

Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета, 2021

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

Том 25 № 4  
2021

# ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

12+



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

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



# ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета, 2021

Том 25 № 4

2021

# ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Том 25 № 4  
2021

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  
Агентства АО ИД  
«Экономическая газета»:  
«Объединенный каталог. Пресса  
России. Газеты и журналы» -  
41476 (ОК + ЭК)  
Адрес АО ИД  
«Экономическая газета»:  
125319, г. Москва,  
ул. Черняховского, 16,  
помещение 1, комната 17.  
Тел.: (499) 152-86-11

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

Адрес редакции:  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,  
e-mail: pgg@istu.edu

## Редакционная коллегия

Главный редактор

**СИДОРОВ Д.Н.**, д. ф.-м. н., профессор, главный научный сотрудник, ФГБУН Институт систем энергетики им. Л.А.Мелентьева СО РАН (г. Иркутск)

Редакционная коллегия

**КОРНЯКОВ М.В.**, д.т.н., ректор Иркутского национального исследовательского технического университета, председатель редакционной коллегии (г. Иркутск, Россия)

**ЗАЙДЕС С.А.**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой машиностроительных технологий и материалов Иркутского национального исследовательского технического университета, заместитель главного редактора по направлению "Машиностроение и машиноведение" (г. Иркутск, Россия)

**НЕМЧИНОВА Н.В.**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой металлургии цветных металлов Иркутского национального исследовательского технического университета, заместитель главного редактора по направлению "Металлургия и материаловедение" (г. Иркутск, Россия)

**СУСЛОВ К.В.**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники Иркутского национального исследовательского технического университета, заместитель главного редактора по направлению "Энергетика" (г. Иркутск, Россия)

**БАЖИН В.Ю.**, д.т.н., декан факультета переработки минерального сырья Санкт-Петербургского горного университета (г. Санкт-Петербург, Россия)

**БЛОМЕНШТЕЙН В.Ю.**, д.т.н., профессор Кузбасского государственного технического университета (г. Кемерово, Россия)

**БОЛДЫРЕВ А.И.**, д.т.н., профессор кафедры технологии машиностроения Воронежского государственного технического университета (г. Воронеж, Россия)

**БОРОВИКОВ Ю.С.**, д.т.н., 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)

**ГАВЛИК ЮЗЕФ**, профессор кафедры технологии производства и автоматизации Краковского технологического университета (г. Краков, Польша)

**ЗАКАРЮКИН В.П.**, д.т.н., профессор кафедры электроэнергетики транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения (г. Иркутск, Россия)

**КАРПЕНКО Е.И.**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой лаборатории плазменно-энергетических процессов и технологий Института физического материаловедения СО РАН (г. Улан-Удэ, Россия)

**КЛЕР А.М.**, д.т.н., главный научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)

**КОЛОСОК И.Н.**, д.т.н., ведущий научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)

**КРЮКОВ А.В.**, д.т.н., 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.**, д.т.н., ведущий научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)

**МАМЯЧЕНКОВ С.В.**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой металлургии цветных металлов Уральского Федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург, Россия)

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

**МЫМРИН В.А.**, д.г.-м.н., профессор, Федеральный университет штата Парана (Куритиба, Бразилия)

**НОВИЦКИЙ Н.Н.**, д.т.н., главный научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)

**ОГАР П.М.**, д.т.н., профессор Братского государственного университета (г. Братск, Россия)

**ПАЗДЕРИН А.В.**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой автоматизированных электрических систем Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург, Россия)

**ПАНТЕЛЕЕВ В.И.**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой электрических комплексов и систем Сибирского федерального университета (г. Красноярск, Россия)

**СЕНДЕРОВ С.М.**, д.т.н., заместитель директора Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)

**СТЕННИКОВ В.А.**, д.т.н., профессор, директор Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)

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

**ТЮРИНА Э.А.**, д.т.н., ведущий научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)

**ФАНГ ЛЮ**, профессор Центрального Южного Университета (Чанша, провинция Хунань, Китай)

**ФЕДЯЕВ А.А.**, д.т.н., заведующий кафедрой промышленной теплоэнергетики Братского государственного университета (г. Братск, Россия)

**ХЕЙФЕЦ М.Л.**, д.т.н., директор Государственного научного учреждения «Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси» (г. Минск, Республика Беларусь)

**ФИШОВ А.Г.**, д.т.н., профессор Новосибирского государственного технического университета (г. Новосибирск, Россия)

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

# PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta

Vol. 25 No. 4

2021

Publishers of Irkutsk National  
Research Technical University

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 JSC «Economic Newspaper»  
Publishing House

“The united catalog. Russian press.  
Newspapers and journals”-  
41476 (OK + EC)

Address of JSC  
«Economic Newspaper»:  
Ekonomicheskaya Gazeta  
CJSC Publishing House 16,  
Chernyakhovsky St., block 1,  
room 17, Moscow 125319.  
Phone: (499) 152-86-11

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

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

## Editorial board

### Editor-in-Chief

**Denis N. SIDOROV**, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Advanced Professor, Chief Researcher, Melentiev Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)

### Editorial Board

**Mikhail V. KORNIKOV**, Dr. Sci. (Eng.), Rector, Irkutsk National Research Technical University, chairman of the editorial board (Irkutsk, Russia)

**Semen A. ZAIDES**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Head of the Department of Machine Building Technologies and Materials, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

**Nina V. NEMCHINOVA**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Head of the Department of Metallurgy of Nonferrous Metals, Irkutsk National Research Technical University, Deputy Editor-in-Chief (Irkutsk, Russia)

**Konstantin V. SUSLOV**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Irkutsk National Research Technical University, Deputy editor-in-chief in Power Engineering (Irkutsk, Russia)

**Vladimir Yu. BAZHIN**, Dr. Sci. (Eng.), Dean of the Mineral Resources Processing Faculty, Saint Petersburg Mining University (Saint Petersburg, Russia)

**Valery Yu. BLUMENSTEIN**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Kuzbass State Technical University (Kemerovo, Russia)

**Aleksander I. BOLDYREV**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia)

**Yury S. BOROVIKOV**, Dr. Sci. (Eng.), Rector, Novgorod State University n.a. Yaroslav-the-Wise (Veliky Novgorod, Russia)

**Nikolay I. VOROPAI**, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Head of the Melentiev Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)

**Josef GAVLIK**, Advanced Professor, Department of Production Technology and Automation, Krakow University of Technology (Krakow, Poland)

**Vasiliy P. ZAKARYUKIN**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Department of Transport Electricity, Irkutsk State Railway University (Irkutsk, Russia)

**Evgeniy I. KARPENKO**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Head of the Department of the Laboratory of Plasma Energy Processes and Technologies, Institute of Physical Materials Science, SB RAS (Ulan-Ude, Russia)

**Aleksander M. KLER**, Dr. Sci. (Eng.), Chief researcher, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)

**Viktor G. KURBATSKY**, Dr. Sci. (Eng.), Leading researcher, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)

**Irina N. KOLOSOK**, Dr. Sci. (Eng.), Leading researcher, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)

**Andrey V. KRYUKOV**, Dr. Sci. (Eng.), Academician of the Russian Academy of Transport, Corresponding member of the Academy of Sciences, Higher School of the Russian Federation and the Russian Academy of Engineering, Honored Power Engineer of the Republic of Buryatia, Advanced Professor, Department of Transport Electric Power Industry, Irkutsk State Railway University (Irkutsk, Russia)

**Sergey V. MAMYACHENKOV**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Head of the Department of Nonferrous Metallurgy, Ural Federal University n.a. the First President of Russia B.N. Yeltsin (Yekaterinburg, Russia)

**Mikhail M. MATLIN**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Head of the Department of Machine Parts and Hoisting-and-Transport Devices, Volgograd State Technical University (Volgograd, Russia)

**Vsevolod A. MYMRIN**, Dr. Sci. (Geology), Professor, Federal University of Parana (Curitiba, Brazil)

**Nikolay N. NOVITSKY**, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)

**Pyotr M. OGAR**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Bratsk State University (Bratsk, Russia)

**Andrey V. PAZDERIN**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Automated Electric Systems, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (Ekaterinburg, Russia)

**Vasiliy I. PANTELEEV**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Head of the Department of Electrical Systems, Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia)

**Sergey M. SENDEROV**, Dr. Sci. (Eng.), Deputy Director, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)

**Valery A. STENNIKOV**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Director, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)

**Zbigniew A. STYCZYNSKI**, Professor, Otto-von-Guericke University (Magdeburg, Germany)

**Eliana A. TYURINA**, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)

**Liu FANG**, Professor, Central Southern University (Changsha, Hunan Province, China)

**Aleksander A. FEDYAEV**, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of Industrial Heat and Power Engineering, Bratsk State University (Bratsk, Russia)

**Mikhail L. KHEIFETS**, Dr. Sci. (Eng.), Director, Institute of Applied Physics, National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

**Aleksander G. FISHOV**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Novosibirsk State Technical University (Novosibirsk, Russia)

**Berholt SCHOLTES**, Director, Institute of Metal Science, University of Kassel (Kassel, Germany)

## СОДЕРЖАНИЕ

Содержание .....	408
------------------	-----

### Машиностроение и машиноведение

Климова Л.Г. Влияние остаточных напряжений на изгибную жесткость валов, упрочненных охватывающим деформированием.....	412
Мокрицкий Б.Я., Верещагин В.Ю. Оценка напряженного состояния режущих элементов концевых твердосплавных составных фрез с покрытиями.....	421

### Энергетика

Местников Н.П., Васильев П.Ф., Давыдов Г.И., Хоютанов А.М., Альзаккар А.М.-Н. Исследование возможности применения фотоэлектрических солнечных установок внутри купольного строения в условиях Севера.....	435
Мухаметгалиева Т.С., Федосов Д.С. Разработка упрощенной модели трансформатора тока для исследования работы релейной защиты в переходных режимах.....	450
Обухов С.Г., Плотников И.А., Масолов В.Г. Исследование эксплуатационного ресурса аккумуляторных батарей в изолированных энергетических системах с возобновляемыми источниками энергии.....	463
Степанова Е.Л., Жарков П.В. Исследование зависимости расхода топлива теплофикационной газотурбинной установки от изменения тепловой нагрузки потребителей регионов, имеющих различные климатические условия с учетом определения конструктивных характеристик теплообменного оборудования подогрева сетевой воды.....	478

### Металлургия и материаловедение

Васюнина Н.В., Дубова И.В., Бакшеев С.П., Ковель М.Р., Макарова В.В. Генерация цианида натрия путем газификации угля для золотоизвлекательных фабрик.....	488
Солихов М.М., Аксёнов А.В., Каримов М.И., Рахманов О.Б., Минеев Г.Г. Исследование и выбор оптимальной технологической схемы флотационного обогащения золото-медно-мышьяковистой руды месторождения «Тарор» (Республика Таджикистан).....	498
Черемисин Д.Д., Новокрещенов С.А., Швыдкий В.С., Жуков В.П. Математическое моделирование теплового режима агрегата печь-ковш с учетом внутренних тепловых источников.....	509
Яковлева А.А., Анциферов Е.А., Садловский С.В. Определение коррозионных характеристик в координатах Нейквиста при защите поверхности стали латексами.....	519

## CONTENTS

Contents.....	409
---------------	-----



### Mechanical Engineering and Machine Science



 <b>Klimova L.G.</b> Effects of residual stresses on the bending stiffness of shafts strengthened by enveloping de-formation.....	412
 <b>Mokritskii B.Ya., Vereshchagin V.Yu.</b> Evaluation of the stressed state of cutting elements of coated end-milling hard-alloy combined cutters.....	421



### Power Engineering



 <b>Mestnikov N.P., Vasilyev P.F., Davydov G.I., Khoyutanov A.M., Alzakkar A.M-N.</b> Applicability of photoelectrical solar units inside domical structures in northern conditions.....	435
 <b>Mukhametgaleeva T.S., Fedosov D.S.</b> A simplified model of a current transformer for studying relay protection operation in transient conditions.....	450
 <b>Obukhov S.G., Plotnikov I.A., Masolov V.G.</b> Service life tests for storage batteries used in islanded power systems with renewable energy sources.....	463
 <b>Stepanova E.L., Zharkov P.V.</b> A study of the dependence between fuel consumption of a heat gas turbine and variation of heat loading of regional consumers having various climatic conditions taking into account determination of structural characteristics of heat exchanging equipment for grid water heating	478



### Metallurgy and Materials Science



 <b>Vasyunina N.V., Dubova I.V., Baksheev S.P., Kovel M.R., Makarova V.V.</b> Generation of sodium cyanide by coal gasification for gold recovery factories.....	488
 <b>Solikhov M.M., Aksenov A.V., Karimov M.I., Mineev G.G., Rakhmanov O.B.</b> An optimal technological scheme for flotation concentration of gold-copper-arsenic ores of the Taror deposit (Republic of Tajikistan).....	498
 <b>Cheremisin D.D., Novokreschenov S.A., Shvydkiy V.S., Zhukov V.P.</b> Mathematical modelling of the thermal regime of a ladle-furnace unit considering internal heat sources.....	509
 <b>Yakovleva A.A., Antsiferov E.A., Sadlovskiy S.V.</b> Determination of corrosion characteristics of steel protected by a latex coating in Nyquist coordinates.....	519

# 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, ВИНИТИ РАН, каждой статье присваивается цифровой индикатор DOI.

«Вестник ИргТУ» реферруется 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  
Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta

## 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**





## Влияние остаточных напряжений на изгибную жесткость валов, упрочненных охватывающим деформированием

© Л.Г. Климова

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

**Резюме:** Цель – исследовать влияние технологических остаточных напряжений на изгибную жесткость цилиндрических деталей типа валов и осей. Исследования проведены на удлиненных цилиндрических образцах (из стали марки 35 диаметром 30 мм) с использованием метода растачивания и обтачивания. Образцы отжигали в защитной среде для удаления начальных остаточных напряжений. Эксперименты выполнены на лабораторной гидравлической испытательной машине Amsler с использованием твердосплавных матриц марки VK8. Эксперименты показали, что при сверхмалой степени относительного обжатия – от 0,1 до 0,5% – размер слоя с тангенциальными остаточными напряжениями сжатия постепенно уменьшается. Жесткость таких цилиндрических заготовок остается практически неизменной. При увеличении относительного обжатия (от 0,5 до 1,2%) происходит уменьшение остаточных напряжений сжатия на поверхности детали. Толщина слоя с тангенциальными остаточными напряжениями сжатия начинает увеличиваться. При этом остаточный прогиб становится меньше, изгибная жесткость увеличивается. Установлено, что степень относительного обжатия не влияет на изменение глубины распределения осевых остаточных напряжений. Оптимального распределения тангенциальных остаточных напряжений сжатия можно достичь за счет увеличения их глубины. Установлена линейная закономерность при степенях относительного обжатия от 0,1 до 1,0%. Самое большое сопротивление изгибу зафиксировано у упрочненных относительным обжатием образцов с близкими к 1,0% величинами. Обработав заготовки охватывающим деформированием с обжатием 1,0% и нагрузив их поперечной силой 0,6 кН, можно добиться уменьшения искажения при изгибе и увеличить прочность деталей в 5 раз. Установлено, что на изгибную жесткость цилиндрических валов большое влияние оказывают остаточные напряжения сжатия. Глубина залегания остаточных напряжений оказывает различное влияние на жесткость цилиндрических деталей. Таким образом, правильно воспользовавшись упрочняющим охватывающим деформированием, можно сформировать качественный поверхностный слой деталей с заранее заданным распределением остаточных напряжений.

**Ключевые слова:** степень обжатия, остаточные напряжения, охватывающее деформирование, цилиндрический образец, изгибная жесткость, поверхностный слой

**Для цитирования:** Климова Л.Г. Влияние остаточных напряжений на изгибную жесткость валов, упрочненных охватывающим деформированием. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 4. С. 412–420. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-412-420>

## Effects of residual stresses on the bending stiffness of shafts strengthened by enveloping deformation

Larisa G. Klimova

*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

**Abstract:** The aim was to study the effects of technological residual stresses on the bending stiffness of cylindrical parts of shafts and axes. Experiments were conducted for elongated cylindrical specimens made of steel grade 35 with a diameter of 30 mm using boring and turning methods. Specimens were annealed in a protective medium to remove initial residual stresses. Experiments were carried out using an Amsler laboratory hydraulic testing machine and VK8 grade hard-alloy matrices. The experiments showed that, for an extremely low degree of relative crimping of 0.1 to 0.5%, the size of the layer with tangential residual compression stresses gradually decreases. The stiffness of such cylindrical workpieces remains almost unchanged. An increase in relative crimping (from 0.5 to 1.2%) leads to a decrease in residual compression stresses on the part surface. The layer thickness with tangential residual compression stresses starts to increase. This leads to a decreased residual buckling and an increased bending stiffness. It was found that the degree of relative crimping has no effect on the variation of distribution depth of axial residual stresses. Optimal distribution of tangential residual compression stresses can be reached by increasing their depth. A linear relationship was found for relative crimping of 0.1 to 1.0%. The highest bending resistance was recorded for specimens strengthened by residual crimping

of about 1.0%. By processing workpieces using enveloping deformation with crimping of 0.1% and loading them with a transverse force of 0.6 kN, bending distortion can be decreased and the strength of parts can be increased by 5 times. It was found that the bending stiffness of cylindrical shafts is greatly affected by residual compression stresses. The bedding depth of residual stresses has various effects on the stiffness of cylindrical parts. Thus, correct use of strengthening enveloping deformation can form a high-quality surface layer on parts with the pre-defined distribution of residual stresses.

**Keywords:** compression degree, residual stresses, enveloping deformation, cylindrical sample, bending stiffness, surface layer

**For citation:** Klimova L.G. Effects of residual stresses on the bending stiffness of shafts strengthened by enveloping deformation. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(4):412–420. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-412-420>

## ВВЕДЕНИЕ

В современном машиностроении можно увидеть тенденцию к уменьшению металлоемкости изделий. Происходит это за счет создания новых конструкционных материалов с высокой прочностью и имеющих особые эксплуатационные свойства<sup>1</sup> [1]. Анализ литературных источников, посвященных задаче повышения прочности, показал многообразие проводимых аналитических и эмпирических исследований. Повышение прочности материала позволяет снижать размеры поперечных сечений деталей типа валов и осей. При таком подходе сформировался класс маложестких деталей, к которым относятся шпиндели станков, ходовые винты, цилиндрические направляющие, штоки и целый ряд аналогичных деталей [2, 3].

Надежность нежестких деталей оценивается не только качеством поверхностного слоя, но и точностью формы, которая характеризуется жесткостью. Жесткость определяется способностью деталей сопротивляться внешним и внутренним силовым факторам, то есть упругому деформированию.

Для изделий цилиндрической формы жесткость можно оценить отношением величины поперечной нагрузки к максимальной стреле прогиба [4]. При изготовлении деталей и на их эксплуатацию негативно влияет малая изгибная жесткость [5, 6].

Форма изделия, условия нагружения и физико-механические свойства материала – это факторы, определяющие изгибную жесткость цилиндрических деталей [7]. На практике только модуль упругости ( $E$  или  $G$ ) способствует изменению жесткости деталей. Условия нагружения и геометрические параметры, как правило, бывают уже заданы. Однако в работах<sup>2,3</sup> [8] установлено, что на модуль упругости обычные температурно-силовые изменения почти не оказывают никакого влияния.

В работах [9, 10] рассмотрена возможность изменения изгибной жесткости деталей за счет формирования остаточных напряжений. Однако эти результаты получены на схематичных законах распределения остаточных напряжений [11].

Для отделочно-упрочняющей обработки длинномерных валов авторами [12–14] предложен процесс охватывающего пластического деформирования. При этом за счет получения бездислокационных кристаллов и торможения движущихся дислокаций происходит повышение прочности изделия. Такой процесс деформирования обладает не только высокой производительностью, но и способностью формировать качественный поверхностный слой деталей с заданным распределением остаточных напряжений. Этот способ упрочнения был использован в данной работе.

<sup>1</sup>Зуев Л.Б., Данилов В.И. Физические основы прочности металлов: учеб. пособ. Долгопрудный: ИД «Интеллект», 2013. 376 с.

<sup>2</sup>Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. Киев: Изд-во «Наукова думка», 1988. 736 с.

<sup>3</sup>Реслер И., Хордерс Х., Бекер М. Механическое поведение конструкционных материалов: учеб. пособ. Долгопрудный: ИД «Интеллект», 2011. 504 с.



Целью исследования явилась экспериментальная проверка влияния остаточных напряжений на изгибную жесткость длинномерных деталей типа валов, штанг, осей.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для выполнения эксперимента использовали образцы цилиндрической формы из стали 35 (с пределом текучести = 360 МПа, пределом прочности = 485 МПа).

Такие образцы были вырезаны из длиномерных заготовок. Для определения остаточных напряжений использовался механический метод расточки и обточки цилиндрических деталей. Этот метод был предложен Г. Заксом и усовершенствован Л.А. Гликманом и А.Н. Бабаевым [15].

Последовательность определения остаточных напряжений:

- 1) сверление и растачивание цельных цилиндрических образцов;
- 2) измерение радиальных и осевых деформаций цилиндрических образцов;
- 3) на основании этих данных произведен расчет главных компонент тензора остаточных напряжений:

$$\sigma_z^o = \frac{E}{1-\nu^2} \left[ (A_n - A) \frac{d(\varepsilon_z + \nu\varepsilon_\phi)}{dA} - (\varepsilon_z + \nu\varepsilon_\phi) \right];$$

$$\sigma_\phi^o = \frac{E}{1-\nu^2} \left[ (A_n - A) \frac{d(\varepsilon_\phi + \nu\varepsilon_z)}{dA} - \frac{A_n + A}{2A} (\varepsilon_\phi + \nu\varepsilon_z) \right];$$

$$\sigma_r^o = \frac{E}{1-\nu^2} \frac{A_n - A}{2A} (\varepsilon_\phi + \nu\varepsilon_z),$$

где  $\sigma_z^o, \sigma_\phi^o, \sigma_r^o$  – соответственно, осевые, тангенциальные и радиальные остаточные напряжения;  $E$  – модуль упругости первого рода;  $A_n$  – площадь, связанная с внешним диаметром цилиндра;  $A$  – переменная площадь, связанная с радиусом рассматриваемого слоя;  $\varepsilon_z, \varepsilon_\phi$  – относительное изменение длины и внешнего диаметра, т.е. геометрии детали при растачивании цилиндра.

На цилиндрических образцах удаляли

снаружи концентрические слои металла. Чтобы получить остаточные напряжения в периферийных слоях, измеряли осевые и тангенциальные деформации внутри образцов.

На устойчивость остаточных напряжений влияет изменение геометрии деталей, и как следствие изменение свойств металла, связанное с заранее выполненным растачиванием. Поэтому способом Г. Закса были определены специальные поправки на остаточные напряжения, измеряемые при помощи такого растачивания [3].

Для проверки правильности определения остаточных напряжений использовали интегральные условия равновесия:

$$\int_0^A \sigma_z^o \cdot dA = 0; \quad \nu \int_0^{r_u} \sigma_\phi^o \cdot dr = 0.$$

При растачивании и обтачивании цилиндрических образцов происходит нагрев металла, создавая неоднородное температурное поле внутри детали. Кроме этого, микрогеометрия изделия меняется. В местах обработки деталей происходит дробление зерен, которые теряют первоначальную форму и резко меняют соотношение размеров. При этом структура основного металла, где зерна расположены беспорядочно, отличается от обработанных участков, на которых зерна вытягиваются в направлении деформирования. В данном случае действительная величина остаточных напряжений будет нестабильна. Чтобы этого не произошло, были выполнены специальные эксперименты, которые помогли подобрать режимы резания, не влияющие на изменения остаточных напряжений в металлических образцах. Были подготовлены отожженные образцы без остаточных напряжений и на них эти режимы прошли тестирование. Благодаря связи толщины снимаемого слоя с деформацией образцов выполнены расчеты составляющих тензора остаточных напряжений. Для этого удаляли концентрические слои цилиндра и с точностью  $\pm 1$  мкм измеряли его искажения в осевом и радиальном направлениях.

Оптимальное число удаляемых слоев было определено при помощи математиче-

ской обработки результатов опытов<sup>4</sup>. Эксперименты с охватывающим деформированием выполняли на лабораторной гидравлической машине Амслер при помощи матриц ВК8, изготовленных из твердых сплавов. Образцы для обнуления начальных остаточных напряжений отжигали в защитной среде. Для определения оптимального числа замеров после удаления каждого слоя были построены кривые деформаций. Для проведения опытов использовали стальные валы диаметром 30 мм (сталь 35). Матрица была постоянной, и чтобы получить нужную степень относительного обжатия, был рассчитан начальный диаметр цилиндра.

Остаточные напряжения рассчитаны по результатам выполненных экспериментов с охватывающим деформированием [16].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве основного параметра охватывающего деформирования, от которого зависят величина и характер распределения остаточных напряжений, принята степень относительного обжатия (Q), которую определяли по формуле [3]:

$$Q = \frac{D_n^2 - D_k^2}{D_n^2} \cdot 100\%,$$

где  $D_n$ ,  $D_k$  – измеренный диаметр образца до и после охватывающего деформирования.

При выполнении экспериментов степень относительного обжатия находилась в пределах от 0,1 до 5%.

В таблице представлены максимальные значения осевых  $\sigma_z^o$  и тангенциальных  $\sigma_\phi^o$  остаточных напряжений, а также глубина распределения ( $\Delta$ ) остаточных напряжений сжатия в поверхностных слоях.

Величину изгибной жесткости упрочненных прутков оценивали экспериментально. Для этого к середине цилиндра, который устанавливали на две призмы, попеременно

прикладывали груз величиной 0,2; 0,4; 0,6 кН. Для определения остаточного прогиба использовали микроиндикаторную головку.

Зависимость максимальных остаточных напряжений на поверхности и глубины их распределения от величины относительного обжатия

Dependence of maximum surface residual stresses and their distribution depths on the value of relative compression

Опыт	Q, %	$\sigma_z^o$ max, МПа	$\Delta_z^{\max}$ , мм	$\sigma_\phi^o$ max, МПа	$\Delta_\phi^{\max}$ , мм
1	0,10	-160	5	-52	12
2	0,15	-220	5	-65	10
3	0,30	-230	5	-102	9
4	0,50	-240	5	-85	6
5	0,80	-80	3	-60	10
6	1,00	+20	5	+5	11
7	2,00	+360	5	+140	8
8	3,00	+400	5	+130	3
9	5,00	+440	5	+120	2

При сверхмалых обжатиях поверхностный слой деформируется слабо. Происходят изменения в геометрии поверхностного слоя на уровне отдельных зерен, не вызывая структурных превращений в остальном объеме деталей. Рис. 1 демонстрирует зависимость остаточных прогибов  $f_{ост}$  от степени относительного обжатия Q образцов после охватывающего деформирования. На рис. 1 отчетливо видно, при сверхмалой степени относительного обжатия – от 0,1 до 0,5% – изменения начальной жесткости изделия несущественны, и геометрия детали практически остается в первоначальном состоянии. При таких обжатиях механические характеристики меняются только на микроуровне.

В результате проведенных экспериментов было обнаружено, что при росте относительного обжатия с 0,5 до 1,2% происходит уменьшение остаточных напряжений сжатия на поверхности детали (см. табл. 1).

<sup>4</sup>Румшинский Л.З. Математическая обработка результатов экспериментов. Справочное руководство. М.: Изд-во «Наука», 1971. 192 с.

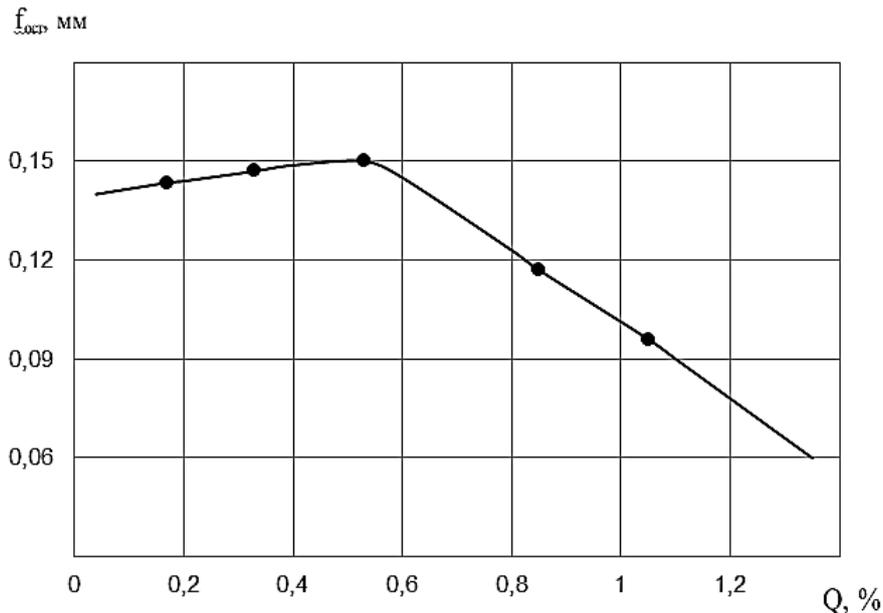


Рис. 1. Влияние степени относительного обжатия  $Q$  на величину остаточного прогиба после поперечного изгиба образцов ( $F = 4$  кН)

Fig. 1. Influence of the relative compression degree  $Q$  on the value of the residual deflection after transverse bending of samples ( $F = 4$  kN)

При этом остаточный прогиб становится меньше (см. рис. 1). То есть при уменьшении остаточных напряжений сжатия можно получить повышение жесткости деталей типа валов. Чтобы удостовериться в правильности такого вывода, были обработаны результаты опытов и проверена зависимость глубины остаточных напряжений сжатия ( $\Delta$ ) от степени относительного сжатия:

$$\Delta\phi = r - r_\phi; \quad \Delta z = r - r_z,$$

где  $r$  – радиус образца,  $r_\phi, r_z$  – величина радиуса изделий, при которой растягивающие осевые и тангенциальные остаточные напряжения меняют знак на сжимающие остаточные напряжения.

На рис. 2 показаны результаты расчета. При росте обжатия от 0,1 до 0,5% размер слоя с тангенциальными остаточными напряжениями сжатия постепенно уменьшается. Зато при увеличении обжатия в пределах от 0,6 до 1,2% – толщина слоя начинает увеличиваться (рис. 2). Зависимость  $\Delta$  от  $Q$  является неоднозначной. Во внутренних слоях деталей напряжение меньше благода-

ря тому, что релаксация напряжений может протекать более свободно.

Было получено, что степень относительного обжатия не влияет на изменение глубины распределения осевых остаточных напряжений (см. рис. 2). Оптимального распределения тангенциальных остаточных напряжений сжатия можно достичь за счет увеличения их глубины. При этом можно увеличить работоспособность упрочненных изделий, повышая их жесткость. Такие же выводы были описаны в работах [17–20] авторами, исследующими локальные методы упрочнения.

Полученные результаты опытов были проверены при разных величинах поперечных нагрузок, действующих на цилиндрические заготовки.

На рис. 3 показано, что остаточный прогиб  $f_{ост}$  зависит от поперечной нагрузки. Очевидно, что прогиб балки  $f_{ост}$  становится больше, если возрастает сила  $f$ . Полученная зависимость уже известна ранее из теоретических исследований и практики. Благодаря проведенным экспериментам, была обнаружена линейная закономерность между поперечной силой и степенью относительного обжатия от 0,1 до 1,0%.

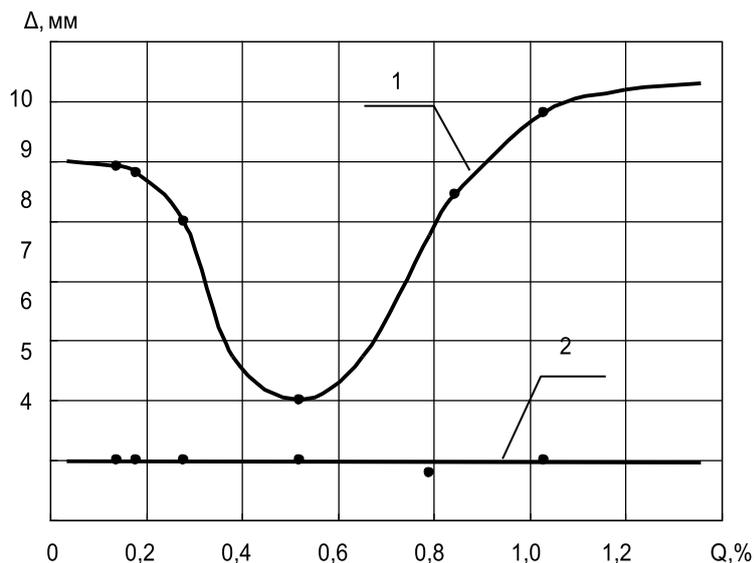


Рис. 2. Влияние степени относительного обжатия  $Q$  на глубину распределения остаточных напряжений сжатия в периферийных слоях: 1 –  $\Delta_\phi$  для тангенциальных остаточных напряжений; 2 –  $\Delta_z$  для осевых остаточных напряжений  
 Fig. 2. Influence of the relative compression degree  $Q$  on the distribution depth of residual compression stresses in peripheral layers: 1 –  $\Delta_\phi$  for tangential residual stresses; 2 –  $\Delta_z$  for axial residual stresses

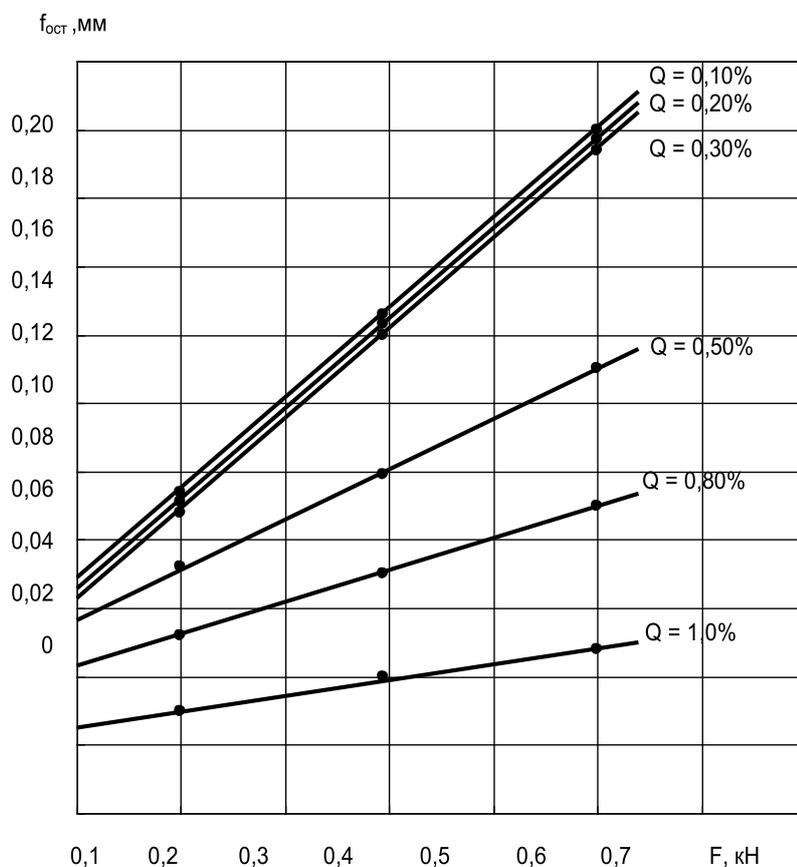


Рис. 3. Влияние усилий  $F$  при разных степенях относительного обжатия  $Q$  на величину остаточного прогиба  
 Fig. 3. Influence of forces  $F$  at different degrees of relative compression  $Q$  on the value of residual deflection



Жесткость цилиндрических заготовок, упрочненных обжатием с малыми значениями –  $Q$  лежит в пределах от 0,1 до 0,5 % – практически остается неизменной. Изгибная жесткость увеличивается, если обжатие увеличивается от 0,6 до 1,0%. Самое большое сопротивление изгибу у образцов, упрочненных относительным обжатием с близкими к 1% величинами. У таких цилиндров глубина действия остаточных напряжений по сравнению с другими обжатиями самая большая [21], а на поверхности они почти отсутствуют. Обработав заготовку охватывающим деформированием с обжатием 1% и нагрузив их поперечной силой 0,6 кН, можно добиться уменьшения искажения при изгибе и увеличить жесткость деталей в 5 раз.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате экспериментальных исследований установлено влияние остаточного напряженного состояния на изгибную жесткость упрочненных цилиндрических деталей. Остаточные напряжения сжатия оказывают большое влияние на повышение изгибной жесткости, чем остаточные напряжения растяжения. Лучшие результаты получены, когда остаточные напряжения в поверхностных слоях стремятся к нулю. Изгибная жесткость цилиндрических деталей не зависит от глубины распределения осевых остаточных напряжений. Жесткость деталей повышается в зависимости от глубины расположения тангенциальных остаточных напряжений сжатия в наружном слое.

## Список литературы

1. Świć A., Zubrzycki J., Gola A. Modelling Characteristics Turning Processing for Want of Management by an Elastic Deformed Condition // *Applied Mechanics and Materials*. 2016. Vol. 844. P. 109–114. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.844.109>
2. Świć A., Taranenko V., Wolos D. New method for machining of low-rigidity shafts // *Advances in Manufacturing Science and Technology*. 2010. Vol. 34. No. 1. P. 59–71.
3. Зайдес С.А. Охватывающее поверхностное пластическое деформирование. Иркутск: Изд-во ИРГТУ, 2001. 309 с.
4. Закс Г. Практическое металловедение. М.: ОНТИ НКТП, 1938. 244 с.
5. Зайдес С.А., Нгуен Ван Хуан. Повышение жесткости длиномерных валов охватывающим пластическим деформированием // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2016. № 2. С. 10–15.
6. Remy L. Thermal and thermal-mechanical fatigue of superalloys // *Low Cycle Fatigue and Elasto-Plastic Behavior of Materials* / ed. D.P. Portella, K.-T. Rie. Oxford: Elsevier, 1998. P. 119–130.
7. Riedel H. Fracture at high temperatures. materials research and engineering. Berlin: Springer – Verlag Berlin Heidelberg, 1987. 431 p. <https://doi.org/10.1002/crat.2170230609>
8. Benito J.A., Manero J.M., Peiro J.J., Roca A. Change of Young's modulus of cold-deformed pure iron in a tensile test // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2005. Vol. 36. Iss. 12. P. 3317–3324. <https://doi.org/10.1007/s11661-005-0006-6>
9. Нгуен Ван Хуан, Зайдес С.А., Фам Дак Фьонг. Моделирование изгибной жесткости валов в зависимости от остаточных напряжений // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2015. № 6. С. 15–19.
10. Зайдес С.А., Рудых Н.В. Определение напряженного состояния поверхностно-упрочненного слоя // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2011. № 12. С. 35–38.
11. Seth P.P., Das A., Bar N.H., Sivaprasad S., Basu A., Dutta K. Evolution of dislocation density during tensile deformation of BH<sub>220</sub> steel at different pre-strain conditions // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2015. Vol. 24. Iss. 7. P. 2779–2783.
12. <https://doi.org/10.1007/s11665-015-1554-6>
13. Беляев В.Н., Иванов В.П., Ингеманссон А.Р., Исаев А.Н., Киричек А.В., Крайнев Д. [и др.]. Эффективные технологии поверхностного пластического деформирования и комбинированной обработки: монография. М.: ООО «Спектр», 2014. 403 с.
14. Зайдес С.А., Нгуен Ван Хуан. Технологические возможности повышения изгибной жесткости деталей типа валов и осей // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2016. № 7. С. 25–31.
15. Зайдес С.А., Фам Д.Ф., Нго К.К. Новые процессы поверхностного пластического деформирования. Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2019. 352 с.
16. Гликман Л.А., Бабаев А.Н., Левин В.М. О рациональном использовании способа Гейна и Бауэра для определения остаточных напряжений в цилиндрах // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 1976. № 5. С. 94–103.
17. Махалов М.С. Расчетные модели остаточных напряжений поверхностного слоя после упрочнения способами поверхностного пластического деформирования // *Обработка металлов*. 2012. № 3. С. 110–115.
18. Уорсинг А., Геффнер Д. Методы обработки экспериментальных данных / пер. с англ. Л.А. Шохат; ред. А.С. Монин. М.: Изд-во иностранной литературы, 1953. 347 с.

19. Зайдес С.А., Нгуен Ван Хуан. Влияние степени относительного обжатия на изгибную жесткость длинномерных валов // Технология металлов. 2017. № 2. С. 3–8.  
20. Zaides S.A., Nguyen Kh.V. Influence of surface plastic deformation on the flexural rigidity of shafts // Russian Engineering Research. 2016. Vol. 36. No. 12. P. 1008–1011. <https://doi.org/10.3103/S1068798X16120182>

21. Zaides S.A., Nguyen H.V. Improving the flexural rigidity of cold-finished steel // Steel in Translation. 2016. No. 46. P. 505–509. <https://doi.org/10.3103/S0967091216070160>  
22. Климова Л.Г. Технологические возможности снижения искривления маложестких валов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2011. № 11. С. 33–37.

## References

1. Świć A, Zubrzycki J, Gola A. Modelling characteristics turning processing for want of management by an elastic deformed condition. *Applied Mechanics and Materials*. 2016;844:109–114. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.844.109>  
2. Świć A, Taranenko V, Wolos D. New method for machining of low-rigidity shafts. *Advances in Manufacturing Science and Technology*. 2010;34(1):59–71.  
3. Zaides SA. *Enveloping surface plastic deformation*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2001, 309 p. (In Russ.)  
4. Zaks G. *Practical science of metals*. Moscow: Ob'edinennoe nauchno-tehnicheskoe izdatel'stvo Narodnogo komissariata tyazhelej promyshlennosti; 1938, 244 p. (In Russ.)  
5. Zaydes SA, Nguyen Van Huan. Increase stiffness of long transmission lineshaft by embracing plastic deformation. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Strengthening Technologies and Coatings*. 2016;2:10–15. (In Russ.)  
6. Remy L. Thermal and thermal-mechanical fatigue of superalloys. In: Portella DP, Rie K-T (eds.) *Low Cycle Fatigue and Elasto-Plastic Behavior of Materials*. Oxford: Elsevier; 1998, p. 119–130.  
7. Riedel H. *Fracture at High Temperatures. Materials Research and Engineering*. Berlin: Springer – Verlag Berlin Heidelberg; 1987, 431 p. <https://doi.org/10.1002/crat.2170230609>  
8. Benito JA, Manero JM, Peiro JJ, Roca A. Change of Young's modulus of cold-deformed pure iron in a tensile test. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2005;36(12):3317–3324. <https://doi.org/10.1007/s11661-005-0006-6>  
9. Nguyen Van Huan, Zaydes SA, Pham Dac Phuong. Modeling shaft bending stiffness depending on residual stresses. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2015;6:15–19. (In Russ.)  
10. Zaides SA, Rudyh NV. Determination of the stress state of the surface-hardened layer. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2011;12:35–38. (In Russ.)  
11. Seth PP, Das A, Bar NH, Sivaprasad S, Basu A, Dutta K. Evolution of Dislocation Density During Tensile Defor-

mation of BH220 Steel at Different Pre-strain Conditions. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2015;24(7):2779–2783. <https://doi.org/10.1007/s11665-015-1554-6>  
12. Belyaev VN, Ivanov VP, Ingemansson AR, Isaev AN, Kirichek AV, Krajnev D, et al. *Effective technologies of surface plastic deformation and combined processing*. Moscow: ООО "Spektr"; 2014, 403 p. (In Russ.)  
13. Zaydes SA, Nguyen Van Huan. Technological possibilities of increasing bending stiffness of shaft and axle type parts. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka metallov davleniem*. 2016;7:25–31. (In Russ.)  
14. Zaydes SA, Fam DF, Ngo KK. *New processes of surface plastic deformation*. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2019, 352 p. (In Russ.)  
15. Glikman LA, Babaev AN, Levin VM. On rational use of the Hein and Bauer method for determining residual stresses in cylinders. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov = Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 1976;5:94–103. (In Russ.)  
16. Mahalov MS. The surface layer residual stresses tensor prediction models after hardening by surface layer plastic deformation methods. *Obrabotka metallov = Metal Working and Material Science*. 2012;3:110–115. (In Russ.)  
17. Worsing A, Heffner D. Methods for processing experimental data, 1953, 347 p. (Russ. ed.: *Metody obrabotki eksperimental'nyh dannyh*. Moscow, Foreign Literature Publishers, 1953, 347 p.)  
18. Zaides SA, Nguyen Van Huan. Influence of relative compression degree on bending stiffness of long-length shafts. *Tekhnologiya metallov = Technology of Metals*. 2017;2:3–8. (In Russ.)  
19. Zaides SA, Nguyen KhV. Influence of surface plastic deformation on the flexural rigidity of shafts. *Russian Engineering Research*. 2016;36(12):1008–1011. <https://doi.org/10.3103/S1068798X16120182>  
20. Zaides SA, Nguyen HV. Improving the flexural rigidity of cold-finished steel. *Steel in Translation*. 2016;46:505–509. <https://doi.org/10.3103/S0967091216070160>  
21. Klimova LG. Technological opportunities to reduce and contort low-rigid shafts. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2011;11(58):33–37. (In Russ.)



### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Климова Лариса Генриховна**,  
кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры инженерной и компьютерной графики,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,  
✉ e-mail: larisgoko@yandex.ru

#### **Заявленный вклад автора**

Автор выполнила исследовательскую работу, на основании полученных результатов провела обобщение, подготовила рукопись к печати.

#### **Конфликт интересов**

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

*Автор прочитала и одобрила окончательный вариант рукописи.*

#### **Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 20.09.2020; одобрена после рецензирования 01.06.2021; принята к публикации 19.08.2021.

### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Larisa G. Klimova**,  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Engineering  
and Computer Graphics,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,  
✉ e-mail: larisgoko@yandex.ru

#### **Contribution of the author**

The author performed the research, made a generalization on the basis of the results obtained and prepared the copyright for publication.

#### **Conflict of interests**

The author declares no conflict of interests.

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

#### **Information about the article**

The article was submitted 20.09.2020; approved after reviewing 01.06.2021; accepted for publication 19.08.2021.



## Оценка напряженного состояния режущих элементов концевых твердосплавных составных фрез с покрытиями

© Б.Я. Мокрицкий\*, В.Ю. Верещагин\*\*

\*Комсомольский-на-Амуре государственный университет, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия

\*\*Новосибирский государственный педагогический университет, г. Новосибирск, Россия

**Резюме:** Цель работы – исследовать величины напряжений в инструментальном материале составных концевых фрез для того, чтобы сравнить их с допустимыми напряжениями с позиций исключения разрушения фрез. Объемом исследования являются предельные величины напряжения в инструментальном материале разработанных составных концевых твердосплавных фрез, имеющих сопряженные между собой режущую часть и хвостовик. Режущая часть выполнена из инструментального твердого сплава, хвостовик – из конструкционной стали. Для определения напряжений использовано имитационное моделирование в программной среде ANSYS и Deform. Составляющие силы резания определены экспериментально. Принято, что чем меньше величины составляющих силы резания, тем меньше величины напряжений в инструментальном материале, и тем меньше возможность разрушения инструментального материала. Рассмотрено фрезерование труднообрабатываемой нержавеющей стали 12X18H10T со скоростью резания 70 м/мин, с глубиной резания 1 мм и подачей 0,1 мм/зуб. Рассмотрен инструментальный материал VK8 без покрытий и с разными покрытиями, которые способствуют снижению составляющих сил резания. Доказано, что составной концевой фрезой диаметром 16 мм и длиной 92 мм можно обрабатывать детали с той же точностью, с какой их обрабатывают монолитной (цельной) концевой твердосплавной фрезой. С увеличением длины составных фрез точность обработки снижается, но при длинах 123 мм и 180 мм они применимы для изготовления деталей, используемых в общем машиностроении. Таким образом, составные концевые фрезы могут конкурировать с монолитными фрезами по точности изготовления и периоду стойкости, чем ограничивают существующую область применения монолитных фрез. При этом стоимость составных фрез меньше монолитных на 10–60%.

