаления меди из золотосодержащих ка-

тодных осадков наиболее целесообразно использовать разбавленные растворы серной кислоты. Степень перехода свинца в раствор низкая – не превысила 2%; свинец не удалось извлечь в раствор по причине пассивации его поверхности пленкой  $PbSO_4$ , это отражено в специализированных источниках<sup>4</sup> [16].

<sup>4</sup>Романтеев Ю.П., Федоров А.Н., Быстров С.В., Комков А.А. Металлургия свинца: учеб. пособие. М.: МИСиС, 2005. 215 с.





#### 4. КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Применение методов математической статистики и приемов моделирования позволяют сократить время эксперимента, делают его целенаправленным и организованным, способствуют надежности полученных результатов [17]. Математическая задача – статистическая обработка результатов химического эксперимента, а также отбор значимых факторов.

Целью корреляционного анализа является проверка наличия корреляции между извлечением меди и свинца, а также концентрации серной кислоты в растворе. Оценка наличия корреляции осуществляется при помощи коэффициента корреляции, который необходимо определить, а также найти уравнение регрессии, связывающее эти величины<sup>5</sup>. Корреляционный анализ состоит из нескольких этапов.

Строим графики зависимости извлечения меди ( $Y_1$ ) и свинца ( $Y_2$ ) от концентрации серной кислоты ( $X$ ) (рис. 3).

Из данных рис. 3 очевидно, что из-

влечение меди возрастает с ростом концентрации кислоты, достигая максимума при 165,4 г/дм<sup>3</sup>, затем при увеличении концентрации извлечение меди падает, свинец практически нерастворим в серной кислоте.

1. Проводим расчеты средних значений, где  $X$  – концентрация серной кислоты,  $Y$  – степень перехода элемента в раствор. Данные расчетов представлены в табл. 3.

2. Проводим проверку расчетов по следующей формуле:

$$\sum_{i=1}^n (x + y)^2 = \sum_{i=1}^n x^2 + \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i + \sum_{i=1}^n y^2. \quad (1)$$

Для меди:

$$1066358 = 985041,67 + 2 \cdot 37991,85 + 5332,63, \\ 1066358 = 1066358.$$

Для свинца:

$$989215,62 = 985041,67 + 2 \cdot 2071,84 + 30,27, \\ 989215,6 = 989215,6.$$

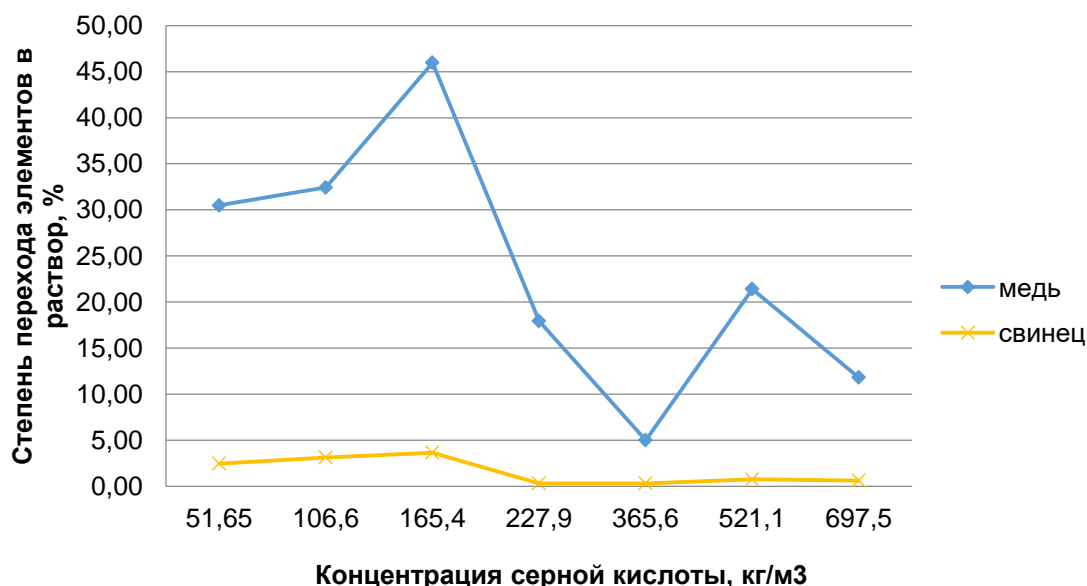


Рис. 3. Зависимость степени перехода в раствор меди, свинца от концентрации серной кислоты  
Fig. 3. Dependence of the degree of copper and lead transition into solution on sulfuric acid concentration

<sup>5</sup>Короткова Е.И. Планирование и организация эксперимента: учеб. пособ. Томск: Изд-во ТПУ, 2010. 122 с.

Таблица 3

Расчеты средних значений данных

Table 3

Average data calculations

Медь							
№ опыта	X	Y	X <sup>2</sup>	Y <sup>2</sup>	X·Y	X+Y	(X+Y) <sup>2</sup>
1	51,65	31,17	2667,72	971,56	1609,93	82,82	6859,16
2	106,6	32,43	11363,56	1051,70	3457,04	139,03	19329,35
3	165,4	48,79	27357,16	2380,46	8069,86	214,19	45877,36
4	227,9	17,93	51938,41	321,49	4086,24	245,83	60432,41
5	365,6	4,99	133663,36	24,90	1824,34	370,59	137336,96
6	521,1	21,39	271545,21	457,53	11146,39	542,49	294295,41
7	697,5	11,18	486506,25	124,99	7798,05	708,68	502227,35
$\overline{X}, \overline{Y}$	305,10	23,98	–	–	–	–	–
$\Sigma$	2136,05	167,88	985041,67	5332,63	37991,85	2303,63	1066358
Свинец							
№ опыта	X	Y	X <sup>2</sup>	Y <sup>2</sup>	X·Y	X+Y	(X+Y) <sup>2</sup>
1	51,65	2,47	2667,72	6,10	127,57	54,12	2928,97
2	106,6	3,12	11363,56	9,73	332,59	109,72	12038,47
3	165,4	3,65	27357,16	13,32	603,71	169,05	28577,90
4	227,9	0,32	51938,41	0,10	72,92	228,22	52084,36
5	365,6	0,32	133663,36	0,10	116,99	365,92	133,897,44
6	521,1	0,74	271545,21	0,54	385,61	521,84	272316,98
7	697,5	0,62	486506,25	0,38	432,45	698,12	487371,53
$\overline{X}, \overline{Y}$	305,10	1,60	–	–	–	–	–
$\Sigma$	2136,05	11,24	985041,67	30,27	2071,84	2146,99	989215,65

3. Рассчитываем стандартные отклонения случайных величин по формулам (табл. 4):

$$Sx = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}, \quad (2)$$

$$Sy = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n-1}}. \quad (3)$$

4. Определяем выборочный коэффициент корреляции по формуле (табл. 5):

$$r^* = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{(n-1) \cdot Sx \cdot Sy}. \quad (4)$$

Проверяем нулевую гипотезу (близость выборочного коэффициента корреляции к генеральному), табл. 6.

$$|r| - \frac{1,96(1-r^2)}{\sqrt{n}} > 0. \quad (5)$$

Доверительный интервал коэффициента корреляции: для меди – 0,37; для свинца – 0,15. Зависимость близка к линейной.

5. Оцениваем уравнение линейной регрессии и рассчитываем коэффициенты уравнения (табл. 7).

Так как 0,29 и 0,63 > 0, зависимость между величинами X и Y существует. Определяем линейный коэффициент регрессии по следующей формуле:

$$a_1 = \frac{rSy}{Sx}. \quad (6)$$

Выборочный коэффициент корреляции связан с уравнением линейной регрессии соотношением (табл. 8):

$$(y - \bar{y}) = a_1(x - \bar{x}). \quad (7)$$



Таблица 4  
Стандартные отклонения  
случайных величин

Table 4  
Standard deviations of random variables

Компонент	$S_x$	$S_y$
Cu	235,71	14,46
Pb	235,71	1,43

Таблица 5  
Выборочный коэффициент  
корреляции

Table 5  
Sample correlation coefficient

Компонент	$r^*$
Cu	-0,66
Pb	0,78

Таблица 6  
Генеральный коэффициент  
корреляции

Table 6  
General correlation coefficient

Компонент	Значение
Cu	0,29
Pb	0,63

Таблица 7  
Линейный коэффициент  
регрессии

Table 7  
Linear regression coefficient

Компонент	$a_1$
Cu	-0,040
Pb	0,005

Таблица 8  
Уравнение линейной регрессии

Table 8  
Linear regression equation

Компонент	Уравнение
Cu	$Y = -0,040 \cdot X + 36,18$
Pb	$Y = 0,005 \cdot X + 3,12$

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При изучении химического состава катодных осадков было установлено, что основными примесями, усложняющими последующую аффинажную переработку, являются медь и свинец, которые необходимо предварительно удалять. В связи с тем, что данные элементы не образуют химических соединений с Au и Ag, целесообразно использовать кислотные методы их выщелачивания.