**Ключевые слова:** составные концевые фрезы, напряжения в инструментальном материале, минимизация отказа фрезы, зуб фрезы, имитационное моделирование, ANSYS

**Для цитирования:** Мокрицкий Б.Я., Верещагин В.Ю. Оценка напряженного состояния режущих элементов концевых твердосплавных составных фрез с покрытиями. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 4. С. 421–434. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-421-434>

## Evaluation of the stressed state of cutting elements of coated end-milling hard-alloy combined cutters

Boris Ya. Mokritskii\*, Vladislav Yu. Vereshchagin\*\*

\*Komsomolsk-na-Amure State University, Komsomolsk-na-Amure, Russia

\*\*Novosibirsk State Pedagogical University, Novosibirsk, Russia

**Abstract:** This paper compares stresses arising in the tool material of combined end-milling cutters and their admissible values with the purpose of preventing cutter destruction. The limit stress values of tool materials for the developed end-milling hard-alloy combined cutters having an interfaced cutting part and tailpiece were investigated. The cutting part was made of a tool-grade hard alloy, and the tailpiece was made of structural steel. To determine stresses, simulation modeling was carried out in the ANSYS and Deform software. The cutting force components were found experimentally. It was assumed that lower cutting force components lead to lower stresses in the tool material. This results in a lower probability of tool material destruction. The process of cutting the hard-to-cut stainless steel 12Kh18N10T was considered at the following parameters: a cutting speed of 70 m/min, a cutting depth of 1 mm, and a feeding of 0.1 mm/tooth. The tool material VK8 with no coating and with various coatings promoting the reduction of cutting force components was studied. It was confirmed that a combined end-milling cutter 16 mm in diameter and 92 mm long can be used to cut parts with the same accuracy as using a solid end-milling hard-alloy cutter. An increase in the length of combined cutters decreases the cutting accuracy; however, for lengths 123 and 180 mm, these cutters can be used to manufacture parts applied in general machine building. Therefore, combined end-milling cutters can compete with solid cutters in terms of the manufactur-

ing accuracy and resilience period, which limits the existing applicability of solid cutters. The cost of combined cutters is 10–60% lower than that of solid cutters.

**Keywords:** composite end mills, tool material stresses, milling cutter failure minimization, milling cutter tooth, simulation, ANSYS

**For citation:** Mokritskii B.Ya., Vereshchagin V.Yu. Evaluation of the stressed state of cutting elements of coated end-milling hard-alloy combined cutters. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(4):421–434. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-421-434>

## ВВЕДЕНИЕ

Основной причиной скола хвостовика монолитных концевых твердосплавных фрез у места крепления их в патроне станка является [1, 2] превышение напряжений в материале твердого сплава тех величин напряжений, которые для данной марки твердого сплава являются предельно допустимыми. Отказ такой фрезы не позволяет использовать ее далее. В качестве частичной альтернативы монолитным фрезам разработаны [3–5] составные фрезы. У них режущая часть выпол-

нена из твердого сплава и состыкована с хвостовиком, выполненным из конструкционного материала. Общее представление о составных фрезах дают их фотографии, приведенные на рис. 1.

Будучи подверженным таким же воздействиям при фрезеровании, как и монолитные твердосплавные концевые фрезы, составные фрезы обеспечивают релаксацию напряжений в материале хвостовика фрезы, что исключает разрушение хвостовика.



Рис. 1. Примеры составных концевых фрез: а, б – примеры фрез с покрытием, кольцевая канавка указывает место стыкования режущей части с хвостовиком; с – пример работы фрезой на станке с числовым программным управлением

Fig. 1. Examples of composite end mills: a, b – examples of coated end mills, the annular groove indicates the joint of the cutting part and the shank; c – an example of milling cutter operation on a numerically controlled machine tool



Примеры обработки составной фрезой вертикальной стенки заготовки (инструментальная сталь) с высокой твердостью (HRC 65) и обработки верхней поверхности заготовки, выполненной из алюминиевого сплава, показаны на рис. 2.

На рис. 2 а показан случай, когда фреза эксплуатируется в чрезвычайно сложных условиях (ширина фрезерования равна длине 40 мм режущей части фрезы), на рис. 2 б, наоборот, показан случай щадящих условий эксплуатации (ширина фрезерования составляет 5 мм). В том и другом случае

подача на зуб равна 0,1 мм. Для рис. 2 а применено попутное фрезерование, на фото хорошо видны длинная стружка игольчатой формы и обработанная поверхность зеркального блеска на заготовке. Такой жесткий режим эксплуатации фрезы применен умышленно для провоцирования разрушения фрезы. Разрушения не произошло. После 40 мин работы в таких условиях режущие лезвия зубьев фрезы имели нормальный характер износа с незначительными местными выкрашиваниями.



а



б

**Рис. 2. Примеры фрезерования составными фрезами различных заготовок:**  
а – обработанная вертикальная поверхность заготовки и игольчатая стружка, образовавшаяся при фрезеровании и упавшая на зажимное приспособление; б – планирование горизонтальной поверхности заготовки, выполненной из алюминиевого сплава

**Fig. 2. Examples of milling various workpieces with composite cutters:**  
а – machined vertical surface of the workpiece and needle-shaped chip formed under milling and dropped on the clamping device;  
б – planing of the horizontal surface of the aluminum alloy workpiece

На рис. 2 б применялись поочередно попутное и встречное фрезерования (контурная обработка). Стружка имела элементную форму. Провоцировали залипание обрабатываемого материала в стружечных канавках фрезы, но этого не произошло, возможно, из-за того, что на станке применялась обильная подача смазывающе-охлаждающей жидкости в зону резания.

Вопросы сопоставления точности изготовления пазов в заготовках деталей при использовании монолитных и составных фрез рассмотрены в работах<sup>1</sup> [1, 2, 6]. Установлено, что есть условия, в которых составные фрезы не уступают (при диаметре фрезы 16 мм, длине 92 мм, режущей части, выполненной из твердого сплава ВК8 с хвостовиком, сделанным из конструкционной стали 40Х, либо из инструментальной стали марки Р18, либо из неинструментального твердого сплава марки Т30К4) монолитным фрезам или уступают (при длине фрезы от 92 мм до 180 мм) им незначительно (от 2 мкм до 5 мкм, что применимо для изделий общего машиностроения).

Изложенное выше указывает на необходимость исследования напряжений в режущей части составных фрез, по меньшей мере, для того чтобы выявить наиболее рациональные пути снижения напряжений, что еще более повысит конкурентоспособность составных фрез по отношению к монолитным фрезам. Одним из путей может быть применение покрытий на твердосплавном субстрате фрез. Это позволяет сформулировать следующую цель данной работы: исследовать величины напряжений в инструменталь-

ном материале составных концевых фрез для того, чтобы сравнить их с допустимыми напряжениями с позиций исключения разрушения фрез. Вопросы прочности инструментального материала в данной работе не рассматриваются.

## МЕТОДОЛОГИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Имитационное моделирование используем как метод исследования для выявления наиболее эффективных покрытий. Моделирование осуществляли в программных средах ANSYS и Deform.

Опыт (Д.А. Криворучко, Украина) проектирования инструмента в программной среде Deform показал перспективность такого проектирования. Там решается задача упрощенно, а именно – предполагаются известными закономерности протекания процессов на контактных поверхностях инструмента. Приближенно они описаны законами Аммонтона–Кулона и Зибеля. Этот подход для нас неприемлем, потому что проектируем новое покрытие, для которого эти закономерности неизвестны.

Поэтому используем другой методологический подход, его суть в следующем: чем меньше сила резания, тем более высокую работоспособность можно ожидать от такого инструмента и, в частности, от примененного на нем покрытия. Зная составляющие силы резания для моделирования разных покрытий, можно определить величины напряжений в инструментальном материале по зависимостям профессора С.И. Петрушина (Томск):

$$\sigma_{\max} = 2 \cdot \frac{P_y \cdot [\cos \gamma \cdot \sin(\gamma + \Theta) - \sin \alpha \cdot \cos(\alpha - \Theta) + \beta \cdot \cos \Theta] + P_z \cdot [\sin \alpha \cdot \sin(\alpha - \Theta) - \dots]}{r \cdot [(\sin^2 \alpha - \cos^2 \gamma) - \beta^2 + \dots \frac{\cos \gamma \cdot \cos(\gamma + \Theta - \beta \cdot \sin \Theta)}{+(\sin \alpha \cdot \cos \alpha - \sin \gamma \cdot \cos \gamma)^2}]}, \quad (1)$$

<sup>1</sup> Мокрицкий Б.Я., Верещагин В.Ю., Верещагина А.С., Саблин П.А. Металлорежущий инструмент. Компьютерное моделирование: учеб. пособ. Комсомольск-на-Амуре: Изд-во ФГБОУ ВО «КНАГТУ», 2017. 76 с.

где  $P_y$  и  $P_z$  – составляющие силы резания;  $\alpha$  – главный задний угол;  $\gamma$  – передний угол;  $r$  и  $\Theta$  – полярные координаты в главной секущей плоскости резания.

Полагали, что от силы резания перейти к величинам напряжений можно по зависимости (С.И. Петрушин) напряжений в инструментальном материале от составляющих силы резания. Под эквивалентными напряжениями в инструментальном материале понимали следующее:

$$\sigma_{эк} = \sqrt{\sigma_{z\max}^2 + \sigma_{y\max}^2}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{z\max}$  – расчетные максимальные напряжения по передней поверхности режущего клина;  $\sigma_{y\max}$  – расчетные максимальные напряжения по задней поверхности режущего клина.

Для определения составляющих сил резания провели экспериментальные исследования с использованием специализированного динамометра модели STD 201-2, сопрягаемого с ПЭВМ. Это обеспечило измерение и запись всех трех составляющих силы резания. Пример такой записи показан на рис. 3.

Анализ подобных записей составляющих силы резания показал существенное различие в значениях и изменении сил резания даже при незначительном изменении условий резания (обе стали 09Х17Н7Ю и 13Х15НАМ-3 являются труднообрабатываемыми и их физико-механические характеристики отличаются принципиально). Максимальные значения величин составляющих силы резания показаны для отдельных случаев в табл. 1, наблюдается существенное отличие (до 2 раз) величин для некоторых составляющих силы резания.

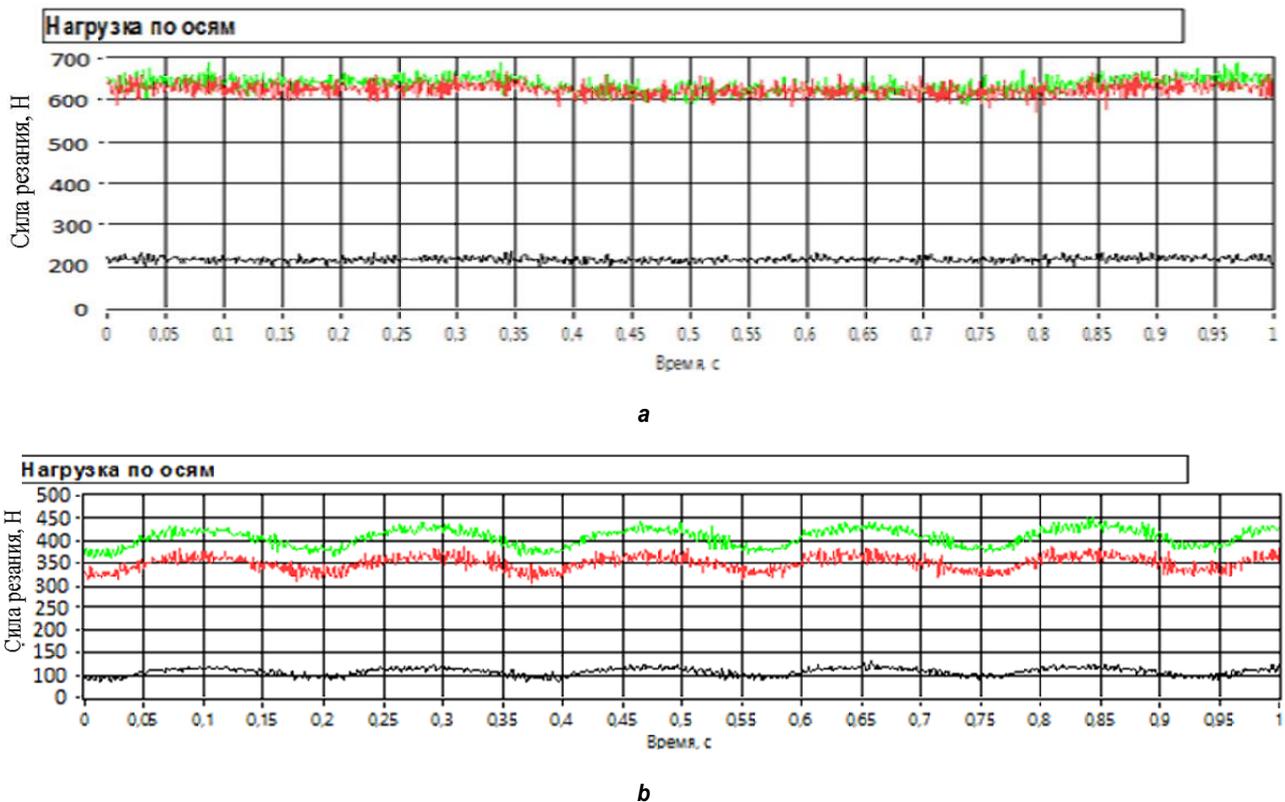


Рис. 3. Примеры записи составляющих сил резания (на графике верхняя линия отображает вертикальную составляющую силы резания, нижняя линия – продольную составляющую, средняя линия – радиальную составляющую): а – обрабатываемый материал 09Х17Н7Ю; б – обрабатываемый материал 13Х15НАМ-3

Fig. 3. Examples of recording cutting force components (the upper line on the graph shows the vertical component of the cutting force, the lower line indicates the longitudinal component, the middle line shows the radial component): а – machined material 09H17N7YU; б – machined material 13H15NAM-3

Таблица 1. Величины составляющих силы резания  
 Table 1. Values of the cutting force components

Составляющие силы резания	09X17H7Ю	13X15H AM-3
F <sub>x</sub> – продольная составляющая силы резания, Н	85,5	35,2
F <sub>y</sub> – радиальная составляющая силы резания, Н	305,2	310,1
F <sub>z</sub> – вертикальная составляющая силы резания, Н	362,5	191,4

Для использования составляющих силы резания в качестве входного параметра при использовании программной среды Deform разработана структурная модель в двух вариантах:

1) для решения прямой задачи, когда прогнозируемая архитектура покрытия является управляемым выходным параметром программной среды;

2) для решения обратной задачи, когда желаемая архитектура покрытия задается на входе в программную среду, а на выходе получают параметры, характеризующие сложнонапряженное состояние материала режущего инструмента.

Пример структурной модели имитационного проектирования для решения обратной задачи показан на рис. 4. По этой модели для имитационного исследования (поиска) инструментального материала с покрытием в качестве задаваемых условий (левая часть верха рис. 4) оказалось достаточно задать нормируемую (допустимую) величину износа  $h_1$  инструмента, максимальную (см. табл. 1) величину составляющей силы резания  $F_1$ , предельно допустимую температуру  $^{\circ}C_1$  в инструментальном материале и предпочтительный пример архитектуры покрытия. Понятие «архитектура покрытия» введено А.С. Верещакой, и в упрощенном виде подразумевает состав, структуру, конструкцию и технологию нанесения покрытия. Например, запись  $VK8 + TiC(2 \text{ мкм}) + (TiCr)N(3 \text{ мкм}) + Al_2O_3(2 \text{ мкм})$  следует понимать так: на твердосплавной субстрат марки  $VK8$  нанесено трехслойное покрытие, а именно – нижний (контактирующий с субстратом) слой толщиной 2 мкм карбида титана, следующий слой толщиной 3 мкм выполнен из нитрида титана с хромом, верхний слой толщиной 2 мкм вы-

полнен из алмазоподобного  $Al_2O_3$  покрытия. Нанесение каждого из указанных слоев требует своей технологии. Нами использованы только известные технологии.

В качестве выходных (управляемых) параметров для этого примера решения обратной задачи программная среда выводит сведения:

– прогнозируемая величина износа инструмента при заданном покрытии;

– прогнозируемая величина силы резания (не допускали превышение 3000 Н);

– прогнозируемая температура в инструментальном материале (не допускали превышение теплостойкости и термостойкости субстрата);

– напряжения в инструментальном материале (это и являлось искомым параметром имитационного исследования);

– дополнительные параметры (деформация инструмента и скорость деформации), характеризующие сложнонапряженное состояние инструментального материала.

Математический аппарат, заложенный в средах ANSYS и Deform, авторами не изменен. Для решения дифференциальных уравнений, положенных в основу в этих программных средах, авторы задавали указанные граничные условия и исходные данные.

Для решения задачи необходима расчетная схема для определения напряжений. Расчетная схема реализована для типовой трехзубой фрезы. Для проведения численного моделирования напряжений использован метод конечных элементов. Приняты следующие параметры фрезы: общая длина фрезы  $L = 90\text{--}220$  мм; длина режущей части  $l = 40$  мм; диаметр фрезы  $d = 12\text{--}16$  мм; материал режущей части фрезы – твердый сплав марки  $VK8$ ; материал хвостовика варьировали (рассмотрены материалы  $40X$ ,  $P18$ ,  $T30K4$ ).

В качестве посылы для построения расчетной схемы определения напряжений приняли следующее условие: составная фреза создана ради повышения ее эксплуатационных свойств в сравнении с монолитной фрезой, при этом точность изготовления деталей, обрабатываемых составной фрезой, должна обеспечивать ее применение в раз-

личных условиях машиностроительных предприятий. Это условие оговорено расчетной схемой отклонений обработанной поверхности детали от ее теоретического положения, рис. 5 а. Условия применения метода конечных элементов отражены на рис. 5 b и 5 с.

Схему, приведенную на рис. 5 а, принимали как схему образования отклонения **В** от вертикали положения стенки обрабатываемого паза при действии радиальной составляющей **Р1** силы резания: 1 – хвостовик фрезы; 3 – твердосплавная режущая часть фрезы; 3 – зажимное устройство станка; 4 – обработанная поверхность паза заготовки 5.

### ИНФОРМАЦИЯ О РОЛИ ПОКРЫТИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СОСТАВНЫХ ФРЕЗ

Профессор С.Н. Григорьев показал, что в зависимости от решаемых задач покрытие может выполнять функции:

- высокотвердого поверхностного слоя, препятствующего абразивному изнашиванию рабочих поверхностей инструмента в процессе резания;
- промежуточной среды, обладающей низким сродством с обрабатываемым материалом и препятствующей интенсивному схватыванию в условиях адгезионного изнашивания;

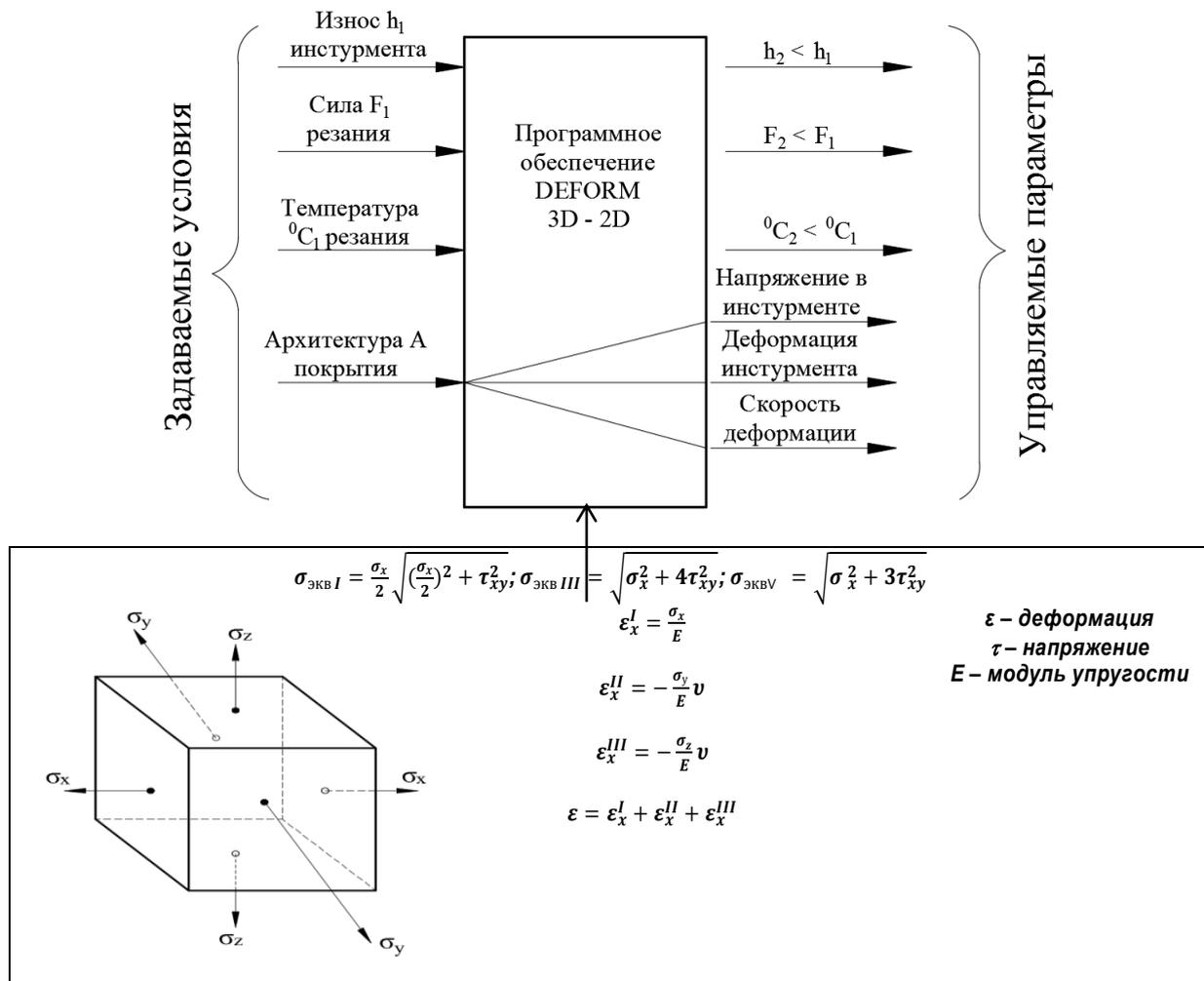


Рис. 4. Структурная модель разработки инструмента в программной среде Deform (используемые обозначения и их размерности общепринятые, а именно:  $\tau_{xy}^2$  – касательные напряжения;  $\sigma_x, \sigma_z, \sigma_y$  – нормальные напряжения;  $\epsilon$  – деформация относительная;  $E$  – модуль упругости

Fig. 4. Structural model of tool development in the Deform software environment (the symbols used and their dimensions are generally accepted, specifically:  $\tau_{xy}^2$  – tangential stresses;  $\sigma_x, \sigma_z, \sigma_y$  – normal stresses;  $\epsilon$  – relative strain;  $E$  – modulus of elasticity

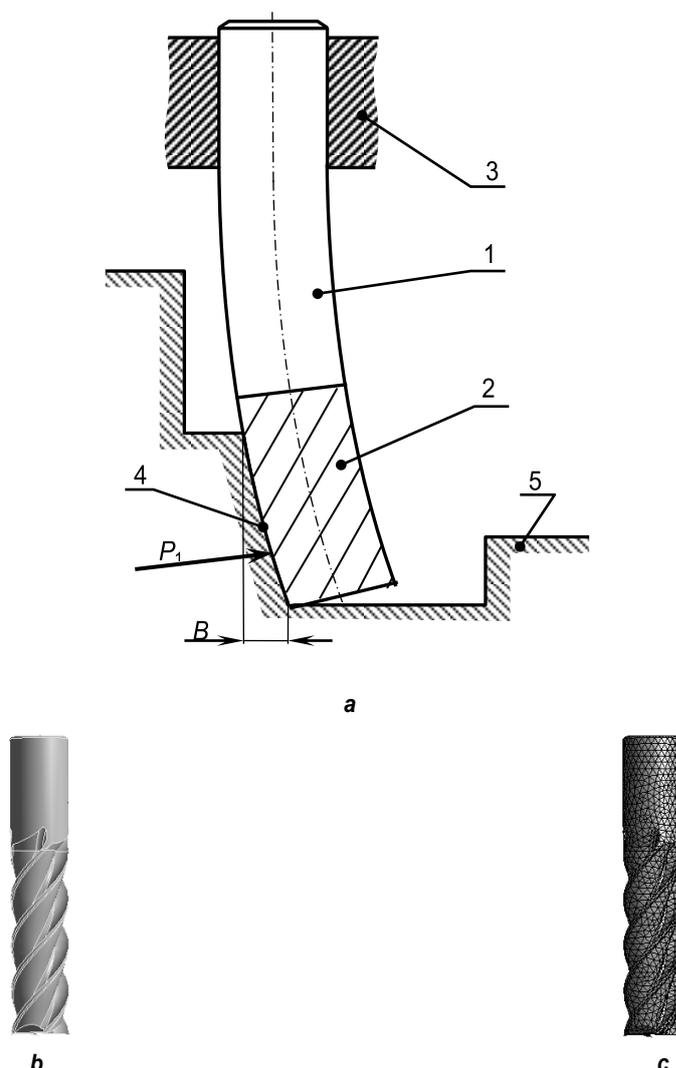


Рис. 5. Расчетная схема для определения напряжений: а – как схема деформации корпуса фрезы; б – физический вид модели фрезы; в – пример модели фрезы с разбиением на 100 тыс. конечных элементов  
 Fig. 5. Calculation model for stress determination: a – as a diagram of milling cutter body deformation; б – physical view of the milling cutter model; в – an example of a milling cutter model segmented into 100 000 finite elements

– антифрикционной твердой смазки, минимизирующей налипание обрабатываемого материала на инструмент в процессе резания;

– барьерного слоя, препятствующего отпуску поверхностного слоя инструмента в результате воздействия повышенных тепловых нагрузок;

– барьерного слоя, способного тормозить или останавливать распространение сетки усталостных трещин, приводящей к макробрашению рабочих кромок.

Общеизвестным фактом повышения физико-механических и эксплуатационных свойств металлорежущего инструмента является создание слоистых материалов – со-

единение высокопрочного субстрата с покрытием [7, 8]. Вместе с тем рабочий поверхностный слой с таким градиентом свойств в материале остается весьма чувствительным к поверхностным дефектам, возникающим при его изготовлении, особенно при шлифовании рабочих поверхностей. Кроме того, сохраняется основная особенность контактных процессов, возникающая при резании таким инструментом, связанная с высоким уровнем нормальных контактных напряжений и концентрацией тепловых напряжений вблизи режущей кромки, что является причиной ее деструкции. Специальные многослойно-композиционные покрытия позволяют «залечить» поверхностные дефекты, вносимые



заточкой, а также снизить уровень нормальных контактных и тепловых напряжений. Применение инструмента с наноструктурированным многослойно-композиционным покрытием позволяет повысить период стойкости в 2–3 раза по сравнению с инструментом без покрытия и в 1,5–2 раза по сравнению с инструментом с коммерческим покрытием Ti-TiN. Концептуальная роль покрытия состоит в двойственной функции, так как оно может не только сильно изменять поверхностные характеристики инструментального материала (фрикционные свойства, теплопроводность, склонность инструментального материала к физико-химическому взаимодействию с обрабатываемым материалом и т.д.), но и одновременно может влиять на контактные процессы. Многофункциональность промежуточной технологической среды, которой является покрытие, позволяет прогнозировать возможность направленного управления температурой резания [8–11].

Покрытия применяются и на монолитных фрезеях. Но в рамках данной работы не представляется возможным сравнить напряжения в монолитной фрезе с напряжениями в составной фрезе. Объясняется это тем, что зарубежные производители монолитных фрез засекречивают архитектуру покрытия и сам твердый сплав. В силу этого нет возможности сравнивать взятое нами покрытие и инструментальный твердый сплав ВК8 с неизвестным зарубежным покрытием и субстратом. Отечественные монолитные концевые фрезы доброкачественно выпускает только фирма «СКИФ-М» (г. Белгород) и ее филиал «СКИФ ДВ М» (г. Комсомольск-на-Амуре). Архитектура и технология нанесения покрытия засекречены.

## ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Путем имитационного моделирования рассчитаны (и построены изолинии) напряжения в режущем лезвии зуба фрезы при разных условиях эксплуатации. Один из примеров показан на рис. 6.

Цифры на изолиниях указывают величину (МПа) напряжений вдоль данной изолинии напряжений.

Анализ рис. 6 показывает, насколько сложный характер распределения напряжений прогнозируется. Применение покрытий заметно снижает величины напряжений, но характер их распределения по-прежнему остается сложным. Более удобно для анализа изменений напряжений это показано в табл. 2. Напряжения  $\sigma_z$  на задней поверхности зуба фрезы тоже имеют сложный характер распределения, но он значительно проще, чем на передней.

Величины прогнозируемых напряжений в общем виде показаны в табл. 2. Их можно сравнить с предельно допустимыми напряжениями для сплава ВК8 и оценить условную прочность инструмента с покрытием и без покрытия. Однако необходимо отметить, что это приближенная оценка. Дело в том, что сплав ВК8, как правило, имеет каркасную структуру, состоящую из твердой фазы (зерна карбида вольфрама), мягкой фазы (кобальт) и контактов зерен твердой фазы между собой. Каждый из этих звеньев структуры способен выдерживать нагрузки, свойственные им. В результате внешних и внутренних нагрузок каждое звено структуры подвержено своим максимальным напряжениям (принято называть максимальной интенсивностью напряжений). Так, напряжения в зернах карбида вольфрама недопустимы (при растяжении) выше 9,1 ГПа. Максимальная интенсивность напряжений в кобальте составляет 4,5 ГПа. Из этого следует, что первоначально при предельном нагружении начнет разрушаться кобальт. Основными концентраторами напряжений являются контакты между зернами карбида вольфрама. В них максимальная интенсивность напряжений достигает 9,8 ГПа.

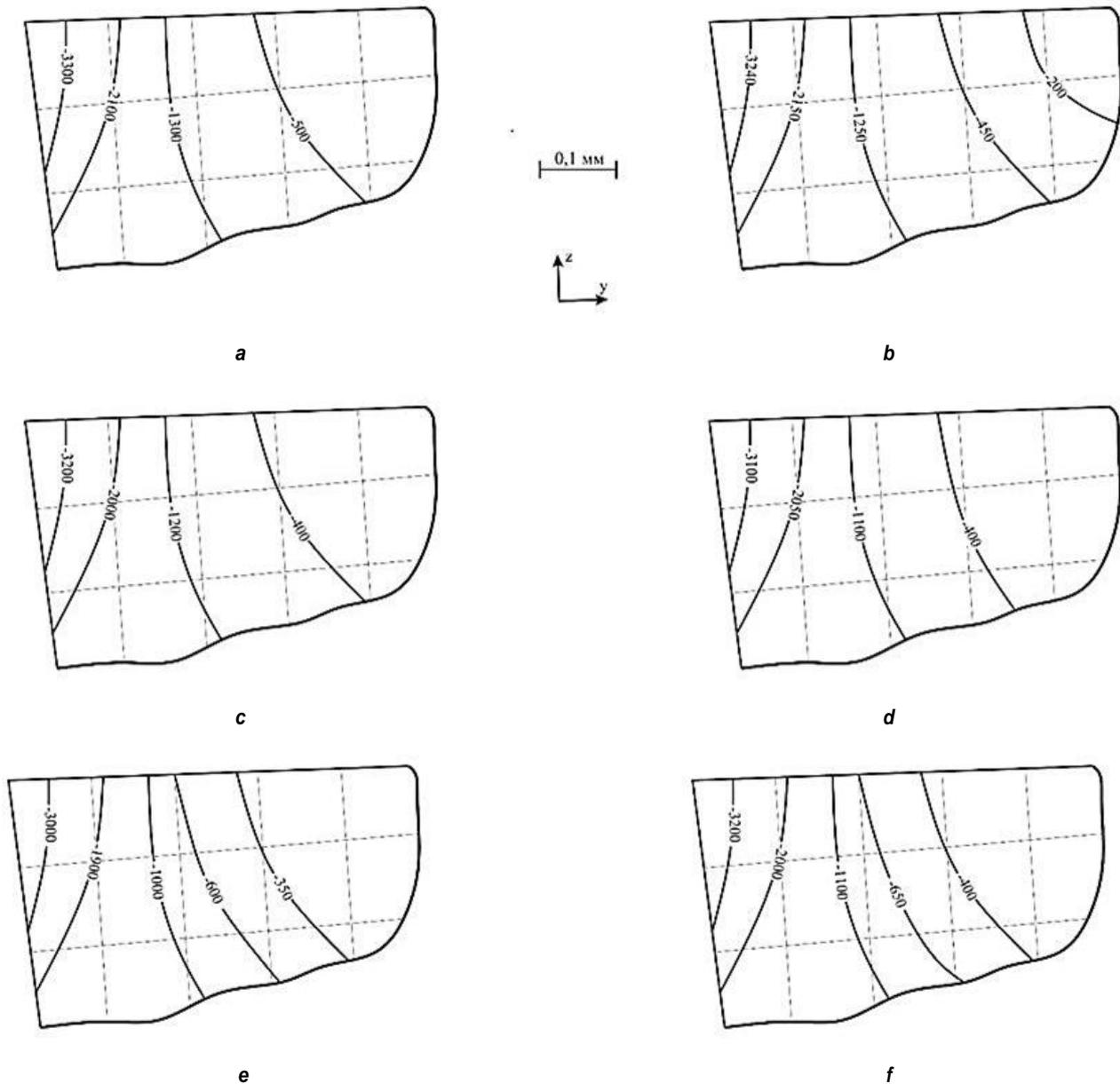
Сопоставление прогнозных величин напряжений с предельно допустимыми показано в табл. 3.

Из данных табл. 3 следует, что прогнозируемые величины напряжений на несколько порядков меньше величин предельно допустимых напряжений. Это относится к напряжениям, действующим на передней поверхности и на задней поверхности зубьев фрезы. Превышение также ощутимо в случае применения покрытий.

**Таблица 2.** Величины напряжений (МПа), действующих на передней поверхности  $\sigma_y$  и на задней поверхности  $\sigma_z$  зуба фрезы (для подачи 0,1 мм/зуб, скорости резания 70 м/мин при попутном фрезеровании стали 12Х18Н10Т)

**Table 2.** Values of stresses (MPa) acting on the front surface  $\sigma_y$  and on the back surface  $\sigma_z$  of the cutter tooth (for 0.1 mm/tooth feed, 70 m/min cutting speed under climb milling of 12H18N10T steel)

Вид напряжений, $\sigma$	Поверхность инструмента	Материал режущей части фрезы	№	Расстояние от вершины режущей кромки, мм								
				0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
1	2	3		4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\sigma_y$	передняя	ВК8 (составная и монокристаллическая фрезы)	1	3300	3300	3300	3300	2600	1000	480	–	–
		Составная фреза ВК8 + TiN (5 мкм)*	2	3240	3240	3240	3240	2000	900	400	–	–
		Составная фреза ВК8 + ВК8 + (TiAl)N (5 мкм) и т.д. – вокруг «+»...	3	3210	3210	3210	3000	1800	830	320	–	–
		ВК8 + Ti (0,1 мкм) + TiN (2 мкм) + (TiAlCr)N (5 мкм)	4	2860	2860	2860	2750	1740	800	–	–	–
	задняя	ВК8 (составная и монокристаллическая фрезы)	5	3300	3300	3300	3300	3300	3000	2100	–	–
		Составная фреза ВК8 + TiN (5 мкм)*	6	3240	3240	3240	3240	3240	3000	2100	–	–
		Составная фреза ВК8 + ВК8 + (TiAl) N (5 мкм)	7	3210	3210	3120	3000	2840	2800	–	–	–
		ВК8 + Ti (0,1 мкм) + TiN (2 мкм) + (TiAlCr)N (5 мкм)	8	2860	2860	2800	2750	2680	–	–	–	–
$\sigma_z$	передняя	ВК8 (составная и монокристаллическая фрезы)	9	980	870	800	780	700	930	970	700	–
		Составная фреза ВК8 + TiN (5 мкм)*	10	970	830	790	770	750	800	900	900	800
		Составная фреза ВК8 + (TiAl)N (5 мкм)	11	970	830	710	700	670	650	610	–	–
		ВК8 + Ti (0,1 мкм) + TiN (2 мкм) + (TiAlCr)N (5 мкм)	12	950	850	700	680	650	600	–	–	–
	задняя	ВК8 (составная и монокристаллическая фрезы)	13	980	920	870	820	780	250	–	–	–
		Составная фреза ВК8 + TiN (5 мкм)*	14	970	910	830	780	770	300	–	–	–
		Составная фреза ВК8 + (TiAl)N (5 мкм)	15	970	910	900	840	800	760	720	–	–
		ВК8 + Ti (0,1 мкм) + TiN (2 мкм) + (TiAlCr)N (5 мкм)	16	920	870	830	800	740	700	680	–	–



**Рис. 6.** Характер изменения напряжений  $\sigma_y$  по передней поверхности режущего клина зуба фрезы твердосплавного инструмента марки ВК8 при обработке материала 12Х18Н10Т: а – без покрытия; б – с однослойным покрытием TiN толщиной 5 мкм; с – с покрытием (TiAl)N толщиной 5 мкм; е – с трехслойным покрытием Ti + TiN + (TiAl)N общей толщиной 7 мкм; ф – с трехслойным покрытием Ti + TiN + (TiAlCr)N общей толщиной 10 мкм; г – с трехслойным покрытием Ti + TiN + (TiAlCr)N общей толщиной 5 мкм  
**Fig. 6.** Variation nature of stresses  $\sigma_y$  on the front surface of the tooth cutting wedge of the VK8 carbide tool cutter when processing the 12H18N10T material: а – uncoated; б – with a single-layer TiN coating of 5  $\mu\text{m}$  thickness; с – with (TiAl)N coating of 5  $\mu\text{m}$  thickness; е – with a three-layer Ti + TiN + (TiAl)N coating with the total thickness of 7  $\mu\text{m}$ ; ф – with a three-layer Ti + TiN + (TiAlCr)N coating with the total thickness of 10  $\mu\text{m}$ ; г – with a three-layer Ti + TiN + (TiAlCr)N coating with a total thickness of 5  $\mu\text{m}$

Анализ данных, приведенных в табл. 2 и 3, позволяет сделать следующие выводы:

Наибольшие значения напряжений прогнозируются для монолитной фрезы без покрытия и для режущей части составной фрезы. Эти напряжения не являются критическими для разрушения фрезы. Характер

напряжений на передней поверхности волнообразный. Это согласуется с результатами экспериментальных исследований величин напряжений ряда исследователей [7–13].

Применение покрытий на составных фрезах снижает величины напряжений. Величина этого снижения от 1,1 раза (строка 3,

**Таблица 3.** Сравнение прогнозируемых величин напряжений, действующих на передней поверхности  $\sigma_y$  и на задней поверхности  $\sigma_z$  зуба фрезы с предельно допустимыми величинами напряжений

**Table 3.** Comparison of the predicted values of stresses acting on the front surface  $\sigma_y$  and on the back surface  $\sigma_z$  of the cutter tooth with the maximum permissible values of stresses

Нижний индекс	Прогнозируемые* величины напряжений в инструментальном материале, МПа				Предельно допустимые значения напряжений на элементах структуры твердого сплава ВК8, ГПа		
	ВК8	ВК8 + TiN (5 мкм)	ВК8 + ВК8 + (TiAl)N (5 мкм)	ВК8 + Ti (0,1 мкм) + TiN (2 мкм) + (TiAlCr)N (5 мкм)	карбид вольфрама	кобальт	границы контакта зерен карбида вольфрама
y	3300	3240	3210	2860	9,1	4,5	9,8
z	980	970	970	950			

\*Для подачи 0,1 мм/зуб, скорости резания 70 м/мин при попутном фрезеровании стали 12Х18Н10Т.

столбец 4) до 10,0 раза (строки 7 и 8, столбец 4). Величина снижения неоднозначна для разных покрытий, согласуется с данными работ [14–20]. Длина контакта в целом уменьшается.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведены результаты имитационного прогнозирования напряжений в инструментальном материале зубьев составной концевой твердосплавной фрезы с применением различных покрытий и без них. Полученные результаты подтверждают достижение поставленной цели исследования. Уста-

новлено, что в режущей части составной фрезы они на несколько порядков меньше критических величин, что предполагает отсутствие условий для отказа фрезы. Предложенные материалы хвостовиков составных фрез позволяют релаксировать напряжения без разрушения хвостовиков. Этим подтверждена идеология разработки составных фрез. Используемые модель и структурная схема проектирования фрез позволяют проектировать эффективные покрытия для фрез, что еще больше поднимает конкурентоспособность составных фрез монолитным фрезам.

## Список литературы

1. Мокрицкий Б.Я., Верещагина А.С., Верещагин В.Ю. Моделирование напряжений и деформации твердосплавных концевых фрез // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного университета. Серия: Науки о природе и технике. 2016. № 1. С. 82–87.
2. Верещагин В.Ю., Мокрицкий Б.Я., Верещагина А.С. Прогнозное моделирование архитектуры покрытия на металлорежущем инструменте // Упрочняющие технологии и покрытия. 2018. Т. 14. № 4. С. 147–156.
3. Мокрицкий Б.Я., Пустовалов Д.А., Саблин П.А., Коннова Г.В., Кравченко Е.Г. Параметрические исследования составных твердосплавных концевых фрез // Металлообработка. 2015. № 6. С. 23–29.
4. Подойницын М.А., Мокрицкий Б.Я., Морозова А.В., Мокрицкая Е.Б. Совершенствование твердосплавной концевой составной фрезы // Вестник Брянского государственного технического университета. 2017. № 1. С. 50–57. <https://doi.org/10.12737/24892>
5. Мокрицкий Б.Я., Пустовалов Д.А., Кваша В.Ю., Артёменко А.А., Кравченко Е.Г. Совершенствование твердосплавных концевых фрез // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2016. № 1. С. 49–54.
6. Totten G.E., Xie Lin, Funatani K. Modeling and Simulation for Material Selection and Mechanical Design. New York, 2004. 880 p.
7. Vereschaka A., Oganyan M., Bublikov Yu., Sitnikov N., Deev K., Pupchin V. Increase in efficiency of end milling of titanium alloys due to tools with multilayered composite nano-structured Zr-ZrN-(Zr,Al)N and Zr-ZrN-(Zr,Cr,Al)N coatings // Coating. 2018. Vol. 8. Iss. 11. P. 395. <https://doi.org/10.3390/coatings8110395>
8. Vereschaka A.A., Vereshchagin V.Y., Sitnikov N.N., Oganyan G.V., Aksenenko A.Yu. Study of mechanism of failure and wear of multi-layered Ti composite nano-structured coating based on system Ti-TiN-(ZrNbTi)N deposited on carbide substrates // Journal of Nano Research. 2017. Vol. 45. P. 110–123. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JNanoR.45.110>
9. Özel T., Altan T. Determination of workpiece flow stress and friction at the chip-tool contact for high-speed cutting // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2000. Vol. 40. Iss. 1. P. 133–152. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(99\)00051-6](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(99)00051-6)
10. Fox-Rabinovich G.S., Yamamoto K., Veldhuis S.C., Kovalev A.I., Dosbaeva G.K. Tribological adaptability of TiAlCrN PVD coatings under high performance dry machining conditions // Surface and Coatings Technology. 2005. Vol. 200. Iss. 5–6. P. 1804–1813. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.08.057>



11. Erkens G., Cremer R., Hamoudi T., Bouzakis K.-D., Mirisidiset I., Hadjiyiannis S., et al. Properties and performance of high aluminum containing (Ti, Al)N based super-nitride coatings in innovative cutting applications // *Surface and Coatings Technology*. 2004. Vol. 177-178. P. 727–734. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.08.013>
12. Zhang Hua, Deng Zhaohui, Fu Yahui, Lv Lishu, Yan Can. A process parameters optimization method of multi-pass dry milling for high efficiency, low energy and low carbon emissions // *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 148. P. 174–184. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.077>
13. Huang Weijian, Li Xi, Wang Boxing, Chen Jihong, Zhou Ji. An analytical index relating cutting force to axial depth of cut for cylindrical end mills // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2016. Vol. 111. P. 63–67. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2016.10.003>
14. Venu Gopala Rao G., Mahajan P., Bhatnagar N. Micro-mechanical modeling of machining of FRP composites – Cutting force analysis // *Composites Science and Technology*. 2007. Vol. 67. Iss. 3-4. P. 579–593. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.08.010>
15. Vasilchenko S., Cherny S., Khruikov V. Improving dynamic and energy characteristics of electromechanical systems with single-phase rectifiers // *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. 2020. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM48468.2020.9111902>
16. Shet Chandrakanth, Deng Xiaomin. Finite element analysis of the orthogonal metal cutting process // *Journal of Materials Processing Technology*. 2000. Vol. 105. Iss. 1-2. P. 95–109. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00595-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00595-1)
17. Mokritskii B.Ya., Pustovalov D.A., Vereschaka A.A., Vereschaka A.S., Verhoturov A.D. Evaluation of efficiency of edge tool on the basis of new technique for analyzing parameters of scribing mark // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 719-720. P. 96–101. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.719-720.96>
18. Zaychenko I.V., Bazheryanu V.V., Gordin S.A. Improving the energy efficiency of autoclave equipment by optimizing the technology of manufacturing parts from polymer composite materials // *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020. Vol. 753. Ch. 2. P. 032069. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/753/3/032069>
19. Shatla M., Kerk C., Altan T. Process modeling in machining. Part I: determination of flow stress data // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2001. Vol. 41. Iss. 10. P. 1511–1534. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(01\)00016-5](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(01)00016-5)
20. Dobryshkin A.Y., Sysoev O.E., Nyein Sitt Naing. Modeling of the opened shell forced vibrations with a small associated mass, with hinged operation by the Pade' approximation method // *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020. Vol. 753. Ch. 2. P. 032024. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/753/3/032024>

## References

1. Mokritskii B.Ya., Vereshchagina AS, Vereshchagin VY. Modeling stress and deformation of solid carbide end mills. *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Nauki o prirode i tekhnike = Scholarly Notes of Komsomolsk-na-Amure State Technical University. Series: Engineering and Natural Sciences*. 2016;1:82–87. (In Russ.)
2. Vereshchagin VY, Mokritskii B.Ya., Vereshchagina AS. Predictive modeling of architecture of coating on metal-cutting tool. *Uprochniaucchie tekhnologii i pokritia*. 2018;14(4):147–156. (In Russ.)
3. Mokritskii B.Ya., Pustovalov DA, Sablin PA, Konnova GV, Kravchenko EG. Parametric studies of composite carbide end mills. *Metallorabotka*. 2015;6:23–29. (In Russ.)
4. Podoinitsyn MA, Mokritsky B.Ya., Morozova AV, Mokritskaya EB. Improvement of hard-alloy end compound miller. *Vestnik Brainskogo tekhnicheskogo universiteta*. 2017;1:50–57. (In Russ.) <https://doi.org/10.12737/24892>
5. Mokritsky B.Ya., Pustovalov DA, Kvasha VYu, Artemenko AV, Kravchenko EG. Improvement of hard-alloy end milling cutters. *Problemi machinostroenia i avtomatizazii = Engineering and Automation Problems*. 2016;1:49–54. (In Russ.)
6. Totten GE, Xie Lin, Funatani K. *Modeling and simulation for material selection and mechanical design*. New York; 2004, 880 p. <https://doi.org/10.1201/9780203913451>
7. Vereschaka A, Oganyan M, Bublikov Yu, Sitnikov N, Deev K, Pupchin V. Increase in efficiency of end milling of titanium alloys due to tools with multilayered composite nano-structured Zr-ZrN-(Zr,Al)N and Zr-ZrN-(Zr,Cr,Al)N coatings. *Coating*. 2018;8(11):395. <https://doi.org/10.3390/coatings8110395>
8. Vereschaka AA, Vereshchagin VY, Sitnikov NN, Oganyan GV, Aksenenko AYu. Study of mechanism of failure and wear of multi-layered composite nano-structured coating based on system Ti-TiN-(ZrNbTi)N deposited on carbide substrates. *Journal of Nano Research*. 2017;45:110–123. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JNanoR.45.110>
9. Özel T, Altan T. Determination of workpiece flow stress and friction at the chip-tool contact for high-speed cutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2000;40(1):133–152. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(99\)00051-6](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(99)00051-6)
10. Fox-Rabinovich GS, Yamamoto K, Veldhuis SC, Kovalev AI, Dosbaeva GK. Tribological adaptability of TiAlCrN PVD coatings under high performance dry machining conditions. *Surface and Coatings Technology*. 2005;200(5–6):1804–1813. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.08.057>
11. Erkens G, Cremer R, Hamoudi T, Bouzakis K.-D., Mirisidiset I, Hadjiyiannis S, et al. Properties and performance of high aluminum containing (Ti, Al)N based super-nitride coatings in innovative cutting applications. *Surface and Coatings Technology*. 2004;177-178:727–734.