Серную кислоту рационально применять для выщелачивания меди (степень извлечения составила 45,98%) из золотосодержащих КО, полученных при электролизе в результате переработки руд по цианисто-сорбционной технологии<sup>6</sup>; степень перехода свинца в раствор низкая (3,65%) за счет, согласно литературным данным, пассивации поверхности свинца малорастворимым сульфатом свинца [18]. На основании математической обработки методом корреляционного анализа экспериментальных данных по выщелачиванию меди и свинца из золотосодержащих катодных осадков растворами серной кислоты можно сделать вывод о том, что степень перехода меди и свинца в раствор зависит от концентрации растворителя; были получены уравнения линейной регрессии. Для совместного извлечения меди и свинца из золотосодержащих катодных осадков необходим подбор другого растворителя, на что и направлены наши дальнейшие исследования.

<sup>6</sup>Барченков В.В. Основные технологические процессы переработки золотосодержащих руд: учеб. пособ. СПб.: Интермедия, 2013. 469 с.

**Библиографический список**

1. Canda L., Heput T., Ardelean E. Methods for recovering precious metals from industrial waste // *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2016. Vol. 106. P.012–020. [Электронный ресурс]. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/106/1/012020> (25.06.2019). <https://doi.org/10.17580/tsm.2017.07.07>
2. Syed S. Recovery of gold from secondary sources – A review // *Hydrometallurgy*. 2012. Vol. 115/116. P. 30–51. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.12.012>
3. Гудков С.С., Шкетова Л.Е., Михайлова А.Н. Бактериальное выщелачивание упорных руд и концентратов // *Горный журнал*. 2011. № 4. С. 27–28.
4. Теляков А.Н., Горленков Д.В., Теляков Н.М. Технология переработки радиоэлектронного лома // *Цветные металлы*. 2015. № 9 (873). С. 68–72. <https://doi.org/10.17580/tsm.2015.09.11>
5. Yunji Ding, Shengen Zhang, Bo Liu, Huandong Zheng, Chein-chi Chang, Christian Ekberg. Recovery of precious metals from electronic waste and spent catalysts: a review // *Resources, Conservation and Recycling*. 2019. Vol. 141. P. 284–298. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.10/041>
6. Hussin A.M. Ahmed, Ayman A. El-Midany. Statistical optimization of gold recovery from difficult leachable sulphide minerals using bacteria // *Materials Testing*. 2012. Vol. 54. No. 5. P. 351–357. <https://doi.org/10.3139/120.110339>
7. Рахманов О.Б., Аксенов А.В., Немчинова Н.В., Солихов М.М., Черношвец Е.А. Поиск оптимальной технологии переработки золотосодержащих руды месторождения «Иккижелон» (Республика Таджикистан) // *Металлургия: технологии, инновации, качество «МЕТАЛЛУРГИЯ–2017»: тр. XX Междунар. науч.-практ. конф. (г. Новокузнецк, 15–16 ноября 2017 г.)*. Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2017. Ч. 1. С. 118–122.
8. Willner J., Fornalczyk A., Cebulski J., Janiszewski K. Preliminary Studies on Simultaneous Recovery of Precious Metals from Different Waste Materials by Pyrometallurgical Method // *Archives of Metallurgy and Materials*. 2014. Vol. 59. Issue 2. P. 801–804. <https://doi.org/10.2478/amm-2014-0136>
9. Комогорцев Б.В., Вареничев А.А. Проблемы переработки бедных и упорных золотосодержащих руд // *Горный информационно-аналитический бюллетень* (научно-технический журнал). 2016. № 2. С. 204–218.
10. Tremolada J., Dzioba R., Bernardo-Sanchez A., Menendez-Agnado J.M. The preg-robbing of gold and silver by clays during cyanidation under agitation and heap leaching conditions // *International Journal of Mineral Processing*. 2010. Vol. 94. P. 67–71. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2009.12.001>
11. Темеров С.А., Струкалев К.М., Рыжов А.Г. Непригодные элементы в аффинажном производстве // *Цветные металлы*. 2019. № 2. С. 39–44. <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.02.06>
12. Жмурова В.В., Немчинова Н.В., Минеев Г.Г. Кислотное выщелачивание примесей золотосодержащего катодного осадка // *Цветные металлы*. 2017. № 7. С. 41–46. <https://doi.org/10.17580/tsm.2017.07.07>
13. Жмурова В.В. Технология повышения качества золотосодержащего сырья, отправляемого на аффинажные заводы // *Золотодобыча*. 2012. № 163. С. 25–28.
14. Барченков В.В. Технология гидрометаллургической переработки золотосодержащих флотоконцентратов с применением активных углей. Чита: Изд-во «Поиск», 2004. 242 с.
15. Ласточкина М.А., Вергизова Т.В., Гейвер Т.Н. Гидрометаллургическое обогащение промпродуктов металлургического производства, содержащих драгоценные металлы // *Цветные металлы и минералы 2014: сб. докладов VI Междунар. конгресса (г. Красноярск, 15–18 сентября 2014 г.)*. Красноярск: Легкие металлы, 2014. С. 752–762.
16. Рюмин А.И., Миронкина Н.В. Исследование кинетических закономерностей растворения сульфата свинца в растворах хлорида и гидроксида натрия // *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*. 2013. № 4. С. 450–454.
17. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.А. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1971. 284 с.
18. Kyle J.H., Breuer P.L., Bunney K.G., Pleysier R. Review of trace toxic elements (Pb, Cd, Hg, As, Sb, Bi, Se, Te) and their deportment in gold processing: Part II: Deportment in gold ore processing by cyanidation // *Hydrometallurgy*. 2012. Vol. 111–112. P. 10–21. <https://doi.org/10.17580/tsm.2017.04.06>

**References**

1. Canda L, Heput T, Ardelean E. Methods for recovering precious metals from industrial waste. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2016;106(1):12–20. [Accessed 25th June 2019]. <https://doi.org/10.17580/tsm.2017.07.07>
2. Syed S. Recovery of gold from secondary sources – A review. *Hydrometallurgy*. 2012; 115/116:30–51. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.12.012>
3. Gudkov SS, Shketova LE, Mihajlova AN. Bacterial leaching of refractory ores and concentrates. *Gornyy zhurnal* = Mining Journal, 2011;4:27–29. (In Russ.)
4. Telyakov AN, Gorlenkov DV, Telyakov NM. Radioelectronic scrap treatment technology. *Tsvetnye metally* = Non-ferrous Metals. 2015; 9:68–72. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/tsm.2015.09.11>
5. Yunji Ding, Shengen Zhang, Bo Liu, Huandong



- Zheng, Chein-chi Chang, Christian Ek-berg. Recovery of precious metals from electronic waste and spent catalysts: a review. *Resources, Conservation and Recycling*. 2019;141:284–298. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.10/041>
6. Hussin AM Ahmed, Ayman A El-Midany. Statistical optimization of gold recovery from difficult leachable sulphide minerals using bacteria. *Materials Testing*. 2012;54(5):351–357. <https://doi.org/10.3139/120.110339>
7. Rahmanov OB, Aksenov AV, Nemchinova NV, Solihov MM, Chernoshvec E.A. Search for an optimal processing technology of gold-bearing ores of the Ikkizhelon deposit (Republic of Tajikistan). In: *Metallurgiya: tekhnologii, innovacii, kachestvo METALLURGIYA–2017: trudy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Metallurgy: technology, innovation, quality METALLURGY-2017: Proceedings of the International scientific and practical conference*, 15–16 November 2017, Novokuznetsk, Novokuznetsk: Siberian State industrial University; 2017, part. 1, pp. 118–122. (In Russ.)
8. Willner J, Fornalczyk A, Cebulski J, Janiszewski K. Preliminary Studies on Simultaneous Recovery of Precious Metals from Different Waste Materials by Pyrometallurgical Method. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2014;59(2):801–804. <https://doi.org/10.2478/amm-2014-0136>
9. Komogorcev BV, Varenichev AA. The problems of processing poor and insistent gold-bearing ores. *Gorny informatsionno-analiticheskii byulleten (Nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2016;2:204–218. (In Russ.)
10. Tremolada J, Dzioba R, Bernardo-Sanchez A, Menendez-Agnado JM. The preg-robbing of gold and silver by clays during cyanidation under agitation and heap leaching conditions. *International Journal of Mineral Processing*. 2010;94:67–71. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2009.12.001>