<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.08.013>  
12. Zhang Hua, Deng Zhaohui, Fu Yahui, Lv Lishu, Yan Can. A process parameters optimization method of multi-pass dry milling for high efficiency, low energy and low carbon emissions. *Journal of Cleaner Production*. 2017;148:174–184.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.077>  
13. Huang Weijian, Li Xi, Wang Boxing, Chen Jihong, Zhou Ji. An analytical index relating cutting force to axial depth of cut for cylindrical end mills. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2016;111:63–67.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2016.10.003>  
14. Venu Gopala Rao G, Mahajan P, Bhatnagar N. Micro-mechanical modeling of machining of FRP composites – cutting force analysis. *Composites Science and Technology*. 2007;67(3-4):579–593.  
<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.08.010>  
15. Vasilchenko S, Cherny S, Khrulkov V. Improving dynamic and energy characteristics of electromechanical systems with single-phase rectifiers. In: *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. 2020.  
<https://doi.org/10.1109/ICIEAM48468.2020.9111902>  
16. Shet Chandrakanth, Deng Xiaomin. Finite element analysis of the orthogonal metal cutting process. *Journal*

*of Materials Processing Technology*. 2000;105(1-2):95–109. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00595-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00595-1)  
17. Mokritskii BYa, Pustovalov DA, Vereschaka AA, Vereschaka AS, Verhoturov AD. Evaluation of efficiency of edge tool on the basis of new technique for analyzing parameters of scribing mark // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 719-720. P. 96–101.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.719-720.96>  
18. Zaychenko IV, Bazheryanu VV, Gordin SA. Improving the energy efficiency of autoclave equipment by optimizing the technology of manufacturing parts from polymer composite materials. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020;753(2):032069.  
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/753/3/032069>  
19. Shatla M, Kerk C, Altan T. Process modeling in machining. Part I: determination of flow stress data. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2001;41(10):1511–1534. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(01\)00016-5](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(01)00016-5)  
20. Dobryshkin AY, Sysoev OE, Nyein Sitt Naing. Modeling of the opened shell forced vibrations with a small associated mass, with hinged operation by the Pade' approximation method. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020;753(2):032024.  
<https://doi.org/10.1088/1757-899x/753/3/032024>

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Мокрицкий Борис Яковлевич**,  
доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры технологии машиностроения,  
Комсомольский-на-Амуре государственный  
университет,  
681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27,  
Россия;  
✉ e-mail: boris@knastu.ru

**Верещагин Владислав Юрьевич**,  
доцент кафедры информационных систем  
и цифрового образования,  
Новосибирский государственный педагогический  
университет,  
630126, г. Новосибирск, ул. Вилюйская, 28, Россия;  
e-mail: klirickv@yandex.ru

#### Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

#### Информация о статье

Статья поступила в редакцию 30.03.2020; одобрена после рецензирования 19.07.2021; принята к публикации 20.08.2021.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Boris Ya. Mokritskii**,  
Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Professor of the Department of Mechanical  
Engineering Technology,  
Komsomolsk-na-Amure State University,  
27, Lenin Ave., Komsomolsk-na-Amure 681013, Russia;  
✉ e-mail: boris@knastu.ru

**Vladislav Yu. Vereshchagin**,  
Associate Professor of the Department of  
Information Systems and Digital Education,  
Novosibirsk State Pedagogical University,  
28, Vilyuyskaya St., Novosibirsk 630126, Russia;  
e-mail: klirickv@yandex.ru

#### Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

#### Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

#### Information about the article

The article was submitted 30.03.2020; approved after reviewing 19.07.2021; accepted for publication 20.08.2021.



## Исследование возможности применения фотоэлектрических солнечных установок внутри купольного строения в условиях Севера

© Н.П. Местников<sup>\*,\*\*</sup>, П.Ф. Васильев<sup>\*,\*\*</sup>, Г.И. Давыдов<sup>\*\*</sup>,  
А.М. Хоютанов<sup>\*\*</sup>, А.М.-Н. Альзаккар<sup>\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия

<sup>\*\*</sup>Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, г. Якутск, Россия

<sup>\*\*\*</sup>Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

**Резюме:** Цель – исследование возможности размещения фотоэлектрических солнечных установок внутри купольного строения, находящегося на базе испытательного полигона Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова в центральной части Республики Саха (Якутия), с сохранением значительной доли генерации мощности и определение оптимального расстояния между фотоэлектрической солнечной установкой и прозрачными стенами данного купольного строения. В исследовании применялись методики и способы определения снижения электроэнергетической эффективности фотоэлектрических солнечных установок при изменении среды размещения, было выявлено оптимальное расстояние размещения установки внутри прозрачных купольных строений с приведением графических интерпретаций и градиентов. Авторами статьи получены контрольные параметры снижения величины светового потока, мощности генерации фотоэлектрической солнечной установки при изменении среды эксплуатации и оптимальное расстояние размещения фотоэлектрической солнечной установки внутри купольного строения в целях значительного снижения поверхностного загрязнения фотоэлектрической солнечной установки. На основе проведенных исследований определено, что в случае эксплуатации фотоэлектрических солнечных установок внутри прозрачного купольного строения мощность генерации падает на 25,61% в сравнении с фактическими данными генерации на открытом пространстве. Определено, что с увеличением расстояния между прозрачными стенами строения и установкой мощность генерации падает на ~ 23,01%, светового потока – на 5,224% на расстоянии до 1,5 м. Кроме того, данный способ применения фотоэлектрических солнечных установок микромощности внутри купольного строения может применяться в рамках строительства и проектирования системы «Умный дом» и объектов автономной генерации электроэнергии и мощности на территории северных регионов России.

**Ключевые слова:** солнечная панель малой мощности, поверхностное загрязнение, мониторинг работы, купольное строение, здание, EPEVER

**Благодарности:** Результаты исследований, описанные в настоящей статье, подготовлены в рамках выполнения государственного задания по проекту «Исследования путей повышения эксплуатационной надежности и эффективности интеллектуальных электроэнергетических систем в условиях Севера и Арктики» ФНИ в РФ на 2021–2030 гг. по приоритетному направлению «Основы эффективного развития и функционирования энергетических систем на новой технологической основе в условиях глобализации, включая проблемы энергобезопасности, энергосбережения и рационального освоения природных энергоресурсов», и при финансовой поддержке публикационной активности СВФУ в рамках научного проекта № 20-11-00001.

**Для цитирования:** Местников Н.П., Васильев П.Ф., Давыдов Г.И., Хоютанов А.М., Альзаккар А.М.-Н. Исследование возможности применения фотоэлектрических солнечных установок внутри купольного строения в условиях Севера. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 4. С. 435–449. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-435-449>

## Applicability of photoelectrical solar units inside domical structures in northern conditions

Nikolay P. Mestnikov<sup>\*\*\*</sup>, Pavel F. Vasilyev<sup>\*\*\*</sup>, Gennadiy I. Davydov<sup>\*\*</sup>,  
Aleksandr M. Khoiyutanov<sup>\*\*</sup>, Ahmad M.-N. Alzakkar<sup>\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup> M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

<sup>\*\*</sup> Institute of Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch  
of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia

<sup>\*\*\*</sup> Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

**Abstract:** The possibility of installing photoelectrical solar units inside domical structures with the maintenance of their power generation level was investigated; an optimal distance between a photoelectrical solar unit and the transparent walls of the respective domical structure was determined. The experiments were carried out at the North-Eastern Federal University in the central part of the Republic of Sakha (Yakutia) by determining reduction in the electrical energy efficiency of photoelectrical solar units when changing their location. An optimal distance for installing such units within transparent domical structures was found based on graphical interpretations and gradients. The authors obtained reference parameters for light flux reduction, the generation power of a photoelectrical solar unit when changing the operation medium, and the optimal distance of a photoelectrical solar unit inside a domical structure for reducing the surface contamination of the unit. It was found that, when photoelectrical solar units are operated within a transparent domical structure, the power generation falls by 25.61% as compared to actual results in open space. It was found that an increase in the distance between the transparent walls of the domical structure and the unit led to a decrease in the power generation by ~23.01% and the light flux power by 5.224% at 1.5 m. This method of installing photoelectrical solar units can be used in the construction and designing of smart home systems and autonomous power generation facilities in northern regions of Russia.

**Keywords:** low power solar panel, surface pollution, operation monitoring, dome structure, building, EPEVER

**Acknowledgements:** The research results described in the article were prepared as a part of fulfilling the state task on the project "Research into the methods to improve the operational reliability and efficiency of intelligent electric power systems in the North and the Arctic" of the Fundamental Scientific Researches of the Russian Federation for the period from 2021 to 2030 in the priority direction "Fundamentals of the effective development and operation of energy systems on a new technological basis in globalization conditions including the problems of energy security, energy saving and rational development of natural energy resources". The publications of the M.K. Ammosov North-Eastern Federal University are funded in the framework of the scientific project no. 20-11-00001.

**For citation:** Mestnikov NP, Vasilyev PF, Davydov GI, Khoiyutanov AM, Alzakkar AM-N. Applicability of photoelectrical solar units inside domical structures in northern conditions. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(4):435–449. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-435-449>

### ВВЕДЕНИЕ

В статье приведены результаты исследования о возможности эксплуатации фотоэлектрических солнечных установок внутри энергоэффективных купольных строений в условиях холодного климата Якутии посредством размещения фотоэлектрических установок внутри прозрачного строения купольной формы в целях снижения поверхностного загрязнения фотоэлектрической панели.

В настоящий момент научными сотрудниками Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова (СВФУ) и Институтом физико-технических проблем Севера СО РАН активно изучается возможность

внедрения энергоэффективных купольных строений в населенные пункты Республики Саха (Якутия). В этой связи зимой 2019 г. ООО ГК «Синет» совместно с СВФУ им. М.К. Аммосова реализован пилотный проект строительства купольного здания, на рис. 1 представлен общий вид данного объекта [1].

На рис. 1 видно, что боковые стороны купольного строения выполнены из прозрачного теплоизоляционного и морозостойкого материала. Данный объект размещен на территории городского округа (ГО) «город Якутск» по следующим географическим координатам: 62.30236386052619 "N 129.91516946160922 "E.

Электроснабжение вышеуказанного объек-



Рис. 1. Внешний вид купольного здания  
Fig. 1. Image of a dome building

та производится посредством эксплуатации дизель-генераторной установки малой мощности с определенным потреблением дизельного топлива и масла. Таким образом, внедрение возобновляемых источников энергии в электропитании вышеуказанного объекта является актуальной задачей, требующей проведения определенных исследований.

Кроме того, необходимо отметить, что вследствие поверхностного загрязнения фотоэлектрической установки (солнечной панели) фиксируется значительное снижение генерации мощности, вплоть до 44,15% [2]. Таким образом, поиск и исследование технических решений снижения степени поверхностного загрязнения фотоэлектрической установки являются одними из основных задач исследования.

Также, в соответствии с исследованиями Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, определено, что степень пылевого загрязнения зависит от следующих причин, а именно: типа почвы и постоянного строительства городской или сельской инфраструктуры [3]. Необходимо отметить, что на территории ГО «город Якутск» уровень загрязнения атмосферного воздуха в марте–апреле оценивается как повышенный. Повышенная степень определена концентрациями взвешенных веществ (пыли) и фенола. Максимальная повторяемость пыли составила

6,6%, наиболее выраженная разовая концентрация (стандартный индекс) по сравнению с предельно допустимой максимальной разовой концентрацией достигала значения выше, чем в 1,3 раза, а среднемесячный показатель имел значение, превышающее в 1,6 раза значение предельно допустимой среднемесячной концентрации.

Повторяемость превышений ПДК по фенолу равнялась 1,9%, стандартный индекс составил 1,2 [4]. На рис. 2 представлен график состава загрязнения воздуха на территории г. Якутск, окрашенная рыжим цветом.

Таким образом, в г. Якутск наблюдается значительное загрязнение воздуха взвешенными веществами (параметр «ВВ», а именно: пыль, сажа, дым, сульфаты и т.д.), что также является одним из главных катализаторов повышения степени запыленности города.

На основании вышеизложенных материалов необходимо отметить, что в случае эксплуатации фотоэлектрических установок на территории ГО «город Якутск» высока вероятность значительного поверхностного загрязнения панелей, что приведет к значительному снижению мощности генерации, а, следовательно, поиск методов и способов снижения степени загрязнения поверхности фотоэлектрической солнечной установки является одной из приоритетных и актуальных задач.

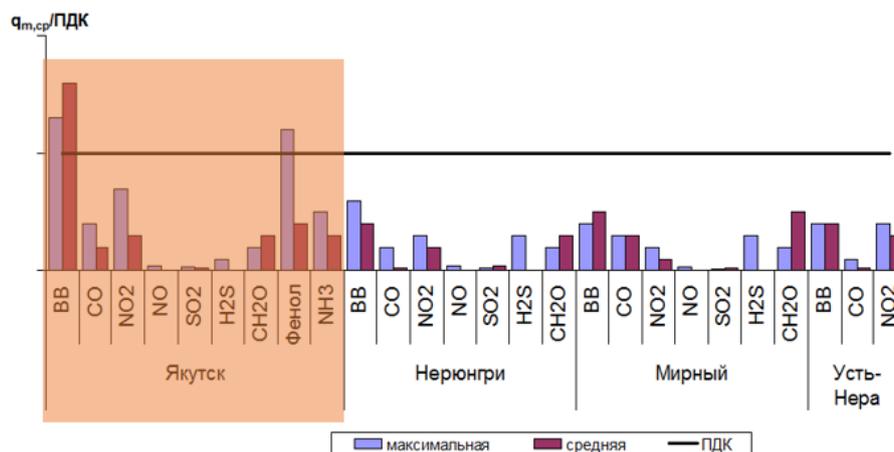


Рис. 2. График состава загрязнения воздуха в населенных пунктах Якутии  
 Fig. 2. Graph of the air pollution composition in the settlements of Yakutia

## ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках выстраивания цели исследования проведен литературный обзор, где авторами рассмотрены различные научно-технические статьи по направлению «солнечная энергетика».

В настоящий момент существуют различные технические решения по снижению пылевого загрязнения фотоэлектрических установок в виде ее очистки, а именно – необходимо отметить результаты работ авторов, опубликованные в различных научных статьях, где приведены данные исследований, в том числе по влиянию пыли на функционирование объектов гелиоэнергетики:

1. Научная статья Малая Мазумдера и Марка Н. Хоренштейна из Бостонского университета, в которой установлено, что применение системы самоочистки фотоэлектрических установок на основе функционирования прозрачных электродинамических экранов, состоящих из рядов прозрачных параллельных электродов, заключенных в прозрачную диэлектрическую пленку, может использоваться для удаления пыли в качестве самоочищающихся солнечных коллекторов [5]. Таким образом, отмечается, что существуют системы самоочистки фотоэлектрических установок, но применение данной технологии в условиях холодного климата требует дальнейшего изучения с учетом высокой стоимости ее внедрения.

2. Научная статья Мухаммада Равшана Хабиба, Мухаммада Шахневаза Танвираиз

Университета Murdoch (Австралия), где ими была разработана система очистки солнечных панелей на базе программного обеспечения Arduino, которая имеет используемый в этой системе двухступенчатый механизм, состоящий из вытяжного вентилятора, работающего как нагнетатель воздуха, и стеклоочистителя, удаляющего пыль с поверхности панели. Также результаты экспериментов показывают, что предлагаемая система очистки может работать с эффективностью 87–96% для различных типов песка [6]. Однако предлагаемая технология имеет некоторые недостатки, а именно – высокую капитальную стоимость и необходимость в человеческих ресурсах в виде постоянного мониторинга за надлежащим техническим состоянием системы.

3. Научная статья В.А. Панченко, М.М. Сангжиева из ФГБОУ ВО Калмыцкого государственного университета им. Б.Б. Городовикова, где установлено, что в случае негерметичности солнечных панелей пыль может попадать внутрь солнечных панелей, а боковые панели (по периметру) могут собирать частички пыли. Загрязнение модулей механическим мусором, частицами песка, пылью, листьями и другими ненужными компонентами приводит к 10–15% потери КПД, а иногда и до 40% [7], что значительно снижает мощность генерации фотоэлектрических установок.

4. Научная статья М.Б. Пермякова, Т.В. Красновой из ФГБОУ ВО Магнитогорского



государственного технического университета им. Г.И. Носова, где указано, что купольные здания имеют значительные преимущества в отличие от обычных домов в виде наименьшей сопротивляемости ветру, уменьшение на 40% энергопотребления в плане теплоснабжения здания; авторами статьи также определено, что купольные дома могут рассматриваться как приемлемый вариант для размещения солнечных элементов на их фасадах для проведения исследований [8].

5. Другие научные статьи и практические рекомендации, где представлены результаты изучения влияния пылевого загрязнения (снижение генерации мощности именно на летний период вследствие сильного напыления), а также предложены технические решения в виде автоматизированных систем очистки солнечных панелей с помощью технических устройств или химических реагентов, позволяющих снизить налипание пылевых фракций на поверхности фотоэлектрической установки и т.д. [9–20].

На основании проведенного обзора литературных источников необходимо отметить, что существуют различные методы и способы снижения влияния пылевого загрязнения на функционирование фотоэлектрических установок. Однако мало изучена возможность проведения экспериментальных исследований по внедрению фотоэлектрических установок внутри прозрачных купольных зданий в целях снижения поверхностного загрязнения и электроснабжения данного здания.

Таким образом, целью данной статьи является проведение экспериментальных исследований возможности применения фотоэлектрических установок внутри купольных зданий и поиск параметров ее размещения с обеспечением наиболее высокой доли электроэнергетической эффективности генерации электроэнергии.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Перейдем к вопросу разработки экспериментальной установки солнечной энергетики малой мощности в целях размещения и технической апробации внутри прозрачного купольного строения (см. рис. 1). Авторами настоящей статьи для проведения натуральных

исследований собрана фотоэлектрическая солнечная электростанция мощностью 10 Вт, названная в виде модели СЭ–10, которая состоит из следующих комплектующих и приборов:

1. Поликристаллическая солнечная панель мощностью 10 Вт марки ФСМ–10П (производитель ExmorK, Россия), выбор данной модели панели обоснован возможностью работы агрегата при температурах от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+80^{\circ}\text{C}$ , что соответствует климатическим условиям холодного климата.

2. Контроллер заряда марки Tracer 2210 AN, выбор модели обоснован возможностью быстрого приобретения в г. Якутск.

3. Силовой аккумулятор марки Delta емкостью 75А·ч, выбор модели обоснован возможностью доступного приобретения в г. Якутск.

4. Нагрузка в виде 1 электрической лампы мощностью 7,5 Вт.

5. Стационарный порт сбора данных eLog марки EPEVER.

6. Персональный компьютер.

7. Программное обеспечение EPEVER для мониторинга данных.

8. Люксметр марки MS6610 (производитель MASTECH, Китай), выбор модели обоснован возможностью доступного приобретения в г. Якутск.

9. Вспомогательные комплектующие, в том числе смартфон с функцией измерения угла наклона панели относительно земли.

В ходе разработки СЭ–10 приняты условия в виде облегчения массы и габаритов установки, удельной стоимости и возможности мониторинга работы, так как планируются последующие испытания СЭ–10 в целях определения возможности электроснабжения сети, освещения объекта сельского хозяйства. Электроустановка СЭ–10 имеет преимущества в сравнении с существующим аналогом (комплект «зарядка в походе» компания «Delta») в виде системы накопления энергии (аккумуляторная батарея емкостью 75 А·ч) и возможности мониторинга параметров, а именно: по напряжению, току и мощности.

Далее внешний вид СЭ–10 представлен на рис.3.



Рис. 3. Внешний вид СЭ–10 в ходе проведения экспериментальных работ  
 Fig. 3. External view of a solar power station SE–10 in the course of experimental work

Проведены сравнительные испытания генерации солнечной электростанции при двух случаях: на открытой поверхности и внутри купольного строения в целях определения степени снижения выработки электрической энергии, а также для дальнейшей оценки эффективности обеспечения защиты от поверхностного загрязнения посредством установки систем солнечной генерации внутри прозрачных закрытых строений. Так как выше, в разделе «Введение», отмечено, что на территории г. Якутск установлено значитель-

ное загрязнение поверхности, а в разделе «Цель исследования» отмечено, что вследствие влияния пылевого загрязнения генерация электроэнергии от солнечных панелей снижается до 40%, то необходимо еще уточнить, что эксперименты произведены в течение июня 2021 г. на базе купольного строения СВФУ им. М.К. Аммосова (см. рис. 1) по следующим координатам: 62.30236386052619 "N 129.91516946160922 "E. Алгоритм проведения натуральных исследований представлен в табл.1.

Таблица 1. Методика проведения эксперимента  
 Table 1. Experiment procedure

№ пункта	Необходимые параметры и действия
1	Подготовка и монтаж экспериментальной установки СЭ–10
2	Подготовка регистратора данных системы EPEVER
3	Проверка исправности экспериментальной установки и люксметра
4	Проверка уровня заряда аккумуляторной батареи ( $30\% < Q_{\text{заряда}} < 55\%$ )
5	Включение нагрузки в виде электрической лампы мощностью 7,5 Вт, которая питается от силового аккумулятора через контроллер заряда
6	Размещение отполированной солнечной панели на открытом воздухе под углом $15^{\circ}$ относительно поверхности земли
7	Включение экспериментальной установки и люксметра (ориентирование в сторону солнца) и начало регистрации показателей (напряжение, ток, мощность, освещенность) при солнечной погоде с 12:00 по 15:00 ч после полуночи. Количество шагов эксперимента – до 36 ед. (1 единица на 5 м)
8	Выключение экспериментальной установки и люксметра
9	Обработка результатов эксперимента в целях получения графической интерпретации по мощности и световому потоку (расчет светового потока производится по формуле (1) на лицензированной программе MS Office Excel)
10	Повтор эксперимента по пунктам 1–9, но внутри купольного здания.
11	Повтор эксперимента по пунктам 1–9 ведется внутри купольного строения при расстоянии от прозрачной стены от 0 до 1,5 м. Шаг расстояния – 0,1 м. На каждый шаг расстояния забор экспериментальных данных производится в отдельном порядке при солнечной погоде с 12:00 по 15:00 ч после полуночи
12	После повтора экспериментов по пункту 11 производится очистка солнечной панели от пылевого загрязнения и демонтаж экспериментальной установки СЭ–10

Необходимо отметить, что, в соответствии с пунктом 4 (табл. 1), уровень заряда аккумуляторной батареи должен составлять не менее 30% в целях обеспечения работоспособности оборудования и не более 55% в целях предотвращения быстрой зарядки батареи, недопущения включения холостой работы солнечной панели и, следовательно, получения достоверных экспериментальных данных.

Кроме того, расчет светового потока производится с помощью формулы (1) на основании экспериментальных данных (освещенность), полученных люксметром:

$$\Phi_{\text{п}} = E_{\text{и}} \cdot S_{\text{п}}, \quad (1)$$

где  $\Phi_{\text{п}}$  – показатель светового тока, лм;  $E_{\text{и}}$  – показатель освещенности, полученный люксметром в ходе эксперимента;  $S_{\text{п}}$  – площадь поверхности солнечной панели ФСМ-10П, принимается как 0,7209 м<sup>2</sup>.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В течение июня 2021 г. авторами статьи были проведены натурные исследования по сравнению генерации солнечной электростанции при двух случаях: на открытом воздухе (случай № 1) и внутри купольного здания (случай № 2), расчет показателей влияния внешних параметров (световой поток и

температура воздуха) на функционирование экспериментальной установки СЭ-10 и определение оптимального расстояния от прозрачной стены купольного строения до фотоэлектрической установки (солнечной панели).

Кроме того, необходимо отметить, что в ходе проведения экспериментальных исследований получены дополнительные данные температуры воздуха на открытой поверхности +31°C и внутри купольного здания +45°C. Следовательно, необходим учет возможного влияния высокой температуры окружающей среды на функционирование солнечной панели ввиду того, что при высоких температурах свыше +30°C зафиксировано снижение мощности генерации объектов солнечной энергетики.

В связи с этим (с целью проведения исследований) на рис. 4 а представлен первый случай – размещение СЭ-10 на открытом воздухе, а на рис. 4 б – внутри купольного строения.

На рис. 5 представлен график светового потока относительно солнечной панели с учетом случаев № 1 и 2. Кроме того, установлен показатель снижения светового потока при переходе с открытой поверхности в купольное строение с использованием формулы (2):

$$K_{\text{о}} = \left(1 - \frac{\Phi_{\text{в}}}{\Phi_{\text{к}}}\right) \cdot 100\%, \quad (2)$$



a



b

Рис. 4. Размещение СЭ-10: а – на открытом воздухе; б – внутри купольного здания  
Fig. 4. Location of a solar power station SE-10: a – outdoors; b – inside the dome building

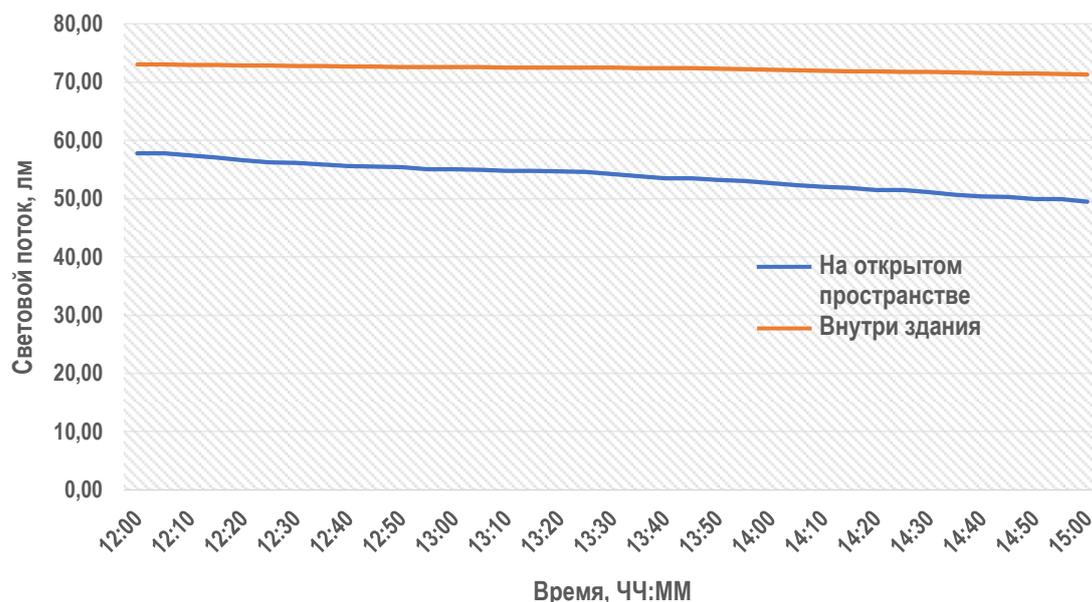


Рис. 5. График-сравнение светового потока в случаях № 1 и 2  
 Fig. 5. Comparison graph of luminous flux in the cases no. 1 and no. 2

где  $K_0$  – показатель снижения светового потока, %;  $\Phi_в$  – показатель светового потока на открытой поверхности, лм;  $\Phi_к$  – показатель светового потока внутри купольного здания, лм.

Таким образом, на вышеуказанном графике видно, что показатель светового потока на открытом воздухе выше показателя светового потока внутри купольного здания на 21,88%. Необходимо отметить, что все процедуры экспериментальных исследований велись при одинаковых условиях для каждого образца.

В соответствии с формулой (3) производится расчет показателя снижения генерации мощности при переходе и размещении установки СЭ–10 внутри купольного строения.

$$K_{\Pi} = \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^{36} P_{iК}}{36} \right) \cdot 100\%, \quad (3)$$

где  $K_{\Pi}$  – показатель снижения эффективности генерации мощности, о.е.;  $n$  – номер образца жидкого покрытия;  $P_{iК}$  – показатель мощности солнечной панели внутри купольного здания в определенный шаг измерения;  $i$  – номер шага измерения ( $i$  – от 1 до 36);  $P_{iВ}$  – показатель мощности солнечной панели на открытом воздухе в определенный шаг измерения.

На рис. 6 представлен график-сравнение

генерации мощности установки СЭ–10 с учетом размещения на открытой поверхности и внутри купольного строения. Необходимо отметить, что на графике показатели мощности указаны в относительных единицах.

На вышеуказанном рис. наглядно видно, что при случае № 1 (открытая поверхность) показатель удельной мощности выше, чем показатель удельной мощности при случае № 2 (внутри купольного здания) на 25,61%, что является относительно «небольшим» снижением ввиду того, что при размещении солнечной панели внутри купольного строения устраняется вероятность запыления или образования тальников на поверхности панели.

В табл. 2 представлены показатели влияния внешних параметров на функционирование солнечной панели с учетом применения формулы (4) в целях обеспечения расчета влияния высокой температуры внутри купольного строения на работу солнечной панели:

$$K_{\Gamma} = K_{\Pi} - K_0, \quad (4)$$

где  $K_{\Gamma}$  – показатель влияния высокой температуры внутри купола на работу солнечной панели, о.е.;  $K_{\Pi}$  – показатель снижения генерации солнечной панели вследствие перевода с

открытой поверхности внутрь купольного здания, о.е.;  $K_0$  – показатель снижения светового потока вследствие замера люксметром с учетом случая № 1 (на открытой поверхности) и случая № 2 (внутри купольного здания).

В ходе проведения экспериментов определено, что при переходе СЭ–10 внутрь купольного здания мощность генерации снижается на 25,61%, при этом показатели светового потока при аналогичном переходе снизились на 21,88%, что является фактической причиной снижения мощности установки СЭ–10. Вместе с тем зафиксировано резкое увеличение температуры воздуха при переходе с открытого пространства внутрь купольного здания с +31°С до +45°С. Данное увеличение температуры воздуха также является одной из причин снижения генерации солнечной электростанции СЭ–10, где коэффициент ее влияния составил 3,73%.

В ходе определения оптимального расстояния от прозрачной стены купольного здания до фотоэлектрической установки от 0 до 1,5 м с шагом 0,1 м получены средние значения мощности генерации СЭ–10 и показатели светового потока. На рис. 7 представлены графики зависимости удельной мощности генерации и светового потока в зависимости от расстояния до прозрачной стены купольного строения.

На вышеуказанных графиках видно, что зависимость удельной мощности генерации от расстояния прозрачной стены купольного здания имеет линейную зависимость, где при изменении расстояния от 0 до 1,5 м удельная мощность снижается на 23,007%, а зависимость светового потока имеет полиномиальную зависимость, где показатель светового потока при изменении расстояния от 0 до 1,5 м снижается на 5,224%.

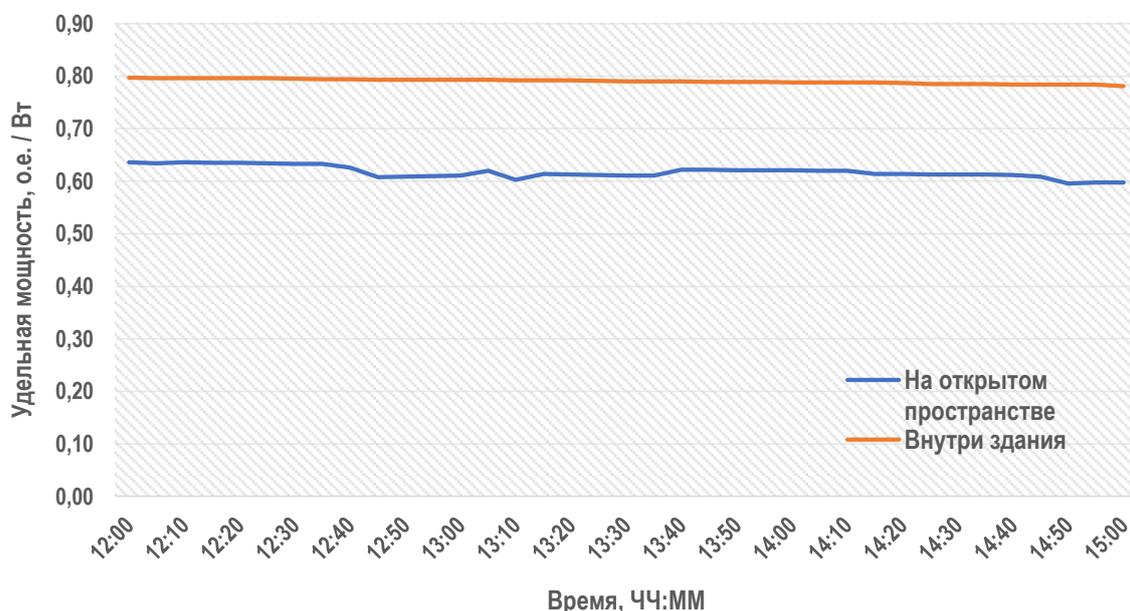


Рис. 6. График-сравнение генерации установки СЭ–10 с учетом случаев № 1 и 2  
Fig. 6. Comparison graph of solar power plant SE-10 generation taking into account the cases no. 1 and no. 2

Таблица 2. Показатели влияния внешних параметров на функционирование солнечной панели  
Table 2. Indicators of external parameters effect on solar panel operation

№	Название влияния	Количественный параметр, %
1	Снижение мощности по системе «открытая поверхность – купольное здание»	25,61
2	Снижение светового потока по системе «открытая поверхность – купольное здание»	21,88
3	Снижение мощности из-за высокой температуры	3,73

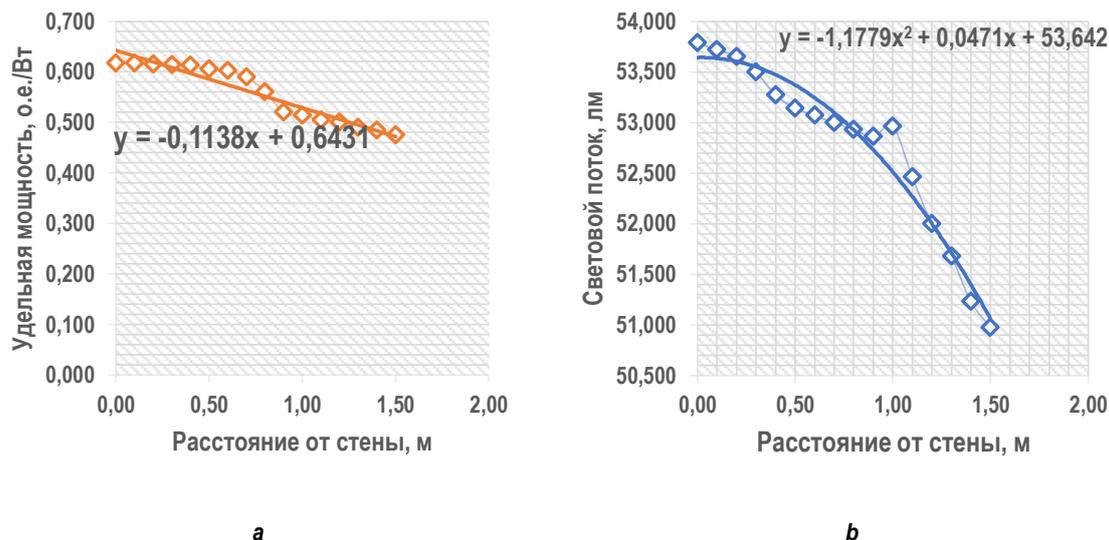


Рис. 7. Графики зависимости удельной мощности СЭ–10 (а) и светового потока (б) от расстояния от прозрачной стены купольного здания  
 Fig. 7. Dependency graphs of solar power plant SE-10 specific power (a) and luminous flux (b) vs distance from the transparent wall of the dome building

Таким образом, оптимальным расстоянием размещения между фотоэлектрическими установками и прозрачной стеной купольного здания составляет 0 м, а именно – размещение солнечной панели вплотную со стеной, где, в соответствии с рис. 7 а, формируется наивысшая мощность генерации.

Представлены физико-математические закономерности расчета удельной мощности для поликристаллических фотоэлектрических установок и светового потока в зависимости от расстояния от стен внутри прозрачного купольного здания в виде формул (5) и (6).

$$P_y = -0,1138 \cdot L + 0,6431, \quad (5)$$

где  $P_y$  – удельная мощность генерации поликристаллической фотоэлектрической установки, о.е./Вт;  $L$  – расстояние фотоэлектрической установки от ближайшей стены прозрачного купольного здания, м.

$$F_c = -1,1779 \cdot L^2 + 0,0471 \cdot L + 53,642, \quad (6)$$

где  $F_c$  – световой поток внутри прозрачного купольного здания, лм;  $L$  – расстояние фотоэлектрической установки от ближайшей стены прозрачного купольного здания, м.

При проведении натуральных исследований авторами анализируются следующие гипотезы:

1. Возможность эксплуатации элементов солнечной энергетики внутри прозрачных строений на территории Севера.

2. Прямая зависимость расстояния размещения между фотоэлектрической установкой и ближайшей прозрачной стеной прозрачного строения.

В рамках доказательства вышеуказанных гипотез авторами статьи представлены следующие контрольные точки:

1. Выполнен ряд экспериментов с приведением графических интерпретаций в виде сравнения показателей светового потока (см. рис. 5) при размещении солнечной панели на открытом воздухе (случай № 1) и внутри купольного здания (случай № 2), где определено, что снижение светового потока в случае перехода из случая № 1 в случай № 2 составляет 21,88%.

2. Получена графическая интерпретация сравнения удельной мощности генерации (см. рис. 6) солнечной панели в случаях № 1 и № 2, где определено, что снижение мощности генерации в случае перехода из случая № 1 в случай № 2 составляет 25,61%; дополнительно рассчитан показатель влияния высокой температуры, которая составила 3,73% (см. табл. 2).

3. Установлены физико-математические закономерности расчета удельной мощности



для поликристаллических фотоэлектрических установок и светового потока в зависимости от расстояния от стен внутри прозрачного купольного строения (см. формулы (5) и (6)).

4. Определено оптимальное расстояние размещения фотоэлектрических установок от ближайшей стены прозрачного строения, которая составила 0 м, и, следовательно, рекомендуется устанавливать солнечные панели вплотную со стеной.

5. В случае увеличения вышеуказанного расстояния от 0 до 1,5 м зафиксированы снижения показателя светового потока на 5,224% и удельной мощности генерации на 23,007%.

Таким образом, посредством проведения экспериментальных исследований авторами статьи доказаны гипотезы о возможности эксплуатации объектов солнечной энергетики внутри прозрачного строения и прямой зависимости расстояния размещения между фотоэлектрической установкой и ближайшей прозрачной стеной.

Кроме того, вычисленные показатели снижения мощности генерации солнечной панели и светового потока в случае размещения фотоэлектрических солнечных панелей внутри прозрачных строений в целях защиты от поверхностного загрязнения имеют возможность использования при эксплуатации объектов гелиоэнергетики в условиях Севера генерирующими предприятиями, частными лицами и организациями.

## ДАЛЬНЕЙШИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе проведения экспериментальных исследований и после их обсуждения необходимо особо выделить дальнейшие направления последующих исследований:

**Направление № 1.** Изучение и исследование возможности применения фотоэлектрических солнечных установок на трекерных установках внутри купольного строения с разделением на периоды наблюдений, а именно: лето, осень, зима и лето.

**Направление № 2.** Проведение экспериментальных исследований по изучению возможности дополнительного применения жидких покрытий в целях нанесения на поверхность фотоэлектрической солнечной уста-

новки с последующим размещением внутри купольного строения для значительного снижения вероятности поверхностного загрязнения установки.

**Направление № 3.** Исследование перспектив внедрения гибридной электростанции на основе параллельного функционирования фотоэлектрической солнечной установки внутри купольного строения и вертикальной ветровой энергетической установки на верхней части купольного строения.

**Направление № 4.** Исследование показателей снижения электроэнергетической эффективности фотоэлектрической солнечной установки внутри купольного строения с разделением на периоды наблюдений, а именно: лето, осень, зима и лето.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенный анализ определил, что исследования о возможности эксплуатации солнечных электроустановок внутри купольных строений в условиях Севера имеют актуальность и малую изученность.

2. В ходе проведения обзора литературы зафиксировано, что в случае значительного поверхностного загрязнения солнечной панели мощность генерации может снижаться до 40% и более, что делает актуальной разработку новых методов и способов снижения влияния поверхностного загрязнения.

3. В результате проведения ряда экспериментов авторами статьи получены показатели снижения мощности генерации фотоэлектрической установки в случае размещения внутри закрытого прозрачной пленкой строения – 25,61%, а светового потока – на 21,88% (см. табл. 2).

4. Авторами статьи определено, что в случае размещения фотоэлектрической установки при расстоянии 1,5 м от ближайшей прозрачной стены строения мощность генерации падает на 23,007%, а светового потока – на 5,224%.

5. Также вычислено, что оптимальное расстояние размещения фотоэлектрических установок от ближайшей стены прозрачного строения составило 0 м, и, следовательно, рекомендуется устанавливать солнечные панели вплотную со стеной.

6. В ходе обработки экспериментальных данных получены закономерности расчета удельной мощности для поликристаллических фотоэлектрических установок и светового потока в зависимости от расстояния от стен внутри прозрачного купольного здания (см. формулы (5) и (6)).

7. Необходимо проведение дальнейших исследований влияния поверхностных загрязнений панелей на их эффективность с определением доли тех или иных источников загрязнения, а также причин и условий возникновения.

#### Список литературы

1. Филиппов Д.В., Васильев П.Ф., Петрова А.Н., Григорьев Б.В. Эксперимент «Дом под куполом» // *Климат 2021: современные подходы к оценке воздействия внешних факторов на материалы и сложные технические системы: матер. VI Всерос. науч.-техн. конф. (г. Геленджик, 20–21 мая 2021 г.)*. Геленджик: Изд-во ГЦКИ ВИАМ им. Г.В. Акимова, 2021. С. 17–25.
2. Васильев П.Ф., Местников Н.П. Исследование влияния резко-континентального климата Якутии на функционирование солнечных панелей // *Международный технико-экономический журнал*. 2021. № 1. С. 57–64. <https://doi.org/10.34286/1995-4646-2021-76-1-57-64>
3. Макаров В.Н., Торговкин Н.В. Загрязнение атмосферы города Якутска взвешенными веществами // *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2020. Т. 25. № 1. С. 43–50.
4. Торговкин Н.В., Макаров В.Н. Влияние современных климатических изменений на геохимические особенности мерзлотных почв г. Якутск // *Устойчивость природных и технических систем в криолитозоне: матер. Всерос. конф. с междунар. участием, посвященной 60-летию образования Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН (г. Якутск, 28–30 сентября 2020 г.)*. Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2020. С. 182–184.
5. Mazumder M.K., Horenstein M.N., Stark J.W., Girouard P., Sumner R., Henderson B., et al. Characterization of electrodynamic screen performance for dust removal from solar panels and solar hydrogen generators // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2013. Vol. 49. Iss. 4. P. 1793–1800. <https://doi.org/10.1109/TIA.2013.2258391>
6. Habib M.R., Tanvir M.S., Suhan A.Yo., Vadher A., Alam S., Shawmee T.T., et al. Automatic solar panel cleaning system based on Arduino for dust removal // *International Conference on Artificial Intelligence and Smart Systems (ICAIS)*. 2021. <https://doi.org/10.1109/ICAIS50930.2021.9395937>
7. Панченко В.А., Дегтярев К.С., Сангджиев М.М. Влияние пыли и песка на возобновляемые источники энергии в Калмыкии // *Инновации в сельском хозяйстве: VII Междунар. науч.-техн. конф. (г. Москва, 13–14 декабря 2016 г.)*. М.: Изд-во ВИЭСХ, 2016. С. 176–183.
8. Пермяков М.Б., Краснова Т.В., Иванченко Т.А. Использование солнечной энергии в комплексе энергоэффективных зданий-полигонов // *Строительные материалы, конструкции и технологии XXI века: межвуз. сб. науч. тр. / под ред. М.Б. Пермякова*. Магнитогорск: Изд-во МГТУ им. Г.И. Носова, 2019. С. 28–35.
9. Местников Н.П. Исследование влияния резкоконтинентального климата Севера на работу поликристаллической солнечной панели // *Eurasia Science: сб. ст. XXXVII Междунар. науч.-практ. конф. (г. Москва, 15 мая 2021 г.)*. М.: ООО «Актуальность. РФ», 2021. С. 72–74.
10. Местников Н.П., Васильев П.Ф., Альхадж Ф.Х. Разработка гибридных систем электроснабжения для энергоснабжения удаленных потребителей в условиях Севера и Арктики // *Международный технико-экономический журнал*. 2021. № 1. С. 47–56. <https://doi.org/10.34286/1995-4646-2021-76-1-47-56>
11. Местников Н.П., Нуруллин Э.Г. Исследование и моделирование процесса генерации ветровой и солнечной электростанции мощностью 650 Вт // *Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы 2019 (МНТК «ИМТОМ–2019»): матер. X Междунар. науч.-техн. конф. Ч. 2. (г. Казань, 5–6 декабря 2019 г.)*. Казань, 2019. С. 436–439.
12. Hossain M., Rabbi F., Zaman S., Rahman F., Islam M.S. Study of dust effect on PV panel's efficiency during winter for Dhaka, Bangladesh // *2nd International Conference on Sustainable Technologies for Industry 4.0 (STI)*. 2020. <https://doi.org/10.1109/STI50764.2020.9350391>
13. Elangovan H., Ranjan U., Jagdish A.K., Ramamurthy P.C., Chattopadhyay K. Performance of monocrystalline silicon solar cell- influence of dust on ultra-violet and visible region during early stage of deposition // *IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*. 2017. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2017.8366172>
14. Darwish Z.A., Sopian K., Kazem H.A., Alghoul M.A., Alawadhi H. Investigating the effect of titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) pollution on the performance of the monocrystalline solar module // *World Renewable Energy Congress-17: E3S Web Conference*. 2017. Vol. 23. P. 01005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172301005>
15. Kavya V., Keshav R.M.R. Solar dust detection system // *International Conference on Power Energy, Environment and Intelligent Control (PEEIC)*. 2018. <https://doi.org/10.1109/PEEIC.2018.8665410>
16. Tiwari S., Rani P., Patel R.N. Examining the economic viability of a solar panel dust cleaning // *IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT)*. 2019. <https://doi.org/10.1109/ICECCT.2019.8869011>
17. Чарыев Я., Сарыев К., Ходжанепесов К.,



Пенджиев А. Техничко-экономическое обоснование использования солнечных фотоэлектрических модулей в Туркменистане // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2016. № 5. С. 214–218.

18. Басан Д., Коломиец Ю.Г., Сулейманов М.Ж. Исследование влияния запыления на эффективность работы солнечных модулей с учетом природных особенностей Монголии // *Возобновляемая энергетика – XXI век: энергетическая и экономическая эффективность REENCON-XXI: матер. IV Междунар. конгр. (г. Москва, 5–6 июня*

2018 г.). М.: Изд-во ОИВТ РАН, 2018. С. 21–25.

19. Зацаринная Ю.Н., Амиров Д.И., Земскова Л.В., Рахматуллин Р.Р. Исследование эффективности работы солнечной панели при воздействии на нее загрязнителей // *Труды Академэнерго*. 2019. № 1. С. 81–92. <https://doi.org/10.34129/2070-4755-2019-54-1-81-92>

20. Симакин В.В., Смирнов А.В., Тихонов А.В., Тюхов И.И. Современная система автономного электроснабжения с использованием возобновляемых источников энергии // *Энергетик*. 2013. № 3. С. 21–25.

## References

1. Filippov DV, Vasil'ev PF, Petrova AN, Grigor'ev BV. An experiment 'A dome house.' In: *Klimat 2021: sovremennye podhody k ocenke vozdeystviya vneshnih faktorov na materialy i slozhnye tekhnicheskie sistemy: materialy VI Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii = Climate 2021: modern approaches to assessing the impact of external factors on materials and complex technical systems: materials of VI All-Russian scientific and technical conference*. 20–21 May 2021, Gelendzhik. Gelendzhik: G.V. Akimov Gelendzhik Center for Climate Testing, All-Russian scientific research institute of aviation materials; 2021, p. 17–25. (In Russ.)

2. Vasilyev PF, Mestnikov NP. Research of the effect of the sharply continental climate of Yakutia on the functioning of solar panels. *Mezhdunarodnyj tekhniko-ekonomicheskij zhurnal = The International Technical-Economic Journal*. 2021;1:57–64. <https://doi.org/10.34286/1995-4646-2021-76-1-57-64>

3. Makarov VN, Torgovkin NV. Yakutsk atmosphere pollution by suspended substances. *Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki = Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2020;25(1):43–50.

4. Torgovkin NV, Makarov VN. Climate change influence on geochemical features of cryosoles in Yakutsk. *Ustojchivost' prirodnyh i tekhnicheskikh sistem v kriolitozone: materialy Vserossijskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoj 60-letiyu obrazovaniya Instituta merzlotovedeniya im. P.I. Mel'nikova Sibirskogo otdeleniya Rossijskoj akademii nauk = Stability of natural and engineering systems in the cryolithozone: materials of All-Russian conference with international participation dedicated to the 60th anniversary of the formation of the P.I. Melnikov Permafrost Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences*. 28–30 September 2020, Yakutsk. Yakutsk: P.I. Melnikov Permafrost Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2020, p. 182–184. (In Russ.)

5. Mazumder MK, Horenstein MN, Stark JW, Girouard P, Sumner R, Henderson B, et al. Characterization of electrodynamic screen performance for dust removal from solar panels and solar hydrogen generators. In: *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2013;49(4):1793–1800. <https://doi.org/10.1109/TIA.2013.2258391>

6. Habib MR, Tanvir MS, Suhan AYo, Vadher A, Alam S, Shawmee TT, et al. Automatic solar panel cleaning system based on Arduino for dust removal. In: *International Conference on Artificial Intelligence and Smart*

*Systems (ICAIS)*. 2021.

<https://doi.org/10.1109/ICAIS50930.2021.9395937>

7. Panchenko VA, Degtyarev KS, Sangdzhiev MM. Influence of dust and sand on renewable energy sources in Kalmykia. In: *Innovacii v sel'skom hozyajstve: VII Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya = Innovation in agriculture: VII International scientific and technical conference*. 13–14 December 2016, Moscow. Moscow: All-Russian research institute of agriculture mechanisation, 2016; p. 176–183. (In Russ.)

8. Permyakov MB, Krasnova TV, Ivanchenko TA. Use of solar energy in a complex of energy-efficient testing buildings. In: Permyakov MB (eds.). *Stroitel'nye materialy, konstrukcii i tekhnologii XXI veka: mezhvuzovskij sbornik nauchnyh trudov = Building materials, structures and technologies of the XXI century: interuniversity collection of scientific articles*. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University; 2019, p. 28–35. (In Russ.)

9. Mestnikov NP. Study of the influence of the sharp continental climate of the North on the operation of a polycrystalline solar panel. In: *Eurasia Science: sbornik statej XXXVII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Eurasia Science: collected articles of XXXVII International scientific and practical conference*. 15 May 2021, Moscow. Moscow: OOO "Aktual'nost'. RF"; 2021, p. 72–74. (In Russ.)

10. Mestnikov NP, Vasilyev PF, Al'hadzh FH. Development of hybrid power supply systems for power supply of remote consumers in North and Arctic conditions. *Mezhdunarodnyj tekhniko-ekonomicheskij zhurnal = The International Technical-Economic Journal*. 2021;1:47–56. <https://doi.org/10.34286/1995-4646-2021-76-1-47-56>

11. Mestnikov NP, Nurullin G. Research and modeling of 650W wind and solar power plant generation. In: *Innovacionnye mashinostroitel'nye tekhnologii, oborudovanie i materialy 2019 (MNTK «IMTOM-2019»): materialy X Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii = Innovative machine-building technologies, equipment and materials 2019 (ISTC 'IMTEM-2019'): materials of X International scientific and technical conference*. Part 2. 5–6 December 2019, Kazan'. Kazan'; 2019, p. 436–439. (In Russ.)

12. Hossain M, Rabbi F, Zaman S, Rahman F, Islam MS. Study of dust effect on PV panel's efficiency during winter for Dhaka, Bangladesh. In: *2nd International Conference on Sustainable Technologies for Industry 4.0 (STI)*. 2020. <https://doi.org/10.1109/STI50764.2020.9350391>

13. Elangovan H, Ranjan U, Jagdish AK, Ramamurthy PC, Chattopadhyay K. Performance of monocrystalline silicon solar cell- influence of dust on ultra-violet and visible region during early stage of deposition. In: *IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*. 2017. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2017.8366172>
14. Darwish ZA, Sopian K, Kazem HA, Alghoul MA, Alawadhi H. Investigating the effect of titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) pollution on the performance of the mono-crystalline solar module. In: *World Renewable Energy Congress-17: E3S Web Conference*. 2017;23:01005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172301005>
15. Kavva V, Keshav RMR. Solar dust detection system. In: *International Conference on Power Energy, Environment and Intelligent Control (PEEIC)*. 2018. <https://doi.org/10.1109/PEEIC.2018.8665410>
16. Tiwari S, Rani P, Patel RN. Examining the economic viability of a solar panel dust cleaning. In: *IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT)*. 2019. <https://doi.org/10.1109/ICECCT.2019.8869011>
17. Charyev Ya, Saryev K, Hodzhanepesov K, Pendzhiev

- A. Feasibility study of the use of solar photovoltaic modules in Turkmenistan. *Innovacii v sel'skom hozyajstve*. 2016;5:214–218. (In Russ.)
18. Basan D, Kolomic YuG, Sulejmanov MZh. Investigation of the effect of dust pollution on the operation efficiency of solar modules taking into account the natural features of Mongolia. *Vozobnovlyаемая energetika–XXI vek: energeticheskaya i ekonomicheskaya effektivnost' REENCON-XXI: materialy IV Mezhdunarodnogo kongressa = Renewable energy – XXI century: energy and economic efficiency REENCON-XXI: materials of IV International Congress*. 5–6 June 2018, Moscow. Moscow: Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences; 2018, p. 21–25. (In Russ.)
19. Zacarinnaya YuN, Amirov DI, Zemskova LV, Rahmatullin RR. Study of solar panel operation efficiency when exposed to pollutants. *Transactions of Academenergo*. 2019;1:81–92. <https://doi.org/10.34129/2070-4755-2019-54-1-81-92>
20. Simakin VV, Smirnov AV, Tihonov AV, Tyuhov II. Modern system of stand-alone power supply using renewable energy sources. *Energetik*. 2013;3:21–25. (In Russ.)

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Местников Николай Петрович**,  
аспирант,  
ассистент кафедры электроснабжения,  
Северо-Восточный федеральный университет  
им. М.К. Аммосова,  
677000, г. Якутск, ул. Белинского, 58,  
Республика Саха (Якутия);  
ведущий инженер отдела электроэнергетики,  
Институт физико-технических проблем Севера  
СО РАН,  
677007, г. Якутск, ул. Кулаковского, 42,  
Республика Саха (Якутия);  
✉ e-mail: sakhacase@bk.ru

**Nikolay P. Mestnikov**,  
Postgraduate student,  
Assistant Professor of the Department of Power Supply,  
M.K. Ammosov North-Eastern Federal University,  
58 Belinsky St., Yakutsk 677000,  
Republic of Sakha  
(Yakutia);  
Leading Engineer of the Department of Electric Power,  
Institute of Physical-Technical Problems of the North of  
the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
42 Kulakovsky St., Yakutsk 677007,  
Republic of Sakha (Yakutia);  
✉ e-mail: sakhacase@bk.ru

**Васильев Павел Филиппович**,  
кандидат технических наук,  
заведующий кафедрой электроснабжения,  
Северо-Восточный федеральный университет  
им. М.К. Аммосова,  
677000, г. Якутск, ул. Белинского, 58,  
Республика Саха (Якутия);  
заведующий Отделом электроэнергетики,  
Институт физико-технических проблем Севера  
СО РАН,  
677007, г. Якутск, ул. Кулаковского, 42,  
Республика Саха (Якутия);  
e-mail: kb-8@mail.ru

**Pavel F. Vasilyev**,  
Cand. Sci. (Eng.),  
Head of the Department of Power Supply,  
M.K. Ammosov North-Eastern Federal University,  
58 Belinsky St., Yakutsk 677000, Republic of Sakha  
(Yakutia);  
Head of the Electric Power Engineering Department,  
Institute of Physical-Technical Problems of the North of  
the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
42 Kulakovsky St., Yakutsk 677007,  
Republic of Sakha (Yakutia);  
e-mail: kb-8@mail.ru



**Давыдов Геннадий Иванович,**  
научный сотрудник Отдела электроэнергетики,  
Институт физико-технических проблем Севера  
СО РАН,  
677027, г. Якутск, ул. Октябрьская, 1, Республика Саха  
(Якутия);  
e-mail: dav\_gen@mail.ru

**Хоютанов Александр Михайлович,**  
научный сотрудник Отдела электроэнергетики,  
Институт физико-технических проблем Севера  
СО РАН,  
677027, г. Якутск, ул. Октябрьская, 1, Республика Саха  
(Якутия);  
e-mail: shuriklater@mail.ru

**Альзаккар Ахмад Мухаммед-Насер,**  
аспирант,  
Казанский государственный энергетический  
университет,  
420066, г. Казань, ул. Яруллина, 6, Россия;  
e-mail: ahmadalzakkar86@gmail.com

#### **Заявленный вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

#### **Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 06.06.2021; одобрена после рецензирования 15.07.2021; принята к публикации 18.08.2021.

**Gennadiy I. Davydov,**  
Researcher of the Department of Electric Power  
Engineering,  
Institute of Physical-Technical Problems of the North of  
the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
1 Oktyabrskaya St., Yakutsk 677027, Republic of Sakha  
(Yakutia);  
e-mail: dav\_gen@mail.ru

**Aleksandr M. Khoютanov,**  
Researcher of the Department of Electric Power  
Engineering,  
Institute of Physical-Technical Problems of the North of  
the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
1 Oktyabrskaya St., Yakutsk 677027, Republic of Sakha  
(Yakutia);  
e-mail: shuriklater@mail.ru

**Ahmad M.-N. Alzakkar,**  
Postgraduate student,  
Kazan State Power Engineering University,  
6 Yarullin St., Kazan 420066, Russia;  
e-mail: ahmadalzakkar86@gmail.com

#### **Contribution of the authors**

The authors contributed equally to this article.

#### **Conflict of interests**

The authors declare no conflict of interests.

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

#### **Information about the article**

The article was submitted 06.06.2021; approved after reviewing 15.07.2021; accepted for publication 18.08.2021.



## Разработка упрощенной модели трансформатора тока для исследования работы релейной защиты в переходных режимах

© Т.С. Мухаметгалева, Д.С. Федосов

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

**Резюме:** Целью работы является создание упрощенной модели трансформатора тока на основе данных его вольтамперной характеристики. Данная модель применима для исследования работы релейной защиты в переходных режимах, когда не требуется высокой точности, в том числе учета гистерезиса магнитопровода трансформатора тока. Модель разработана в среде MATLAB Simulink с применением элементов библиотек SimPowerSystems и Simscape. В модели используются данные о коэффициенте трансформации и вольтамперной характеристике, снятой при эксплуатационных испытаниях трансформатора тока. В ходе расчетных экспериментов на нелинейном сопротивлении установлено, что для моделирования трансформатора тока можно использовать вольтамперную характеристику не в мгновенных, а в действующих значениях тока и напряжения. Смоделированы режимы с номинальными токами в обмотках трансформатора тока для проверки коэффициента трансформации, режимы с разомкнутой вторичной обмоткой и режимы с насыщением трансформатора тока за счет увеличения вторичной нагрузки, повышения кратности первичного тока и наличия аperiodического тока в начальный момент переходного процесса. Установлено, что модель трансформатора тока позволяет корректно имитировать все указанные режимы. Для верификации модели выполнено снятие осциллограмм вторичного тока на реальных трансформаторах тока 10 кВ при известном первичном токе и их сравнение с расчетными осциллограммами на модели. Расхождение между результатами расчетного и натурального экспериментов составило не более 10% в амплитудных значениях, при этом получено качественное совпадение графиков токов на модели и у реального трансформатора тока. Основным преимуществом разработанной модели является то, что для ее задания не требуется информация о сечении магнитопровода, длине силовой линии, марке стали и числах витков обмоток трансформатора тока.

**Ключевые слова:** релейная защита, трансформатор тока, вольтамперная характеристика, насыщение трансформатора тока, MATLAB Simulink, моделирование

**Для цитирования:** Мухаметгалева Т.С., Федосов Д.С. Разработка упрощенной модели трансформатора тока для исследования работы релейной защиты в переходных режимах. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 4. С. 450–462. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-450-462>

## A simplified model of a current transformer for studying relay protection operation in transient conditions

Tatiana S. Mukhametgaleeva, Denis S. Fedosov

*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

**Abstract:** We develop a simplified model of a current transformer based on its current-voltage characteristic. This model is applicable for studying relay protection operation in transient conditions when no high accuracy or consideration of current transformer magnet core hysteresis is required. The model was developed in MATLAB Simulink using elements of the SimPowerSystems and Simscape libraries. The model uses the transformation ratio and current-voltage characteristic obtained during operational tests of a current transformer. Calculation experiments with non-linear resistance found that a current-voltage characteristic of voltage and current values can be used to model a current transformer, rather than instantaneous values. The following conditions were simulated: for nominal currents in current transformer windings to check the transformation ratio; for opened secondary winding; with current transformer saturation by increasing secondary loading; increasing the primary current ratio and presence of aperiodic current at the start of the transition process. It was found that the developed current transformer model allows for a correct imitation of all the above conditions. To verify the model, secondary current oscillograms were obtained using real current transformers 10 kV at known primary current, which were compared with nominal oscillograms in the model. The discrepancy between the results of calculational and real experiments was no more than 10% in amplitude values, with high-quality matching obtained for current charts in the model and real current transformers. A significant advantage of the developed model is that its setting requires no information on magnet core cross-section, power line length, steel grade, and the number of current transformer winding turns.

**Keywords:** relay protection, current transformer, current-voltage characteristic, saturation of current transformer, MATLAB Simulink, simulation

**For citation:** Mukhametgaleeva TS, Fedosov DS. A simplified model of a current transformer for studying relay protection operation in transient conditions. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(4):450–462. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-450-462>

## ВВЕДЕНИЕ

С каждым годом мощность электрооборудования энергосистем увеличивается, при этом неизбежно возрастает количество повреждений и далеких от нормы режимов работы [1]. По этой причине при реконструкции и модернизации объектов энергетики повышаются требования к устройствам релейной защиты (РЗ) от коротких замыканий (КЗ) и других видов повреждений.

Основными требованиями к работе устройств РЗ являются селективность, надежность, чувствительность и быстродействие [2]. Они должны обеспечиваться не только самими устройствами РЗ, но и первичными преобразователями измеряемых величин, в первую очередь трансформаторами тока (ТТ). Именно от аналогового сигнала ТТ во многом зависит правильная работа РЗ. Вторичный ток электромагнитных ТТ в переходных режимах может значительно искажаться по причине насыщения магнитной системы ТТ [3]. Такая проблема является актуальной как для работы аналоговых (электромеханических и статических), так и цифровых защит [3–5]. Известен случай неправильной работы РЗ в 2014 г. на одной из электростанций из-за искажения вторичного тока по причине насыщения ТТ при внешнем трехфазном КЗ с апериодической составляющей. Некорректное срабатывание защиты привело к развитию крупной системной аварии. Подобные случаи отмечаются и в зарубежных публикациях [6–8].

Для предотвращения подобных аварий в энергосистемах необходима разработка мероприятий по повышению надежности работы РЗ. Требуется корректно рассчитывать вторичные токи ТТ в переходных режимах, для чего нужна адекватная математическая модель ТТ. Существующие модели ТТ [9–11]

требуют наличия информации о параметрах обмоток ТТ (число витков, сопротивления обмоток) и магнитной цепи ТТ (длина средней силовой линии, сечение магнитопровода, характеристика намагничивания стали), которая не сообщается производителями в технической документации и в лучшем случае доступна только по частному запросу. Вместе с тем для исследования работы РЗ не требуется высокая точность моделирования ТТ. Например, в [12] указано, что для моделирования можно применять близкую к прямоугольной характеристику намагничивания, а явление гистерезиса для ТТ, применяемых в РЗ, можно не учитывать, придерживаясь РД 153-34.0-35.301-02<sup>1</sup>.

В связи с этим актуальной задачей является разработка упрощенной модели ТТ для распространенной среды моделирования MATLAB Simulink [13, 14]. В качестве источника информации для моделирования предлагается использовать вольтамперную характеристику (ВАХ), снятую при периодической проверке ТТ, и данные о коэффициенте трансформации. Построение модели только на основе ВАХ позволит исключить необходимость получения информации о ТТ, которая не указана в его паспортных данных. Такая модель ТТ с использованием ВАХ и дифференциальных уравнений будет использоваться для расчетного исследования погрешностей трансформаторов тока и изучения их влияния на работу устройств РЗ в переходных режимах. Для проверки корректности разработанной модели ТТ предлагается провести моделирование установившихся режимов и переходных процессов с апериодической составляющей тока и сравнить результаты моделирования с натурными осциллограммами реальных ТТ.

<sup>1</sup>РД 153-34.0-35.301-02. Инструкция по проверке трансформаторов тока, используемых в схемах релейной защиты и измерения. Введ. 01.03.2003. М., 2003. 151 с.

**МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Известна модель ТТ на основе дифференциальных уравнений [10, 15]:

$$\begin{cases} w_2 S_c \frac{dB}{dt} = (R_2 + R_n) i_2 + (L_2 + L_n) \frac{di_2}{dt}; \\ i_1 w_1 - i_2 w_2 = H l_{cp}; \\ B = f(H), \end{cases} \quad (1)$$

где  $w_1, w_2$  – число витков первичной и вторичной обмоток ТТ;  $i_1, i_2$  – токи в первичной и вторичной обмотках ТТ;  $R_2, L_2$  – активное сопротивление и индуктивность вторичной обмотки ТТ;  $R_n, L_n$  – активное сопротивление и индуктивность вторичной нагрузки ТТ;  $l_{cp}$  – длина средней силовой линии магнитного поля в магнитопроводе ТТ;  $S_c$  – площадь поперечного сечения магнитопровода ТТ;  $B = f(H)$  – средняя характеристика намагничивания электротехнической стали (зависимость индукции  $B$  от напряженности магнитного поля  $H$  при номинальной частоте  $f = 50$  Гц) [16].

На кафедре электрических станций, сетей и систем Иркутского национального исследовательского технического университета (ИРНИТУ) также разработана имитационная модель ТТ в среде MATLAB Simulink [17] с использованием дифференциальных уравнений. Уравнения описывают параметры режима в первичной и вторичной обмотках ТТ и формируются при помощи 2-го закона

Кирхгофа и уравнения магнитодвижущих сил ТТ.

Как упоминалось ранее, общим недостатком данных моделей является необходимость задавать информацию о сечении магнитопровода, длине силовой линии, марке стали и числе витков обмоток, что у большинства ТТ не указано в заводской документации и, безусловно, является избыточным для практических расчетов при анализе поведения РЗ.

Также на кафедре электрических станций, сетей и систем ИРНИТУ разработана упрощенная модель ТТ с использованием блока Saturable Transformer в среде MATLAB Simulink [18]. Для данной модели в качестве исходных данных используется информация о коэффициенте трансформации, номинальной мощности ТТ и его ВАХ. Однако основной проблемой при применении такой модели является отсутствие информации об уравнениях, применяемых в блоке Saturable Transformer для моделирования кривой намагничивания ТТ.

Этими причинами и обусловлено создание новой упрощенной математической модели ТТ на основе ВАХ. Разработаны два типа моделей ТТ в MATLAB с применением разных библиотек элементов для моделирования.

Первая модель создана в среде MATLAB Simulink при помощи общих блоков Simulink и библиотеки SimPowerSystems [14, 16]. В качестве основы для построения модели используется Т-образная схема замещения ТТ на рис. 1 [19].

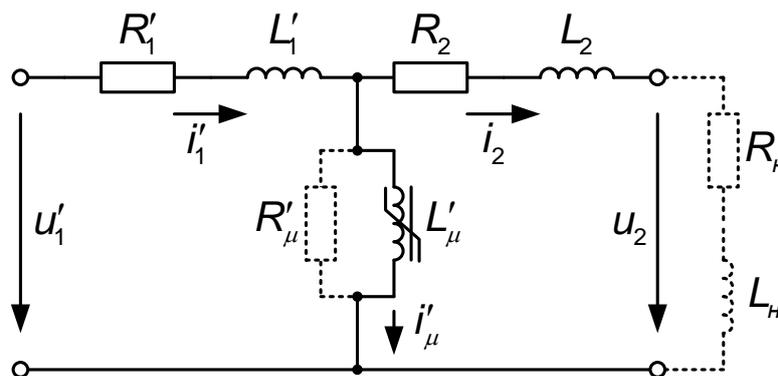


Рис. 1. Т-образная схема замещения трансформатора тока  
Fig. 1. T-shaped equivalent circuit of a current transformer

В упрощенной модели ТТ принято, что сопротивления первичной и вторичной обмоток ТТ ввиду их малости равны нулю. Таким образом, объектом моделирования становится только ветвь намагничивания с нелинейной индуктивностью  $L_\mu$ . По данной ветви протекает ток намагничивания  $i_\mu$ , являющийся разностью приведенного первичного  $i_1'$  и вторичного  $i_2$  токов ТТ. Сопротивление ветви намагничивания при синусоидальном токе намагничивания (работа на линейном участке ВАХ) может быть найдено по мгновенным значениям тока и напряжения, сдвинутым относительно друг друга на угол  $90^\circ$ :

$$X_\mu = \frac{u_2}{i_\mu} = \omega L_\mu, \quad (2)$$

где  $\omega = 2\pi f$  – циклическая частота переменного тока. Поскольку в данной работе исследуется режим с насыщением магнитопровода, т.е. режим нелинейных электрических цепей, то выражение (2) нельзя применить для всей ВАХ. Вместе с тем электродвижущая сила (ЭДС) вторичной обмотки, численно равная при отсутствии сопротивления вторичной обмотки напряжению  $u_2$ , описывается уравнением по закону электромагнитной индукции:

$$e_2 = u_2 = L_\mu \frac{di_\mu}{dt}, \quad (3)$$

где  $L_\mu = \frac{u_2}{i_\mu \omega}$  – нелинейная индуктивность сердечника ТТ, определяемая ВАХ.

В разработанной модели с общими блоками Simulink и SimPowerSystems (рис. 2) первичный ток приводится ко вторичной обмотке с помощью деления на коэффициент трансформации ТТ блоком Gain. Затем приведенный первичный и вторичный токи вычитаются, чтобы получить ток намагничивания:

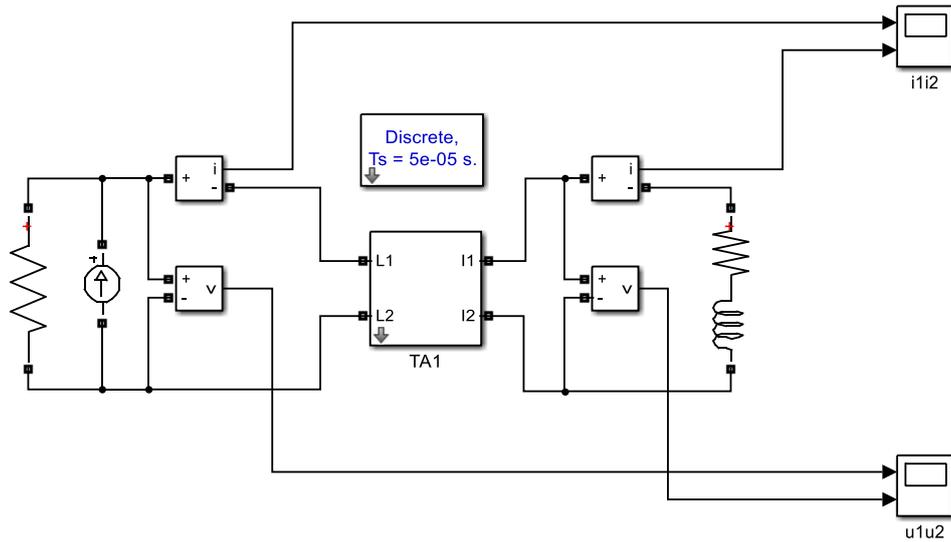
$$i_\mu = i_1' - i_2. \quad (4)$$

Для задания ВАХ используется блок Lookup Table. Из тока намагничивания  $i_\mu$  на входе блок Lookup Table позволяет получить величину ЭДС ТТ (напряжения на вторичной обмотке  $u_2$ ). Преобразование тока в напряжение ведется по заданной в блоке Lookup Table ВАХ в мгновенных значениях тока и напряжения. Так как по выражению (3) напряжение связано с током намагничивания через производную, после блока Lookup Table выполняется операция дифференцирования с помощью блока Derivative. Так как производная тока своей размерностью отличается от напряжения, для приведения величины производной в вольты выполняется деление сигнала на величину  $\omega$  в блоке Gain. Полученное напряжение (электродвижущая сила ТТ) подается на управляемый источник напряжения Controlled Voltage Source, включенный во вторичную обмотку.

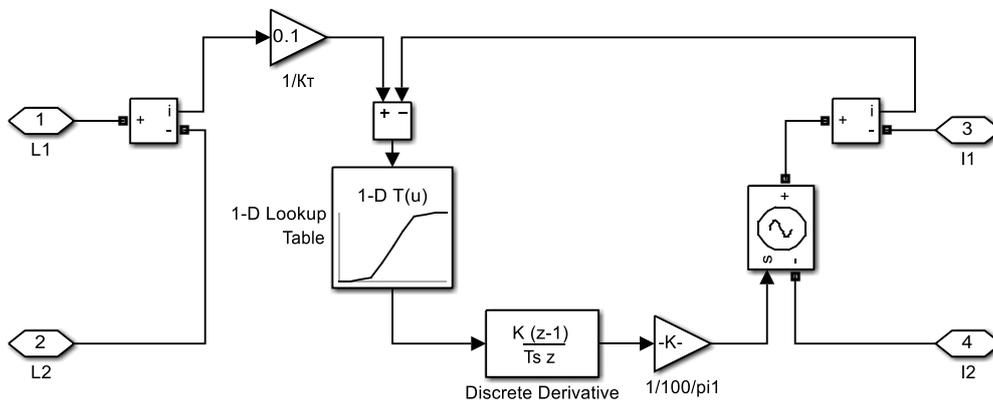
Вторая модель ТТ в среде MATLAB аналогична первой с тем отличием, что для построения используются блоки библиотеки Simscape (рис. 3). Для нахождения производной использована цепь с индуктивностью. Это вызвано отсутствием в среде Simscape штатного блока для нахождения производной сигнала. Блок PS-Simulink Converter необходим для перевода физического сигнала Simscape в сигнал для Simulink и его отображения.

Представляет отдельный интерес вопрос о корректности задания ВАХ в действующих значениях тока и напряжения (в соответствии с протоколом проверки ТТ) вместо ВАХ в мгновенных значениях, как этого требует выражение (3) для нахождения производной тока. Сравнение результатов снятия ВАХ в мгновенных и действующих значениях величин проведено на модели нелинейного сопротивления (рис. 4 а), которое задано зависимостью напряжения от тока в блоке Lookup Table.

В модели на рис. 4 б, где снимается ВАХ в мгновенных значениях тока и напряжения, в цепь с нелинейным сопротивлением включен блок управляемого источника тока, который позволяет регулировать значения подаваемого постоянного тока. В модели на рис. 4 с нелинейное сопротивление включено в



a



b

Рис. 2. Модель трансформатора тока (а), работающего на активно-индуктивную нагрузку, и подсистема с моделью трансформатора тока в среде MATLAB Simulink (b)  
Fig. 2. Model of a current transformer with active and inductive loads (a) and a subsystem with a model of a current transformer in MATLAB Simulink environment (b)

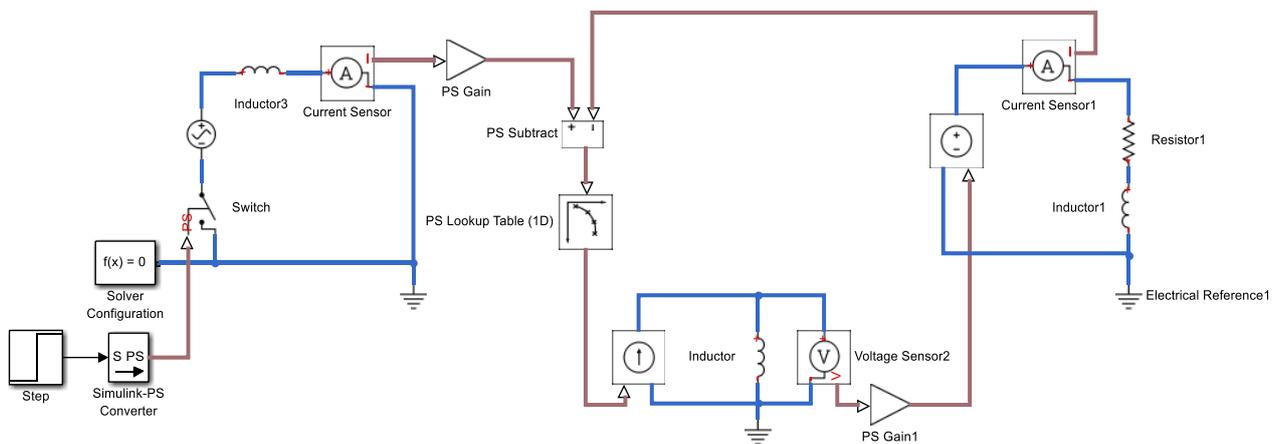


Рис. 3. Модель трансформатора тока в среде MATLAB Simscape  
Fig. 3. Model of a current transformer in MATLAB Simscape environment

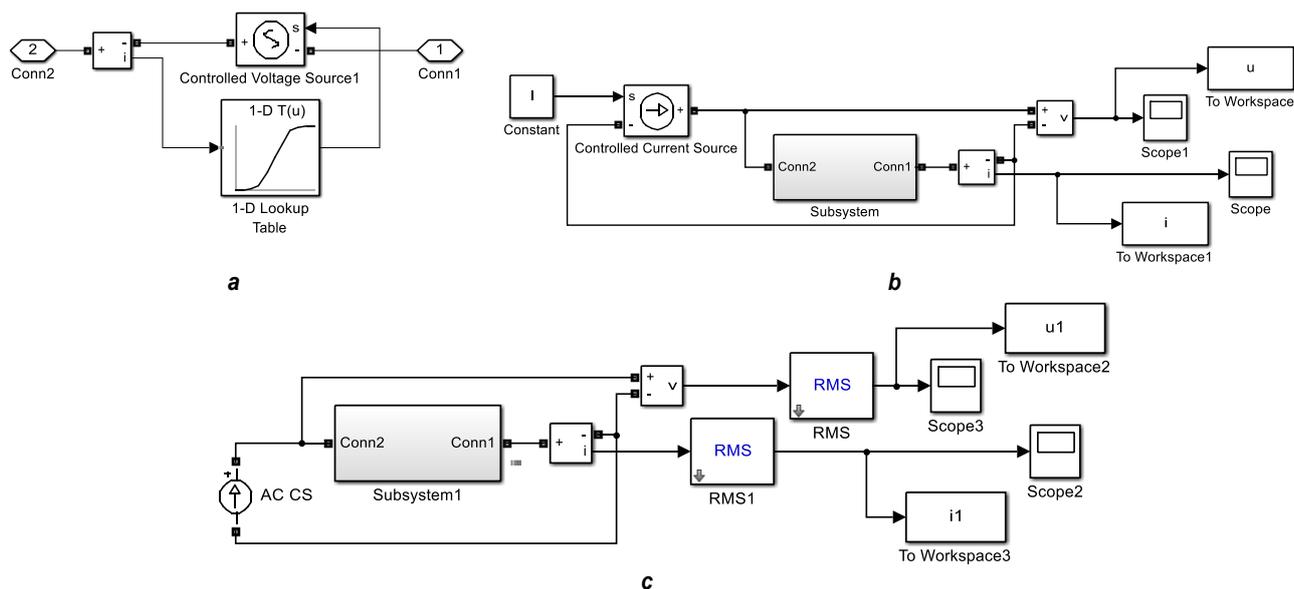


Рис. 4. Модель нелинейного сопротивления (а), получение вольтамперной характеристики в мгновенных значениях (b) и в действующих значениях (c)  
 Fig. 4. Model of nonlinear resistance (a), obtaining of current-voltage characteristics in instantaneous (b) and effective values (c)

цепь с синусоидальным источником переменного тока, а результаты измерений переводятся в действующие значения с помощью модулей расчета среднеквадратичных значений основной частоты RMS (номинальная максимальная синусоидальность, от англ. Rated Maximum Sinusoidal) [20].

В результате расчетных экспериментов получены ВАХ в мгновенных и действующих значениях на рис. 5. Установлено, что ВАХ в мгновенных значениях отличается в большую сторону от ВАХ в действующих значениях ориентировочно в 1,14 раза.

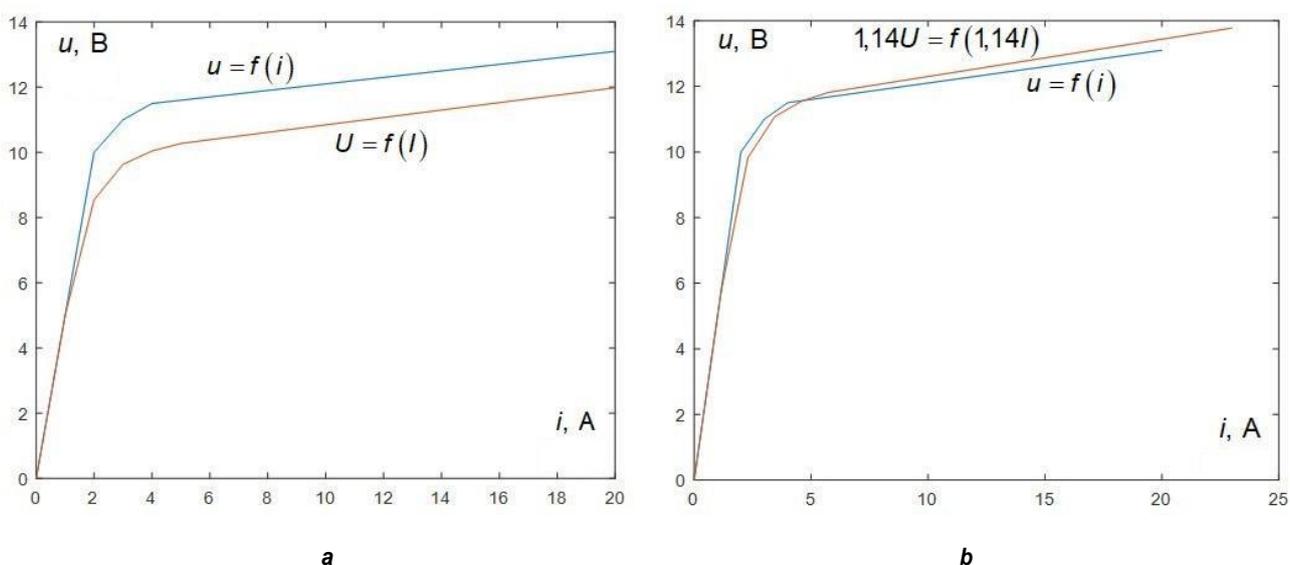


Рис. 5. Вольтамперные характеристики нелинейного сопротивления, снятые в мгновенных и действующих значениях (а), и те же характеристики после умножения вольтамперной характеристики в действующих значениях на коэффициент 1,14 по току и напряжению (b)  
 Fig. 5. Current-voltage characteristics of nonlinear resistance taken in instantaneous and effective values (a), the same characteristics after multiplication of the current-voltage characteristic in effective values by a factor of 1.14 for current and voltage (b)

Так как точки перегиба у двух характеристик на рис. 5 *b* отличаются несущественно, то ВАХ в модели ТТ можно задавать в действующих значениях (как их обычно и снимают в эксплуатации), умноженных на 1,14.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Обе разработанные модели ТТ проверены при имитации различных режимов работы: при номинальном первичном токе и замкнутой вторичной обмотке; при номинальном первичном токе и разомкнутой вторичной обмотке; при номинальном первичном токе и вторичной нагрузке, превышающей номинальную; при первичном синусоидальном токе КЗ; в переходном режиме КЗ с апериодической составляющей тока. Для моделирования принят ТТ типа ТПЛ-10. На рис. 6 представлены осциллограммы напряжения на вторичной обмотке при ее размыкании и протекании номинального тока по первичной обмотке ТТ.

При разомкнутой вторичной обмотке на осциллограмме (см. рис. 6) видны перенапряжения на разомкнутой вторичной обмотке, что соответствует реальным физическим процессам во вторичной обмотке при таком режиме.

На рис. 7 представлены осциллограммы первичного и вторичного токов ТТ при токе в первичной обмотке, превышающие номинальный.

На рис. 7 очевидно, что при первичном токе, значительно превышающем номинальный, наблюдается насыщение ТТ, а на осциллограмме вторичного тока видны срезы. Аналогичные эффекты получены при меньших первичных токах в случае задания вторичной нагрузки ТТ, превышающей номинальную.

На рис. 8 показаны осциллограммы первичного и вторичного токов ТТ при переходном процессе с апериодической составляющей.

Затухание апериодического тока во вторичной обмотке происходит быстрее, чем в первичном контуре ТТ (см. рис. 8), также наблюдаются искажения формы вторичного тока во время протекания апериодического тока за счет эффекта насыщения магнитопровода ТТ.

В целом характеристики вторичного тока в моделях Simulink и Simscape полностью совпадают, тем не менее модель с использованием блоков MATLAB Simscape на рис. 3 показала более стабильную работу во всех режимах.

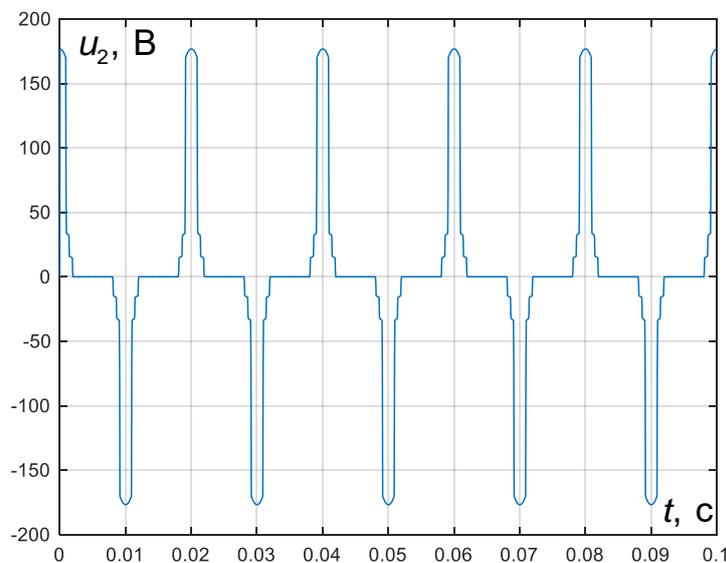


Рис. 6. Осциллограмма напряжения на вторичной обмотке трансформатора тока при разомкнутой вторичной обмотке и первичном токе 50 А

Fig. 6. Oscillogram of voltage on the secondary winding of the current transformer with an open secondary winding and a primary current of 50 A

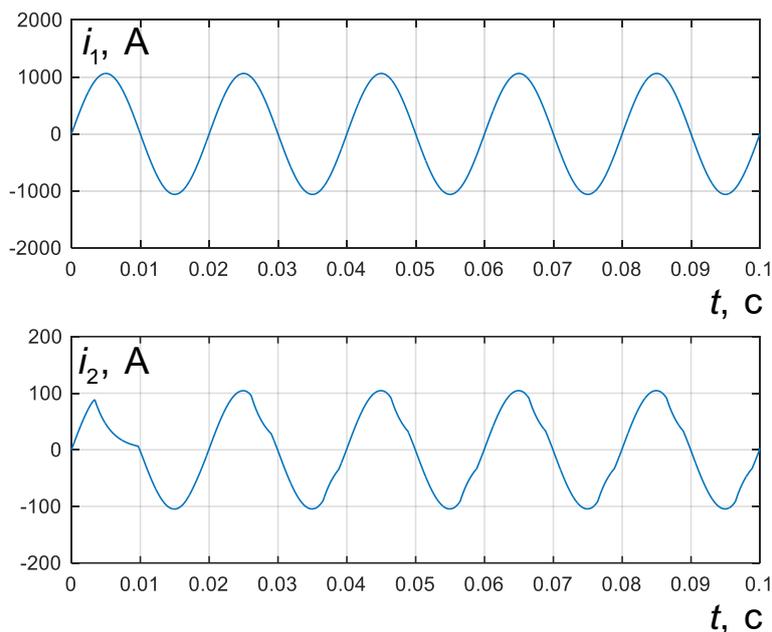


Рис. 7. Осциллограммы токов токов в первичной и вторичной обмотках трансформатора тока при первичном токе 750 А и вторичной нагрузке  $R_2 = 0,48$  Ом,  $L_2 = 1,146$  мГн  
Fig. 7. Oscillograms of currents in primary and secondary windings of the current transformer at a primary current of 750 A and a secondary load  $R_2 = 0.48$  Ohm,  $L_2 = 1.146$  mH

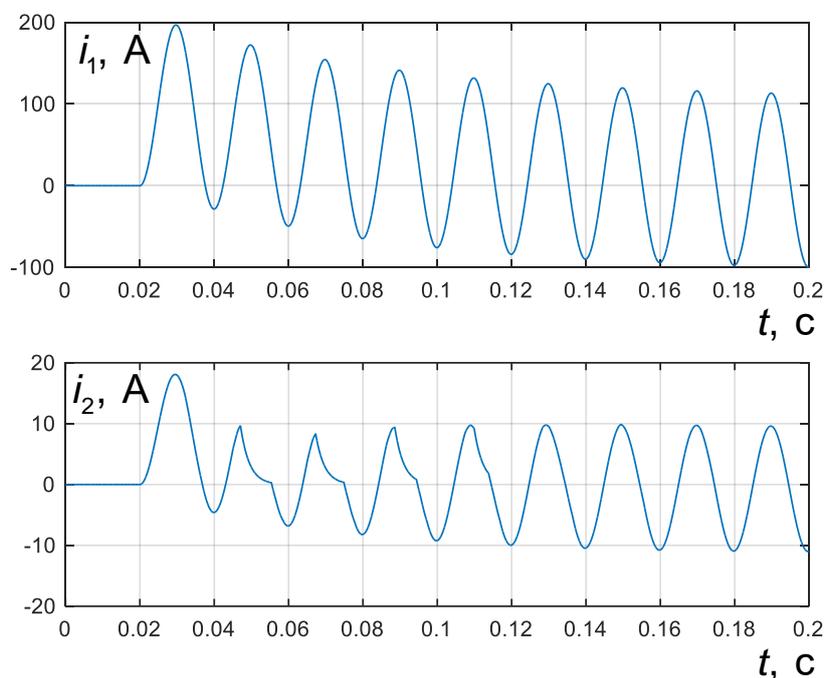


Рис. 8. Осциллограммы токов в первичной и вторичной обмотках трансформатора тока в переходном режиме с аperiodической составляющей тока при первичном токе 75 А и вторичной нагрузке  $R_2 = 0,96$  Ом,  $L_2 = 2,292$  мГн  
Fig. 8. Oscillograms of currents in primary and secondary windings of the current transformer in the transient mode with an aperiodic current component at a primary current of 75 A and a secondary load  $R_2 = 0.96$  Ohm,  $L_2 = 2.292$  mH

Для проверки разработанной модели ТТ придуманы и внедрены модели двух реальных ТТ: ТПЛ-10 с коэффициентом трансформации 50/5 и ТВЛМ-10 с коэффициентом

трансформации 75/5. На данных ТТ выполнено снятие ВАХ с помощью испытательного комплекса РЕТОМ-21 и построены ВАХ на математической модели (рис. 9).

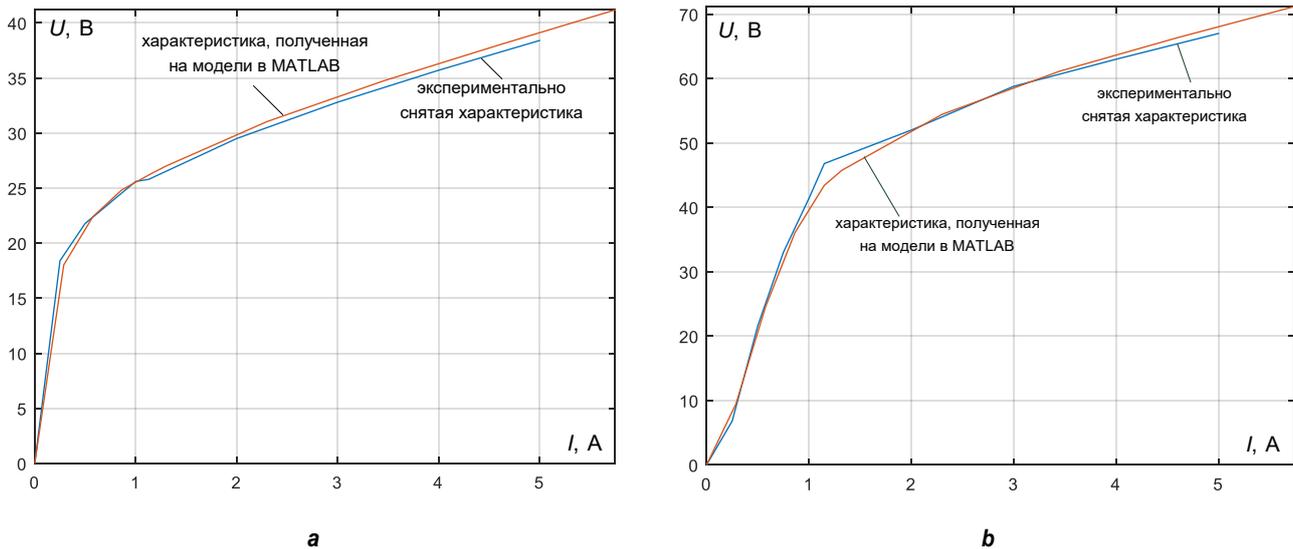


Рис. 9. Сравнение экспериментально снятой и полученной на модели вольтамперных характеристик трансформатора тока типа ТПЛ-10 50/5 (а) и ТВЛМ-10 75/5 (б)

Fig. 9. Comparison of current-voltage characteristics of TPL-10 50/5 (a) and TVLM-10 75/5 (b) types of the current transformer taken experimentally and obtained on the model

На рис. 9 видно, что ВАХ, снятые с помощью РЕТОМ-21 на обоих ТТ, совпадают с ВАХ, построенными на модели.