11. Temerlov SA, Strukalev KM, Ryzhov AG. Base elements in refining. *Tsvetnye metally = Non-ferrous Metals*. 2019;2:39–44. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.02.06>
12. Zhmurova VV, Nemchinova NV, Mineev GG. Acid leaching of impurities of gold-containing cathode deposit. *Tsvetnye metally = Non-ferrous Metals*. 2017;7:41–46. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/tsm.2017.07.07>
13. Zhmurova VV. Quality improvement technology for gold-bearing raw materials sent to refining plants. *Zolotodobycha = Gold Mining*. 2012;163:25–28. (In Russ.)
14. Barchenkov VV. *Active carbon-based technology of hydrometallurgical processing of gold-containing flotation concentrates*. Chita: Poisk; 2004, 242 p. (In Russ.)
15. Lastochkina MA, Vergizova TV, Gejver TN. Hydrometallurgical concentration of industrial products of metallurgical production containing precious metals. In: *Tsvetnye metally i mineraly 2014: sbornik dokladov V Mezhdunarodnogo kongressa = Non-Ferrous Metals and Minerals 2014: Collected Works of V International Congress*. 15–18 September 2014, Krasnoyarsk, Krasnoyarsk: *Legkie metally*; 2014, p.752–762. (In Russ.)
16. Ryumin AI, Mironkina NV. Study of dissolution kinetics of lead sulfate in solutions of sodium chloride and sodium hydrate. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies* 2013;4:450–454. (In Russ.)
17. Adler YuP, Markova EV, Granovskij YuA. *Experiment planning when searching for optimal conditions*. Moscow: Nauka; 1971, 284 p. (In Russ.)
18. Kyle JH, Breuer PL, Bunney KG, Pleysier R. Review of trace toxic elements (Pb, Cd, Hg, As, Sb, Bi, Se, Te) and their deportment in gold processing: Part II: Deportment in gold ore processing by cyanidation. *Hydrometallurgy*. 2012;111–112:10–21. <https://doi.org/10.1016/j.tsm.2017.04.06>

#### Критерии авторства

Жмурова В.В. получила и оформила научные результаты и несет ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитала и одобрила окончательный вариант рукописи.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**Жмурова Виктория Васильевна**,  
старший преподаватель кафедры  
металлургии цветных металлов,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;  
✉ e-mail: v\_pichugina@list.ru

#### Authorship criteria

Zhmurova V.V. has obtained and formalized the scientific results and bears the responsibility for plagiarism.

#### Conflict of interests

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by the author.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Viktoria V. Zhmurova**  
Senior Lecturer of the Department  
of Non-Ferrous Metals Metallurgy,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;  
✉ e-mail: v\_pichugina@list.ru



## Роль термической активации при получении глинозема из низкокачественных бокситов

© В.М. Сизяков, О.А. Дубовиков, А.Д. Рис, А.В. Сундунов

Санкт-Петербургский государственный горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

**Резюме:** Целью статьи является обоснование целесообразности предварительной термической активации при получении глинозема из низкокачественных бокситов путем проведения сравнительного анализа жидкой и твердой фаз процесса обескремнивания исходного и обожженного боксита. Использованы следующие методы: термоактивация продукта за счет обжига исходного боксита при температуре 1000°C, его обескремнивание щелочными растворами 150 г/дм<sup>3</sup> Na<sub>2</sub>O<sub>к</sub> с соотношением Ж:Т = 10:1, получение концентрата, пригодного для переработки по способу Байера. Определение химического анализа твердой фазы рентгенофлуоресцентным методом с использованием спектрометра XRF-1800 («Shimadzu», Япония). Содержание SiO<sub>2</sub> в жидкой фазе определялось при помощи спектрофотометра ПЭ-5400УФ. Для интенсификации разделения фаз использовалась центрифуга. Твердая фаза в кювете (после отбора жидкой фазы) промывалась декантацией, сушилась и анализировалась. Построены графические зависимости, характеризующие степень извлечения диоксида кремния от продолжительности обескремнивания для различных температур, в т.ч.: учитывающие использование термоактивации исходного сырья, показывающие изменение скорости протекания процесса от температуры обескремнивания, отображающие изменение кажущейся энергии активации протекания процесса обескремнивания от степени извлечения диоксида кремния в раствор. Сделаны выводы о целесообразности использования обжига для повышения степени извлечения диоксида кремния и получения более высокого значения кремниевого модуля бокситового концентрата. Доказана целесообразность термической активации при переработке высококремнистых бокситов, позволяющая увеличить степень извлечения диоксида кремния из обожженного боксита в щелочной раствор, а также интенсифицировать протекание процесса обескремнивания. На основании изменения кажущейся энергии активации для различных температурных интервалов и степени извлечения SiO<sub>2</sub> для термоактивированного и исходного боксита предпринята попытка раскрытия механизма и химизма процесса обескремнивания.

**Ключевые слова:** низкокачественные бокситы, термическая активация, выщелачивание, обескремнивание, кажущаяся энергия активации

**Информация о статье:** Дата поступления 19 августа 2019 г.; дата принятия к печати 18 сентября 2019 г.; дата онлайн-размещения 31 октября 2019 г.

**Для цитирования:** Сизяков В.М., Дубовиков О.А., Рис А.Д., Сундунов А.В. Роль термической активации при получении глинозема из низкокачественных бокситов. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т. 23. № 5. С. 1032–1041. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-1032-1041>

## Role of thermal activation in alumina production from low-quality bauxites

Victor M. Sizyakov, Oleg A. Dubovikov, Aleksandra D. Ris, Aleksandr V. Sundurov

Saint Petersburg state Mining University, Saint Petersburg, Russia

**Abstract:** The purpose of this article is giving the rationale for preliminary thermal activation under alumina production from low-quality bauxites via a comparative analysis of liquid and solid phases of desiliconization of initial and calcined bauxite. The following methods are used: thermal activation of the product through firing of initial bauxite at the temperature of 1000 °C, its desiliconization by alkaline solutions of 150 g/dm<sup>3</sup> of Na<sub>2</sub>O<sub>к</sub> where the liquid-to solid ratio is 10:1, production of the concentrate suitable for refining by the Bayer method. The chemical analysis of solid phase is determined by the x-ray fluorescence method using XRF-1800 spectrometer ("Shimadzu", Japan). The content of SiO<sub>2</sub> in the liquid phase is determined using PE-5400UF spectrophotometer. Phase separation is intensified by means of a centrifuge. The solid phase in the sample cell (after liquid phase sampling) is washed by decantation, dried and analyzed. Graphs are built that describe the dependence of silica extraction degree on desiliconization time for different temperatures. Graphic dependences also take into consideration the use of raw material thermoactivation, show the variations of the process

rate depending on the desiliconization temperature, reflect the changes in the apparent activation energy of desiliconization depending on the degree of silica extraction in solution. Conclusions are drawn on the expediency of firing for increasing the silica extraction degree and obtaining a higher value of the silicon modulus of bauxite concentrate. The feasibility of thermal activation in processing of high-silicon bauxites is proved as it allows to increase the degree of silica extraction from calcined bauxite into an alkaline solution as well as to intensify the desiliconization process. Based on the variations of the apparent activation energy for different temperature intervals and  $\text{SiO}_2$  extraction degree for thermoactivated and initial bauxite an attempt is made to reveal the mechanism and chemical nature of the desiliconization process.

**Keywords:** low-quality bauxites, thermochemical activation, leaching, desiliconization, apparent activation energy

**Information about the article:** Received August 19, 2019; accepted for publication September 18, 2019; available online October 31, 2019.