Также для верификации сняты осциллограммы вторичного тока на трансформаторе тока ТПЛ-10 в различных режимах (рис. 10):

1) при первичном токе 50 А в установившемся режиме синусоидального тока и вторичной нагрузке 9,6 Ом (рис. 10 а);

2) при первичном токе 10 А с апериодической составляющей и вторичной нагрузке 9,6 Ом (рис. 10 б);

3) при первичном токе 10 А с апериодической составляющей и вторичной нагрузке 39 Ом (рис. 10 с).

При помощи специальной программы в MATLAB получены осциллограммы в формате COMTRADE, которые подавались на ТТ от испытательного устройства РЕТОМ-51. COMTRADE является общепринятым форматом регистрации осциллограмм переходных процессов (аварий) в энергосистемах [21]. Вторичные токи при этом фиксировались осциллографом Fluke 190 с токовыми клещами.

Рис. 10 показывает, что снятые осциллограммы вторичных токов на реальном ТТ типа ТПЛ-10 идентичны графикам, полученным на упрощенной модели. Расхождение по ам-

плитудам токов составляет не более 10%. Вероятная причина расхождения – неучет активного сопротивления и индуктивного сопротивления рассеяния вторичной обмотки ТТ в упрощенной модели.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены результаты исследования по разработке упрощенной математической модели ТТ на основе его ВАХ в средах MATLAB Simulink и MATLAB Simscape. Предложенная модель позволяет исследовать работу ТТ в различных установившихся и переходных режимах работы. Для моделирования ТТ требуются данные только о коэффициенте трансформации и о ВАХ, что упрощает моделирование в сравнении с известными моделями ТТ на основе дифференциальных уравнений.

Разработанные модели проверены в различных режимах работы ТТ. Модель с использованием блоков MATLAB Simscape показала более стабильную работу во всех режимах. Установлено, что при задании ВАХ в модели необходимо действующие значения напряжения и тока умножать на коэффициент 1,14 для перехода к мгновенным значениям напряжений и токов.

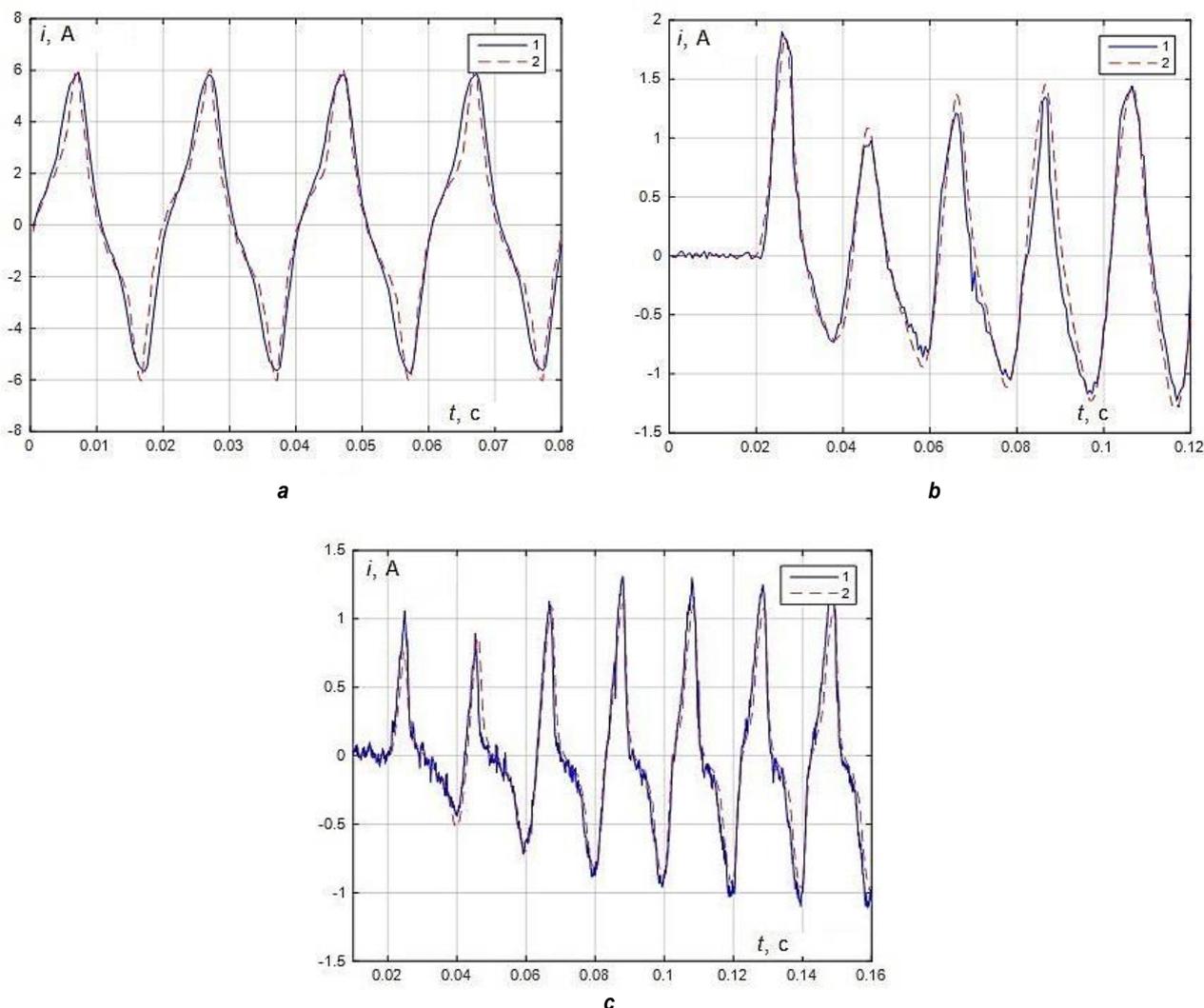


Рис. 10. Осциллограммы вторичного тока при первичном токе 50 А в установившемся режиме и вторичной нагрузке 9,6 Ом (а), при первичном токе 10 А с аperiodической составляющей и вторичной нагрузке 9,6 Ом (b) и при первичном токе 10 А с аperiodической составляющей и вторичной нагрузке 39 Ом (с): 1 – расчетные осциллограммы в MATLAB Simulink; 2 – осциллограммы, записанные осциллографом Fluke 190  
Fig. 10. Oscillograms of the secondary current at a primary current of 50 A in the steady state and a secondary load of 9.6 Ohm (a), at a primary current of 10 A with an aperiodic component and a secondary load of 9.6 Ohm (b) and at a primary current of 10 A with an aperiodic component and a secondary load of 39 Ohm (c): 1 – calculated oscillograms in MATLAB Simulink, 2 – oscillograms recorded by a Fluke 190 oscilloscope

Для верификации модели при помощи устройств РЕТОМ-21 и РЕТОМ-51 сняты ВАХ с ТТ типа ТПЛ-10-50/5, ТВЛМ-10-75/5. Сравнение экспериментальных ВАХ с характеристиками, построенными на модели, показало почти полное совпадение данных.

Для проверки разработанной модели рассмотрены режимы насыщения ТТ током КЗ с аperiodической составляющей. Данные режимы воспроизведены при помощи сгенерированных файлов осциллограмм COMTRADE на устройстве РЕТОМ-51, сняты осциллограммы вторичного тока на ТТ типа ТПЛ-10-

50/5. Снятые осциллограммы на реальных ТТ идентичны полученным на модели, расхождение в мгновенных значениях токов не превышает 10%.

Таким образом, полученная упрощенная модель ТТ позволяет анализировать режимы работы РЗ при насыщении ТТ и довольно корректно учитывать влияние на работу ТТ аperiodического тока. Планируется доработка модели для возможности учета остаточной индукции магнитопровода и приближенного учета полного сопротивления вторичной обмотки.



Список литературы

1. Илюшин П.В., Небера А.А., Федоров О.А. Перспективы развития и инструменты автоматизации задач эксплуатации устройств РЗА // Релейная защита и автоматизация. 2017. № 2. С. 28–37.
2. Долбилова Е.Г., Наконечный М.В. Основные направления развития систем релейной защиты и автоматики, проблемы и недостатки в микропроцессорной защите // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2012. Т. 1. С. 101–105.
3. Одинаев И.Н., Мурзин П.В., Паздерин А.В., Тащилин В.А., Шукало А. Анализ математических методов снижения погрешности трансформатора тока в режиме насыщения // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 2. С. 11–18. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-11-18](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-11-18)
4. Кужеков С.Л., Дегтярев А.А., Чередниченко К.В. Об обеспечении необходимой точности работы защитных трансформаторов тока в переходных режимах // Электрические станции. 2015. № 5. С. 53–60.
5. Кужеков С.Л., Дегтярев А.А., Дони Н.А., Шурупов А.А., Петров А.А., Костарев Л.Н. [и др.]. Анализ неселективных действий дифференциальных защит сборных шин при внешних однофазных коротких замыканиях с насыщением трансформатора тока в неповрежденной фазе // Релейная защита и автоматизация. 2019. № 1. С. 28–36.
6. Hunt R., Schaefer J., Bentert B. Practical experience in setting transformer differential inrush restraint // 61st Annual Conference for Protective Relay Engineers (TX, 1–3 April 2008). TX: IEEE, 2008. P. 118–141. <https://doi.org/10.1109/CPRE.2008.4515051>
7. Gorji R.T., Hosseini S.M., Abdoos A.A., Ebadi A. A hybrid intelligent method for compensation of current transformers saturation based on PSO-SVR // Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science. 2021. Vol. 65. No. 1. P. 53–61. <https://doi.org/10.3311/PPee.16248>
8. Zheng Yuping, Wu Tonghua, Hong Feng, Yao Gang, Chai Jimin, Wei Zhinong. Transmission line distance protection under current transformer saturation // Journal of Modern Power Systems and Clean Energy. 2021. Vol. 9. Iss. 1. P. 68–76. <https://doi.org/10.35833/MPCE.2019.000095>
9. Zaytseva N., Fedosov D. Development of an algorithm for improving the reliability of digital differential protection in transient modes // International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon) (Chelyabinsk, 22–24 September 2020). Chelyabinsk: IEEE, 2020. P. 195–199. <https://doi.org/10.1109/UralCon49858.2020.9216232>
10. Новаш И.В., Румянцев Ю.В. Реализация математической модели трехфазной группы трансформаторов тока в системе динамического моделирования // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2014. № 3. С. 19–28.
11. Миронюк Н.Е., Соболев А.С., Пудов В.И. Расчетная модель для оценки характеристик электромагнитных трансформаторов тока // Электричество. 2016. № 2. С. 19–28.
12. Kasztenny B., Mazereeuw J., DoCarmo H. CT saturation in industrial applications - analysis and application guidelines // 60th Annual Conference for Protective Relay Engineers (Texas, 27–29 March 2007). Texas: IEEE, 2008. P. 418–425. <https://doi.org/10.1049/cp:20080074>
13. Новожилов М.А., Пионкевич В.А. Разработка и исследование математических моделей трехфазных мостовых выпрямителей и инверторов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2019. Т. 23. № 3. С. 553–574. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-3-553-574>
14. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Суслов К.В., Полячкова М.А. Применение газотурбинной установки с прогнозными регуляторами в изолированной системе электроснабжения с асинхронной нагрузкой // Системы. Методы. Технологии. 2021. № 1. С. 48–54. <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2021-1-48-54>
15. Новаш И.В., Румянцев Ю.В. Упрощенная модель трехфазной группы трансформаторов тока в системе динамического моделирования // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. 2015. № 5. С. 23–38.
16. Тихонов А.И., Каржевин А.А., Подобный А.В., Дрязгов Д.Е. Разработка и исследование динамической модели однофазного трансформатора с сердечником из аморфной стали // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2019. Вып. 2. С. 43–51. <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2019.2.043-051>
17. Etingov D.A., Fedosov D.S. Development of restraint algorithm for improvement of reliability of transformer differential protection during external short circuits // International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon) (Chelyabinsk, 1–3 October 2019). Chelyabinsk: IEEE, 2019. P. 388–393. <https://doi.org/10.1109/URALCON.2019.8877653>
18. Этингов Д.А., Федосов Д.С. Применение дифференциально-фазного принципа для повышения надежности дифференциальной защиты трансформатора // Электроэнергетика глазами молодежи – 2019: матер. юбилейной X Междунар. науч.-техн. конф. (г. Иркутск, 16–20 сентября 2019 г.). Иркутск: Изд-во ИРГТУ, 2019. С. 79–82.
19. Мазалева Н.Н., Горбенко Ю.М. Схемы замещения трансформаторов тока и трансреакторов // Вологодские чтения. 2002. № 28. С. 15–17.
20. Tokić A., Milardić V., Kasumović M., Demirović D. Conversion of RMS into instantaneous transformer saturation characteristics – implementation in MATLAB/SPS-ST // International Review of Electrical Engineering. 2019. Vol. 14. No. 5. P. 367–374. <https://doi.org/10.15866/iree.v14i5.17298>
21. Кухарчук А.В., Живых А.А. Использование формата COMTRADE при анализе работы моделей MATLAB Simulink // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика. 2018. Т. 1. С. 141–145.

## References

1. Ilyushin P, Nebera A, Fedorov O. Development perspectives and automation tools for the tasks of relaying protection maintenance. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya*. 2017;2:28–37. (In Russ.)
2. Dolbilova EG, Nakonechny MV. Major trends in the development of relay protection and automation systems, problems and shortcomings in microprocessor protection. *Nauchno-tekhnicheskoe i ehkonomicheskoe sotrudnichestvo stran Aziatsko-Tihookeanskogo regiona v XXI veke*. 2012;1:101–105. (In Russ.)
3. Odinaev IN, Murzin PV, Pazderin AV, Tashchilin VA, Shukalo A. Analysis of mathematical methods for decreasing the saturated current transformer error. *Ehlektrrotekhnicheskie sistemy i komplekсы = Electrotechnical Systems and Complexes*. 2020;2:11–18. (In Russ.) [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-11-18](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-11-18)
4. Kuzhekov SL, Degtyarev AA, Cherednichenko KV. Ensuring required operation accuracy of protective current transformers in transient modes. *Elektricheskie stantsii = Power Technology and Engineering*. 2015;5:53–60. (In Russ.)
5. Kuzhekov SL, Degtyarev AA, Doni NA, Shurupov AA, Petrov AA, Kostarev LN, et al. Analysis of non-selective actions of busbar differential protection at external single-phase short circuits with saturation of current transformer in a healthy phase. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya*. 2019;1:28–36. (In Russ.)
6. Hunt R, Schaefer J, Bentert B. Practical experience in setting transformer differential inrush restraint. In: *61st Annual Conference for Protective Relay Engineers*. 1–3 April 2008, TX. TX: IEEE; 2008, p. 118–141. <https://doi.org/10.1109/CPRE.2008.4515051>
7. Gorji RT, Hosseini SM, Abdoos AA, Ebadi A. A hybrid intelligent method for compensation of current transformers saturation based on PSO-SVR. *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*. 2021;65(1):53–61. <https://doi.org/10.3311/PPEE.16248>
8. Zheng Yuping, Wu Tonghua, Hong Feng, Yao Gang, Chai Jimin, Wei Zhinong. Transmission line distance protection under current transformer saturation. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. 2021;9(1):68–76. <https://doi.org/10.35833/MPCE.2019.000095>
9. Zaytseva N, Fedosov D. Development of an algorithm for improving the reliability of digital differential protection in transient modes. In: *International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*. 22–24 September 2020, Chelyabinsk. Chelyabinsk: IEEE; 2020, p. 195–199. <https://doi.org/10.1109/UralCon49858.2020.9216232>
10. Novash IV, Rumyantsev YuV. Mathematical model implementation of wye-connected current transformers in dynamic simulation system. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij i energeticheskikh ob'edinenij SNG. Energetika = Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*. 2014;3:19–28. (In Russ.)
11. Mironyuk NE, Sobolev AS, Pudov VI. Calculation model for estimation accuracy of characteristics of electromagnetic transformers of the current. *Elektrichestvo*. 2016;2:19–28. (In Russ.)
12. Kasztenny B, Mazereeuw J, DoCarmo H. CT saturation in industrial applications - analysis and application guidelines. In: *60th Annual Conference for Protective Relay Engineers*. 27–29 March 2007, Texas. Texas: IEEE; 2008, p. 418–425. <https://doi.org/10.1049/cp:20080074>
13. Novozhilov MA, Pionkevich VA. Development and study of mathematical models of three-phase bridge rectifiers and inverters. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(3):553–574. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-3-553-574>
14. Bulatov YuN, Kryukov AV, Suslov KV, Polyachkova MA. Application of a gas turbine plant with predictive controllers in an isolated power supply system with an asynchronous load. *Sistemy. Metody. Tekhnologii = Systems. Methods. Technologies*. 2021;1:48–54. (In Russ.) <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2021-1-48-54>
15. Novash IV, Rumyantsev YuV. A simplified model of three-phase bank of current transformers in the dynamic simulation system. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij i energeticheskikh ob'edinenij SNG. Energetika = Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*. 2015;(5):23–38. (In Russ.)
16. Tikhonov AI, Karzhevin AA, Podobny AV, Dryazgov DE. Development and study of a dynamic model of single-phase amorphous steel core transformer. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta = Vestnik of the Ivanovo State Power Engineering University*. 2019;2:43–51. (In Russ.) <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2019.2.043-051>
17. Etingov DA, Fedosov DS. Development of restraint algorithm for improvement of reliability of transformer differential protection during external short circuits. In: *International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*. 1–3 October 2019, Chelyabinsk. Chelyabinsk: IEEE; 2019, p. 388–393. <https://doi.org/10.1109/URALCON.2019.8877653>
18. Etingov DA, Fedosov DS. Application of the phase comparison principle for improvement of reliability of the transformer differential protection. In *Elektroenergetika glazami molodezhi – 2019: materialy yubilejnoj X Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii = Electric power industry through the eyes of youth - 2019: materials of the anniversary 10th International scientific and technical conference*. 16–20 September 2019, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2019, p. 79–82. (In Russ.)
19. Mazaleva NN, Gorbenko YuM. Equivalent circuits for current transformers and transreactors. *Vologdinskije chteniya*. 2002;28:15–17. (In Russ.)
20. Tokić A, Milardić V, Kasumović M, Demirović D. Conversion of RMS into instantaneous transformer saturation characteristics – implementation in MATLAB/SPS-ST. *International Review of Electrical Engineering*. 2019;14(5):367–374. <https://doi.org/10.15866/iree.v14i5.17298>



21. Kukharchuk AV, Zhiviyh AA. Using the Comtrade format in analysis of work of the MATLAB Simulink models.

*Innovatsionnye tekhnologii: teoriya, instrumenty, praktika.* 2018;1:141–145. (In Russ.)

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Мухаметгалева Татьяна Сергеевна**,  
магистрант,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;  
e-mail: tatiana\_m98@mail.ru

**Tatiana S. Mukhametgaleeva**,  
Master's Degree Student,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;  
e-mail: tatiana\_m98@mail.ru

**Федосов Денис Сергеевич**,  
кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой электрических станций, сетей  
и систем,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;  
✉ e-mail: fedosov\_ds@istu.edu

**Denis S. Fedosov**,  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Head of the Department of Electric Stations,  
Networks and Systems,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;  
✉ e-mail: fedosov\_ds@istu.edu

#### Заявленный вклад авторов

Мухаметгалева Т.С. – разработка математических моделей трансформаторов тока в MATLAB Simulink; проведение расчетов; обработка результатов; измерение и обработка осциллограмм в натурных экспериментах на реальных трансформаторах тока.  
Федосов Д.С. – идея для разработки упрощенных математических моделей трансформаторов тока; внедрение программы в MATLAB; участие в разработке и проверке корректности моделей в MATLAB Simulink; измерение и обработка осциллограмм в натурных экспериментах на реальных трансформаторах тока.

#### Contribution of the authors

Mukhametgaleeva T.S. developed mathematical models of current transformers in MATLAB Simulink, performed calculations, processed the results, measured and processed the oscillograms in field experiments on real current transformers.  
Fedosov D.S. introduced an idea for the development of simplified mathematical models of current transformers, implemented the program in MATLAB, participated in the development of models and their validation in MATLAB Simulink, measured and processed the oscillograms in field experiments on real current transformers.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

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

#### Информация о статье

Статья поступила в редакцию 28.04.2021; одобрена после рецензирования 03.06.2021; принята к публикации 20.08.2021.

#### Information about the article

The article was submitted 28.04.2021; approved after reviewing 03.06.2021; accepted for publication 20.08.2021.



## Service life tests for storage batteries used in islanded power systems with renewable energy sources

Sergey G. Obukhov\*, Igor A. Plotnikov\*, Vladimir G. Masolov\*\*

\*Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

\*\*VDM-tekhnika LLC, Moscow, Russia

**Abstract:** We investigated the service life of storage batteries to provide recommendations on the design of energy storage systems used in islanded energy systems based on renewable power sources. The service life of maintenance-free, sealed lead-acid batteries produced by absorbed glass mat (AGM) technology was determined by endurance tests carried out by repeated charge/discharge cycles according to specified load profiles, implemented at a specialized Chroma Test System station. Three battery load profiles were simulated: one for the standard DC charge/discharge mode, and two for the charge/discharge modes from renewable energy sources. To this end, the actual data obtained from monitoring the operating modes of a wind power plant were used. It was found that the battery service life depends on the intensity of stress factors. Among them, the throughput factor has the most pronounced influence on the battery lifespan. To extend the service life of storage batteries, it is proposed to separate the charge/discharge modes in time. For batteries operated on renewable energy profiles, this approach decreases time intervals between full charges and at low battery levels, which increases the battery service life by 14%. A solution to designing an energy storage system for microgrids was proposed, which consists in the use of a combined double-circuit energy storage unit. An experimental prototype of such a unit with a power of 15 kW was developed. The use of a combined energy storage unit in the microgrid system: increases the battery service life by 20–30% compared to analogues; improves the static and dynamic stability of the local energy system with a response time of no more than 50 ms towards power change; allows a fuel replacement level of at least 25%; reduces the electricity cost by 25–30%.

### Abbreviations:

AGM – absorbed glass mat  
CES – combined energy storage unit  
CF – charge factor  
DC – direct current  
DCS – direct current power supply systems  
DGS – diesel generator set  
DOD – depth of discharge  
DR – discharge rate  
ICUF – installed capacity utilization factor  
PC – partial cycling  
RES – renewable energy source  
SB – storage battery  
SOC – state of charge  
TF – time between full charge  
TL – time at low state of charge  
WPP – wind power plant

**Keywords:** isolated energy system, renewable energy sources, energy storage, rechargeable battery

**For citation:** Obukhov SG, Plotnikov IA, Masolov VG. Service life tests for storage batteries used in islanded power systems with renewable energy sources. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(4):463–477. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-463-477>

УДК 621.311.26; 621.311.68

## **Исследование эксплуатационного ресурса аккумуляторных батарей в изолированных энергетических системах с возобновляемыми источниками энергии**

© С.Г. Обухов\*, И.А. Плотников\*, В.Г. Масолов\*\*

\*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

\*\*ООО «ВДМ-техника», г. Москва, Россия

**Резюме:** Цель – исследование эксплуатационного ресурса аккумуляторных батарей и разработка рекомендаций по построению систем накопления энергии для изолированных энергетических систем с возобновляемыми источниками энергии. Объектом исследований явились необслуживаемые, герметичные свинцово-кислотные батареи, выполненные по AGM-технологии. Срок службы аккумуляторных батарей определялся по результатам их ресурсных испытаний посредством заряда/разряда по заданным профилям нагрузки, реализованных на специализированной испытательной станции Chroma Test System. Для проведения экспериментов были смоделированы 3 профиля нагрузки батарей: один – для стандартного режима заряда/разряда на постоянном токе, и два – для режимов заряда/разряда от возобновляемых источников энергии, для формирования которых использовались фактические данные мониторинга рабочих режимов ветроэнергетической установки. Результаты экспериментов показали, что условия эксплуатации батарей по рассматриваемым профилям существенно различаются по значениям практически всех стресс-факторов, из которых определяющее влияние на срок службы батарей оказывает фактор пропускной способности. Для сохранения эксплуатационного ресурса аккумуляторных батарей предложено разделение во времени их режимов заряда/разряда. Результаты испытаний показали, что при эксплуатации батарей по профилям от возобновляемых источников энергии применение данного способа сокращает временные интервалы между полной зарядкой и при низком уровне заряда батарей, что обеспечивает повышение их срока службы до 14%. Предложено новое техническое решение по построению системы накопления энергии для MicroGrid в виде комбинированного двухконтурного накопителя энергии. Изготовлен экспериментальный образец комбинированного накопителя энергии на мощность 15 кВт. Применение комбинированного накопителя энергии в составе MicroGrid позволяет повысить эксплуатационный ресурс аккумуляторных батарей до 20–30% в сравнении с аналогами, обеспечивает статическую и динамическую устойчивость локальной энергетической системы со временем реакции на изменение мощности не более 50 мс, уровень замещения топлива не менее 25% и снижение стоимости электроэнергии на 25–30%.

### **Аббревиатуры:**

AGM – герметичные свинцово-кислотные батареи, выполненные по AGM-технологии

КНЭ – комбинированный накопитель энергии

CF – фактор заряда

DC – постоянный ток

СЭП – система электропитания на постоянном токе

ДГУ – дизель-генераторная установка

DOD – максимальная глубина разряда

DR – скорость разряда

КИУМ – коэффициент использования установленной мощности

ПК – частичный цикл

ВИЭ – возобновляемый источник энергии

АБ – аккумуляторная батарея

SOC – контроль остаточной емкости

TF – время работы между полной зарядкой

TL – время работы при низком уровне заряда

ВЭС – ветроэлектростанция

**Ключевые слова:** изолированная энергетическая система, возобновляемые источники энергии, накопитель энергии, аккумуляторная батарея

**Для цитирования:** Обухов С.Г., Плотников И.А., Масолов В.Г. Исследование эксплуатационного ресурса аккумуляторных батарей в изолированных энергетических системах с возобновляемыми источниками энергии. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 4. С. 463–477. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-463-477>



## INTRODUCTION

Islanded energy systems based on various generating units, such as microgrids<sup>1</sup>, are promising technologies for producing electrical energy. Microgrid technology was initially aimed at increasing the energy efficiency and environmental friendliness of autonomous power supply systems that incorporate diesel generator sets (DGS). Therefore, the developers relied on the use of renewable energy sources (RES), both wind power plants (WWP) and photovoltaic installations.

Microgrids can operate either in grid-connected or islanded mode. According to the *Navigant Research* analytical company, in 2018, the annual production of islanded and grid-connected microgrids amounted to 1,231 MW and 1,463 MW, respectively, with the total sales volume exceeding USD 3 billion. By 2027, the market demand for such microgrids is predicted to reach 4,230 MW and 11,576 MW, respectively, which will require investments of about USD 30 billion<sup>2</sup>.

Microgrid equipment has a large potential in Russia, whose eastern and northern areas are characterized by a low population density and a poorly-developed transport infrastructure. Relia-

ble power supply in decentralized regions is an urgent state task, confirmed by a number of legal and regulatory documents<sup>3,4</sup>.

Microgrids incorporate energy storage systems, which significantly improve energy efficiency by increasing the installed capacity utilization factor of renewable energy installations, reducing the DGS operating hours, and, accordingly, decreasing fuel and service costs<sup>5</sup>.

Storage batteries (SB) as energy storage systems satisfy the requirements of microgrids in terms of power range and energy storage duration. Despite significant progress in the industry of electrochemical power sources [2, 3], lead-acid SBs are mainly used for storing energy in microgrids due to their good value-for-money characteristics. In this work, we also consider this type of SBs.

The expenses involved with energy storage are quite significant, amounting from 25 to 60% of the total cost of an energy system [4, 5]. Therefore, it is important to increase the SB service life, which is typically lower than that of other microgrid components [6]. To that end, the main factors affecting the lifespan of SBs when used in microgrids should be identified. It should be noted that the operating modes of SBs incor-

<sup>1</sup> Off-grid renewable energy solutions to expand electricity access: an opportunity not to be missed. International Renewable Energy Agency. Available from: <https://www.irena.org/publications/2019/Jan/Off-grid-renewable-energy-solutions-to-expand-electricity-to-access-An-opportunity-not-to-be-missed> [Accessed 17th February 2021] / Off-grid renewable energy solutions to expand electricity access: an opportunity not to be missed // International Renewable Energy Agency [Электронный ресурс]. URL: <https://www.irena.org/publications/2019/Jan/Off-grid-renewable-energy-solutions-to-expand-electricity-to-access-An-opportunity-not-to-be-missed> (17.02.2021).

<sup>2</sup> What's Driving Microgrids toward a \$30.9B Market. *Microgrid Knowledge*. Available from: <https://microgridknowledge.com/microgrid-market-navigant/> [Accessed 17th February 2021] / What's Driving Microgrids toward a \$30.9B Market // Microgrid Knowledge [Электронный ресурс]. URL: <https://microgridknowledge.com/microgrid-market-navigant/> (17.02.2021).

<sup>3</sup> Decree "On national goals and strategic objectives of the development of the Russian Federation for the period up to 2024". *President of Russia*. Available from: <http://www.kremlin.ru/events/president/news/57425> [Accessed 17th February 2021] (In Russ.) / Указ «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» // Президент России [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kremlin.ru/events/president/news/57425> (17.02.2021).

<sup>4</sup> About the draft plan for the modernization of inefficient diesel, fuel oil and coal generation in hard-to-reach regions. *The Government of Russia*. Available from: <http://government.ru/orders/selection/401/35150/> [Accessed 17th February 2021] (In Russ.) / О проекте плана по модернизации неэффективной дизельной, мазутной и угольной генерации в труднодоступных регионах // Правительство России [Электронный ресурс]. URL: <http://government.ru/orders/selection/401/35150/> (17.02.2021).

<sup>5</sup> Kempener R, Borden E. Battery storage for renewables: market status and technology outlook. *International Renewable Energy Agency*. Available from: <https://cleanenergysolutions.org/resources/battery-storage-renewables-market-status-technology-outlook> [Accessed 20th February 2021] / Kempener R., Borden E. Battery storage for renewables: market status and technology outlook. International Renewable Energy Agency [Электронный ресурс]. URL: <https://cleanenergysolutions.org/resources/battery-storage-renewables-market-status-technology-outlook> (20.02.2021).

porated in microgrids differ significantly from those in direct current (DC) power supply systems (DCS).

The concept of charge/discharge cycles and methods for determining the SB service life are defined in regulatory documents<sup>6,7</sup>. In accordance with these requirements<sup>6,7</sup>, each cycle consists of sequential DC charge/discharge steps, and the SB lifetime is determined by a number of cycles, following which the SB capacity is reduced to 80% compared to the nominal value. When SBs are applied as part of DCSs, the charge/discharge currents vary across the ranges and profiles recommended by the SB producers, ensuring their maximal service life. In such systems, the main factors affecting the SB service life are temperature and the depth of discharge. These dependencies are given in the SB technical specification, allowing determination of their service life when used in a DCS.

A characteristic feature of microgrids is a change in the generated and consumed power values over a wide range, which determines the presence of ripples in the SB charge/discharge currents. Operation of SBs in the impulse current mode leads to a rapid degradation of their performance and a reduction in their service life [7]. The stochastic nature of generation leads to incomplete SB charge/discharge cycles with significant time intervals between full charges and at low residual charge rates, which also diminishes the SB lifetime [8, 9].

The main reasons for SB deterioration are physicochemical processes leading to electrolyte separation, water loss, electrode sulfur poisoning and corrosion, as well as loss of active mass. The intensity of these processes, or the deterioration rate, depends on both SB type and its operating conditions. SB deterioration mechanisms are described in [10, 11]. The main factors affecting these processes are defined in

[12, 13]. A qualitative estimation of the effect of these factors on SB degradation is given in [13, 14]. The aforementioned studies determined the main stress factors during SB operation, considerably accelerating degradation processes:

- temperature;
- charge factor (CF);
- throughput ( $Q_{thr}$ );
- discharge rate (DR);
- time between full charge (TF);
- time at low state of charge (TL);
- partial cycling (PC).

Determination of reliable quantitative relationships between stress factors, degradation mechanisms and the SB lifespan is a challenging research problem attracting widespread interest [15–26]. The high complexity of this problem is associated with the stochastic nature and mutual influence of stress factors affecting SB deterioration processes.

Mathematical modelling is the primary and, in many cases, sole way to predict the service life of SBs incorporated in microgrids. The majority of studies apply the following 3 types of models: performance or charge, voltage and lifetime. Performance models, where the SB service life is determined by the state of charge [15, 16], are used most widely. Voltage models measure the voltage at the SB cleats, on the basis of which losses and the degradation degree are calculated [17]. Service life models rely on empirical relationships linking stress factors with the SB service life [18, 19]. All these models can be used independently or integrated into a generalized SB model [20, 21]. A comparison of various models is presented in [22, 23]; the questions of practical application of SB models when selecting an optimal composition of microgrid equipment are considered in [16, 24, 25].

<sup>6</sup> GOST R MEK 60896-21-2013. Stationary lead-acid batteries. Part 21. Controlled valve type. Test methods. Introduced on 1st January, 2015. Moscow: Standartinform, 2015./ГОСТ Р МЭК 60896-21-2013. Батареи свинцово-кислотные стационарные. Часть 21. Типы с регулирующим клапаном. Методы испытаний. Введ. 01.01.2015. М.: Стандартинформ, 2015.

<sup>7</sup> GOST R MEK 61427-1-2014. Accumulators and storage batteries for renewable energy sources. General requirements and test methods. Part 1. Application in stand alone photovoltaic power systems. Introduced on 1st January, 2016. Moscow: Standartinform, 2016./ГОСТ Р МЭК 61427-1-2014. Аккумуляторы и аккумуляторные батареи для возобновляемых источников энергии. Общие требования и методы испытаний. Часть 1. Применение в автономных фотоэлектрических энергетических системах. Введ. 01.01.2016. М.: Стандартинформ, 2016.



The studies discussed above aimed to develop SB deterioration models that reliably and accurately describe the effect of stress factors on the SB lifespan. However, a serious limitation to the practical implementation of RES-based microgrids is a lack of approaches to extending the SB service life and creating efficient energy storage systems.

In this work, we investigate the service life of SBs operated in microgrids to propose recommendations on the design of energy storage systems for use in islanded RES energy systems.

## MATERIALS AND METHODS

Maintenance-free, sealed lead-acid batteries produced by AGM technology, CS3 battery trademark, GP 12120 model<sup>8</sup> were investigated. The main technical characteristics of CSB GP 12120 SB are given in tab. 1.

**Table 1.** CSB GP 12120 SB nominal characteristics  
**Таблица 1.** Паспортные характеристики АБ CSB GP 12120

Characteristic	Value
Rated voltage	12V (6 cells per battery)
Rated capacity	12 A · h, at a discharge of 0.05C to 1.75V per cell
Voltage under load	13.5 – 13.8V
Charge voltage	14.4 – 15V
Maximum discharge current	150/180A for 5 s
Short circuit current	378 A
Maximum charge current	3.6 A
Internal resistance	16 mΩ
Resource	Up to 260 cycles at 100% discharge
Lifetime when idle	Up to 5 years standby time at 25°C

Due to the high complexity involved with the mathematical description of electrochemical and thermal processes in SBs, direct experiment was chosen as the research method producing valid results.

The batteries were tested using a Chroma 17011 Test System (7208M-6-30 model). This system is used for testing battery cycle life by repeated charging/discharging according to the specified load profiles, allowing estimation of the battery capacity and internal resistance with an error of up to 0.02%<sup>9</sup>.

SB life tests were carried out according to the requirements for test methods established in regulatory documents<sup>6,7</sup>. During the experiments, the SB degradation rate was determined at various charge/discharge profiles. Three SB load profiles were simulated: one for the standard DC charge/discharge mode, and two for the charge/discharge modes when using a RES. The maximum values of the charge and discharge current for all profiles were limited to 3.6 A and 2.4 A, respectively, which correspond to a 3-hour discharge current according to the battery passport. The maximum depth of discharge (DOD) was taken equal to 80%. The state of charge (SOC) and gas release values were continuously monitored during the experiments. The tests were carried out at a temperature of 24 °C and an air humidity of 60–70%.

The selected parameters of charge/discharge profiles correspond to severe SB operating modes, leading to the fastest possible degradation of their operating characteristics. Therefore, in all the experiments, we applied a used SB, in which 3 cells of a similar residual capacity were selected according to the results of preliminary tests.

The profile of RES1 was formed using the actual data obtained by monitoring the operating modes of a WPP VDM-2kW wind turbine produced by VDM-tehnika LLC, installed at a wind farm in Dubna<sup>10</sup>. The WPP output power log data recorded at 1 second intervals were normalized to the required experimental conditions. The change in the SB charge/discharge current, corresponding to the RES1 profile, is shown in

<sup>8</sup> Official site of the CSB Energy Technology Co., Ltd. Available from: <https://www.csb-battery.com/> [Accessed 21st February 2021] / Официальный сайт компании CSB Energy Technology Co., Ltd. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.csb-battery.com/> (21.02.2021).

<sup>9</sup> Official site of the ZTS, Inc. Available from: <https://www.ztsinc.com/> [Accessed 21st February 2021] / Официальный сайт компании ZTS, Inc. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ztsinc.com/> (21.02.2021).

<sup>10</sup> Official site of VDM-technika LLC. Available from: <http://www.vdmtech.ru/> [Accessed 21st February 2021] / Официальный сайт компании «ВДМ – техника» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.vdmtech.ru/> (21.02.2021).

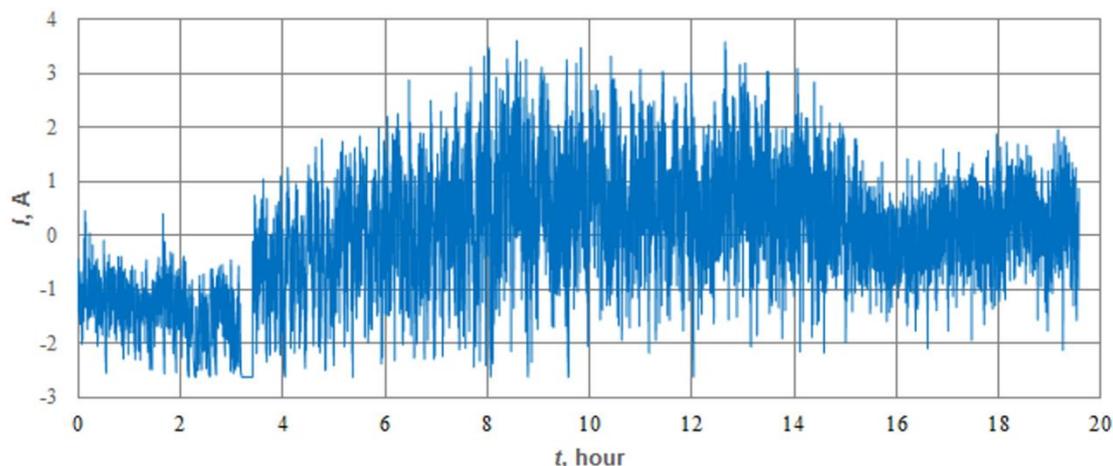


Fig. 1. Change in the charge/discharge current supplied to one battery cell according to the RES1 profile  
 Рис. 1. График изменения зарядно-разрядного тока, подаваемого на одну ячейку батареи по профилю ВИЭ1

fig. 1. The time interval of 1 profile comprises 19.57 h. The profile of RES2 was formed based on the same initial data; however, the discharge and charge modes were separated in time while maintaining the overall power balance.

To ensure comparable experimental conditions during RES profile tests, the following limitations were set. When the voltage reached 2.35 V (full charge), the SB was transferred to the discharge section of the profile. When the voltage dropped to 1.8 V (DOD = 80%), the SB was transferred to the charge section of the profile.

### DETERMINATION OF STRESS FACTORS

Since the ambient temperature was kept constant during the SB life tests, the temperature-related stress factors were not taken into account.

**The charge factor (CF)** is a dimensionless coefficient, its numerical values are determined through the ratio of the energy received and delivered by a SB, expressed in A · h per operation year:

$$CF = \frac{Ah_{\text{charged}}}{Ah_{\text{discharged}}} = \frac{\int I_{\text{bat}} \cdot H(I_{\text{bat}}) \cdot dt}{-\int I_{\text{bat}} \cdot H(-I_{\text{bat}}) \cdot dt}, \quad (1)$$

where H – the Heaviside function;  $I_{\text{bat}}$  – SB current, whose values are used to separate charge/discharge modes according to the given conditions:  $I_{\text{bat}} > 0$  – charge mode (charged),  $I_{\text{bat}} < 0$  – discharge mode (discharged).

Depending on the microgrid design and the methods used for controlling the microgrid mode, the CF value can vary within a wide range. Thus, each specific current value will have a corresponding optimal CF value under a certain combination with other stress factors. The CF value can be used to assess the efficiency of the SB voltage regulation system, as well as possible deterioration mechanisms. Very low CF values lead to intensification of the sulfation and acid separation processes; moreover, an imbalance in the battery and cell charges in the SB bank is possible. Higher CF values promote corrosion and the loss of water and active mass [14].

**The throughput factor  $Q_{\text{thr}}$**  is expressed through the normalized value of the SB annual discharge capacity:

$$Q_{\text{thr}} = -\frac{\int I_{\text{bat}} \cdot H(-I_{\text{bat}}) \cdot dt}{C_N}, \quad (2)$$

where  $C_N$  – the rated SB capacitance, A · h.

The effect of  $Q_{\text{thr}}$  factor on the SB service life can only be considered in combination with two other PC and TL stress factors. In general, higher  $Q_{\text{thr}}$  values contribute to the active mass

deterioration of the SB plates, their crumbling and degradation.

**The discharge rate** factor is applied to assess the effect of high discharge currents on the SB lifetime. The function of discharge current distribution is used for calculating DR, where 1% of the capacity from the total SB throughput ( $Q_{thr}$ ) is discharged. These distribution parameters are determined by dividing the entire range of discharge currents into  $M$  groups from the lowest  $I_1$  to the highest  $I_M$  current, with the subsequent determination of the corresponding frequency  $f_m$  to construct a distribution histogram. By combining adjacent current groups in the total amount  $L$ ,  $m$  groups with the  $I_m$  average current value, the  $t_m$  time interval and the  $f_m$  distribution frequency are extracted from the original histogram. These groups satisfy the following condition:

$$\sum_{m=M-L}^M I_m t_m = 0,01 \cdot Q_{thr} \cdot C_N \quad (3)$$

The DR value is determined by normalizing the average discharge current of all selected groups to the SB 10-hour rated discharge current  $I_{10}$ :

$$DR = \frac{\sum_{m=M-L}^M I_m \cdot f_m}{I_{10}} \quad (4)$$

A practical example of defining DR is discussed in [17]. Higher DR values increase the electrolyte temperature, losses and self-discharge current of a SB.

**Time between full charge.** SB average time between full charge (in hours) is determined by the following equation:

$$TF = \frac{\int H(90 - SOC) dt}{n_{90\%}} \quad (5)$$

where  $n_{90\%}$  is the number of events per year that

satisfy the condition:  $SOC(t) > 90\%$  and  $SOC(t - \Delta t) \leq 90\%$ .

The choice of  $SOC = 90\%$  as a criterion when calculating this factor is explained by the fact that determination of actual SOC values at high SB charge levels involve significant errors [14].

Higher TF values activate the process of forming insoluble sulfur compounds, which cannot be converted back into active substances. This ultimately leads to an irreversible decrease in the SB capacity relative to its rated value.

**The time at low state of charge.** The TL factor is the SB service time expressed as a percentage over the calculated period (usually per year) at a SOC value  $< 35\%$ :

$$TL = \frac{\int H(35 - SOC) dt}{\int dt} \cdot 100 \quad (6)$$

Long operation periods at low SOC levels accelerate sulfation and electrolyte decomposition. It should be noted that this stress factor has a significant negative impact on the service life of lead-acid SB, although its effect on other SB types is much smaller [14].

**Partial cycling.** The PC stress factor characterizes the weighted and averaged value of the battery discharge energy at different SOC levels to the total throughput, expressed as a percentage [17]:

$$PC = (A + 2 \cdot B + 3 \cdot C + 4 \cdot D + 5 \cdot E) / 5 \quad (7)$$

where the A – E coefficients represent the SB total discharge capacity in a specific SOC range, expressed as a percentage of the total annual discharge capacity.

The following SOC ranges are used to calculate the coefficient values in equation (7): 100–80% corresponds to coefficient A, 85–70% – to coefficient B, 70–55% – to coefficient C, 55–40% – to coefficient D, and 40–0% – to coefficient E. The following equation demonstrates an example of calculating coefficient A:

$$A = \frac{\int I_{bat} \cdot H(SOC - 85) \cdot H(100 - SOC) \cdot H(-I_{bat}) \cdot dt}{\int I_{bat} \cdot H(-I_{bat}) \cdot dt} \cdot 100 \quad (8)$$

The other coefficients are determined in a similar manner. The effect of the PC factor on SB deterioration is manifested similarly to that of the TL stress factor.

## RESULTS AND DISCUSSION

Fig. 2 shows a fragment of SB life tests registered for different load profiles. During the tests, the values of SB (I) charge/discharge current and cell voltage (V), as well as the calculated value of residual capacity (SOC) were recorded. The measurements were carried out with

an interval of 1 s and were recorded in a spreadsheet for further processing.

Fig. 2 presents the experimental data for 2 charge/discharge cycles according to the DC profile, as well as 1 operating cycle for each RES profile. Following 5 consecutive cycles according to the given load profiles, the SB residual capacity was measured<sup>7</sup>. The obtained experimental dependences of the change in the SB residual capacity (SOC) on operating cycle numbers ( $N_{\text{cycle}}$ ) and operating time ( $t$ ) are presented in fig. 3.

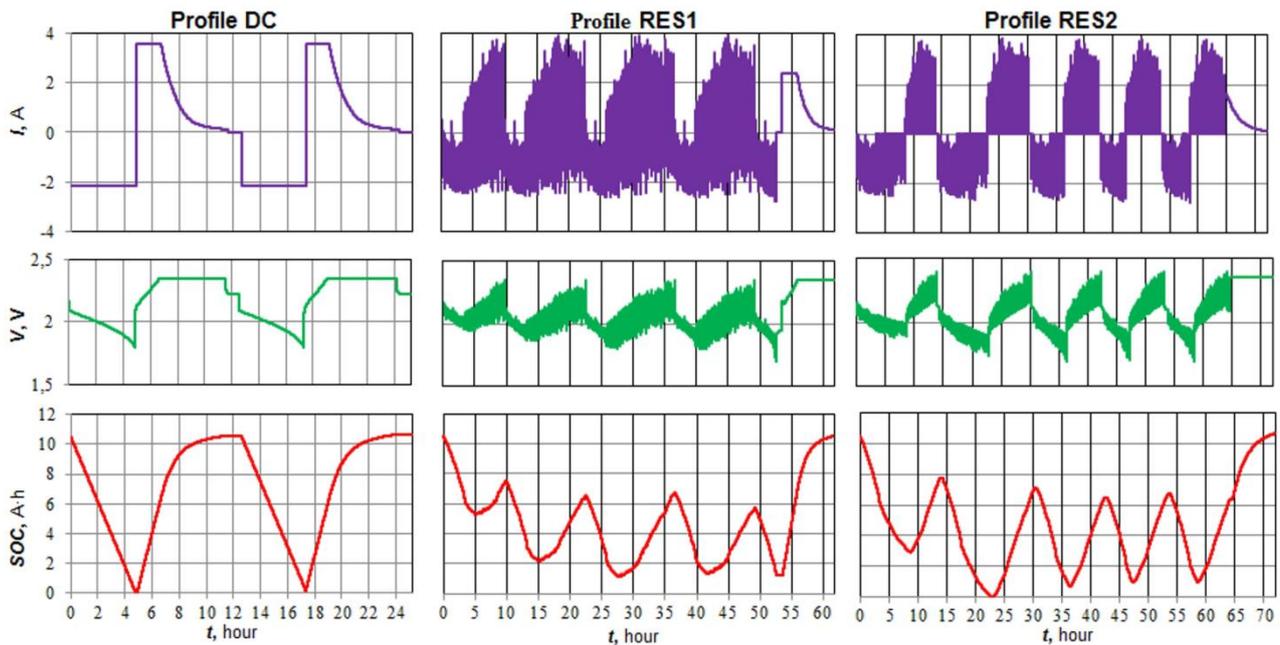


Fig. 2. Images obtained during storage battery life tests  
 Рис. 2. Регистрограммы ресурсных испытаний аккумуляторных батарей

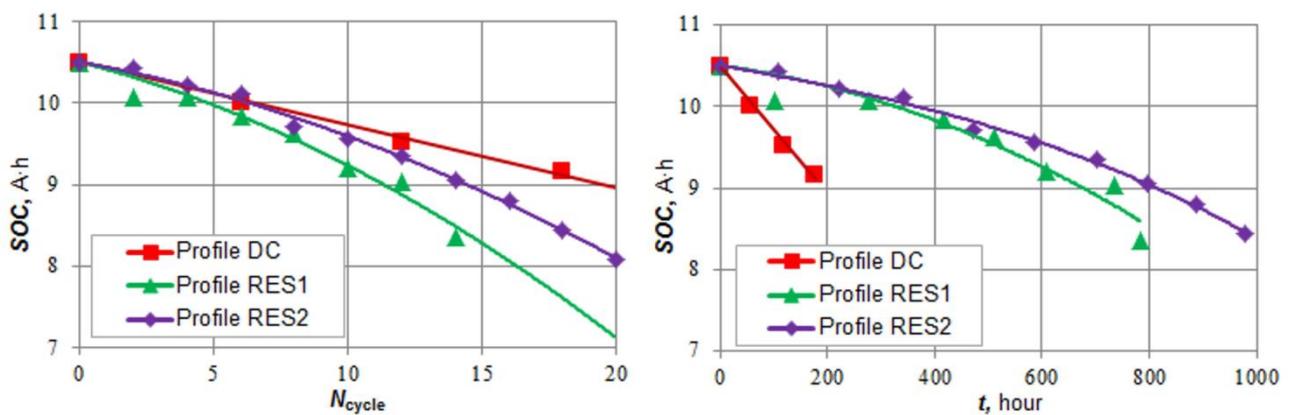


Fig. 3. Experimental dependences for the SB residual capacity on the number of operating cycles and operating time  
 Рис. 3. Экспериментальные зависимости остаточной емкости аккумуляторных батарей от числа рабочих циклов и времени эксплуатации



The experiments showed that the evaluation of the service life of SBs operated according to RES profiles based on the number of charge/discharge cycles and (or) the calendar operation from the data provided by the technical specification can lead to serious errors. This can be explained by significant differences in the full charge/discharge cycles between the DC and RES profiles, both in terms of duration and throughput. Performance models are more efficient [15, 16], allowing the residual battery life to be estimated by the amount of passed energy. Nevertheless, this method of determining the SB service life ignores the influence of other stress factors, thus leading to additional errors.

Our experiments revealed a significant effect of pulsed charge currents on SB degradation. When the battery is charged by pulsed currents, the voltage increases to the limiting values of 2.35–2.4 V per cell. Further charging will lead to a sharp growth in temperature and boiling off the electrolyte with irreversible consequences in terms of SB degradation [7]. In the experiments carried out on RES profiles, when the voltage increased to 2.35 V, the tested cell was switched to the discharge mode, ensuring its protection from overcharging. Voltage control and charging current limitation allow the SB to be protected from overcharge modes; however, this leads to an incomplete battery charge and increases the operating time between full charge and at a low SOC level (see fig. 2). In addition, due to significant voltage ripples (for the RES1 profile, in particular), it is rather difficult to provide reliable and accurate control of the SOC value, which is essential for the effective operation of the microgrid energy storage mode control system.

The efficient recovery and accurate SOC control (see fig. 2) can be ensured by the standard two-tier DC charging mode based on the current-voltage method (DC profile). However, this requires the SB to be in a low-current charging mode (up to one percent of the rated capacity  $C_N$ ) for a sufficiently long period of 5–7 h. The practical implementation of this SB charging mode in a RES-based microgrid is complicated by the excess electricity generated at such time intervals. The inability to consume this excess

energy will lead to a drop in the RES ICF and, accordingly, to deteriorated technical and economic characteristics of the entire energy system.

Tab. 2 presents the numerical values of the stress factors acting during SB operation for different load profiles. Fig. 4 shows the intensity of stress factors according by a gradation proposed in [14]: 1 – very low, 2 – low, 3 – medium, 4 – high, 5 – very high.

**Table 2.** SB operation stress factors for different load profiles

**Таблица 2.** Стресс-факторы эксплуатации аккумуляторных батарей для разных профилей нагрузки

Stress factor	DC profile	RES1 profile	RES2 profile
<i>CF</i>	1.0082	1.0018	1.0057
$Q_{thr}$	212	158	174
<i>DR</i>	2.08	1.04	0.99
<i>TF</i>	12.61	75.66	54.32
<i>TL</i>	21.15	59.25	39.09
<i>PC</i>	68.31	80.19	82.25

A comparison of the SB operating conditions according to the DC and RES profiles reveals significant differences between all stress factors. It can be seen that the throughput factor has a decisive influence on the SB service life. An increase in  $Q_{thr}$  values corresponds to a proportional acceleration of battery degradation; nevertheless, the battery life is determined by the cumulative impact of all stress factors. The obtained stress factors for the RES1 and RES2 profiles indicate a better retention of the SB service life when the charge/discharge modes are separated in time. The conducted tests demonstrated that the SB operating conditions according to these profiles are significantly different in terms of time between full charge (TF) and time at low state of charge (TL). These differences lead to a longer service life (by 10–14%) of SB, when operated by the RES2 profile even at higher  $Q_{thr}$  values.

The obtained results allowed us to develop recommendations for selecting an appropriate SB capacity and designing an efficient energy storage system for RES-based microgrids:

1. In RES-based microgrids, deep-discharge SBs demonstrating good cyclic characteristics should be applied. Among lead-acid batteries,

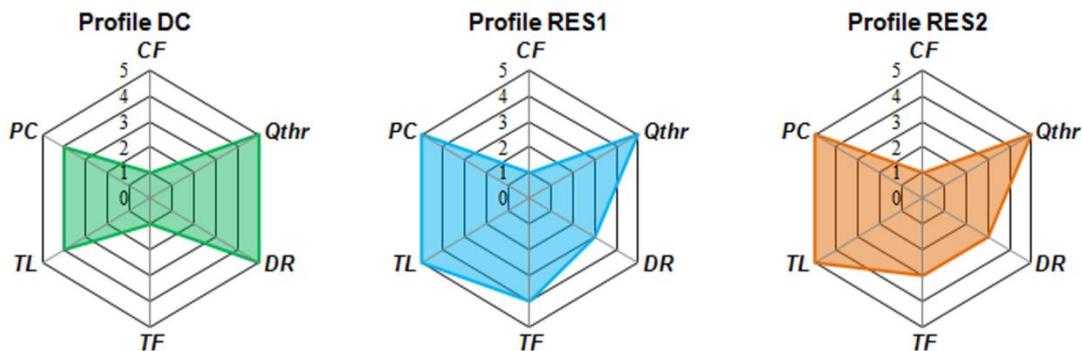


Fig. 4. Intensity of stress factors for different load profiles  
 Рис. 4. Сводные диаграммы интенсивности стресс-факторов для разных профилей нагрузки

gel batteries and those with armored electrodes (OPzV and OPzS) meet these requirements to a large extent.

2. The nominal capacity of the energy storage device  $Q_{BB}$  (W · h) should be selected according to the following conditions:

2.1. Covered energy consumption

$$Q_{BB} \geq \frac{E_L \cdot T_{BB}}{24 \cdot DOD \cdot \eta_{dch}},$$

where  $E_L$  – the average daily energy consumed by the load;  $T_{BB}$  – the required hours of power supply to consumers from the SB in the absence of electricity generated by a RES;  $\eta_{dch}$  – battery efficiency during the discharge phase, taking into account the converter efficiency.

2.2. Covered maximum power

$$Q_{BB} \geq 3 \cdot P_{max},$$

where  $P_{max}$  is the maximum electrical load.

3. The impact of high-amplitude pulse charge/discharge currents on the SB should be avoided, depending on the SB type. Thus, for lead-acid SBs, the charge/discharge currents should be limited to  $I_{bat} = 0.3 \cdot C_N$ .

4. The SB operating modes with the residual capacity below the maximum allowable discharge level should be minimized or avoided. For lead-acid SBs, optimal DOD values range from 30% to 40%.

5. SBs should be operated at a constant temperature using thermal containers equipped with a heating/air conditioning system.

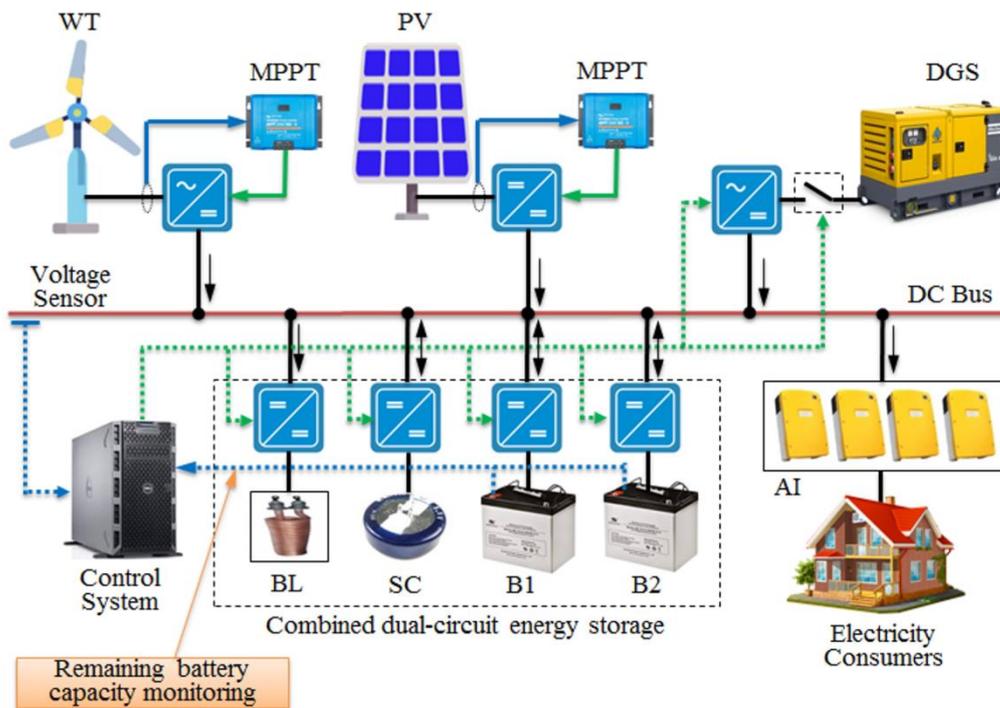
6. In cases where the energy storage circuit

consists of series-parallel SB chains, balancing devices should be used.

These recommendations minimize the influence of stress factors on the performance of SBs, thus ensuring their maximum possible service life.

On the basis of the results obtained, a novel technical solution for developing an energy storage system for a RES-based microgrid was proposed [26]. Fig. 5 describes the proposed solution, which is based on a combined energy storage unit (CES) consisting of a supercapacitor module (SC) and 2 identical storage units based on SBs, alternately operating in the charge/discharge mode and a ballast load (BL). Here, the energy storage is connected to the microgrid busbars to control the energy balance in the system by regulating the SB charge/discharge currents, supercapacitors and the ballast load. The application of 2 SB circuits makes it possible to implement the effective charging modes according to the "current-voltage" method and a precise control of the residual capacity. The supercapacitor module mitigates power ripples over short periods of time, and, accordingly, optimizes the magnitude of charge/discharge currents. The proposed solution is expected to increase the SB reliability and service life, as well as the RES ICUF. In addition, the design of an autonomous inverter (AI) can be significantly simplified.

An experimental prototypes of CES with a rated power of 15 kW was manufactured at the VDM-Tekhnika LLC; its declared parameters were experimentally confirmed when operated as part of a wind photo-diesel microgrid (fig. 6)<sup>10</sup>. The use of CES in a microgrid increases



**Fig. 5. The architecture proposed for hybrid energy systems based on renewable energy sources**  
**Рис. 5. Предлагаемая архитектура построения гибридных энергетических систем на основе возобновляемых источников энергии**



**Fig. 6. An experimental model of a combined energy storage unit installed in a wind photo-diesel power complex:**  
**1 – SB1 and SB2 modules; 2 – SB balancers; 3 – supercapacitor module; 4 – ventilation system;**  
**5 – climate control system**

**Рис. 6. Экспериментальный образец комбинированного накопителя энергии в составе ветрофото дизельного энергетического комплекса: 1 – модули АБ1 и АБ2; 2 – балансир АБ; 3 – суперконденсаторный модуль; 4 – система вентиляции; 5 – система климат-контроля**

the SB service life by 20–30%, ensures the static and dynamic stability of the local energy system with a response time to power changes of no more than 50 ms, provides a fuel substitution level of at least 25% and reduces the electricity cost by 25–30%.

## CONCLUSIONS

The conducted experimental studies allowed us to determine the numerical values of stress factors, which reflect the relationship between the operating conditions and service life of SBs

used in microgrids. On the basis of a comparative analysis of the effect of various stress factors on the SB service life, recommendations were formulated for selecting an optimal battery capacity, as well as for developing an efficient energy storage system for RES-based microgrids.

A novel technical solution for the design of an energy storage system was proposed, implemented and experimentally tested. This solution provides for an increase in the energy efficiency of RES-based microgrids.

## References

1. Salas V, Suponthana W, Salas RA. Overview of the off-grid photovoltaic diesel batteries systems with AC loads. *Applied Energy*. 2015;157:195–216. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.07.073>
2. Akinyele D, Belikov J, Levron Yo. Battery storage technologies for electrical applications: impact in stand-alone photovoltaic systems. *Energies*. 2017;10(11):1760. <https://doi.org/10.3390/en10111760>
3. May GJ, Davidson A, Monahov B. Lead batteries for utility energy storage: a review. *Journal of Energy Storage*. 2018;15:145–157. <https://doi.org/10.1016/j.est.2017.11.008>
4. Jakhрани AQ, Rigit ARH, Othman A-K, Samo SR, Kamboh SA. Life cycle cost analysis of a standalone PV system. In: *IEEE International Conference on Green and Ubiquitous Technology*. 7–8 July 2012, Bandung. Bandung: IEEE; 2012, p. 82–85. <https://doi.org/10.1109/GUT.2012.6344195>
5. Ataei A, Nedaei M, Rashidi R, Yoo Changkyoo. Optimum design of an off-grid hybrid renewable energy system for an office building. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. 2015;7:053123. <https://doi.org/10.1063/1.4934659>
6. Obukhov SG, Plotnikov IA, Ibrahim A, Masolov VG. Dual energy storage for hybrid energy systems with renewable energy sources. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2020;331(1):64–76. <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/1/2448> (In Russ.)
7. Hu Xiaosong, Martinez CM, Yang Yalian. Charging, power management, and battery degradation mitigation in plug-in hybrid electric vehicles: a unified cost-optimal approach. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2017;87(B):4–16. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.03.004>
8. Bordin C, Anuta HO, Crossland A, Gutierrez IL, Dent CJ, Vigo D. A linear programming approach for battery degradation analysis and optimization in offgrid power systems with solar energy integration. *Renewable Energy*. 2017;101:417–430. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.08.066>
9. Ruddell AJ, Dutton AG, Wenzl H, Ropeter C, Sauer DU, Merten J, et al. Analysis of battery current microcycles in autonomous renewable energy systems. *Journal of Power Sources*. 2002;112(2):531–546. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(02\)00457-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00457-3)
10. Brik K, Ammar F. Causal tree analysis of depth degradation of the lead acid battery. *Journal of Power Sources*. 2013;228:39–46. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.10.088>
11. Sauer DU, Garche J. Optimum battery design for applications in photovoltaic systems – theoretical considerations. *Journal of Power Sources*. 2001;95(1-2):130–134. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(00\)00642-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(00)00642-X)
12. Wenzl Heinz, Baring-Gould Ian, Kaiser R, Liaw Bor Yann, Lundsager P, Manwell J, et al. Life prediction of batteries for selecting the technically most suitable and cost effective battery. *Journal of Power Sources*. 2005;144(2):373–384. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.11.045>
13. Bindner H, Cronin T, Lundsager P, Manwell JF, Abdulwahid U, Baring-Gould I. Lifetime Modelling of Lead Acid Batteries. Available from: [https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/7710966/ris\\_r\\_1515.pdf](https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/7710966/ris_r_1515.pdf) [Accessed 17th February 2021].
14. Svoboda V, Wenzl H, Kaiser R, Jossen A, Baring-Gould I, Manwell J, et al. Operating conditions of batteries in off-grid renewable energy systems. *Solar Energy*. 2007;81(11):1409–1425. [https://scholarworks.umass.edu/mie\\_faculty\\_pubs/511](https://scholarworks.umass.edu/mie_faculty_pubs/511)
15. Lee M, Park J, Na SI, Choi HS, Bu BS, Kim J. An analysis of battery degradation in the integrated energy storage system with solar photovoltaic generation. *Electronics*. 2020;9(4):701. <https://doi.org/10.3390/electronics9040701>
16. Hlal MI, Ramachandaramurthy VK, Sarhan A, Pouryekt A, Subramaniam U. Optimum battery depth of discharge for off-grid solar PV/battery system. *Journal of Energy Storage*. 2019;26:100999. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100999>
17. Lujano-Rojas JM, Dufo-López R, Atencio-Guerra JL, Rodrigues EMG, Bernal-Aguistin JL, Catalão JPS. Operating conditions of lead-acid batteries in the optimization of



- hybrid energy systems and microgrids. *Applied Energy*. 2016;179:590–600. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.018>
18. Narayan N, Papakosta T, Vega-Garita V, Qin Zian, Popovic-Gerber J, Bauer P, Zeman M. Estimating battery lifetimes in Solar Home System design using a practical modelling methodology. *Applied Energy*. 2018;228:1629–1639. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.06.152>
19. Layadi TM, Champenois G, Mostefai M, Abbes D. Lifetime estimation tool of lead–acid batteries for hybrid power sources design. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2015;54:36–48. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2015.03.001>
20. Alsaidan I, Khodaei A, Gao W. A Comprehensive battery energy storage optimal sizing model for microgrid applications. In: *IEEE Transactions on Power Systems*. 2018;33(4):3968–3980. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2017.2769639>
21. Schiffer J, Sauer DU, Bindner H, Cronin T, Lundsager P, Kaiser R. Model prediction for ranking lead-acid batteries according to expected lifetime in renewable energy systems and autonomous power-supply systems. *Journal of Power Sources*. 2007;168(1):66–78. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.11.092>
22. Dufo-López R, Lujano-Rojas JM, Bernal-Agustín JL. Comparison of different Lead–acid battery lifetime prediction models for use in simulation of stand-alone photovoltaic systems. *Applied Energy*. 2014;115:242–253. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.11.021>
23. Dufo-López R, Cortés-Arcos T, Artañal-Sevil JS, Bernal-Agustín JL. Comparison of Lead-acid and Li-ion batteries lifetime prediction models in stand-alone photovoltaic systems. *Applied Sciences*. 2021;11(3):1099. <https://doi.org/10.3390/app11031099>
24. Moncecchi M, Brivio C, Mandelli S, Merlo M. Battery Energy Storage Systems in Microgrids: Modeling and Design Criteria. *Energies*. 2020;13(8):2006. <https://doi.org/10.3390/en13082006>
25. García-Vera YiE, Dufo-López R, Bernal-Agustín JL. Optimization of isolated hybrid microgrids with renewable energy based on different battery models and technologies. *Energies*. 2020;13(3):581. <https://doi.org/10.3390/en13030581>
26. Masolov VG, Masolov NV, Muravlev AI, Obukhov SG. *Standalone power supply system with a combined energy storage device*. Patent RF, no. 2726735; 2019. (In Russ.)

#### Список литературы

1. Salas V., Suponthana W., Salas R.A. Overview of the off-grid photovoltaic diesel batteries systems with AC loads // *Applied Energy*. 2015. Vol. 157. P. 195–216. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.07.073>
2. Akinyele D., Belikov J., Levron Yo. Battery storage technologies for electrical applications: impact in stand-alone photovoltaic systems // *Energies*. 2017. Vol. 10. Iss. 11. P. 1760. <https://doi.org/10.3390/en10111760>
3. May G.J., Davidson A., Monahov B. Lead batteries for utility energy storage: a review // *Journal of Energy Storage*. 2018. Vol. 15. P. 145–157. <https://doi.org/10.1016/j.est.2017.11.008>
4. Jakhрани A.Q., Rigit A.R.H., Othman A.-K., Samo S.R., Kamboh S.A. Life cycle cost analysis of a standalone PV system // *IEEE International Conference on Green and Ubiquitous Technology (Bandung, 7–8 July 2012)*. Bandung: IEEE, 2012. P. 82–85. <https://doi.org/10.1109/GUT.2012.6344195>
5. Ataei A., Nedaei M., Rashidi R., Yoo Changkyoo. Optimum design of an off-grid hybrid renewable energy system for an office building // *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. 2015. Vol. 7. P. 053123. <https://doi.org/10.1063/1.4934659>
6. Обухов С.Г., Плотников И.А., Ибрагим А., Масолов В.Г. Двухконтурный накопитель энергии для гибридных энергетических систем с возобновляемыми источниками энергии // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2020. Т. 331. No. 1. С. 64–76. <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/1/2448>
7. Hu Xiaosong, Martinez C.M., Yang Yalian. Charging, power management, and battery degradation mitigation in plug-in hybrid electric vehicles: a unified cost-optimal approach // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2017. Vol. 87. Part B. P. 4–16. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.03.004>
8. Bordin C., Anuta H.O., Crossland A., Gutierrez I.L., Dent C.J., Vigo D. A linear programming approach for battery degradation analysis and optimization in off-grid power systems with solar energy integration // *Renewable Energy*. 2017. Vol. 101. P. 417–430. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.08.066>
9. Ruddell A.J., Dutton A.G., Wenzl H., Ropeter C., Sauer D.U., Merten J., Orfanogiannis C., et al. Analysis of battery current microcycles in autonomous renewable energy systems // *Journal of Power Sources*. 2002. Vol. 112. Iss. 2. P. 531–546. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(02\)00457-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00457-3)
10. Brik K., Ammar F. Causal tree analysis of depth degradation of the lead acid battery // *Journal of Power Sources*. 2013. Vol. 228. P. 39–46. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.10.088>
11. Sauer D.U., Garche J. Optimum battery design for applications in photovoltaic systems – theoretical considerations // *Journal of Power Sources*. 2001. Vol. 95. Iss. 1-2. P. 130–134. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(00\)00642-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(00)00642-X)
12. Wenzl Heinz, Baring-Gould Ian, Kaiser R., Liaw Bor Yann, Lundsager P., Manwell J., et al. Life prediction of batteries for selecting the technically most suitable and cost effective battery // *Journal of Power Sources*. 2005. Vol. 144. Iss. 2. P. 373–384. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.11.045>
13. Bindner H., Cronin T., Lundsager P., Manwell J.F., Abdulwahid U., Baring-Gould I. Lifetime modelling of lead acid batteries. [Электронный ресурс]. URL: [https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/7710966/ris\\_r\\_1515.pdf](https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/7710966/ris_r_1515.pdf) (17.02.2021).

14. Svoboda V., Wenzl H., Kaiser R., Jossen A., Baring-Gould I., Manwell J., et al. Operating conditions of batteries in off-grid renewable energy systems // *Solar Energy*. 2007. Vol. 81. Iss. 11. P. 1409–1425.  
[https://scholarworks.umass.edu/mie\\_faculty\\_pubs/511](https://scholarworks.umass.edu/mie_faculty_pubs/511)
15. Lee M., Park J., Na S.I., Choi H.S., Bu B.S., Kim J. An analysis of battery degradation in the integrated energy storage system with solar photovoltaic generation // *Electronics*. 2020. Vol. 9. Iss. 4. P. 701.  
<https://doi.org/10.3390/electronics9040701>
16. Hlal M.I., Ramachandaramurthy V.K., Sarhan A., Pouryekt A., Subramaniam U. Optimum battery depth of discharge for off-grid solar PV/battery system // *Journal of Energy Storage*. 2019. Vol. 26. P. 100999.  
<https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100999>
17. Lujano-Rojas J.M., Dufo-López R., Atencio-Guerra J.L., Rodrigues E.M.G., Bernal-Agustín J.L., Catalão J.P.S. Operating conditions of lead-acid batteries in the optimization of hybrid energy systems and microgrids // *Applied Energy*. 2016. Vol. 179. P. 590–600.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.018>
18. Narayan N., Papakosta T., Vega-Garita V., Qin Zian, Popovic-Gerber J., Bauer P., Zeman M. Estimating battery lifetimes in Solar Home System design using a practical modelling methodology // *Applied Energy*. 2018. Vol. 228. P. 1629–1639.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.06.152>
19. Layadi T.M., Champenois G., Mostefai M., Abbes D. Lifetime estimation tool of lead–acid batteries for hybrid power sources design // *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2015. Vol. 54. P. 36–48.  
<https://doi.org/10.1016/j.simpat.2015.03.001>
20. Alsaidan I., Khodaei A., Gao W. A Comprehensive battery energy storage optimal sizing model for microgrid applications // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2018. Vol. 33. Iss. 4. P. 3968–3980.  
<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2017.2769639>
21. Schiffer J., Sauer D.U., Bindner H., Cronin T., Lundsager P., Kaiser R. Model prediction for ranking lead-acid batteries according to expected lifetime in renewable energy systems and autonomous power-supply systems // *Journal of Power Sources*. 2007. Vol. 168. Iss. 1. P. 66–78. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.11.092>
22. Dufo-López R., Lujano-Rojas J.M., Bernal-Agustín J.L. Comparison of different Lead–acid battery lifetime prediction models for use in simulation of stand-alone photovoltaic systems // *Applied Energy*. 2014. Vol. 115. P. 242–253.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.11.021>
23. Dufo-López R., Cortés-Arcos T., Artañ-Sevil J.S., Bernal-Agustín J.L. Comparison of Lead-acid and Li-ion batteries lifetime prediction models in stand-alone photovoltaic systems // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. Iss. 3. P. 1099. <https://doi.org/10.3390/app11031099>
24. Moncecchi M., Brivio C., Mandelli S., Merlo M. Battery energy storage systems in microgrids: modeling and design criteria // *Energies*. 2020. Vol. 13. Iss. 8. P. 2006. <https://doi.org/10.3390/en13082006>
25. García-Vera Y.E., Dufo-López R., Bernal-Agustín J.L. Optimization of isolated hybrid microgrids with renewable energy based on different battery models and technologies // *Energies*. 2020. Vol. 13. Iss. 3. P. 581. <https://doi.org/10.3390/en13030581>
26. Пат. 2726735 С1, Российская Федерация, Н02J 7/34 (2006.01). Система автономного электроснабжения с комбинированным накопителем энергии / В.Г. Масолов, Н.В. Масолов, А.И. Муравлев, С.Г. Обухов; заявитель и патентообладатель ООО «ВДМ-техника». Заявл. 23.08.2019; опублик. 15.07.2020. Бюл. № 20.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Sergey G. Obukhov**,  
Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Professor of the Department of Electric Power  
and Electrical Engineering,  
National Research Tomsk Polytechnic University;  
30 Lenin Ave., Tomsk 634050, Russia;  
✉ e-mail: serob99@mail.ru

**Igor A. Plotnikov**,  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Electric Power  
and Electrical Engineering, National Research Tomsk  
Polytechnic University;  
30 Lenin Ave., Tomsk 634050, Russia;  
e-mail: igorplt@tpu.ru

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Обухов Сергей Геннадьевич**,  
доктор технических наук, доцент,  
профессор Отделения электроэнергетики  
и электротехники,  
Национальный исследовательский Томский  
политехнический университет,  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия;  
✉ e-mail: serob99@mail.ru

**Плотников Игорь Александрович**,  
кандидат технических наук, доцент,  
доцент Отделения электроэнергетики  
и электротехники,  
Национальный исследовательский Томский  
политехнический университет,  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия;  
e-mail: igorplt@tpu.ru



**Vladimir G. Masolov,**  
Cand. Sci. (Eng.),  
Director General of VDM-Tekhnika LLC,  
27/3/206, Pavlovskaya St., Moscow 115093, Russia;  
e-mail: vdm-tech@mail.ru

**Масолов Владимир Геннадьевич,**  
кандидат технических наук,  
генеральный директор ООО «ВДМ-техника»;  
115093, г. Москва, ул. Павловская, 27/3/206, Россия;  
e-mail: vdm-tech@mail.ru

#### **Contribution of the authors**

The authors contributed equally to this article.

#### **Заявленный вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

#### **Conflict of interests**

The authors declare no conflict of interests.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

#### **Information about the article**

The article was submitted 15.06.2021; approved after reviewing 13.07.2021; accepted for publication 18.08.2021.

#### **Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 15.06.2021; одобрена после рецензирования 13.07.2021; принята к публикации 18.08.2021.



## Исследование зависимости расхода топлива теплофикационной газотурбинной установки от изменения тепловой нагрузки потребителей регионов, имеющих различные климатические условия, с учетом определения конструктивных характеристик теплообменного оборудования подогрева сетевой воды

© Е.Л. Степанова, П.В. Жарков

*Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Россия*

**Резюме:** Цель работы – исследовать величины напряжений в инструментальном материале составных концевых фрез для того, чтобы сравнить их с допустимыми напряжениями с позиций исключения разрушения фрез. Объектом исследования являются предельные величины напряжения в инструментальном материале разработанных составных концевых твердосплавных фрез, имеющих сопряженные между собой режущую часть и хвостовик. Режущая часть выполнена из инструментального твердого сплава, хвостовик – из конструкционной стали. Для определения напряжений использовано имитационное моделирование в программной среде ANSYS и Deform. Составляющие силы резания определены экспериментально. Принято, что чем меньше величины составляющих силы резания, тем меньше величины напряжений в инструментальном материале, и тем меньше возможность разрушения инструментального материала. Рассмотрено фрезерование труднообрабатываемой нержавеющей стали 12X18H10T со скоростью резания 70 м/мин, с глубиной резания 1 мм и подачей 0,1 мм/зуб. Рассмотрен инструментальный материал ВК8 без покрытий и с разными покрытиями, которые способствуют снижению составляющих сил резания. Доказано, что составной концевой фрезой диаметром 16 мм и длиной 92 мм можно обрабатывать детали с той же точностью, с какой их обрабатывают монолитной (цельной) концевой твердосплавной фрезой. С увеличением длины составных фрез точность обработки снижается, но при длинах 123 мм и 180 мм они применимы для изготовления деталей, используемых в общем машиностроении. Таким образом, составные концевые фрезы могут конкурировать с монолитными фрезами по точности изготовления и периоду стойкости, чем ограничивают существующую область применения монолитных фрез. При этом стоимость составных фрез меньше монолитных на 10–60%.

**Ключевые слова:** теплофикационная газотурбинная установка, математическая модель теплоэнергетической установки, расход топлива, тепловая нагрузка, конструктивные характеристики, теплообменное оборудование.

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0005, рег. № AAAA-A21-121012190004-5) Программы фундаментальных исследований РФ на 2021–2025 гг.

**Для цитирования:** Степанова Е.Л., Жарков П.В. Исследование зависимости расхода топлива теплофикационной газотурбинной установки от изменения тепловой нагрузки потребителей регионов, имеющих различные климатические условия, с учетом определения конструктивных характеристик теплообменного оборудования подогрева сетевой воды. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 4. С. 478–487. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-478-487>

## A study of the dependence between fuel consumption of a heat gas turbine and variation of heat loading of regional consumers having various climatic conditions taking into account determination of structural characteristics of heat exchanging equipment for grid water heating

Elena L. Stepanova, Pavel V. Zharkov

*Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia*

**Abstract:** The aim was to optimize the dependence between fuel consumption and heat loading of regional consumers varied due to climatic conditions, taking into account the determination of structural characteristics of heat exchanging equipment for grid water heating in a heat gas turbine. A heat gas turbine comprising two fuel combustion chambers, a

waste-heat boiler and a contact heat exchanger to heat makeup grid water was investigated. Scheme and parametric optimization studies were carried out using a mathematic model of a gas turbine created using a software and hardware system developed at the Department of Heat Power Systems of the Melentiev Energy Systems Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. The turbine operating conditions differing in heat loads in four suggested operating regions were studied. It was found that an increase in fuel consumption in the second combustion chamber was 29%–84% compared to that in the first combustion chamber. This rise was recorded when the turbine heat loading was increasing in the considered regions. Data analysis of the scheme and parametric optimization studies showed that, for operating conditions with a higher heat loading, it seems reasonable to ensure the maximum possible heating of makeup grid water as the loading rises. It is also recommended to slightly increase the heat surface area of the makeup grid water heater whose structural materials are less expensive than in a waste-heat boiler. It was shown that the suggested technical solution slightly increases specific capital investments while fully providing electrical and heat power to consumers. The obtained results can be used to select optimal technical solutions ensuring competitiveness in the operation of a heat gas turbine in regions with various climatic characteristics.

**Keywords:** cogeneration gas turbine unit, mathematical model of a heat power plant, fuel consumption, heat load, design characteristics, heat exchange equipment

**Acknowledgements:** The research was carried out under the State Assignment Project (no. FWEU-2021-0005, reg. no. AAAA-A21-121012190004-5) of the Fundamental Research Program of the Russian Federation for the period from 2021 to 2025.

**For citation:** Stepanova EL, Zharkov PV. A study of the dependence between fuel consumption of a heat gas turbine and variation of heat loading of regional consumers having various climatic conditions taking into account determination of structural characteristics of heat exchanging equipment for grid water heating. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(4):478–487. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-478-487>

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мировой энергетике, несмотря на развитие альтернативных источников энергии, работающие за счет сжигания природного газа газотурбинные установки (ГТУ) сохраняют свою востребованность и конкурентоспособность [1, 2]. Эксплуатация теплофикационных ГТУ, вырабатывающих электрическую и тепловую энергии, особенно актуальна для регионов с холодным климатом, где есть необходимость в обеспечении потребителей теплом. Для таких энергоустановок тепловая нагрузка напрямую зависит от климатических характеристик конкретного региона эксплуатации. Кроме того, ГТУ, работающие в режиме когенерации, позволяют повысить энергетическую и экономическую эффективности их работы [3–5]. Помочь в выборе оптимальных технических решений, определении конструктивных характеристик и оптимальных показателей режимов работы ГТУ могут исследования, выполненные с помощью современных средств математического моделирования и оптимизации [6–9]. В Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН) имеется разработан-

ный коллективом Отдела теплосиловых систем программно-вычислительной комплекс «Система машинного построения программ» (СМПП) [10]. Использование математических моделей энергоустановок, созданных с его помощью, позволяет выполнять конструкторские, поверочные расчеты и проводить оптимизационные исследования.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В России и во многих зарубежных странах достаточно регионов, чьи климатические условия требуют обеспечения потребителей не только электрической, но и тепловой энергией. Расход тепла на отопление и вентиляцию зданий различного назначения пропорционален разности температур воздуха внутри отапливаемых помещений и наружного воздуха. Для теплоэнергетических установок, к которым относятся и теплофикационные ГТУ, суммарная тепловая нагрузка сильно меняется с изменением температуры наружного воздуха. Расход топлива является одним из основных энергетических показателей режимов работы ГТУ и напрямую зависит от нагрузок: электрической и тепловой. В свою очередь, увеличение тепловой нагрузки ГТУ в случае необходимости может быть обеспе-

чено определенными техническими решениями, в частности изменением конструктивных характеристик теплообменного оборудования подогрева сетевой воды. Для правильного принятия подобных технических решений необходимо проводить исследования, позволяющие определить оптимальные энергетические, конструктивные и экономические характеристики исследуемого энергооборудования [11].

Исследования зависимости расхода топлива от изменения тепловой нагрузки потребителей регионов с разными климатическими условиями и учетом определения конструктивных характеристик теплообменного оборудования подогрева сетевой воды проводились на математической модели теплофикационной ГТУ с двумя камерами сгорания, ее технологическая схема показана на рис. 1.

ГТУ имеет воздушный компрессор, две камеры сгорания топлива (природного газа), газовую турбину, котел-утилизатор, контактный теплообменник, водоводяной подогреватель сетевой воды и насосные установки. Схема ГТУ предусматривает дожигание некоторого количества топлива в среде уходящих газов во второй камере сгорания. Так как после газовой турбины уходящие газы имеют достаточно высокую температуру ( $360^{\circ}\text{C}$  и выше) и объемную концентрацию окислителя  $\text{O}_2$  в пределах 13–16%, то такую среду можно использовать в качестве окислителя процесса горения. Применение данной технологии позволяет повысить тепловую мощность ГТУ и стабилизировать параметры сетевой воды, подогреваемой в котле-утилизаторе. Стоит отметить, что в схеме данной энергоустановки отсутствует

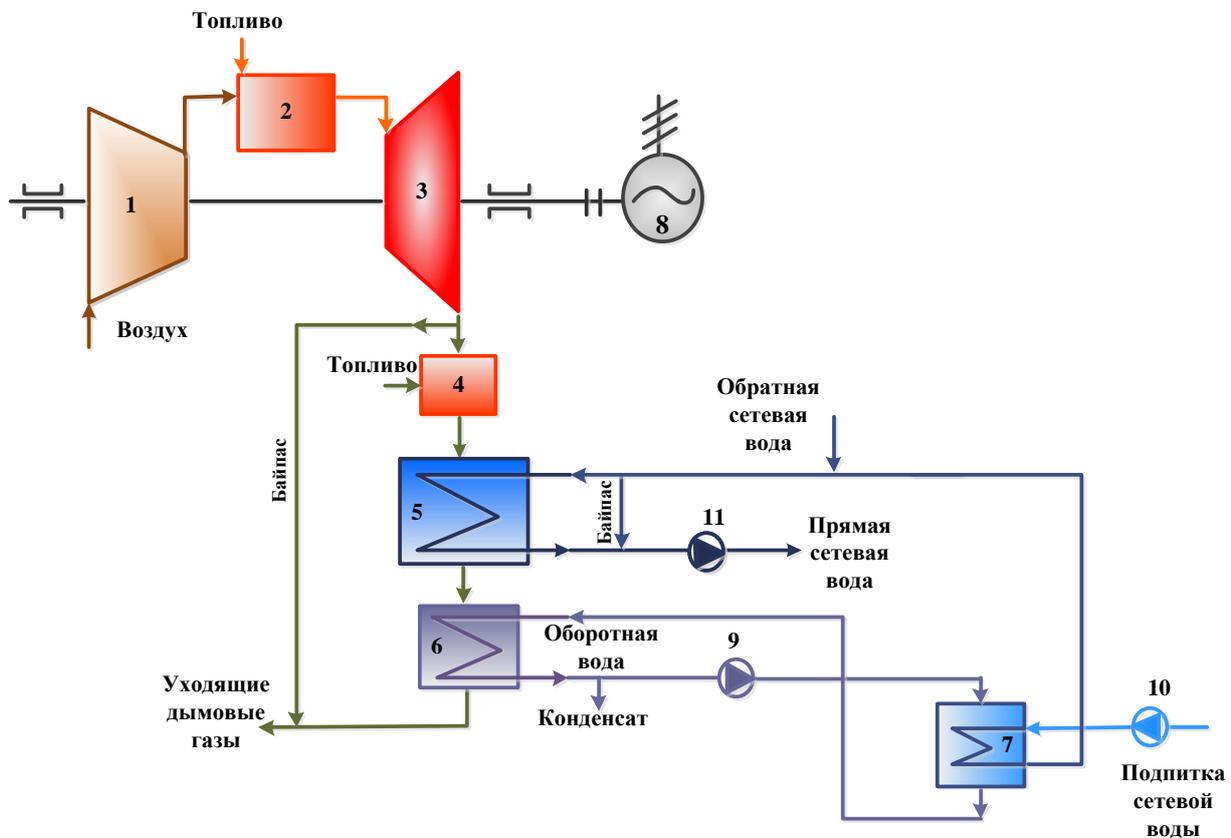


Рис. 1. Технологическая схема теплофикационной газотурбинной установки:

1 – воздушный компрессор; 2 – 1-я камера сгорания топлива; 3 – газовая турбина; 4 – 2-я камера сгорания топлива; 5 – котел-утилизатор; 6 – контактный теплообменник; 7 – водоводяной подогреватель сетевой воды; 8 – генератор; 9–11 – насосы

Fig. 1. Process flow diagram of the cogeneration gas turbine plant:

1 – air compressor; 2 – first fuel combustion chamber; 3 – gas turbine; 4 – second fuel combustion chamber; 5 – waste heat boiler; 6 – contact heat exchanger; 7 – water-to-water heater of network water; 8 – generator; 9–11 – pumps

пиковый источник тепла и его роль берет на себя именно вторая камера сгорания, регулируя повышение тепловой нагрузки. Описанная организация регулирования тепловой нагрузки позволяет использовать исследуемую установку как в случаях, когда необходима полная загрузка ГТУ по выработке электро- и теплоэнергии, так и в тех случаях, когда большая электрическая нагрузка потребителю не требуется, а в увеличенной тепловой нагрузке, напротив, есть потребность. Это вполне возможно при эксплуатации теплофикационной ГТУ в регионах с холодным климатом. Также регулирование тепловой нагрузки рассматриваемой ГТУ может осуществляться и следующим образом: часть уходящих газов отбирается по ходу газа после газовой турбины перед второй камерой сгорания и по байпасу, минуя котел-утилизатор и контактный теплообменник, подается в газовый тракт после контактного теплообменника, смешиваясь с охлажденными в нем дымовыми газами. Такое регулирование может использоваться в случаях, когда требуется полная загрузка энергоустановки по электрической нагрузке, а тепловая нагрузка при этом невелика. Кроме того, осуществляемый таким методом пропуск части продуктов сгорания по обводному каналу (байпасу) позволяет поддерживать температуру уходящих газов за контактным теплообменником примерно  $70-90^{\circ}\text{C}$ , что необходимо для исключения выпадения конденсата в газовом тракте и дымовой трубе. В технологической схеме установки для утилизации теплоты уходящих газов после котла-утилизатора применяется контактный теплообменник, в котором движутся в вертикальном противотоке продукты сгорания и распыленная оборотная вода [12–15]. Обратная вода, нагреваясь в контактном теплообменнике, далее перекачивается насосом по водному контуру, отдавая тепло в водоводяном теплообменнике подпиточной сетевой воде. Поскольку количество оборотной воды будет увеличиваться из-за конденсации водяных паров дымовых газов, то излишек конденсата в случае необходимости может сливаться в канализацию или подаваться в конденсатную линию после химводоподготовки.

Подробно общая конструкторско-проверочная математическая модель теплофикационной ГТУ описана в работе [16]. В настоящем исследовании авторами рассматривается конструкторская модель установки. В конструкторской математической модели ГТУ все математические модели ее оборудования базируются на конструкторских расчетах. Для ее построения использовались математические модели воздушного компрессора, камер сгорания топлива, газовой турбины, котла-утилизатора, контактного теплообменника, водоводяного подогревателя подпитки сетевой воды, насосов. В результате проведения расчетов с помощью конструкторской модели ГТУ определяются геометрические размеры теплообменников, номинальные расходы теплоносителей, давления газа на входе и выходе из газовой турбины, температура и давление газа на выходе из котла-утилизатора и контактного теплообменника, суммарная и полезная электрическая мощности ГТУ, а также расход электрической мощности на собственные нужды, общий расход топлива и расход топлива каждой камерой сгорания.

В настоящий период времени цены на продажу электроэнергии формируются в пределах ценовых зон на конкурентной основе механизмами оптового рынка электроэнергии и мощности, а в неценовых зонах – по регулируемым государством ценам [17]. Цены на тепловую энергию тоже имеют некоторую неопределенность в связи с начавшимся процессом перехода сектора теплоснабжения во многих регионах России на рыночные отношения [18]. Поэтому целесообразно учитывать возможные диапазоны изменения устанавливаемых для производителей энергии цен на энергетическую продукцию. Для определения оптимальных параметров режимов работы и конструктивных характеристик теплообменного оборудования ГТУ необходимо проводить оптимизационные исследования с использованием математической модели конструкторского расчета энергоустановки, где в качестве критерия оптимальности используется цена электроэнергии при заданных ценах используемого топлива и отпускаемого потребителю тепла, а



также внутренней норме возврата капиталовложений, определяющей уровень экономической эффективности инвестиционного проекта [19]. Математическая запись решаемой оптимизационной задачи имеет следующий вид:

$$\min_{Q^p, x_k, G_k^{mon}} U_{\text{элек}} \quad (1)$$

при условиях:

$$\begin{aligned} V_k &= f(x_k, G_k^{mon}, \gamma_k, Q^p); \\ H_k(x_k, G_k^{mon}, \gamma_k, Q^p) &\geq 0; \\ x_k^{\min} &\leq x_k \leq x_k^{\max}; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} N_k &= f(Q^p, G_k^{mon}, x_k, \gamma_k), \\ N_k^{\min} &\leq N_k \leq N_k^{\max}; \end{aligned}$$

$$K_{об} = f(V_k, d_{y\partial}), \quad (3)$$

$$K_{сум} = K_{об} + K_{см}, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} CRF(G_k^{mon}, Q^p, N_k, U^{men}, \\ U^{\text{элек}}, U^{mon}, K_{сум}, \mu) &= CRF_Z, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $U_{\text{элек}}$  – цена электрической энергии;  $x_k$  – вектор оптимизируемых параметров, определяющих конструктивные характеристики установки (параметры цикла, конструктивные параметры элементов и режимные параметры в номинальном режиме);  $G_k^{mon}$  – расход топлива;  $Q^p$  – расчетная тепловая нагрузка;  $V_k$  – вектор конструктивных характеристик;  $\gamma_k$  – вектор исходных данных, определяющих внешние условия работы установки;  $H_k$  –  $l_k$ -мерная векторная функция ограничений-неравенств;  $N_k$  – полная электрическая мощность;  $N_k^{\min}$ ,  $N_k^{\max}$  – минимальное и максимальное значения электрической мощности;  $K_{об}$  – капиталовложения в оборудова-

ние;  $d_{y\partial}$  – вектор удельных стоимостей элементов оборудования;  $K_{сум}$  – суммарные капиталовложения;  $K_{см}$  – капиталовложения, учитывающие непредвиденные затраты и затраты на строительство;  $CRF$  – внутренняя норма возврата капиталовложений;  $CRF_Z$  – заданное значение внутренней нормы возврата капиталовложений;  $U^{men}$  – цена тепловой энергии;  $U^{mon}$  – цена топлива;  $\mu$  – вектор параметров, определяющих условия кредитования и налогообложения;  $x_k^{\min}$ ,  $x_k^{\max}$  – векторы минимальных и максимальных значений  $x_k$ . Для проведения оптимизационных исследований были назначены оптимизируемые параметры, такие как расчетная тепловая нагрузка, расход топлива, внутреннее, наружные диаметры и шаги труб теплообменного оборудования, массовые скорости воды, расход оборотной воды, температура и давление газа на выходе из газовой турбины, давление газа на входе во вторую камеру сгорания, доля расхода газа, идущего по обводному каналу (байпасу). При проведении оптимизационных исследований вводились ограничения на максимальную электрическую мощность ГТУ в пределах 60 МВт. Устанавливались ограничения на неотрицательность температурных напоров и расходов рабочих тел ГТУ, на механические напряжения металла труб теплообменного оборудования. Таким образом, число оптимизируемых параметров конструкторской математической модели теплофикационной ГТУ равно 19, а ограничений-неравенств – 48.