**For citation:** Sizyakov VM, Dubovikov OA, Ris AD, Sundurov AV. Role of thermal activation in alumina production from low-quality bauxites. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2019;23(5):1032–1041. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-5-1032-1041>

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Алюминиевая отрасль России является одной из самых крупнейших по объемам производства, конкурентоспособной на мировом рынке [1], постоянно развивающейся за счет совершенствования технологии получения глинозема и алюминия [2–5], повышения энергоэффективности [6], предложений и разработки технологических приемов и методов для решения экологических проблем [7–10].

В районе г. Тихвина в 1916 г. было открыто первое в России месторождение бокситов. На III Менделеевском съезде по «чистой» и «прикладной» химии, проходившем в Петрограде с 25 мая по 1 июня 1922 года, Н.С. Курнаков и Г.Г. Уразов в своем докладе подчеркнули важность открытых бокситовых пород для создания отечественной глиноземной промышленности. В 1920 г. началось полное геологическое обследование месторождения, а к 1923 г. было установлено, что бокситы Тихвинского месторождения могут обеспечить глиноземом алюминиевую промышленность страны, отмечалась невысокая стоимость их добычи, однако по содержанию диоксида кремния бокситы относились к числу низкосортных и требовали создания новой технологии для их переработки.

Деятельность, направленная на исследование технологии получения глинозема из низкокачественных бокситов Тихвинского месторождения, проводилась в Горном и Российском институтах прикладной химии под руководством Н.С. Курнако-

ва. Взяв за основу способ спекания трехкомпонентной шихты Г. Мюллера, А.А. Яковкин с И.С. Лилеевым оптимизировали состав шихты и разработали метод фракционного осаждения гидроксида алюминия.

Мировая глиноземная промышленность строится на переработке алюминийсодержащего сырья по способу Байера, основанного на использовании высококачественного сырья с кремниевым модулем ( $\mu_{\text{Si}}$ ) выше 7. Отечественная сырьевая база для производства глинозема имеет ограниченный запас бокситов с высоким кремниевым модулем и требует вовлечения в процесс переработки низкокачественного сырья. Переход на низкокачественное алюминийсодержащее сырье зачастую связан с внедрением новых технологий переработки, что, несомненно, отражается на увеличении капитальных затрат. Такие затраты могут быть частично покрыты за счет частно-государственного партнерства с привлечением инвестиций в предприятия цветной металлургии [11]. Современные тенденции по переработке низкокачественного алюминийсодержащего сырья предполагают вовлечение в технологический процесс методов обогащения [12–14]. В отличие от традиционных методов обогащения, химическое обогащение сопряжено с изменением не только химического, но и минералогического составов получаемого концентрата. При воздействии на исходные низкокачественные бокситы щелочными растворами происходит целенаправленное извлечение в раствор диоксида кремния,





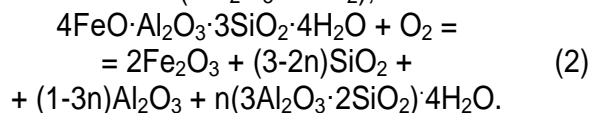
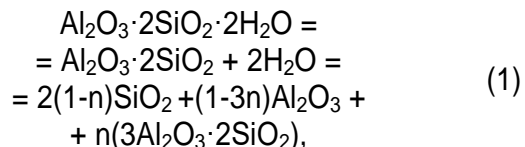
таким способом можно повысить кремниевый модуль высококремнистых бокситов на несколько единиц. В отличие от химического метода, термохимическое обогащение включает стадию термического воздействия и последующее обескремнивание обожженного боксита щелочными растворами. На принципе термохимического кондиционирования основана технология «Термохимия-Байер», которая прошла многочисленные лабораторные исследования и была опробована в опытно-промышленном масштабе [14]. Кроме удаления диоксида кремния, данный способ зарекомендовал себя как эффективный метод удаления и других технологически вредных примесей. Помимо дезактивации органических веществ, в результате термической обработки устраняется вредное влияние сульфидов и карбонатов, а удаление влаги снижает транспортные расходы и устраняет возможную смерзаемость бокситов [15–21]. В процессе обжига термоактивируются алюмосиликаты и, как следствие, появляется хорошо растворимый в щелочных растворах аморфный диоксид кремния, а образующаяся  $\gamma$ -модификация оксида алюминия начинает претерпевать фазовый переход от  $\gamma$  к  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , а из-за низкой концентрации щелочного раствора при обескремнивании обожженных бокситов его извлечение в раствор значительно меньше, чем диоксида кремния [22, 23].

Одним из направлений исследований, проводимых ведущей научной школой Санкт-Петербургского горного университета, является кондиционирование низкокачественного бокситового сырья, идея которого состоит в использовании процессов термического воздействия и последующего селективного выщелачивания, обеспечивающих повышение  $\mu_{\text{Si}}$  в несколько раз, и возможности переработки полученных бокситовых концентратов в рамках традиционных щелочных способов.

Процесс переработки высококремнистого алюминийсодержащего сырья по способу «Термохимия-Байер» можно разделить на три этапа.

1. Термическая активация бокситов,

при которой каолин и шамозит претерпевают превращения согласно реакциям:



2. Обескремнивание термоактивированного боксита щелочными растворами.

3. Выщелачивание бокситового концентрата по способу Байера.

Активирование минерального сырья при термическом воздействии основано на необратимом изменении его структуры, переводе в неравновесную полиморфную модификацию, фиксации неравновесного фазового состава, возникновении термических напряжений, обусловленных изменением объема при полиморфных и других превращениях.

Снижение прочности связей в кристаллической решетке, имеющей дефекты, приводит к уменьшению энергии активации на величину  $\Delta E_{\text{деф.}}$  и увеличению константы скорости реакции  $K_{\text{деф.}}$  по уравнению:

$$K_{\text{деф.}} = K_{\text{идеал.}} \cdot e^{\Delta E_{\text{деф.}}/RT}. \quad (3)$$

## 2. ЦЕЛЬ, МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью исследований явилось обоснование целесообразности использования обжига исходного сырья, в частности, высококремнистых бокситов для интенсификации процесса обескремнивания и повышения извлечения диоксида кремния в щелочной раствор.

Более четверти запасов бокситов России приходится на зону Тимана, на такие месторождения как Вежаю-Ворыквинское, Верхне-Щугорское и Восточное. Бокситы характеризуются высоким содержанием железа и имеют  $\mu_{\text{Si}} = 3 \div 6$ . Наиболее крупное Вежаю-Ворыквинское

месторождение расположено в районе рек Ворыквы и Вежаю. Бокситы относятся к промышленному бемитовому типу. Минеральный состав представлен бемитом, каолинитом, шамозитом и гематитом.

В качестве объекта исследования были выбраны бокситы Вежаю-Ворыквинского месторождения следующего химического состава, % масс.:  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 41,00;  $\text{SiO}_2$  – 10,35;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 29,60;  $\text{FeO}$  – 7,40; потери при прокаливании – 11,65. Образцы для исследований измельчались до крупности минус 0,147 мм.

В одном случае изучаемые образцы подвергались термической активации на установке, состоящей из электропечи с силовыми нагревателями и программного регулятора температуры, который позволял осуществлять подъем, стабилизацию и снижение температуры по установленному графику. В нашем случае скорость нагрева и скорость охлаждения после достижения температуры  $1000^\circ\text{C}$  –  $10^\circ\text{C}/\text{мин}$ . Отклонение точности стабилизации воспроизведения заданного температурного режима не превышало 2%. В другом случае, для сравнения, боксит обескремнивался щелочным раствором без предварительного обжига.

Изучение процесса обескремнивания бокситов щелочными растворами  $150 \text{ г/дм}^3 \text{ Na}_2\text{O}_\text{к}$  и соотношением Ж:Т = 10:1 проводилось во фторопластовой реторте, обогреваемой водяным термостатом и снабженной трехлопастной нормализованной мешалкой. Частота вращения перемешивающего устройства обеспечивала режим развитой турбулентности, который определялся по значению центробежного критерия Рейнольдса.

Отобранная в кювету проба горячей пульпы помещалась в лабораторную центрифугу, где происходило разделение жидкой и твердой фаз. Из кюветы отбиралась аликвотная часть жидкой фазы на анализ<sup>1</sup> [24], а твердая фаза в кювете промывалась декантацией, сушилась и анализировалась с использованием рентгенофлуоресцентно-

го спектрометра XRF-1800 («Shimadzu», Япония).

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РОЛИ ТЕРМИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ

По результатам исследований были построены кинетические зависимости степени извлечения ( $\alpha$ ) диоксида кремния в раствор в долях ед. от продолжительности при различных температурах процесса обескремнивания (рис. 1);  $\alpha$  диоксида кремния в раствор определялась по его количеству в боксите и полученном концентрате по формуле:

$$\alpha = 1 - \frac{\text{Fe}_2\text{O}_{3(\text{бок.})} \cdot \text{SiO}_{2(\text{кон.})}}{\text{Fe}_2\text{O}_{3(\text{кон.})} \cdot \text{SiO}_{2(\text{бок.})}},$$

где  $\text{Fe}_2\text{O}_{3(\text{бок.})}$ ,  $\text{SiO}_{2(\text{бок.})}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_{3(\text{кон.})}$ ,  $\text{SiO}_{2(\text{кон.})}$ , соответственно, содержание оксида железа, диоксида кремния в боксите и концентрате, % масс.

На основании ранее изложенной информации термическая активация действительно приводит к возрастанию скорости протекания процесса обескремнивания (рис. 2).

Анализ полученной графической зависимости показал целесообразность применения термической активации образцов исходных бокситов, предшествующей их обескремниванию. Первоначально (см. рис. 2) наблюдается увеличение  $\alpha$  для всех взятых температур. Однако после 60 мин проведения эксперимента для исходного боксита и 30÷40 мин – для термоактивированного боксита происходит снижение данного параметра, что может быть объяснено протеканием вторичных процессов, а именно образованием пленки гидроалюмосиликата натрия (ГАСН)  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 1,7\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  на частицах обрабатываемого щелочью боксита, что оказывает тормозящее влияние и говорит о внутреннем диффузионном характере лимитирующей стадии процесса.

<sup>1</sup>Романков П.Г., Фролов В.Ф., Флисюк О.М. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии: учеб. пособ. для вузов. Изд. 2-е, испр. СПб.: ХИМИЗДАТ, 2009. 544 с.

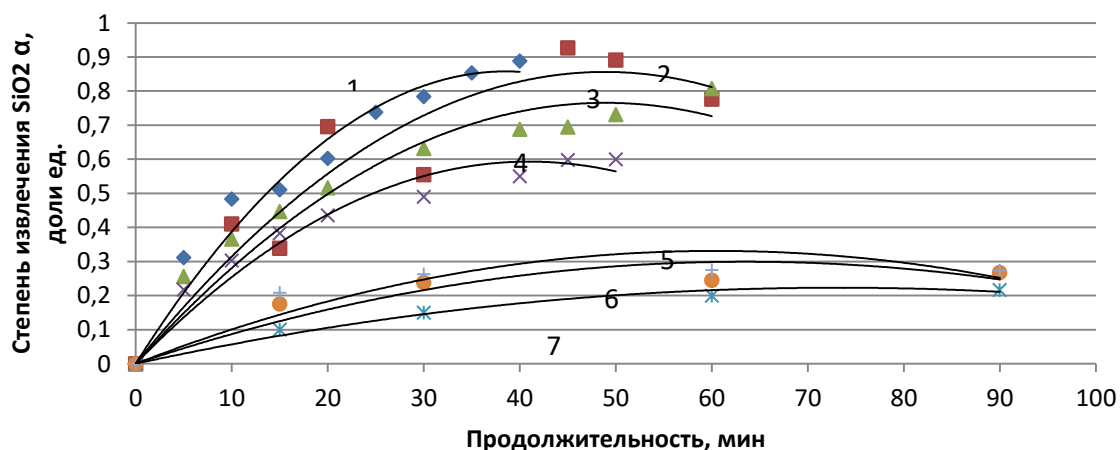


Рис. 1. Зависимость степени извлечения  $\text{SiO}_2$  от продолжительности обескремнивания с применением термоактивации для температур: 1 – 95, 2 – 85, 3 – 75, 4 – 65°C; без термоактивации для температур: 5 – 90, 6 – 80, 7 – 70°C  
Fig. 1. Dependence of  $\text{SiO}_2$  extraction degree on desilicization time using thermal activation for the temperatures: 1 – 95°, 2 – 85°, 3 – 75°, 4 – 65°C; without thermal activation for the temperatures: 5 – 90°, 6 – 80°, 7 – 70°C

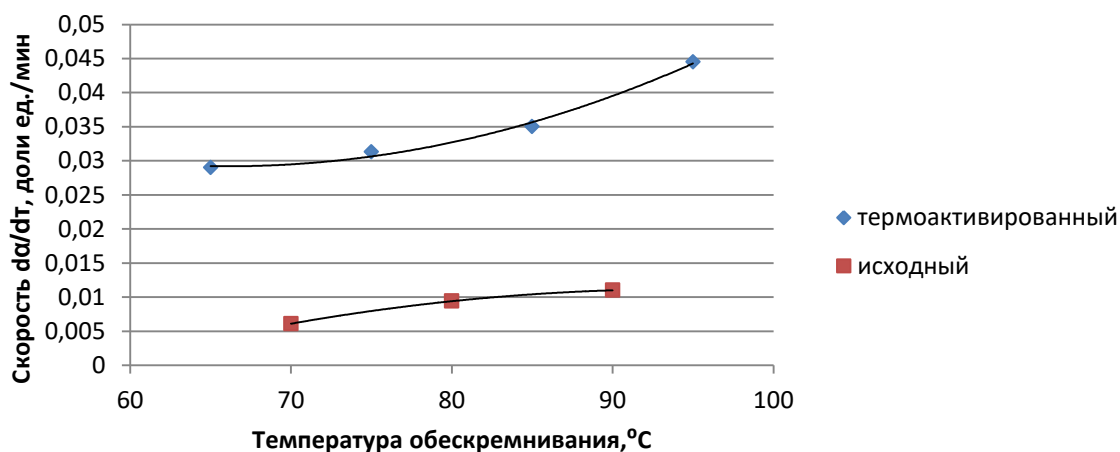


Рис. 2. Влияние термоактивации бокситов на скорость протекания процесса обескремнивания  
Fig. 2. Effect of bauxite thermal activation on the desilicization rate

Для оценки возможности образования экранирующей оболочки можно воспользоваться критерием Пиллинга-Бедвордса ( $K_{\text{П-Б}}$ )<sup>2</sup>. При обескремнивании исходного боксита образующийся ГАСН может экранировать каолинит и шамозит. Для каолинита  $K_{\text{П-Б}} > 1$ , что говорит о возможном образовании плотной оболочки и, следовательно, протекании процесса во

внутренней диффузионной области. Для шамозита  $K_{\text{П-Б}} < 1$ , что не позволяет сделать вывод о возможном образовании плотной оболочки.

Известно, что по величине энергии активации ( $E$ ) можно судить о характере лимитирующей стадии: при  $E = 40 \div 300$  кДж/моль – кинетическая область, при  $E = 20 \div 40$  кДж/моль – смешанная область, при

<sup>2</sup>Зеликман А.Н., Вольдман Г.М. Теория гидрометаллургических процессов: учеб. пособ. для вузов. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Интермет Инжиниринг, 2003. 464 с.