Оптимизационные расчеты выполнялись для номинального режима работы теплофикационной ГТУ предположительно эксплуатируемой в четырех регионах с различными климатическими характеристиками. В частности, учитывались расчетные температуры наружного воздуха равные  $-22^{\circ}\text{C}$ ,  $-25^{\circ}\text{C}$ ,  $-38^{\circ}\text{C}$ ,  $-55^{\circ}\text{C}$  и продолжительности их стояния 75 ч, 106 ч, 173 ч и 380 ч, соответственно. Внутренняя норма возврата капиталовложений была принята равной 0,15, цена топлива – 100 долл/т у.т. Для каждого региона рассматривались два режима, отличающиеся

ценой тепла и, соответственно, тепловыми нагрузками, так как схемно-параметрическая оптимизация, проводимая с помощью конструкторской модели исследуемой теплофикационной ГТУ, показала, что при более высокой цене тепла выгодно увеличить отпуск тепла для его возможной реализации на рынке тепловой энергии. Цена тепла принималась для Режимов 1 и 2 равной 3,82 долл/ГДж, для Режимов 2 – 5,26 долл/ГДж. При расчете капиталовложений ГТУ была использована исходная экономическая информация [16, 19].

Создание математической модели ГТУ и проведение оптимизационных расчетов осуществлялись с помощью программно-вычислительного комплекса (ПВК), созданного сотрудниками Отдела теплосиловых систем ИСЭМ СО РАН [20]. Интерфейс ПВК с изображением интерактивной расчетной схемы теплофикационной ГТУ представлен на рис. 2.

Результаты проведенных оптимизационных расчетов, такие как основные показатели расчета режимов работы и конструктивные характеристики теплообменного оборудования подогрева сетевой воды теплофикационной ГТУ

для четырех регионов предполагаемой эксплуатации, представлены в табл. 1 и 2.

В результате анализа данных оптимизационных исследований зависимости расхода топлива от изменения тепловой нагрузки потребителей регионов с разными климатическими условиями и учетом определения конструктивных характеристик теплообменного оборудования подогрева сетевой воды, проводимых с помощью математической модели теплофикационной ГТУ с двумя камерами сгорания, могут быть сделаны следующие выводы: тепловая нагрузка, определенная в результате расчетов при цене тепла 3,82 долл/ГДж для Режимов 1 и 5,26 долл/ГДж для Режимов 2, увеличивается для первого и второго регионов предполагаемой эксплуатации в среднем на 24%, а для третьего и четвертого регионов с более холодным климатом – на 35%. Распределение расхода топлива между камерами сгорания происходит следующим образом: для всех рассматриваемых регионов в Режиме 1 первая камера сгорания загружается несколько больше, чем вторая, но загрузка постепенно меняется от 5,3% до 1,5% от региона с более теплым климатом к региону с более холодным климатом.

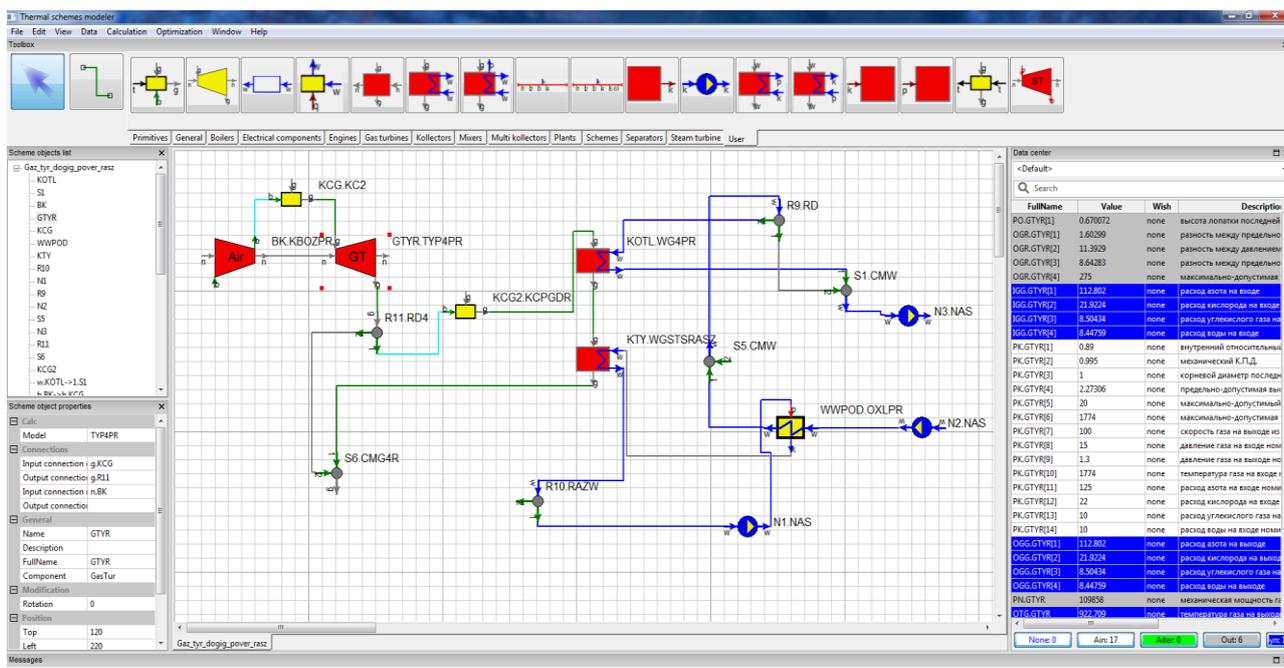


Рис. 2. Интерфейс программно-вычислительного комплекса с изображением интерактивной расчетной схемы теплофикационной газотурбинной установки  
 Fig. 2. Interface of the software and computer complex with the image of the interactive computational scheme of the cogeneration gas turbine plant



**Таблица 1.** Основные показатели расчета режимов работы теплофикационной газотурбинной установки для четырех регионов предполагаемой эксплуатации

**Table 1.** Main indicators for calculation of the operating modes of the cogeneration gas turbine plant for four regions of the proposed operation

Основные показатели	Условный номер региона эксплуатации / расчетная температура наружного воздуха, °С							
	1/-22		2/-25		3/-38		4/-55	
	режим							
	1	2	1	2	1	2	1	2
Тепловая нагрузка газотурбинной установки, ГДж/ч	675,0	871,5	695,1	931,3	757,8	1166,2	803,3	1248,9
Полезная электрическая мощность газотурбинной установки, МВт	60							
Общий расход топлива, т у.т.	37,68	45,92	38,11	48,57	39,40	57,23	40,14	59,89
Расход топлива 1-й камерой сгорания газотурбинной установки, т у.т.	19,36	20,04	19,55	20,35	20,04	20,29	20,22	21,09
Расход топлива 2-й камерой сгорания газотурбинной установки, т у.т.	18,32	25,88	18,56	28,22	19,36	36,95	19,92	38,8
Удельные капиталовложения, долл/кВт	570,0	680,0	580,0	695,0	660,0	770,0	735,0	850,0

**Таблица 2.** Конструктивные характеристики теплообменного оборудования подогрева сетевой воды теплофикационной газотурбинной установки для четырех регионов предполагаемой эксплуатации

**Table 2.** Design characteristics of the heat exchange equipment for heating network water of the cogeneration gas turbine plant for four regions of the proposed operation

Основные показатели	Условный номер региона эксплуатации / расчетная температура наружного воздуха, °С							
	1/-22		2/-25		3/-38		4/-55	
	режим							
	1	2	1	2	1	2	1	2
Площадь теплообменной поверхности котла-утилизатора, м <sup>2</sup>	3012	4010	3124	4100	3180	4268	3893	4340
Площадь теплообменной поверхности подогревателя подпитки сетевой воды, м <sup>2</sup>	748	845	765	896	795	1039	827	1120
Наружный/внутренний диаметр труб теплообменной поверхности котла-утилизатора, мм	50/47				52/49			
Поперечный/продольный шаг труб теплообменной поверхности котла-утилизатора, мм	103/63				102/62			
Наружный/внутренний диаметр труб теплообменной поверхности подогревателя подпитки сетевой воды, мм	16/14,5				18/16,5			
Поперечный/продольный шаг труб теплообменной поверхности подогревателя подпитки сетевой воды, мм	22/19				21/18			

Что касается режимов с увеличенной тепловой нагрузкой (Режим 2), то загрузка первой камеры сгорания остается примерно на том же уровне, что и в Режиме 1, так как полезная электрическая мощность во всех режимах определяется в районе 60 МВт, а во второй камере сгорания по мере увеличения тепловой нагрузки по регионам увеличивается расход топлива с 25,88 т у.т. до 38,9 т у.т., что составляет увеличение расхода топлива

во второй камере сгорания от 29% до 84% по сравнению с расходом топлива первой камеры сгорания. Рост удельных капиталовложений происходит по мере увеличения теплообменной поверхности котла-утилизатора и подогревателя подпитки сетевой воды. Для Режима 1 диапазон изменения удельных капиталовложений составляет от 570 долл/кВт до 735 долл/кВт для всех четырех регионов, а для Режима 2 – от 680 долл/кВт до

850 долл/кВт. В свою очередь, для Режима 1 рост площади теплообменной поверхности котла-утилизатора от первого региона к четвертому составил порядка 23%, площади теплообменной поверхности подогревателя подпитки сетевой воды – около 10%. Для Режима 2 изменение площади теплообменной поверхности котла-утилизатора – около 8%, площади теплообменной поверхности подогревателя подпитки сетевой воды – около 25%. То есть схемно-параметрическая оптимизация режимов работы и конструктивных показателей оборудования теплофикационной ГТУ показала, что для режимов работы с более высокой тепловой нагрузкой (Режим 2), по мере ее роста, целесообразно обеспечить максимально возможный нагрев подпиточной сетевой воды и несколько больше увеличивать площадь поверхности нагрева подогревателя подпитки сетевой воды, материалы для изготовления которого являются менее дорогостоящими, чем для котла-утилизатора, тем самым обеспечив относительно невысокий прирост удельных капиталовложений при полном обеспечении потребителей электрической и тепловой энергиями.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере математической модели теплофикационной ГТУ, имеющей две камеры сгорания топлива, котел-утилизатор и контактный теплообменник для подогрева подпиточной сетевой воды, проведены оптимизационные исследования зависимости расхода топлива от изменения тепловой нагрузки потребителей регионов с разными климатическими условиями и учетом определения

конструктивных характеристик теплообменного оборудования подогрева сетевой воды. Расчеты выполнялись на конструкторской математической модели ГТУ, созданной с помощью разработанного сотрудниками Отдела теплосиловых систем ИСЭМ СО РАН программно-вычислительного комплекса. В работе рассматривались режимы работы установки в четырех предполагаемых регионах эксплуатации. Режимы отличались тепловыми нагрузками. Результаты исследований показали, что увеличение расхода топлива во второй камере сгорания составляет по мере роста тепловой нагрузки ГТУ рассматриваемых регионов эксплуатации от 29% до 84% по сравнению с расходом топлива первой камеры сгорания. Результаты схемно-параметрической оптимизации позволили сделать вывод, что для режимов работы ГТУ с более высокой тепловой нагрузкой, по мере ее роста, целесообразно обеспечить максимально возможный нагрев подпиточной сетевой воды и несколько больше увеличивать площадь поверхности нагрева подогревателя подпитки сетевой воды, цена материалов для изготовления которого ниже, чем для котла-утилизатора, таким образом, давая относительно невысокий прирост удельных капиталовложений при полном обеспечении потребителей электрической и тепловой энергиями. Результаты исследований могут использоваться при подборе оптимального сочетания схемно-параметрических решений, обеспечивающих конкурентоспособность теплофикационной ГТУ, эксплуатируемой в регионах с различными климатическими характеристиками.

## Список литературы

1. Boyce M.P. An overview of gas turbines // Gas Turbine Engineering Handbook (Fourth Edition). 2012. P. 3–88. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-383842-1.00001-9>
2. Al-attab K.A., Zainal Z.A. Externally fired gas turbine technology: a review // Applied Energy. 2015. Vol. 138. P. 474–487. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.049>
3. Yang Xiaochen, Li Hongwei, Svendsen Svend. Evaluations of different domestic hot water preparing methods with ultra-low-temperature district heating // Energy. 2016. Vol. 109. P. 248–259. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.04.109>
4. Liu Xuezhi, Wu Jianzhong, Jenkins N., Bagdanavicius A. Combined analysis of electricity and heat networks // Applied Energy. 2016. Vol. 162. P. 1238–1250. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.102>
5. Leitner B., Widl E., Gawlik W., Hofmann R. A method for technical assessment of power-to-heat use cases to couple local district heating and electrical distribution grids // Energy. 2019. Vol. 182. P. 729–738. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.016>
6. Wang Ligang, Voll P., Lampe M., Yang Yongping, Bardow A. Superstructure-free synthesis and optimization of thermal power plants // Energy. 2015. Vol. 91. P. 700–711. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.08.068>



7. Kowalczyk Ł., Elsner W., Niegodajew P., Marek M. Gradient-free methods applied to optimization of advanced ultra-supercritical power plant // *Applied Thermal Engineering*. 2016. Vol. 96. P. 200–208. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.11.091>
8. Plis M., Rusinowski H. Predictive, adaptive model of PG 9171E gas turbine unit including control algorithms // *Energy*. 2017. Vol. 126. P. 247–255. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.027>
9. Mehrgoo M., Amidpour M. Constructal design and optimization of a dual pressure heat recovery steam generator // *Energy*. 2017. Vol. 124. P. 87–99. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.046>
10. Клер А.М., Тюрина Э.А. Оптимизационные исследования энергетических установок и комплексов. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2016. 298 с.
11. Kler A.M., Zharkov P.V., Epishkin N.O. Parametric optimization of supercritical power plants using gradient methods // *Energy*. 2019. Vol. 189. P. 116230. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116230>
12. Шадек Е., Маршак Б., Анохин А., Горшков В. Глубокая утилизация тепла отходящих газов теплогенераторов // *Промышленные и отопительные котельные и мини-ТЭЦ*. 2014. № 2. С. 21–25.
13. Аронов И.З., Пресич Г.А. Опыт эксплуатации контактных экономайзеров на Первоуральской ТЭЦ // *Промышленная энергетика*. 1991. № 8. С. 17–20.
14. Terhan M., Comakli K. Design and economic analysis of a flue gas condenser to recover latent heat from exhaust flue gas // *Applied Thermal Engineering*. 2016. Vol. 100. P. 1007–1015. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.12.122>
15. Shang Sheng, Li Xianting, Chen Wei, Wang Baolong, Shi Wenxing. A total heat recovery system between the flue gas and oxidizing air of a gas-fired boiler using a non-contact total heat exchanger // *Applied Energy*. 2017. Vol. 207. P. 613–623. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.169>
16. Степанова Е.Л., Жарков П.В. Исследование эффективности дожигания топлива в дополнительной камере сгорания ГТУ, имеющей контактный теплообменник для подогрева подпиточной сетевой воды // *Известия Российской академии наук. Энергетика*. 2020. № 2. С. 133–140. <https://doi.org/10.31857/S0002331020020120>
17. Демченко К.В. Основные принципы организации оптового рынка электроэнергии и мощности Российской Федерации // *Главный энергетик*. 2019. № 12. С. 23–27.
18. Пеньковский А.В., Стенников В.А. Математическое моделирование рынка тепловой энергии в формате единой теплоснабжающей организации // *Теплоэнергетика*. 2018. № 7. С. 42–53. <https://doi.org/10.1134/S004036361807007X>
19. Kler A.M., Stepanova E.L., Maksimov A.S. Investigating the efficiency of a steam-turbine heating plant with a back-pressure steam turbine and waste-heat recovery // *Thermophysics and Aeromechanics*. 2018. Vol. 25. No. 6. P. 929–938. <https://doi.org/10.1134/S0869864318060136>
20. Клер А.М., Максимов А.С., Степанова Е.Л., Жарков П.В., Тарариев Р.А., Перевалов Е.Г. [и др.]. Оптимизация режимов работы ТЭЦ с учетом реального состояния основного оборудования // *Теплоэнергетика*. 2009. № 6. С. 53–57.

### References

1. Boyce MP. An overview of gas turbines. *Gas Turbine Engineering Handbook (Fourth Edition)*. 2012;3–88. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-383842-1.00001-9>
2. Al-attab KA, Zainal ZA. Externally fired gas turbine technology: a review. *Applied Energy*. 2015;138:474–487. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.049>
3. Yang Xiaochen, Li Hongwei, Svendsen Svend. Evaluations of different domestic hot water preparing methods with ultra-low-temperature district heating. *Energy*. 2016;109:248–259. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.04.109>
4. Liu Xuezhi, Wu Jianzhong, Jenkins N., Bagdanavicius A. Combined analysis of electricity and heat networks. *Applied Energy*. 2016;162:1238–1250. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.102>
5. Leitner B, Widl E, Gawlik W, Hofmann R. A method for technical assessment of power-to-heat use cases to couple local district heating and electrical distribution grids. *Energy*. 2019;182:729–738. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.016>
6. Wang Ligang, Voll P, Lampe M, Yang Yongping, Bardow A. Superstructure-free synthesis and optimization of thermal power plants. *Energy*. 2015;91:700–711. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.08.068>
7. Kowalczyk Ł., Elsner W, Niegodajew P, Marek M. Gradient-free methods applied to optimization of advanced ultra-supercritical power plant. *Applied Thermal Engineering*. 2016;96:200–208. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.11.091>
8. Plis M, Rusinowski H. Predictive, adaptive model of PG 9171E gas turbine unit including control algorithms. *Energy*. 2017;126:247–255. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.027>
9. Mehrgoo M, Amidpour M. Constructal design and optimization of a dual pressure heat recovery steam generator. *Energy*. 2017;124:87–99. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.046>
10. Kler AM, Tyurina EA. *Optimization studies of power plants and complexes*. Novosibirsk: Geo; 2016, 298 p. (In Russ.)
11. Kler AM, Zharkov PV, Epishkin NO. Parametric optimization of supercritical power plants using gradient methods. *Energy*. 2019;189:116230. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116230>
12. Shadek E, Marshak B, Anokhin A, Gorshkov V. Deep heat recovery of heat generator waste gases. *Promyshlennye i otopitel'nye kotel'nye i mini-TEC*. 2014;2:21–25. (In Russ.)
13. Aronov IZ, Presich GA. Experience of contact economizer operation at Pervouralskaya CHPP. *Promyshlenna-*

ya energetika. 1991;8;17–20. (In Russ.)

14. Terhan M, Comakli K. Design and economic analysis of a flue gas condenser to recover latent heat from exhaust flue gas. *Applied Thermal Engineering*. 2016;100:1007–1015.

<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.12.122>

15. Shang Sheng, Li Xianting, Chen Wei, Wang Baolong, Shi Wenxing. A total heat recovery system between the flue gas and oxidizing air of a gas-fired boiler using a non-contact total heat exchanger. *Applied Energy*. 2017;207:613–623.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.169>

16. Stepanova EL, Zharkov PV. Investigation of the efficiency of fuel afterburning in an additional combustion chamber of a gas turbine unit with a contact heat exchanger for heating the make-up network water. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Energetika = Thermal Engineering*. 2020;2;133–140. (In Russ.)

<https://doi.org/10.31857/S0002331020020120>

17. Demchenko KV. Basic principles for the organization of wholesale electricity and power market in the Russian Federation. *Glavnyj jenergetik*. 2019;12;23–27. (In Russ.)

18. Penkovskii AV, Stennikov VA. Mathematical modeling of the heat energy market on a single heat supplier basis. *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2018;7;42–53. (In Russ.)

<https://doi.org/10.1134/S004036361807007X>

19. Kler AM, Stepanova EL, Maksimov AS. Investigating the efficiency of a steam-turbine heating plant with a back-pressure steam turbine and waste-heat recovery. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2018;25(6):929–938.

<https://doi.org/10.1134/S0869864318060136>

20. Kler AM, Maksimov AS, Stepanova EL, Zharkov PV, Tarariev RA, Perevalov EG. Optimizing the operating modes of cogeneration stations taking actual state of main equipment into account. *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2009;6:53–57. (In Russ.)

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

##### **Степанова Елена Леонидовна,**

кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник Отдела теплосиловых систем, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия; ✉ e-mail: elstep47@mail.ru

##### **Жарков Павел Валерьевич,**

кандидат технических наук, старший научный сотрудник Отдела теплосиловых систем, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия; e-mail: pzharkov@isem.irk.ru

#### **Заявленный вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

#### **Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 20.04.2021; одобрена после рецензирования 21.06.2021; принята к публикации 17.08.2021.

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

##### **Elena L. Stepanova,**

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Senior Researcher of the Department of Heat Power Systems, Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, 130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia; ✉ e-mail: elstep47@mail.ru

##### **Pavel V. Zharkov,**

Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Department of Heat Power Systems, Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, 130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia; e-mail: pzharkov@isem.irk.ru

#### **Contribution of the authors**

The authors contributed equally to this article.

#### **Conflict of interests**

The authors declare no conflict of interests.

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

#### **Information about the article**

The article was submitted 20.04.2021; approved after reviewing 21.06.2021; accepted for publication 17.08.2021.



## Генерация цианида натрия путем газификации угля для золотоизвлекательных фабрик

© Н.В. Васюнина\*, И.В. Дубова\*, С.П. Бакшеев\*\*, М.Р. Ковель\*, В.В. Макарова\*

\*Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

\*\*Частный исследователь, г. Красноярск, Россия

**Резюме:** Цель – оценка технологической возможности генерации цианида натрия путем газификации угля с изучением влияния параметров процесса (температуры, продолжительности эксперимента, типа угля) на концентрацию цианида натрия в полученных растворах и выявление оптимальных режимов процесса. Эксперименты проводили на лабораторной установке, состоящей из трубчатой печи цилиндрической конструкции с рабочим отсеком в виде корундовой трубы. В качестве объекта исследований были выбраны бурый и древесный угли, предварительно измельченные для увеличения удельной поверхности. Раствор цианида натрия образовывался при сорбции содовым раствором газообразной синильной кислоты как одного из компонентов синтез-газов. В системе поглотителей использовали раствор NaOH (pH = 10), установленный в ледяную баню. Содержание цианида натрия в растворе определялось титриметрическим методом. Для термодинамических расчетов применяли программный комплекс HSC Chemistry 5.1. При проведении газификации древесного угля в диапазоне температур 600–800°C получены растворы цианида натрия с концентрацией 0,03–0,08% масс. Установлено, что с повышением температуры от 600 до 900°C концентрация цианида натрия в щелочном растворе снижается ~ в 4 раза при одинаковой продолжительности эксперимента. Выведено регрессионное уравнение зависимости концентрации NaCN в растворе от температуры газификации угля и продолжительности ведения процесса. Показано, что генерация цианида натрия в лабораторных условиях путем газификации угля позволяет получить концентрации цианида натрия в растворе, соответствующие применяемым на золотоизвлекательных фабриках для проведения цианирования. Внедрение линии генерации цианида натрия непосредственно на производственных площадях золотоизвлекательных фабрик позволит снизить себестоимость производства за счет снижения затрат на закупку, транспортировку и хранение реагентов.

**Ключевые слова:** газификация угля, выщелачивание, производство цианида натрия, производство золота, цианирование

**Для цитирования:** Васюнина Н.В., Дубова И.В., Бакшеев С.П., Ковель М.Р., Макарова В.В. Генерация цианида натрия путем газификации угля для золотоизвлекательных фабрик. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 4. С. 488–497. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-488-497>

## Generation of sodium cyanide by coal gasification for gold recovery factories

Natalia V. Vasyunina\*, Irina V. Dubova\*, Sergey P. Baksheev\*\*,  
Margarita R. Kovel\*, Victoria V. Makarova\*

\*Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

\*\*Private researcher, Krasnoyarsk, Russia

**Abstract:** The aim was to assess the technological feasibility of generating sodium cyanide by coal gasification, to study the effects of the process parameters (temperature, experiment duration, coal type) on the concentration of sodium cyanide in the resulting solutions, as well as to identify optimal modes of the process. Experiments were carried out on a laboratory setup consisting of a tubular cylindrical furnace equipped with a working compartment in the form of a corundum tube. Lignite and charcoal, preliminarily crushed to increase the specific surface area, were investigated. A solution of sodium cyanide was produced by sorption of gaseous hydrocyanic acid (a syngas component) with a sodium carbonate solution. A NaOH solution (pH = 10) installed in an ice bath was used in the system of absorbers. The content of sodium cyanide in the solution was determined by the titrimetric method. The HSC Chemistry 5.1 software package was used for thermodynamic calculations. During the gasification of charcoal in the temperature range 600–800°C, sodium cyanide solutions with a concentration of 0.03–0.08 wt% were obtained. An increase in temperature from 600 to 900°C led to a 4-fold decrease in the concentration of sodium cyanide in an alkaline solution, under the same duration of the

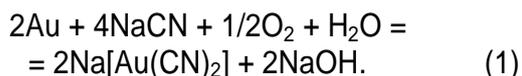
experiments. A regression equation was derived for the dependence of the NaCN concentration in solution on the temperature of coal gasification and the duration of the process. It was shown that the generation of sodium cyanide by coal gasification under laboratory conditions yields sodium cyanide concentrations in solution comparable to those used for gold cyanidation at gold recovery plants. The installation of sodium cyanide generation lines directly at the production areas of gold recovery plants will reduce the production costs by eliminating expenses for purchasing, transporting and storing reagents.

**Keywords:** coal gasification, leaching, sodium cyanide production, gold production, cyanidation

**For citation:** Vasyunina NV, Dubova IV, Baksheev SP, Kovel MR, Makarova VV. Generation of sodium cyanide by coal gasification for gold recovery factories. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(4):488–497. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-488-497>

## ВВЕДЕНИЕ

Цианирование считается наиболее эффективным методом извлечения золота, используемым в процессе выщелачивания в большинстве технологических схем переработки золотосодержащих руд и концентратов [1, 2]. Извлечение благородных металлов цианированием основано на взаимодействии реагентов с минералами золотосодержащего концентрата, т.е. на свойстве золота и серебра реагировать с цианистым натрием в присутствии кислорода с образованием комплексной соли  $\text{Na}[\text{Au}(\text{CN})_2]$ , трудно разлагаемой, но легко растворимой в воде по реакции Эльснера:



Относительная селективность растворителя, удачное сочетание процессов растворения и осаждения благородных металлов из цианистых растворов (цементация цинковой пылью, сорбция на ионообменных смолах и активированных углях и др.), простота аппаратного оформления и другие преимущества цианирования делают его весьма эффективным и производительным, обеспечивая возможность применения данной технологии не только к концентратам механического обогащения, но и к рядовым золотым рудам и даже к хвостам обогащения, содержащим 1–2 г/т золота и ниже. Оптимальными условиями процесса цианирования являются следующие: Т:Ж = 1,5:1; концентрация цианида натрия для крепких растворов – 0,03–

0,06%, для слабых – 0,003–0,01%; pH промышленных растворов – не ниже 10–10,5 (для поддержания pH добавляют известь в виде 20% раствора); температура раствора – 10–20°C.

Существует множество способов получения цианида натрия, но главным образом его производят путем нейтрализации синильной кислоты водными растворами NaOH или  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Для производства цианистых солей газообразную синильную кислоту направляют на щелочные абсорберы, представляющие собой небольшие цилиндрические герметизированные аппараты, снабженные барботером с мешалкой и наполненные раствором едкой щелочи. Раствор цианистой соли фильтруется и концентрируется под вакуумом. Выпавшие кристаллы отделяются на центрифугах. Затем соль сушат и упаковывают и отправляют потребителю.

Цианид натрия, как и все цианиды, чрезвычайно ядовит, поэтому существуют особые требования к его транспортировке<sup>1</sup> (для которой требуется специальное разрешение, специальный автотранспорт, неповрежденная тара и упаковка) и хранению (в закрытом вертикальном положении), а также дальнейшему разведению до раствора заданной концентрации [3].

Потребность в цианиде натрия зависит от характера выщелачиваемой руды и составляет 0,25–0,75 кг на 1 т сухой руды [4, 5].

Поэтому актуальным является получение раствора цианида натрия заданной концентрации непосредственно на производственных площадях обогатительных комбинатов.

<sup>1</sup>Новая химия. Цианид натрия: свойства, и технология производства [Электронный ресурс]. URL: [http://www.newchemistry.ru/printletter.php?n\\_id=6492](http://www.newchemistry.ru/printletter.php?n_id=6492). (10.05.2021).



В данной работе для этой цели предлагается использовать синтез-газы, произведенные при газификации угля с получением газообразного HCN конверсией метана с кислородом и аммиаком и дальнейшим синтезом цианида натрия сорбцией HCN содовым раствором (таблица).

Газификация угля – это высокотемпературный физико-химический процесс взаимодействия угля с газами-окислителями (O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>) с получением газов H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub> (см. таблицу, уравнения (1)–(5), рис. 1) [6–9]. Состав и теплота сгорания полученного в результате газификации газа различны и зависят от предполагаемых направлений его использования [12, 13]. В результате могут быть получены<sup>2</sup>:

– горючий газ (для технологического и энергетического сжигания) при наличии большего объема метана и отсутствии нежелательных продуктов полукоксования угля (масла, смолы, фенолы);

– восстановительный газ (в металлургической промышленности) – для прямого восстановления железной руды и др.;

– синтез-газ (химическое сырье для про-

изводства метанола, аммиака, жидкого топлива согласно процесса Фишера-Тропша) при определенном соотношении CO:H<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub>:H<sub>2</sub>, что достигается подбором условий технологического процесса и выбором состава газифицирующего агента [14–16].

– Как показывает термодинамический анализ данных при равновесных условиях (рис. 2, 3), газификацию угля можно проводить при температурах выше 500°C (с целью получения синтез-газа достаточно температуры 600–800°C, реакции (1)–(3) [17]. Водород синтезируется при горении угля в интервале температур выше 650°C (реакция (1)) [18, 19].

– Синтез метана из CO и CO<sub>2</sub> (реакции (4), (5)) протекает при температурах газов на выходе из установки ниже 600°C, для образования газообразного аммиака требуются еще более низкие температуры (ниже 200–300°C, реакция 6) [14–16]. Синильная кислота образуется при совместном окислении аммиака и метана кислородом воздуха во всем диапазоне температур, также как и цианид натрия, синтезируемый во время хемосорбции синильной кислоты содовым раствором.

Стадии протекания реакций при генерации цианида натрия  
Reaction stages at sodium cyanide generation

Стадия	Реакция	№ реакции	Примечание
Газификация угля	$C + H_2O(g) = H_2(g) + CO(g)$	(2)	процесс основан на взаимодействии угля с водяным паром, реакция является эндотермической, равновесие сдвигается вправо, начиная с 923 К
	$2C + O_2(g) = 2CO(g)$	(3)	параллельно с реакцией (2) протекает экзотермическая реакция сгорания угля, которая обеспечивает необходимый тепловой баланс
	$C + CO_2(g) = 2CO(g)$	(4)	реакция Будуара, является эндотермической, равновесие сдвигается вправо, начиная с 973 К
Конверсия синтез-газа в метан	$CO_2(g) + 4H_2(g) = CH_4(g) + 2H_2O(g)$	(5)	равновесие сдвигается вправо при температурах ниже 873 К
	$CO_2(g) + 4H_2(g) = CH_4(g) + 2H_2O(g)$	(6)	
Образование аммиака	$N_2(g) + 3H_2(g) = 2NH_3(g)$	(7)	равновесие сдвигается вправо при температурах ниже 473 К
Получение синильной кислоты	$2NH_3(g) + 2CH_4(g) + 3O_2(g) = 2HCN(g) + 6H_2O(g)$	(8)	совместное окисление аммиака и метана кислородом воздуха
Получение цианида натрия	$HCN(g) + NaOH = NaCN + H_2O$	(9)	нейтрализация синильной кислоты щелочью

\*g – газообразный (от англ. gas).

<sup>2</sup> Нефтегаз. Газификация угля [Электронный ресурс]. URL: <https://neftegaz.ru/tech-library/energoresursy-toplivo/147407-vnutritsiklovaya-gazifikatsiya-uglya/>. (26.04.2021).

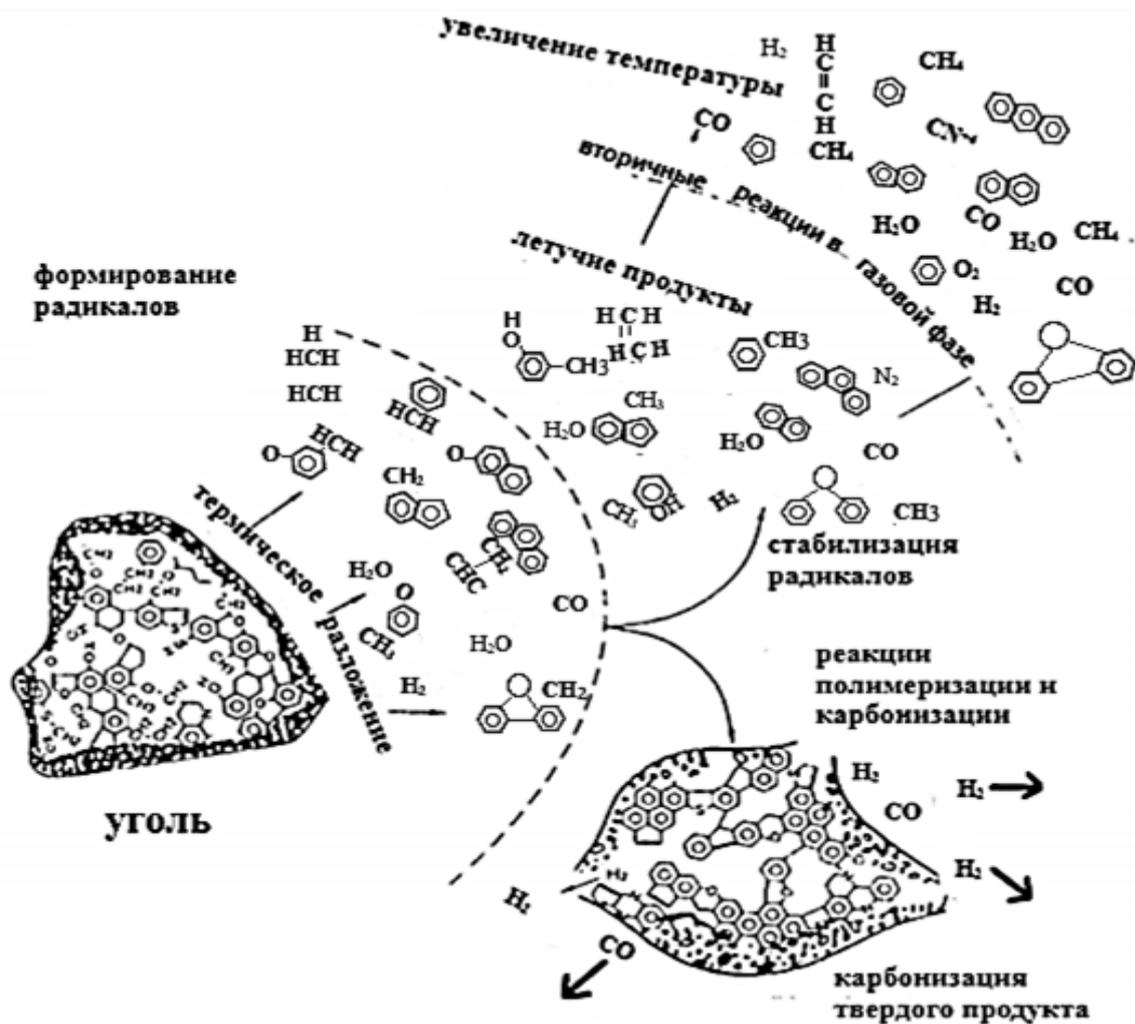


Рис. 1. Разложение угля на молекулы газов при газификации угля  
 Fig. 1. Decomposition of coal into gas molecules at coal gasification

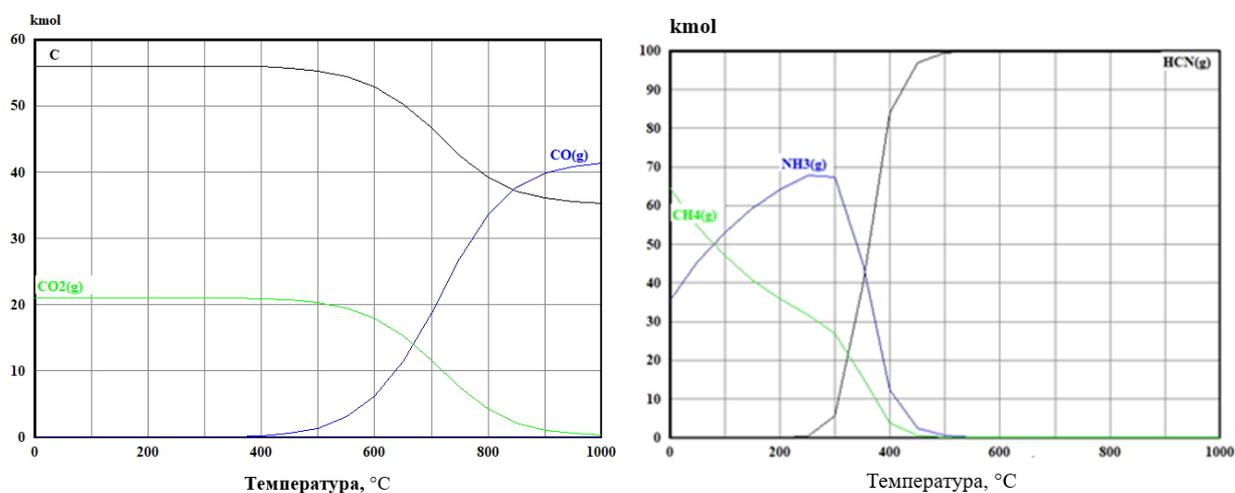


Рис. 2. Влияние температуры горения углерода на состав синтез-газа при газификации угля  
 Fig. 2. Carbon combustion temperature vs synthesis gas composition at coal gasification

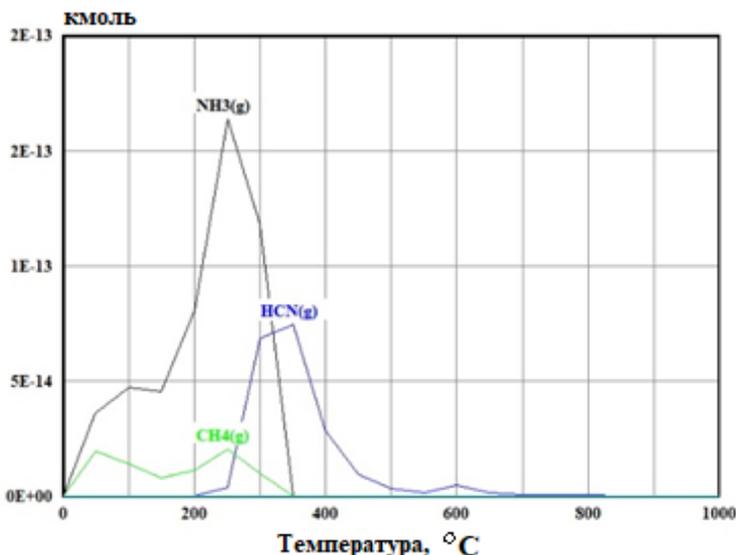


Рис. 3. Влияние температуры отходящих газов на состав синтез-газа при дальнейшей сорбции его содовым раствором

Fig. 3. Waste gas temperature vs synthesis gas composition at its further sorption with a soda solution

При выборе температурного режима стоит учитывать, что эффективность абсорбции увеличивается с понижением температуры абсорбента. Таким образом, газификацию угля необходимо проводить в диапазонах температур выше 600°C, однако с целью синтеза аммиака, метана и целевого продукта их взаимодействия газообразного циановодорода с последующей эффективной абсорбцией необходимо резкое снижение температуры газа на выходе из установки до 200°C и проведение сорбции циановодорода холодным щелочным раствором.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ГЕНЕРАЦИИ ЦИАНИДА НАТРИЯ

Лабораторная установка состояла из трубчатой печи цилиндрической конструкции 1, корпус которой изготовлен из жаропрочной стали, футерованной теплоизоляционными кирпичами, и гирлянды с поглотителями (рис. 4). Рабочий отсек печи представлял собой корундовую трубу с намотанным вокруг спиральным нагревательным элементом.

Температура в ячейке контролировалась термопарой типа К 4, подключенной к регулятору ОВЕН ТРМ. Перед запуском газификатора в начале каждого эксперимента проводилась предварительная проверка на наличие утечек, герметичность установки и рабо-

ту системы вентиляции.

Уголь (бурый или древесный, 30–60 г), предварительно измельченный для повышения удельной поверхности, помещался в кварцевую трубку 2. Затем трубка располагалась в печи таким образом, чтобы срединная ее часть трубы, заполненная углем, находилась в камере печи, а края трубки выходили за пределы камеры печи на 10 см. С одного конца трубка герметично закрывалась резиновой пробкой 3, с другого конца – пробкой с газоотводной стеклянной трубкой. Газоотводная трубка через силиконовый шланг соединялась с гирляндой 5, состоящей из двух поглотителей объемом 200 мл и одного каплеуловителя.

Поглотители заполняли раствором NaOH (рН = 10) до 100 мл, гирлянду устанавливали в ледяную баню 6, которая служит охлаждающим элементом для наилучшего эффекта конвертации.

Печь включали и устанавливали заданную температуру регулятором. Образующийся при сгорании угля газ постепенно вытеснялся по системе силиконовых трубок в гирлянду с поглотителями. Постепенно остывая, газ метанизировался и конвертировался в циановодород, который при прохождении через систему поглотителей сорбировался щелочным раствором с образованием NaCN.

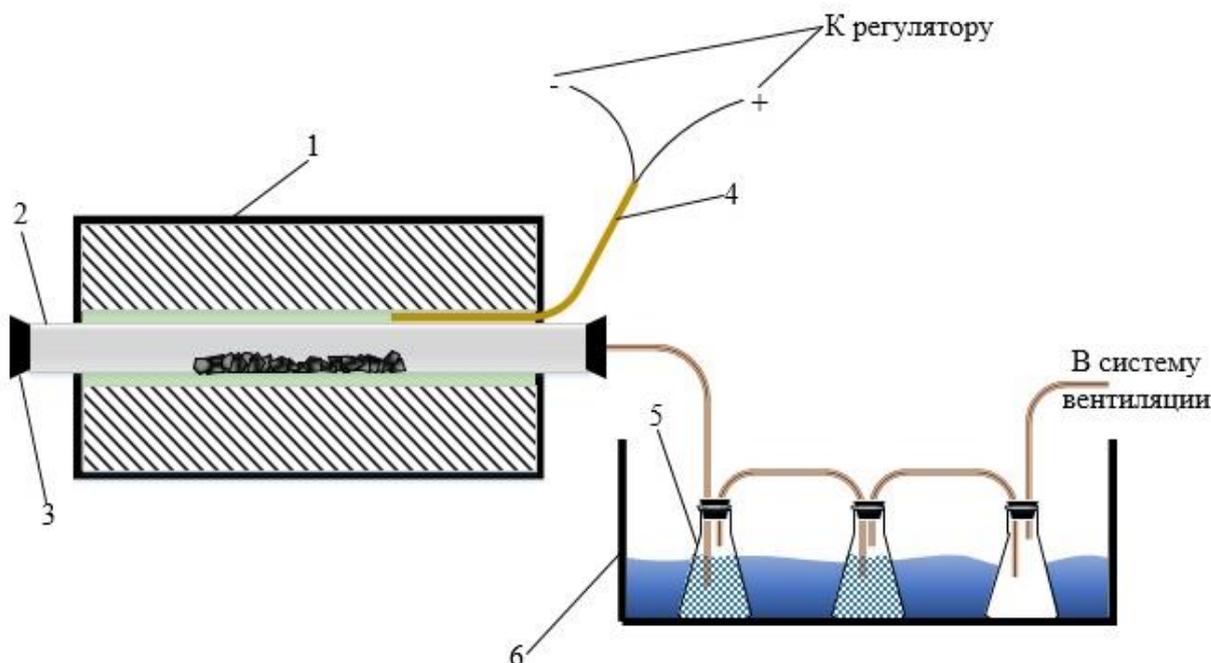


Рис. 4. Схема установки по генерации цианида натрия: 1 – печь; 2 – кварцевая труба с углем; 3 – резиновая пробка; 4 – термопара; 5 – гирлянда с поглотителями и каплеуловителем; 6 – ледяная баня

Fig. 4. Diagram of a sodium cyanide generation plant: 1 – furnace; 2 – quartz pipe with coal; 3 – rubber stopper; 4 – thermocouple; 5 – chain of absorbers and a drop trap; 6 – ice bath

Полученные растворы из поглотителей после окончания эксперимента сливались в сухие стеклянные мерные колбы, герметично закрытые пробкой. Колбы маркировали с указанием наименования продукта, времени отбора пробы и надписью «Осторожно – яд!» и отправлялись на проведение анализа на содержание в растворах цианида натрия. Содержание цианида натрия в растворе определялось методом титрования в соответствии с ГОСТ 8464-79<sup>3</sup>.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Установлено, что с повышением температуры от 600 до 900°C концентрация цианида натрия в щелочном растворе снижается почти в 4 раза при одинаковой продолжительности эксперимента (рис. 5). Полученные концентрации цианида натрия при проведении газификации древесного угля в диапазоне температур 600–800°C 0,03–0,08% масс. соответствуют требуемым концентрациям

цианида натрия в растворе для проведения интенсивного цианирования.

В результате обработки полученных данных по результатам экспериментов было выведено регрессионное уравнение зависимости концентрации цианида натрия в щелочном растворе от температуры газификации угля  $T$  (°C) и продолжительности ведения процесса  $t$  (ч):

$$C_{\text{NaCN}} = 0,171 - 2 \cdot 10^{-4} \cdot T + 0,023 \cdot t.$$

Множественный коэффициент регрессии составляет 0,973. Уравнение корректно в интервале температур от 600–900°C и в пределах продолжительности процесса от 45 мин до 1,5 ч.

Также было отмечено небольшое влияние типа используемого для газификации угля на конечное содержание цианида натрия. Так, при 700°C содержание цианида натрия при газификации бурого угля в течение 1 ч соста-

<sup>3</sup>ГОСТ 8464-79 (ОКП 21 51120100). Натрий цианистый технический. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1979.

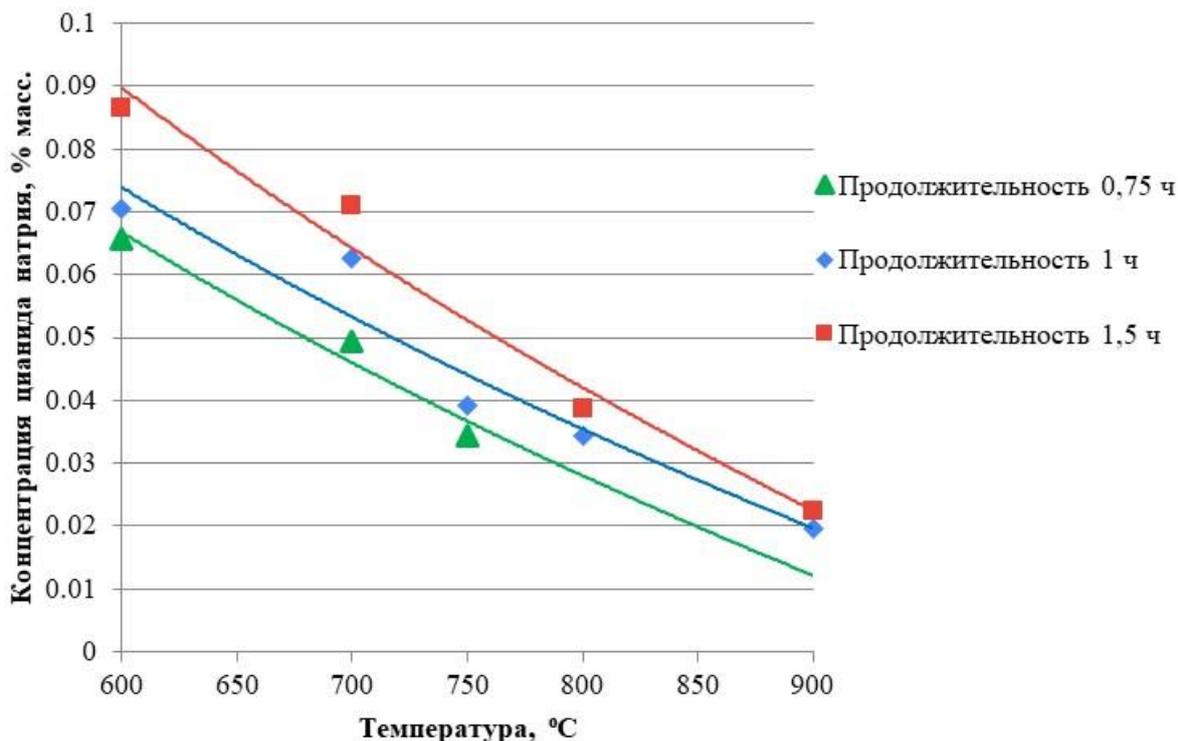


Рис. 5. Влияние продолжительности и температуры процесса газификации угля на синтез цианида натрия  
Fig. 5. Effect of coal gasification duration and temperature on sodium cyanide synthesis

вило 0,04% масс., в то время как при идентичных условиях при газификации древесного угля она составила более 0,06% масс. Это связано с тем, что древесный уголь имеет меньшую зольность, меньше битуминозных летучих веществ, серы и воды, чем бурый уголь. Также древесный уголь имеет большую ВЕТ-поверхность вследствие большого количества капилляров и пор, что подтверждается в работах.