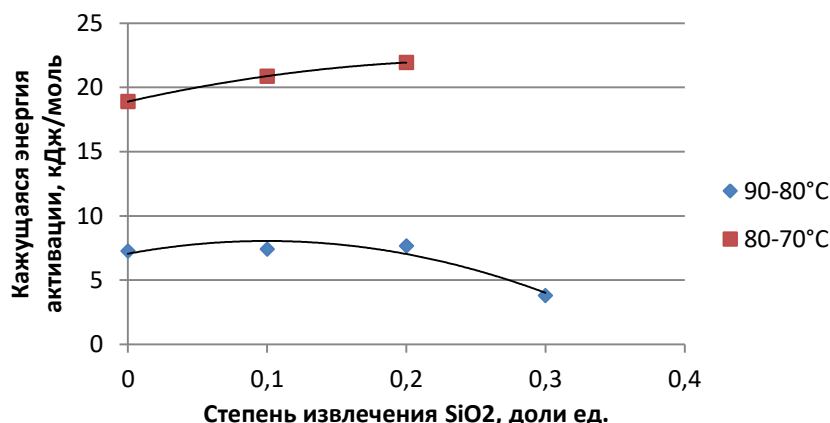


Рис. 3. Изменение кажущейся энергии активации для различных температурных интервалов и степени извлечения для исходного боксита

Fig. 3. Variations of the apparent activation energy for different temperature ranges and extraction degrees for initial bauxite

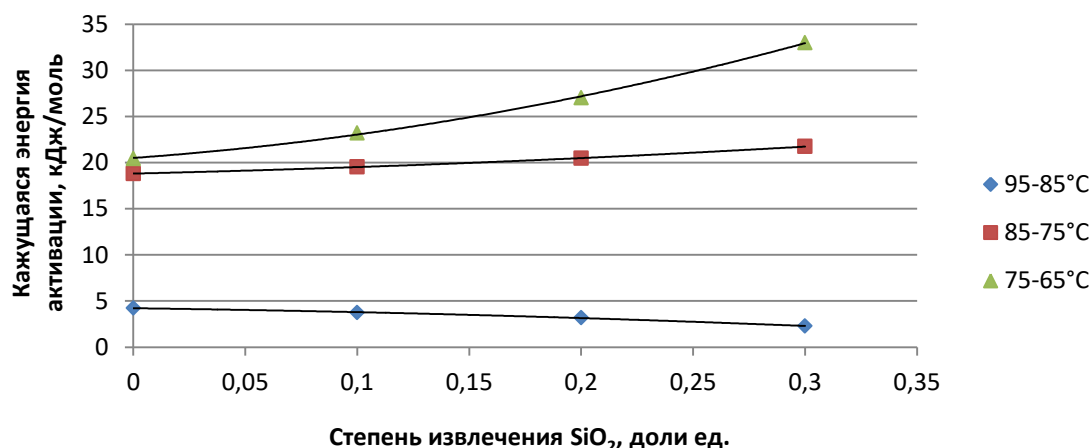


Рис. 4. Изменение кажущейся энергии активации для различных температурных интервалов и степени извлечения для термоактивированного боксита

Fig. 4. Variations of apparent activation energy for different temperature ranges and extraction degrees for thermally activated bauxite

$E < 20$  кДж/моль – взаимодействие лимитируется диффузией<sup>3</sup>. На основании полученных кинетических зависимостей извлечения SiO<sub>2</sub> в раствор (см. рис. 1, 2) были рассчитаны кажущиеся энергии активации по методике<sup>2</sup> (рис. 3, 4).

Согласно рис. 3 и 4 можно сделать вывод, что для высоких температур проведения обескремнивания (80–95°C) независимо от проведения или отсутствия термической активации лимитирующей стадией

является диффузия. С понижением температуры, начиная с 80°C, наблюдается смещение лимитирующей стадии из диффузионной области в переходную. При изменении степени прореагировавшего диоксида кремния (до 0,3 долей ед.) для высокотемпературной области наблюдается интенсивное взаимодействие, что влечет за собой образование ГАСН и, как следствие, «затормаживание» процесса, которое, в свою очередь, подтверждается снижением

<sup>3</sup>Минеев Г.Г., Минеева Т.С., Жучков И.А., Зелинская Е.В. Теория металлургических процессов: учебник для вузов. Иркутск: Изд-во ИРГТУ, 2010. 524 с.



величины энергии активации. Противоположную картину можно видеть в температурном интервале 80–95°C, где наблюдается тенденция смещения лимитирующей стадии из диффузионной области в переходную. В отличие от высокотемпературной области, где интенсифицируется процесс образования ГАСН, происходит замедление процесса обескремнивания. В области более низких температур в результате образования более пористой структуры процесс торможения имеет меньшее действие, а с увеличением степени прореагировавшего диоксида кремния процесс смещается в сторону кинетической области.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании опытных данных, полученных при протекании процесса обескремнивания как исходного, так и термоактивированного образцов низкокачественного боксита Вежаю-Ворыквинского месторождения, можно сделать выводы и рекомендовать следующие основные способы интенсификации.

1. Термическая активация исходного сырья позволяет значительно повысить как

скорость протекания процесса, так и степень обескремнивания изучаемых образцов бокситов.

2. Оптимальная температура находится в интервале температур 85–95°C, что позволяет извлечь до 90% SiO<sub>2</sub>. При температуре 95°C сохраняется степень извлечения диоксида кремния на уровне 90%, однако сокращается продолжительность протекания процесса.

3. Сведение к минимуму внутридиффузионного сопротивления возможно при совмещении процессов обескремнивания и измельчения, в котором одновременно с обновлением поверхности минерала (вследствие удаления с его поверхности ГАСН) будет происходить увеличение реагирующей поверхности (в результате раскалывания частиц).

4. На основании полученных данных можно сделать предположение об уменьшении величины энергии активации при помощи механического активирования твердых тел в результате тонкого измельчения материала с последующим протеканием химической реакции или в результате химического взаимодействия, совмещенного с размолом и истиранием.

#### Библиографический список

1. Sizykov V.M., Vlasov A.A., Bazhin V.Yu. Strategy tasks of the Russian metallurgical complex // *Non-ferrous Metals*. 2016. No. 1. P. 32–37. <https://doi.org/10.17580/tsm.2016.01.05>
2. Бричкин В.Н., Васильев В.В., Нагорная Е.А., Гуменюк А.М. Повышение качества боксита путем селективного измельчения // *Обогащение руд*. 2017. № 3. С. 3–9. <https://doi.org/10.17580/or.2017.03.01>
3. Aleksandrov A.V., Nemchinova N.V., Mineev G.G., Yakovleva A.A. Evaluation of the effect of nepheline the sinter on hydration activity during alumina production // *Metallurgist*. 2018. Vol. 61. No. 11–12. P. 1016–1022. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0601-6>
4. Горланов Е.С., Бажин В.Ю. Диборид титана для катодов алюминиевых электролизеров. Обзор. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2019. 439 с.
5. Bazhin V.Yu., Brichkin V.N., Sizyakov V.M., Cherkasova M.V. Pyrometallurgical treatment of a nepheline charge using additives of natural and technogenic origin // *Metallurgist*. 2017. Vol. 61. No. 1–2. P. 147–154. <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0468-y>
6. Радионов Е.Ю., Третьяков Я.А., Немчинова Н.В.

Влияние положения анодной рамы на магнетогидродинамические параметры электролизера С-8БМЭ // *Технология металлов*. 2018. № 4. С. 31–38.

7. Somov V.V., Nemchinova N.V., Tyutrin A.A. Ways of Solving the Ecological Problem of Aluminium Smelting Hard Waste Disposal // *Contemporary Issues of Geology, Geophysics and Geo-ecology of the North Caucasus (CIGGG 2018): Proceedings of VIII Science and Technology Conference*. 2019. Vol. 182. P. 216–221. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.atlantispress.com/proceedings/ciggg-18/55915028> (27.08.2019). <https://doi.org/10.2991/ciggg-18.2019.41>
8. Patrino R.K., Bazhin V.Yu. Spent Linings from Aluminium Cells as a Raw Material for the Metallurgical, Chemical, and Construction Industries // *Metallurgist*. 2014. Vol. 58. Issue 7–8. P. 625–629. <https://doi.org/10.1007/s11015-014-9967-2>
9. Nemchinova N.V., Yakushevich P.A., Yakovleva A.A., Gavrilenko L.V. Experiment for use of Bratsk aluminium plant technogenic waste as a reducing agent during cast iron smelting // *Metallurgist*. 2018. Vol. 62. Issue 1–2. P. 150–155. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0601-6>

018-0637-7

10. Бурдонов А.Е., Зелинская Е.В., Гавриленко Л.В., Гавриленко А.А. Изучение вещественного состава глиноземсодержащего материала алюминиевых электролизеров для использования в технологии первичного алюминия // Цветные металлы. 2018. № 3. С. 32–38. <https://doi.org/10.17580/tsm.2018.03.05>
11. Головных Н.В., Швеиц А.А., Сахачев А.Ю., Шепелев И.И. Эколого-технологические аспекты комплексного использования природных и техногенных видов фторсодержащего сырья в алюминиевом производстве // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: материалы 19 Междунар. науч.-техн. конф. (г. Екатеринбург, 23–24 апреля 2014 г.). Екатеринбург: Форт Диалог-Исеть, 2014. С. 233–237.
12. Xiao Jin, Fachuang Li, Zhong Qifan, Bao Hongguang. Separation of aluminum and silica from coal gangue by elevated temperature acid leaching for the preparation of alumina and SiC // Hydrometallurgy. 2015. Vol. 155. P. 118–124. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.04.018>
13. Yue Qiang, Wang Heming, Gao Chengkang. Resources saving and emissions reduction of the aluminum industry in China // Resources Conservation and Recycling. 2015. No. 104. P. 68–75. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.09.006>
14. Сизяков В.М., Дубовиков О.А., Логинов Д.А. Теория и практика термохимического обогащения низкокачественных бокситов // Обогащение руд. 2014. № 5. С. 10–17.
15. Scarsella A., Rothenfluh T. The Processing of aluminosilicates for the purpose of producing alumina // Non-Ferrous Metals & Minerals – 2016: Book of Abstracts of the Eighth International Congress (Krasnoyarsk, 13–16 September 2016). Krasnoyarsk: Science and Innovation Center Publishing House, 2017. P. 47.
16. Арсентьев В.А., Герасимов А.М., Мезенин А.О. Исследование технологии обогащения каолинов с использованием гидротермального модифицирования // Обогащение руд. 2017. № 2. С. 3–9.

<https://doi.org/10.17580/or.2017.02.01>

17. Котова О.Б., Размыслов И.Н., Ростовцев В.И., Силаев В.И. Радиационно-термическое модифицирование железистых бокситов в процессах их переработки // Обогащение руд. 2016. № 4. С. 16–21. <https://doi.org/10.17580/or.2016.04.03>
18. Логинова И.В., Лоскутова А.И. Способ комплексной переработки высококремнистых бокситов // Инновации в материаловедении и металлургии: материалы III Междунар. интерактивной научно-практ. конф. (г. Екатеринбург, 17–21 декабря 2013 г.). Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2013. С. 59–61.
19. Андреев П.И., Шавло Р.А. Обжиг-магнитное обогащение гематит-бемитовых бокситов // Цветные металлы. 1973. № 7. С. 92–93.
20. Дубовиков О.А., Бричкин В.Н., Николаева Н.В., Ромашев А.О. Исследование процесса термохимического обогащения бокситов Среднего Тимана // Обогащение руд. 2014. № 4. С. 14–18.
21. Qiu Guanzhou, Jiang Tao, Li Guanghui, Fan Xiaohui. Activation and removal of silicon in kaolinite by thermochemical process // Scandinavian Journal of Metallurgy. 2004. Vol. 33. Issue 2. P. 121–128. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0692.2004.00677.x>
22. Wang Yan, Xing Shuwen, Zhang Yong, Li Zhiwei. Mineralogical and thermal characteristics of low-grade Jinlong bauxite sourced from Guangxi Province, China // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2015. No. 122. P. 917–927. <https://doi.org/10.1007/s10973-015-4742-6>
23. Dubovikov O.A., Brichkin V.N., Ris A.D., Sundurov A.V. Thermochemical activation of hydrated aluminosilicates and its importance for alumina production // Non-ferrous Metals. 2018. No. 2. P. 10–15. <https://doi.org/10.17580/nfm.2018.02.02>
24. Рис А.Д., Сундуров А.В., Дубовиков О.А. Поведение бокситовых концентратов на стадии выщелачивания по способу Байера // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2019. Т. 23. № 2. С. 395–403. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-2-395-403>

## References

1. Sizykov VM, Vlasov AA, Bazhin VYu. Strategy tasks of the Russian metallurgical complex. *Non-ferrous Metals*. 2016;1:32–37. <https://doi.org/10.17580/tsm.2016.01.05>
2. Brichkin VN, Vasiliev VV, Nagornaya EA, Gumenyuk AM. Improving bauxite quality by selective grinding. *Obogashchenie rud = Ore Dressing*. 2017;3:3–9. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/or.2017.03.01>
3. Aleksandrov AV, Nemchinova NV, Mineev GG, Yakovleva AA. Evaluation of the effect of nepheline the sinter on hydration activity during alumina production. *Metallurgist*. 2018;61(11–12):1016–1022. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0601-6>
4. Gorlanov ES, Bazhin VYu. *Titanium diboride for cathodes of aluminum electrolysis cells. Overview*. Saint Petersburg: Polytechnic University; 2019. 439 p.

(In Russ.)

5. Bazhin VYu, Brichkin VN, Sizyakov VM, Cherkasova MV. Pyrometallurgical treatment of a nepheline charge using additives of natural and technogenic origin. *Metalurgist*. 2017;61(1–2):147–154. <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0468-y>
6. Radionov EYu, Tretyakov YaA, Nemchinova NV. Influence of anode frame position on magnetic-hydrodynamic parameters of S-8BME electrolytic cell. *Tekhnologiya metallov = Metal Technology*. 2018;4:31–38. (In Russ.)
7. Somov VV, Nemchinova NV, Tyutrin AA. Ways of Solving the Ecological Problem of Aluminium Smelting Hard Waste Disposal. In: *Contemporary Issues of Geology, Geophysics and Geo-ecology of the North Caucasus (CIGGG 2018)*: Proceedings of VIII Science and



Technology Conference. 2019;182:216–221. Available from: <https://www.atlantis-press.com/proceedings/ciggg-18/55915028> [Accessed 27th August 2019]. <https://doi.org/10.2991/ciggg-18.2019.41>

8. Patrín RK, Bazhin VYu. Spent Linings from Aluminum Cells as a Raw Material for the Metallurgical, Chemical, and Construction Industries. *Metallurgist*. 2014;58(7–8):625–629. <https://doi.org/10.1007/s11015-014-9967-2>
9. Nemchinova NV, Yakushevich PA, Yakovleva AA, Gavrilenko LV. Experiment for use of Bratsk aluminium plant technogenic waste as a reducing agent during cast iron smelting. *Metallurgist*. 2018;62(1–2):150–155. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0637-7>
10. Burdonov AE, Zelinskaya EV, Gavrilenko LV, Gavrilenko AA. Investigation of substantial composition of alumina-bearing material of aluminium electrolyzers for usage in primary aluminium technology. *Tsvetnye metally = Non-ferrous Metals*. 2018;3:32–38. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/tsm.2018.03.05>
11. Golovnykh NV, Shvets AA, Sakhachev AYU, Shepelev II. Environmental and technological aspects of the integrated use of natural and technogenic types of fluorine-containing raw materials in aluminum production. In: *Nauchnyye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogennogo syr'ya: materialy 19 Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferencii = Scientific fundamentals and processing practice of ore and technogenic raw material: Proceedings of 19 International scientific and technical conference*, 23–24 April 2014, Yekaterinburg, Yekaterinburg: Fort Dialog-Iset'; 2014, p.233–237. (In Russ.)
12. Xiao Jin, Fachuang Li, Zhong Qifan, Bao Hongguang. Separation of aluminum and silica from coal gangue by elevated temperature acid leaching for the preparation of alumina and SiC. *Hydrometallurgy*. 2015;155:118–124. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.04.018>
13. Yue Qiang, Wang Heming, Gao Chengkang. Resources saving and emissions reduction of the aluminium industry in China. *Resources Conservation and Recycling*. 2015;104:68–75. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.09.006>
14. Szykov VM, Dubovikov OA, Loginov DA. Lower grade bauxite thermo-chemical processing theory and practice. *Obogashchenie rud = Ore Dressing*. 2014;5:10–17. (In Russ.)
15. Scarsella A., Rothenfluh T. The processing of aluminosilicates for the purpose of producing alumina. In: *Non-Ferrous Metals & Minerals - 2016: Book of abstracts of the eighth international congress*, 13–16 September 2016, Krasnoyarsk, Krasnoyarsk: Science and

Innovation Center Publishing House; 2017, p.47. (In Russ.)

16. Arsentiev VA, Gerasimov AM, Mezenin AO. Kaolines beneficiation technology study with application of hydrothermal modification. *Obogashchenie rud = Ore Dressing*. 2017;2:3–9. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/or.2017.02.01>
17. Kotova OB, Razmyslov IN, Rostovtsev VI, Silaev VI. Radiation-thermal modification of ferruginous bauxites in processing. *Obogashchenie rud = Ore Dressing*. 2016;4:16–21. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/or.2016.04.03>
18. Loginova IV, Loskutova AI. Complex processing method of high-silicon bauxites. In: *Innovatsii v materialovedenii i metallurgii: materialy III Mezhdunar. interaktivnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii = Innovations in Materials Science and Metallurgy: Proceedings of III International interactive scientific and practical conference*, 17–21 December 2013, Yekaterinburg, Yekaterinburg: Publishing House of the Ural Federal University; 2013, p.59–61. (In Russ.)
19. Andreev PI, Shavlo RA. Firing-magnetic concentration of hematite-boehmite bauxites. *Tsvetnye metally = Non-ferrous Metals*. 1973;7:92–93. (In Russ.)
20. Dubovikov OA, Brichkin VN, Nikolaeva NV, Romanov AO. Study of Middle Timan bauxite thermochemical concentration. *Obogashchenie rud = Ore Dressing*. 2014;4:14–18.
21. Qiu Guanzhou, Jiang Tao, Li Guanghui, Fan Xiaohui. Activation and removal of silicon in kaolinite by thermochemical process. *Scandinavian Journal of Metallurgy*. 2004;33(2):121–128. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0692.2004.00677.x>
22. Wang Yan, Xing Shuwen, Zhang Yong, Li Zhiwei. Mineralogical and thermal characteristics of low-grade Jinlong bauxite sourced from Guangxi Province, China. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2015;122:917–927. <https://doi.org/10.1007/s10973-015-4742-6>
23. Dubovikov OA, Brichkin VN, Ris AD, Sundurov AV. Thermochemical activation of hydrated aluminosilicates and its importance for alumina production. *Non-ferrous Metals*. 2018;2:10–15. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/nfm.2018.02.02>
24. Ris AD, Sundurov AV, Dubovikov OA. Bauxite concentrate behaviour at the leaching stage in the Bayer process. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(2):395–403. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-2-395-403>

#### Критерии авторства

Сизяков В.М., Дубовиков О.А., Рис А.Д., Сундуров А.В. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в одинаковой мере несут ответственность за плагиат.

#### Authorship criteria

Sizyakov V.M., Dubovikov O.A., Ris A.D., Sundurov A.V. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.



**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

**Conflict of interests**

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Сизяков Виктор Михайлович,**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры металлургии,  
Санкт-Петербургский горный университет,  
199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский о-в,  
21-я линия, 2, Россия;  
✉ e-mail: sizyakov\_vm@pers.spmi.ru

**Дубовиков Олег Александрович,**

доктор технических наук,  
старший научный сотрудник,  
профессор кафедры химических технологий  
и переработки энергоносителей,  
Санкт-Петербургский горный университет,  
199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский о-в, 21-я  
линия, 2, Россия;  
e-mail: dubovikov\_oa@pers.spmi.ru

**Рис Александра Дмитриевна,**

аспирант,  
Санкт-Петербургский горный университет,  
199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский о-в,  
21-я линия, 2, Россия;  
e-mail: kasandraspb@yandex.ru

**Сундуrow Александр Владимирович,**

аспирант,  
Санкт-Петербургский горный университет,  
199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский о-в,  
21-я линия, 2, Россия;  
e-mail: sav.66@bk.ru

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Viktor M. Sizyakov,**

Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Professor of the Metallurgy Department,  
Saint Petersburg Mining University,  
2, 21 Line, Vasilievsky Ostrov,  
Saint Petersburg 199106, Russia;  
✉ e-mail: Sizyakov\_VM@pers.spmi.ru

**Oleg A. Dubovikov,**

Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher,  
Professor of the Department of Chemical  
Technologies and Energy Source Processing,  
Saint Petersburg Mining University,  
2, 21 Line, Vasilievsky Ostrov,  
Saint Petersburg 199106, Russia;  
e-mail: dubovikov\_oa@mail.ru

**Aleksandra D. Ris,**

Postgraduate Student,  
Saint Petersburg Mining University,  
2, 21 Line, Vasilievsky Ostrov,  
Saint Petersburg 199106, Russia;  
e-mail: kasandraspb@yandex.ru

**Aleksandr V. Sundurov,**

Postgraduate Student,  
Saint Petersburg Mining University,  
2, 21 Line, Vasilievsky Ostrov,  
Saint Petersburg 199106, Russia;  
e-mail: sav.66@bk.ru

Уважаемые коллеги!

**Мы приглашаем Вас к участию в нашем журнале в качестве авторов, рекламодателей и читателей и сообщаем требования к статьям, принимаемым к публикации**

I. Статья представляется **в электронном и распечатанном видах**. Рекомендуемый объем статьи не менее 10 000 знаков.

К статье прилагаются:

1. Экспертное заключение.
2. Название рубрики, в которой должна быть размещена Ваша статья; УДК; название статьи; реферат (аннотация), количество слов в реферате – не менее 200; ключевые слова (4-5); сведения об авторах: название учреждения, его адрес; фамилия, имя, отчество (полностью); ученая степень; звание и должность; контактный телефон и e-mail (**вся информация предоставляется одним файлом**).
3. Статья должна иметь личную подпись автора; на статьях адъюнктов и аспирантов должна стоять также подпись научного руководителя.

II. **Текст статьи, сведения об авторах, реферат, ключевые слова, адрес учреждения, контактный телефон и E-mail** должны быть также представлены по электронной почте: [pgp@istu.edu](mailto:pgp@istu.edu) **в виде файла с расширением \*.DOC** – документа, построенного средствами Microsoft Word 97 или последующих версий.

При наборе статьи в Microsoft Word рекомендуются следующие установки:

- 1) параметры **страницы** и абзаца: отступы сверху и снизу – **2 см**; слева и справа – **2 см**; **табуляция – 2 см**; ориентация – книжная;
- 2) шрифт – **Times New Roman**, размер – **12**, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;
- 3) при вставке формул использовать **Microsoft Equation 3** при установках: элементы формулы выполняются **курсивом**; для греческих букв и символов назначать шрифт **Symbol**, для остальных элементов – **Times New Roman**. Размер символов: обычный – 12 пт, крупный индекс – 7 пт, мелкий индекс – 5 пт, крупный символ – 18 пт, мелкий символ – 12 пт. Все экспликации элементов формул необходимо также выполнять в виде формул;
- 4) **рисунки**, вставленные в текст, должны быть выполнены с разрешением 300 dpi, B&W – для черно-белых иллюстраций, Grayscale – для полутонов, максимальный размер рисунка с надписью: ширина 150 мм, высота 245 мм и представлены в виде файла с расширением \*.BMP, \*.TIFF, \*.JPG, должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. **Схемы, графики** выполняются во встроенной программе **MS Word** или в **MS Excel**, с приложением файлов (**представляемые иллюстрации должны быть четкими и ясными во всех элементах**);
- 5) библиографические ссылки должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ Р 7.05 2008.

**Внимание! Публикация статьи является бесплатной.**

Стоимость журнала – 500 руб. (без стоимости почтовых расходов).

«Вестник ИрГТУ» включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, в DOAJ, международный каталог периодических изданий «UlrichsPeriodicals Directory», EBSCO, в Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU), представлен в Научной электронной библиотеке «КиберЛенинка» (CYBERLENINKA), рассылается в Российскую книжную палату, ВИНТИ РАН.

**Статьи, опубликованные в журнале «Вестник ИрГТУ», реферируются и рецензируются.**

**Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям.**

По вопросам публикации статей обращаться: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Д-215.

Телефон: **(3952) 40-57-56** – Привалова Галина Петровна, ответственный за выпуск.

Факс: **(3952) 405-100**, e-mail: [pgp@istu.edu](mailto:pgp@istu.edu)

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

# ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Научный журнал  
№ 5 (148) 2019

12+

Редактор Я.В. Макшанцева  
Художественный редактор Е.В. Хохрин  
Ответственный за выпуск Г.П. Привалова  
Перевод на английский язык В.В. Батицкой  
Верстка Н.П. Дзюндзя

Выход в свет 30.10.2019 г. Формат 60х90/8.  
Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 25.  
Тираж 500 экз. Заказ 222. Поз. плана 3н.

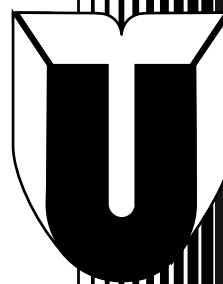
Издание распространяется **бесплатно**

Иркутский национальный исследовательский технический университет  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Отпечатано в типографии Издательства  
ФГБОУ ВО "Иркутский национальный  
исследовательский технический университет"

664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

ИЗДАТЕЛЬСТВО



Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета, 2019