Таким образом, результаты эксперимен-

тов показали, что генерация цианида натрия в лабораторных условиях путем газификации угля позволяет при оптимальных параметрах ведения процесса получить концентрации цианида натрия в растворе, соответствующие применяемым на золотоизвлекательных фабриках для проведения цианирования. В качестве сорбционного оборудования для улавливания компонентов синтез-газа предлагается несколько ступеней газоочистного оборудования, описанного в [20, 21].

#### Список литературы

1. Барченков В.В. Основные технологические процессы переработки золотосодержащих руд. СПб.: Изд-во «Интермедия», 2013. 469 с.
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. Akcil A., Wu X.Q., Aksay E.K. Coal-gold agglomeration: an alternative separation process in gold recovery // Separation & Purification Reviews. 2009. Vol. 38. Iss. 2. P. 173–201. <https://doi.org/10.1080/15422110902855043>
4. Chugaev L.V., Pleshkov M.A., Markelov A.V. Studying the gold loss structure during cil of carbonaceous concentrate // Tsvetnye Metally. 2020. No. 9. С.34–42. <https://doi.org/10.17580/tsm.2020.09.10>
5. Мусаев В.В., Ключников А.М., Галимов Р.Р. Оптимизация переработки стойких золотосодержащих руд Каменского месторождения // Проблемы и перспективы эффективности переработки минерального сырья в 21 веке (Плаксинские чтения-2019): матер. Междунар. конф. (г. Иркутск, 9–14 сентября 2019 г.). Иркутск: Изд-во ООО «Репроцентр А1», 2019. С. 283–286.
6. Исламов С.Р. Частичная газификация угля. Переработка и обогащение минерального сырья. Т. 5. М.: ООО «Киммерийский центр», 2017. 382 с.
7. Higan C., Van Der Burt M. Gasification. New York: Elsevier Science, 2003. 391 p.
8. Журавский Г.И., Савчин В.В. Высокотемпературный термолит органического сырья // Инженерно-физи-

ческий журнал. 2021. Т. 94. № 3. С. 753–759.

9. Сафин Р.Г., Тимербаев Н.Ф., Саттарова З.Г. Технология переработки древесных отходов в генераторный газ: монография. Казань: Изд-во КНИТУ, 2014. 116 с.

10. Choudhury H.A., Chakma S., Moholkar V.S. Biomass gasification integrated Fischer-Tropsch synthesis: perspectives, opportunities and challenges // *Recent Advances in Thermo-Chemical Conversion of Biomass*. Chapter 14. Assam: Center for Energy, Indian Institute of Technology Guwahati, 2015. P. 383–435.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63289-0.00014-4>

11. Загоршменный И.М., Кубрин С.С., Янченко Г.А. Расчет показателей материального баланса процесса сжигания угля в подземных условиях при дефиците необходимых исходных данных // *Известия вузов. Горный журнал*. 2018. № 3. С. 90–99.  
<https://doi.org/10.21440/0536-1028-2018-3-90-99>

12. Донской И.Г. Влияние добавок водяного пара и диоксида углерода на характеристики процесса кислородной газификации пылеугольного топлива // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика*. 2021. Т. 21. № 1. С. 21–28.  
<https://doi.org/10.14529/power210102>

13. Kállay A.A., Vincze V., Nagy G. Two-stage pyrolysis of hungarian brown coal to reduce hydrocarbons within sythesis gas // *Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 42. No. 1. P. 59–68.

14. Yarkova T.A., Kairbekov Zh.K., Eshova Zh.T., Aubakirov E.A., Kairbekov A.Zh., Gyl'maliev A.M. Thermodynamics of gasification of organic matter of brown coal using oxidants of various compositions // *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2017. Vol. 53. Iss. 1. P. 45–53. <https://doi.org/10.1007/s10553-017-0780-z>

15. Григорьева Д.М., Жагфаров Ф.Г., Куликова М.В., Гильмалиев А.М. Термодинамика синтеза углеводородов на основе паровой конверсии метана // *Химия и технология топлив и масел*. 2018. № 6. С. 28–31.

16. Li Bowen, Wang Shuai, Yang Xuesong, Wu Qiang, He Yurong. Thermodynamic evaluation of sorption-enhanced chemical looping gasification with coal as fuel // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020. Vol. 45. Iss. 41. P. 21186–21194.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.05.205>

17. Xu Bang, Cao Qingxi, Kuang Dongyang, Gasem K.A.M., Adidharma Hertanto, Ding Dong, Fan Maohong. Kinetics and mechanism of CO<sub>2</sub> gasification of coal catalyzed by Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, FeCO<sub>3</sub> and Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-FeCO<sub>3</sub> // *Journal of the Energy Institute*. 2020. Vol. 93. Iss.3. P. 922–933.  
<https://doi.org/10.1016/j.joei.2019.08.004>

18. Kocer A., Yakal F., Gungor A. Evaluation of greenhouse residues gasification performance in hydrogen production // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. Vol. 42. Iss. 36. P. 23244–23249.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.05.110>

19. Liu Shanke, GuoLiejun, Jin Hui, Li Linhu, Li Guoliang, Yu Lijun. Hydrogen production by supercritical water gasification of coal: a reaction kinetic model including nitrogen and sulfur elements // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020. Vol. 45. Iss. 56. P. 31732–31744.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.166>

20. Дружинин К.Е., Немчинова Н.В., Васюнина Н.В. Совершенствование основного и вспомогательного оборудования пирометаллургических процессов и его испытания в условиях действующего производства // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2016. № 5. С. 144–152.  
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-5-144-152>

21. Дружинин К.Е., Васюнина Н.В., Немчинова Н.В., Гильманшина Т.Р. Очистка отходящих газов печей спекания с использованием подшламовой воды в качестве газоочистного раствора // *Экология и промышленность России*. 2020. Т. 24. № 3. С. 4–9.  
<https://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-3-4-9>

## References

1. Barchenkov VV. *Main technological processes of gold-bearing ore treatment*. Saint-Petersburg: Intermediya; 2013, 469 p. (In Russ.)

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. Akcil A, Wu XQ, Aksay EK. Coal-gold agglomeration: an alternative separation process in gold recovery. *Separation & Purification Reviews*. 2009;38(2):173–201.  
<https://doi.org/10.1080/15422110902855043>

4. Chugaev LV, Pleshkov MA, Markelov AV. Studying the gold loss structure during cil of carbonaceous concentrate. *Tsvetnye Metally*. 2020; 9:34–42.  
<https://doi.org/10.17580/tsm.2020.09.10>

5. Musaev VV, Klyushnikov AM, Galimov RR. Optimization of resistant gold-bearing ore processing from Kamenskoe deposit. *Problemy i perspektivy effektivnosti pererabotki mineral'nogo syr'ya v 21 veke (Plaksinskie chteniya–2019): materialy Mezhdunarodnoj konferencii = Problems and prospects of effective processing of mineral*

*raw materials in the 21st century (Plaksinsky readings–2019): proceedings of international conference*. 9–14 September 2019, Irkutsk. Irkutsk: ООО “Reprocentr A1”; 2019, p. 283–286. (In Russ.)

6. Islamov SR. *Partial gasification of coal. Processing and concentration of mineral raw materials*. Vol. 5. Moscow: ООО “Kimmerijskijcentr”; 2017, 382 p. (In Russ.)

7. Higman C, Van Der Burgt M. *Gasification*. New York: Elsevier Science; 2003, 391 p.

8. ZhuravskiiGI, SavchinVV. High-temperature thermolysis of organic raw materials. *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal = Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2021;94(3):753–759. (In Russ.)

9. Safin RG, Timerbaev NF, Sattarova ZG. *Technology of wood waste processing into a product gas*. Kazan': Kazan National Research Technological University; 2014, 116 p. (In Russ.)

10. Choudhury HA, Chakma S, Moholkar VS. Biomass gasification integrated Fischer-Tropsch synthesis: perspectives, opportunities and challenges. In: *Recent Ad-*



vances in Thermo-Chemical Conversion of Biomass. Chapter 14. Assam: Center for Energy, Indian Institute of Technology Guwahati; 2015, p. 383–435.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63289-0.00014-4>

11. Zakorshmenyi IM, Kubrin SS, Yanchenko GA. Performance calculation of the material balance of combustion process of coal in underground conditions with a deficit of necessary source data. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*. 2018;3:90–99. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2018-3-90-99>

12. Donskoy IG. How water vapor and carbon dioxide additives affect oxygen gasification of pulverized coal fuel. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika = Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2021;21(1):21–28. <https://doi.org/10.14529/power210102>

13. Kállay AA, Vincze V, Nagy G. Two-stage pyrolysis of hungarian brown coal to reduce hydrocarbons within sythesis gas. *Materials Science and Engineering*. 2017;42(1):59–68.

14. Yarkova TA, Kairbekov ZhK, Eshova ZhT, Aubakirov EA, Kairbekov AZh, Gyul'maliev AM. Thermodynamics of gasification of organic matter of brown coal using oxidants of various compositions. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2017;53(1):45–53. <https://doi.org/10.1007/s10553-017-0780-z>

15. Grigor'eva DM, Zhagfarov FG, Kulikova MV, Gyul'maliev AM. Thermodynamics of hydrocarbon synthesis based on the steam conversion of methane. *Himiya i tekhnologiya topliv i masel = Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2018;6:28–31. (In Russ.)

16. Li Bowen, Wang Shuai, Yang Xuesong, Wu Qiang, He Yurong. Thermodynamic evaluation of sorption-enhanced chemical looping gasification with coal as fuel.

*International Journal of Hydrogen Energy*. 2020;45(41):21186–21194.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.05.205>

17. Xu Bang, Cao Qingxi, Kuang Dongyang, Gasem K.A.M., Adidharma Hertanto, Ding Dong, Fan Maohong. Kinetics and mechanism of CO<sub>2</sub> gasification of coal catalyzed by Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, FeCO<sub>3</sub> and Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>–FeCO<sub>3</sub>. *Journal of the Energy Institute*. 2020;93(3):922–933. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2019.08.004>

18. Kocer A, Yaka IF, Gungor A. Evaluation of greenhouse residues gasification performance in hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017;42(36):23244–23249.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.05.110>

19. Liu Shanke, GuoLiejun, Jin Hui, Li Linhu, Li Guoliang, Yu Lijun. Hydrogen production by supercritical water gasification of coal: a reaction kinetic model including nitrogen and sulfur elements. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020;45(56):31732–31744. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.166>

20. Druzhinin KE, Nemchinova NV, Vasyunina NV. Improving main and auxiliary equipment for pyrometallurgical processes and testing it in production conditions. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2016;5:144–152. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-5-144-152>

21. Druzhinin K, Vasyunina N, Nemchinova N, Gilmanshina T. Exhaust gases purification of sintering furnaces using under-sludge water as a gas cleaning solution. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and Industry of Russia*. 2020;24(3):4–9. (In Russ.) <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-3-4-9>

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Васюнина Наталья Валерьевна,**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры металлургии цветных металлов,  
Сибирский федеральный университет,  
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, Россия;  
✉ e-mail: NVVasyunina@gmail.com

**Дубова Ирина Владимировна,**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры фундаментального  
естественнонаучного образования,  
Сибирский федеральный университет,  
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, Россия;  
e-mail: idubova@mail.ru

**Бакшеев Сергей Пантелеймонович,**

кандидат технических наук,  
частный исследователь,  
e-mail: baksha@mail.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Natalia V. Vasyunina,**

Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor of the Department of Metallurgy  
of Non-Ferrous Metals,  
Siberian Federal University,  
79 Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia;  
✉ e-mail: NVVasyunina@gmail.com

**Irina V. Dubova,**

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Fundamental  
Natural Science Education,  
Siberian Federal University,  
79 Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia;  
e-mail: idubova@mail.ru

**Sergey P. Baksheev,**

Cand. Sci. (Eng.),  
Private Researcher,  
e-mail: baksha@mail.ru

**Ковель Маргарита Романовна,**  
студент,  
Сибирский федеральный университет,  
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, Россия;  
e-mail: r.margo07@gmail.com

**Margarita R. Kovel,**  
Student,  
Siberian Federal University  
79 Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia;  
e-mail: r.margo07@gmail.com

**Макарова Виктория Владимировна,**  
студент,  
Сибирский федеральный университет,  
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, Россия;  
e-mail: 13ikam@gmail.com

**Victoria V. Makarova,**  
Student,  
Siberian Federal University,  
79 Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041, Russia;  
e-mail: 13ikam@gmail.com

#### **Заявленный вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

#### **Contribution of the authors**

The authors contributed equally to this article.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### **Conflict of interests**

The authors declare no conflict of interests.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

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

#### **Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 20.05.2021; одобрена после рецензирования 12.07.2021; принята к публикации 16.08.2021.

#### **Information about the article**

The article was submitted 20.05.2021; approved after reviewing 12.07.2021; accepted for publication 16.08.2021.



## Исследование и выбор оптимальной технологической схемы флотационного обогащения золото-медно-мышьяковистой руды месторождения «Тарор» (Республика Таджикистан)

© М.М. Солихов\*, А.В. Аксёнов\*\*, М.И. Каримов\*\*\*, Г.Г. Минеев\*\*, О.Б. Рахманов\*

\*ООО НИИПИ «ТОМС», г. Иркутск, Россия,

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

\*\*\*Горно-металлургический институт Таджикистана, г. Бустон, Таджикистан

**Резюме:** Цель – изучение влияния крупности материала на повышение эффективности флотационного обогащения золото-медно-мышьяковистых руд месторождения «Тарор» (Республика Таджикистан) и изучение зависимости извлечения золота от продолжительности процесса для выбора альтернативной технологической схемы переработки данной руды. По данным рентгенофазового анализа минеральный состав пробы руды месторождения «Тарор» на 92% представлен породообразующими минералами. Рудная минерализация представлена сульфидными минералами, главным образом арсенопиритом, халькопиритом и пиритом в суммарном количестве 8%. Рудообразующие элементы представлены по большей части железом, серой, мышьяком и медью. Массовая доля составляет, %, соответственно: железа – 6,02, серы – 3,26, мышьяка – 1,52, меди – 0,82. Содержание золота и серебра в руде составляет 7,35 г/т и 20,28 г/т. Степень окисления руды, рассчитанная по железу, составляет 51,3%. Данный показатель позволил характеризовать руду как смешанную, близкую к первичному типу. Результаты исследований по флотационному обогащению показали, что измельчение исходной руды до крупности 95% -71 мкм позволяет повысить извлечение золота в концентрате на 10% по сравнению с измельчением до крупности частиц 80% -71 мкм. Было изучено влияние продолжительности процесса флотации на извлечение золота. Для достижения максимального извлечения золота в черновой флотационный концентрат время основной флотации в дальнейших тестах целесообразно принять равным 14 мин, в контрольной флотации – 12 мин. По полученным экспериментальным данным при рекомендации флотационного обогащения изучаемой руды месторождения «Тарор» в качестве альтернативного технологического решения предлагается сравнительно стандартная схема, включающая основную, контрольную и перечистную стадии флотации.

**Ключевые слова:** месторождение «Тарор», упорные золотосодержащие руды, золото, флотация, флотационное обогащение, рудная минерализация

**Для цитирования:** Солихов М.М., Аксёнов А.В., Каримов М.И., Минеев Г.Г., Рахманов О.Б. Исследование и выбор оптимальной технологической схемы флотационного обогащения золото-медно-мышьяковистой руды месторождения «Тарор» (Республика Таджикистан) // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2021. Т. 25. № 4. С. 498–508. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-498-508>

## An optimal technological scheme for flotation concentration of gold-copper-arsenic ores of the Taror deposit (Republic of Tajikistan)

Mirzobedil M. Solikhov\*, Aleksandr V. Aksenov\*\*, Murad I. Karimov\*\*\*, Gennadiy G. Mineev\*\*, Odilzhon B. Rakhmanov\*

\*Institute of Technologies of Mineral Separation (TOMS) LLC, Irkutsk, Russia,

\*\*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia,

\*\*\*Mining and Metallurgical Institute of Tajikistan, Buston, Tajikistan

**Abstract:** This article investigates the effect of material size on the efficiency of flotation concentration of gold-copper-arsenic ores of the Taror deposit (Republic of Tajikistan) and studies the dependence of gold recovery on the duration of the process with the purpose of developing an alternative technological scheme for processing this ore type. According to X-ray phase analysis, Taror ore samples consist of rock-forming minerals by 92%. Ore mineralization is represented by sulphide minerals, mainly arsenopyrite, chalcopyrite and pyrite, in the total amount of 8%. Ore-forming elements include iron, sulphur, arsenic and copper with the mass fraction of 6.02%, 3.26%, 1.52% and 0.82%, respectively. Gold and sil-

ver are contained in the ore in the amount of 7.35 g/t and 20.28 g/t, respectively. The oxidation state of the ore calculated by iron comprises 51.3%. According to this indicator, this ore type can be distinguished as mixed, close to the primary type. According to the conducted chemical phase analysis of gold, this ore type belongs to the category of refractory ores. Flotation concentration experiments showed that grinding the original ore to a size of 95%–71 microns increases the recovery of gold in the concentrate by 10%, compared to grinding to a particle size of 80%–71 microns. The effect of the flotation process duration on gold recovery was also studied. To achieve the maximum gold recovery in the flotation concentrate, the duration of the main flotation and control flotation should be taken equal to 14 and 12 minutes, respectively. As a result of the experiments, a relatively simple technological solution was proposed for flotation concentration of the Taror ore, which includes the main, control and cleaning stages of flotation.

**Keywords:** Taror deposit, refractory gold-bearing ores, gold, flotation, flotation concentration, ore mineralization

**For citation:** Solikhov MM, Aksenov AV, Karimov MI, Mineev GG, Rakhmanov OB. An optimal technological scheme for flotation concentration of gold-copper-arsenic ores of the Taror deposit (Republic of Tajikistan). *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(4):498-508. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-498-508>

## ВВЕДЕНИЕ

Добыча золота в Таджикистане в настоящее время осуществляется на ~ 40 месторождениях. Крупнейшие месторождения золота, где сосредоточены основные балансовые запасы, расположены в Центральной части Таджикистана, в Зеравшанской долине (Тарор, Джилау, Чоре, Дуоба).

Из перечисленных месторождений на территории Республики Таджикистан наибольшее значение имеет золоторудное месторождение «Тарор», которое по вещественному составу характеризуется большим разнообразием. Главной особенностью золотосодержащей руды данного месторождения является наличие сопутствующих примесных элементов – меди и мышьяка [1–5].

Золото-медно-мышьяковистая руда месторождения «Тарор» является наиболее тяжелым объектом (упорным) по отношению к традиционным способам извлечения золота. Переработка данной руды зачастую дает неудовлетворительные технико-экономические и экологические показатели: минералы меди, активно взаимодействуя с цианистыми растворами, являются причиной больших потерь цианида вследствие образования комплексных цианистых соединений меди. Мышьяксодержащий минерал – арсениопирит – является основным носителем

тонко-вкрапленного золота. Наличие золота в данной форме обуславливает низкие показатели извлечения: менее 80% при цианировании<sup>1</sup> [6–12].

В последние годы в мировой практике упорные золотосодержащие руды перерабатываются по разным комбинированным схемам, в том числе по флотационной и флотационно-цианистой схеме. Флотация играет достаточно важную роль при обогащении золоторудного сырья [13].

В настоящее время флотационным способом обогащения ежегодно перерабатывают более 2 млрд т полезных ископаемых, и этот факт является лучшей характеристикой данного технологического процесса.

Благоприятными объектами для использования флотации являются технологически упорные руды, золото в которых тесно ассоциировано с сульфидными минералами (пиритом, арсениопиритом, халькопиритом, галенитом, антимонитом и многими другими), и, как известно из литературных источников, такое золото не может быть извлечено цианированием без применения достаточно сложных и дорогостоящих подготовительных процессов: окислительного обжига, автоклавного, атмосферного или биохимического окисления сульфидов<sup>2,3</sup> [13–20], ультратонкого измельчения [15].

<sup>1</sup> Жучков И.А. Извлечение золота из упорных золотосодержащих руд: учеб. пособ. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2008. 88 с.

<sup>2</sup> Авдохин В.М. Основы обогащения полезных ископаемых: учеб. В 2 т., т. 2; 4-е изд., стер. М.: Изд-во «Горная книга», 2017. 312 с.

<sup>3</sup> Бочаров В.А., Игнаткина В.А., Абрютин Д.В. Технология переработки золотосодержащего сырья: учеб. пособ. М.: Изд-во «МИСиС», 2011. 328 с.

В настоящей работе с целью повышения извлечения ценного компонента (золота) и обеспечения приемлемой рентабельности переработки месторождения «Тарор» авторы провели лабораторные исследования по флотационному обогащению золотосодержащей руды месторождения «Тарор».

### ФОРМА НАХОЖДЕНИЯ ЗОЛОТА И ЕГО РАСПРЕДЕЛЕНИЕ В ИСХОДНОЙ РУДЕ

В ходе изучения фазового анализа были определены формы нахождения золота, характера его взаимосвязи с рудными и породообразующими минералами в исходной руде месторождения «Тарор». Результаты анализа представлены в табл. 1.

Как видно из таблицы, доля свободного золота в исходной руде по крупности материала 95% класса -71 мкм находится на низком уровне и составляет 7,93%. Суммарное количество цианируемого золота – 76,63 %. На долю упорного, не извлекаемого прямым цианированием золота, приходится 23,37% от общей массы металла. Упорное золото распределяется на золото, содержащееся в сульфидах (18,22%), и нерастворимое в царской водке (5,15%).

По результату фазового анализа отмечено, что исходная руда месторождения «Тарор» является упорным сырьем по отношению к цианистому процессу. Извлечение золота цианированием составило 76,63%. Основными причинами технологической упорности исследуемого сырья является тонкая вкрапленность золота в сульфидах, как указывалось выше (18,22%), и наличие золота в кварце и минералах, нерастворимых в кислотах.

Таким образом, на основании фазового анализа золота сделан вывод о том, что данное сырье относится к категории труднообогатимых руд.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Флотационное обогащение исходной руды месторождения «Тарор» проводили с использованием достаточно простой схемы, включающей основную, контрольную и перечистную стадии флотации. Схема флотационного обогащения руды представлена на рис. 1.

Одним из факторов, влияющих на эффективность флотационного обогащения, является крупность материала. Учитывая тонкую вкрапленность сульфидных минералов, рекомендуемой крупностью материала для процесса флотационного обогащения на первой стадии экспериментов принята крупность 80–90% класса -71 мкм [18].

Исходную руду измельчали в шаровой мельнице до крупности 80% -71 мкм при следующих условиях: масса материала – 1 кг, масса мелющих тел (шары из низкоуглеродистой стали) – 7 кг, Т:Ж = 1:0,5.

Опыт проводили с навесками массой 1 кг в лабораторной флотомашине механического типа с объемом камеры 3 л, перечистная операция – в камерах объемом 0,75 л. Продолжительность флотации определяли визуально по степени нагруженности пены. По окончании процесса обогащения продукты высушивали, взвешивали и анализировали пробирным, атомно-абсорбционным и химическим методами анализа. В качестве собирателя использовали бутиловый ксантогенат калия (БКК) при расходе 200 г/т в основную и 100 г/т в контрольную операции, соответственно. В качестве вспенивателя применяли реагент Т-92 при расходе 130 г/т (основная флотация) и 60 г/т (контрольная флотация). Общая продолжительность флотации составила 40 мин (10 мин – основная, 10 мин – контрольная, 20 мин – перечистная флотация).

Таблица 1. Форма нахождения золота в руде  
Table 1. Form of gold occurrence in ore

Форма нахождения золота	Свободное золото	Золото в открытых сростках (цианируемые)	Тонковкрапленное в сульфидах (пирит, арсенопирит)	Золото в кварце и минералах, в нерастворимых кислотах	Всего
Содержание, г/т	0,57	4,94	1,31	0,37	7,19
Массовая доля, %	7,93	68,70	18,22	5,15	100

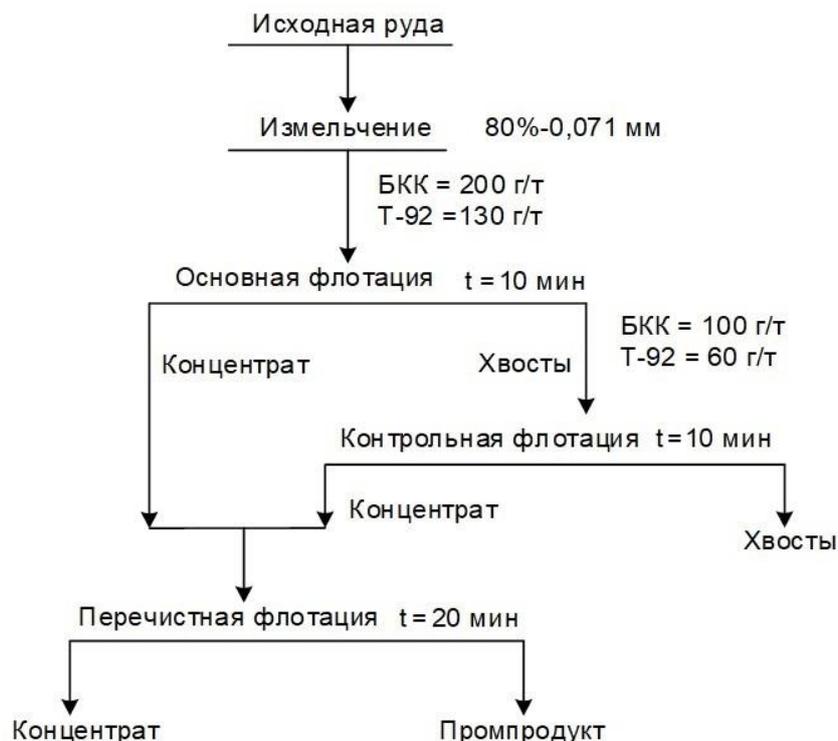


Рис. 1. Схема флотационного обогащения руды  
Fig.1. Diagram of ore flotation concentration

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты флотационного обогащения руды приведены в табл. 2.

Таким образом, в ходе флотационного обогащения руды получены следующие продукты: концентрат перечистой флотации с содержанием Au – 46,6 г/т, выход концентрата – 9,2%, промпродукт (хвосты перечистой флотации) с содержанием Au – 6,8 г/т, выход – 9,79%, отвальные хвосты флотации с содержанием Au – 2,6 г/т, выход хвостов – 81,01%.

В суммарном концентрате содержание

золота составило 26,09 г/т при извлечении 70,17% и выходе 18,99%. Химический состав продуктов флотации приведен в табл. 3.

Результаты, полученные при флотационном обогащении исходной руды при крупности измельчения 80% -71 мкм, не могут считаться удовлетворительными: невысокое извлечение Au (70,17%) при достаточно высоких потерях ценного компонента с хвостами (2,6 г/т). Одной из причин низкого извлечения золота является тонкая вкрапленность сульфидов в породообразующих минералах.

Таблица 2. Результаты флотационного обогащения пробы исходной руды месторождения «Тарор»

Table 2. Results of flotation concentration of the sample of original ore of the Taror deposit

Продукты обогащения	Выход, %	Содержание				Извлечение, %			
		Au, г/т	Fe, %	S, %	As, %	Au,	Fe	S	As
Концентрат перечистой флотации	9,20	46,6	22,6	21,3	11,0	60,74	36,06	63,54	65,66
Промпродукт перечистой флотации	9,79	6,8	5,9	3,3	0,94	9,43	10,01	10,47	5,97
Суммарный концентрат флотации	18,99	26,09	13,99	12,02	5,81	70,17	46,04	74,01	71,63
Отвальные хвосты	81,01	2,6	3,84	0,99	0,54	29,83	53,93	25,99	28,37
Исходная руда	100	7,06	5,77	3,09	1,52	100	100	100	100

Таблица 3. Химический состав продуктов флотации  
Table 3. Chemical composition of flotation products

Элементы, компоненты	Массовая доля элемента, %	
	Концентрат перерешивной флотации	Хвосты
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,52	5,14
CaO	3,77	11,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	32,3	5,49
MgO	7,60	11,9
MnO	0,042	0,093
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	<0,010	0,064
K <sub>2</sub> O	0,144	1,79
Na <sub>2</sub> O	<1,0	<1,0
TiO <sub>2</sub>	0,041	0,212
SiO <sub>2</sub>	15,3	39,2
As	11,0	0,54
Ba	0,0043	0,054
Bi	0,077	0,0050
Cd	0,043	0,0016
Cr	0,0010	0,0022
Co	0,0074	0,0007
Cu	7,14	0,150
Pb	0,015	0,0016
Sb	0,134	0,0052
Mo	0,0036	<0,0005
Ni	0,0022	0,0010
Sr	<0,0010	0,0078
Sn	0,0079	<0,0050
W	<0,0050	<0,0050
Zn	0,205	0,013
Au, г/т	46,6	2,6

С целью вскрытия зерна золотосодержащих минералов и достижения максимального извлечения золота в концентрат флотации в дальнейших исследованиях по флотационному обогащению предлагается измельчение исходной руды до крупности 95% -71 мкм.

Для выбора оптимальных режимов флотации были поставлены эксперименты по изучению кинетики флотации при крупности руды 95% -71 мкм. Изучение кинетики флотации минералов с целью повышения технологических показателей флотационного обогащения является одним из вариантов решения данной проблемы [20].

Схема проведения эксперимента по флотации представлена на рис. 2, результаты исследований приведены в табл. 4.

Для оценки результатов флотации в дан-

ном тесте было рассчитано значение критерия Хенкока, характеризующего эффективность протекания флотационного процесса, и построены графические зависимости этого показателя и извлечения золота от продолжительности флотации, приведенные на рис. 3.

Из графика (см. рис. 3) следует, что прирост извлечения золота в концентрат наблюдается в течение 18 мин, далее прирост извлечения металла замедляется. В этом же интервале времени достигается близкое к максимальному значение критерия эффективности обогащения. В оставшееся время процесс замедляется, извлечение нарастает плавно. Для достижения максимального извлечения золота в концентрат флотации продолжительность основной флотации в дальнейших тестах целесообразно принять равной 14 мин, в контрольной флотации – 12 мин.

По данным, полученным в результате исследований кинетики флотации исходной руды, следует, что по сравнению с предыдущим тестом золото достаточно эффективно флотируется при крупности 95% -71 мкм. Данные табл. 1 и 3 показывают, что извлечение золота в концентрат при крупности 80% -71 мкм составило 70,17%, а при крупности 95% -71 мкм повысилось на 13,67% и составило 83,84%.

Опираясь на полученные результаты, был проведен опыт по флотационному обогащению исходной руды крупностью 95% -71 мкм с последующим цианированием продуктов флотации.

С целью повышения содержания металла в концентрате и снижения выхода пенного продукта в схему введена перерешивная операция. Для предотвращения гидрофобизации минералов при тонком измельчении и повышения избирательности (селективности) флотации при разделении минералов, обладающих близкими флотационными свойствами, был использован реагент-депрессор карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ). Продолжительность флотации была определена по результатам исследования кинетики флотации (см. табл. 3).

Схема флотационного обогащения руды представлена на рис. 4.

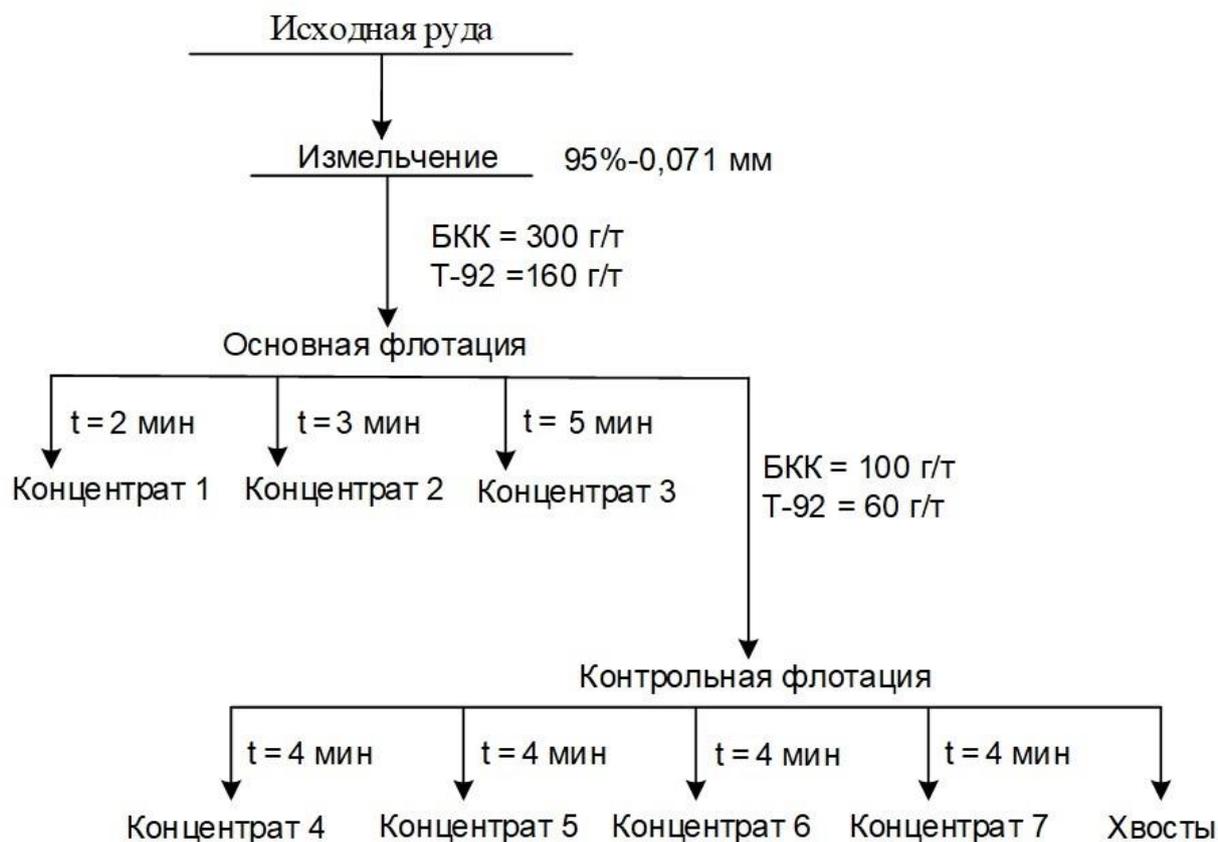


Рис. 2. Схема изучения кинетики флотации исходной руды  
Fig. 2. Diagram for original ore flotation kinetics study

Таблица 4. Результаты кинетики флотационного обогащения исходной руды  
Table 4. Results of original ore flotation concentration kinetics

№ п/п	Наименование продуктов	Продолжительность, мин	Масса, г	Выход, %	Содержание Au, г/т	Извлечение Au, %
1	Концентрат 1	2	31,5	3,23	52	22,78
2	Концентрат 2	3	33	3,38	30,3	13,91
3	Концентрат 3	5	40,5	4,15	18,8	10,59
4	Концентрат 4	4	88,5	9,08	20,7	25,48
5	Концентрат 5	4	42,5	4,36	9,8	5,79
6	Концентрат 6	4	33,5	3,44	6,9	3,22
7	Концентрат 7	4	26	2,67	5,7	2,06
Итого суммарный концентрат		26	295,5	30,31	20,40	83,84
8	Хвосты	–	679,5	69,69	1,71	16,16
Исходная руда			975	100,00	7,37	100,00

Результаты исследований представлены в табл. 5, химический состав продуктов обогащения – в табл. 6.

По предлагаемой схеме был получен зо-

лото-медно-мышьяковистый концентрат, содержащий: золото – 43,2 г/т, медь – 5,51%, серебро – 89,8 г/т, мышьяк – 10,3% (при выходе концентрата 14,17%).

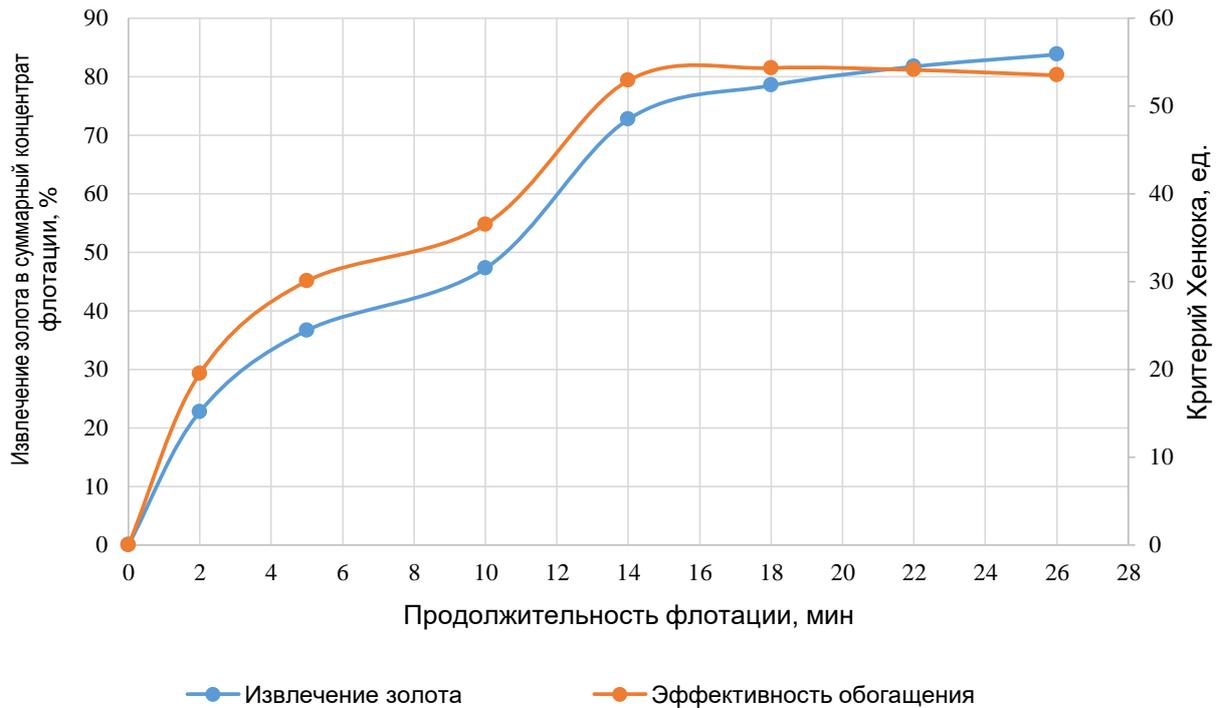


Рис. 3. Зависимость извлечения золота от продолжительности флотации  
Fig. 3. Gold recovery vs flotation duration

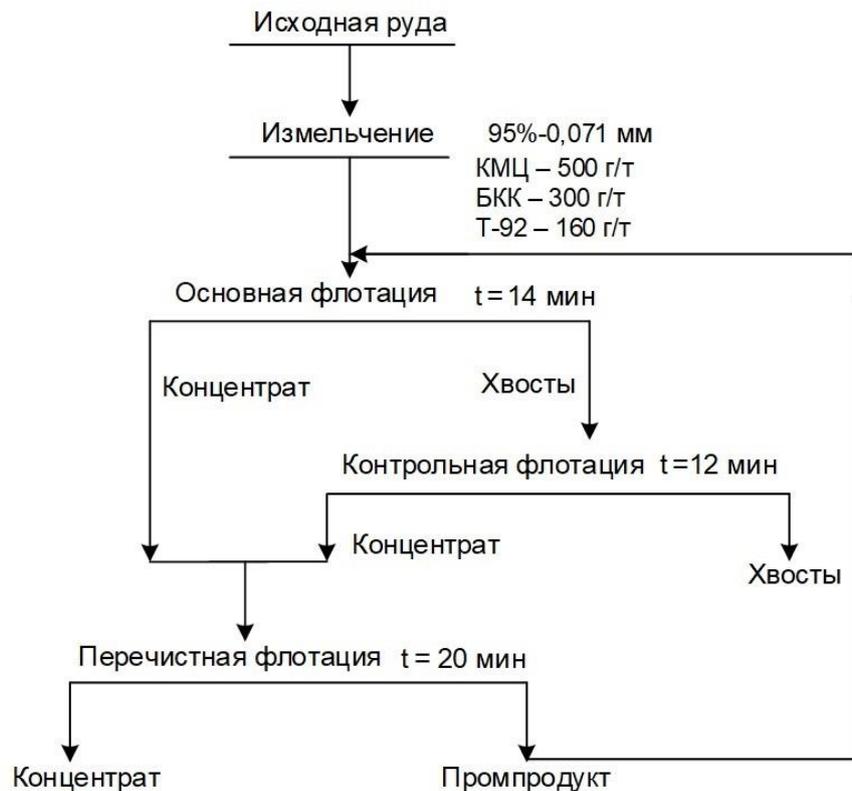


Рис. 4. Схема флотационного обогащения исходной руды при крупности 95 % -71 мкм  
Fig. 4. Diagram of flotation concentration of original ore of 95% -71  $\mu$ m size

**Таблица 5.** Результаты флотационного обогащения пробы исходной руды крупностью 95% -71 мкм  
**Table 5.** Results of flotation concentration of the original ore sample of 95% -71 µm size

Продукты обогащения	Выход, %	Содержание				Извлечение, %			
		Au, г/т	Ag, г/т	Fe, %	S, %	Au	Ag	Fe	S
Концентрат флотации	14,17	43,20	89,80	26,10	20,90	80,21	76,72	54,71	86,95
Хвосты флотации	85,83	1,76	4,50	4,10	0,45	19,79	23,28	45,29	3,05
Исходная руда	100	7,63	16,59	7,22	3,35	100,0	100,0	100,0	100,0

**Таблица 6.** Химический состав продуктов флотации  
**Table 6.** Chemical composition of flotation products

Элементы, компоненты	Массовая доля элемента, %	
	Концентрат флотации	Хвосты флотации
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,61	5,8
CaO	4,6	11,9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	36,9	5,6
MgO	8,9	13,8
MnO	0,049	0,099
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,25	0,067
K <sub>2</sub> O	0,21	1,37
Na <sub>2</sub> O	<1,0	<1,0
TiO <sub>2</sub>	0,042	0,23
SiO <sub>2</sub>	15,9	34
As	10,3	1,4
Ba	0,0056	0,059
Bi	0,076	0,0039
Cd	0,003	<0,0002
Cr	<0,0050	<0,0050
Co	0,0081	<0,0005
Cu	5,51	0,12
Pb	0,0099	<0,0020
Sb	0,103	<0,005
Mo	0,0036	<0,0005
Ni	<0,0050	<0,0050
Sr	<0,0010	0,0093
Sn	0,0066	<0,0050
W	<0,010	<0,010
Zn	0,1	0,024
Ag, г/т	89,8	4,5

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По полученным данным при флотационном обогащении золотосодержащей руды месторождения «Тарор» (Республика Таджикистан) в качестве альтернативной технологической схемы предлагается схема, включающая основную, контрольную и перечист-

ную флотации. В результате исследований было определено основное время флотации. Для достижения максимального извлечения золота в концентрат флотации продолжительность основной флотации в дальнейших тестах рекомендовано принять равной 14 мин, контрольной флотации – 12 мин.

Применение реагента-депрессора КМЦ в процессе флотационного обогащения способствовало повышению технологических показателей за счет сокращения выхода флотоконцентрата и значительного увеличения содержания металла в концентрате.

Результаты исследований показали, что измельчение исходной руды до крупности 95% -71 мкм позволяет вскрыть зерна золотосодержащих минералов, что благоприятно сказывается для последующих обогатительных и гидрометаллургических процессов. Таким образом, при измельчении исходной руды до крупности 80% -71 мкм извлечение золота в концентрат составило 70,17%, а при крупности 95% -71 мкм – повысилось на 10,04% и составило 80,21%.

В дальнейшем, с целью изучения влияния крупности частиц концентрата на извлечение золота, рассматривается проведение серии экспериментов по ультратонкому измельчению флотоконцентратов с обработкой полученного продукта методом атмосферного окисления с последующим цианированием в сорбционном режиме. Целесообразным является также изучение направления цианирования хвостов флотации.

## Список литературы

1. Маджидов Б.С. Минерально-сырьевая база драгоценных металлов Республики Таджикистан // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 5. С. 404–412.
2. Рахманов О.Б., Аксёнов А.В., Каримов М.И., Назаров Х.М. Извлечение золота и серебра из упорного

- золотосодержащего мышьяковистого флотоконцентрата месторождения «Иккижелон» с добавлением хлорида натрия в процессе автоклавного окисления // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 4. С. 896–905. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-4-896-905>

3. Сохибназаров М.Д. Из истории добычи золота в Таджикистане // Вестник Таджикского государственного университета права, бизнеса и политики. 2010. № 1. С. 34–39.
4. Солихов М.М., Аксёнов А.В., Васильев А.А., Каримов М.И., Рахманов О.Б. Поиск оптимальной технологической схемы переработки упорных золотосодержащих руд месторождения «Тарор» (Республика Таджикистан) // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 2. С. 180–190. <http://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-2-182-192>
5. Солихов М.М., Рахманов О.Б., Аксёнов А.В., Захаренков Р.И. Анализ данных по месторождению «Тарор» // Перспективы развития технологии переработки углеводородных и минеральных ресурсов: матер. VI Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Иркутск, 21–22 апреля 2016 г.). Иркутск, 2016. С. 82–85.
6. Стрижко Л.С., Бобохонов Б., Бобоев И.Р. Исследование и разработка технологии извлечения золота из окисленных руд одного из крупнейших месторождений Таджикистана // Цветные металлы. 2012. № 7. С. 41–44.
7. Захаров Б.А., Меретуков М.А. Золото: упорные руды. М.: ИД «Руда и металлы», 2013. 452 с.
8. Меретуков М.А. Золото. Химия. Минералогия. Metallurgy. М.: ИД «Руда и металлы», 2008. 518 с.
9. Лодейщиков В.В. Технология извлечения золота и серебра из упорных руд: монография. В 2 т., т. 1, т. 2. Иркутск: ОАО «Иргиредмет», 1999. 342 с.; 452 с.
10. Chen Yong, Song Yongsheng, Li Wenjuan, Cai Liulu. Mineralogical characteristics of a micro-fine and low grade refractory gold ore // International Conference on Materials Applications and Engineering 2017 (ICMAE2017): MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 142. P. 02011. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814202011>
11. Рахманов О.Б., Аксёнов А.В., Немчинова Н.В., Солихов М.М., Черношвец Е.А. Поиск оптимальной технологии переработки золотосодержащей руды месторождения «Иккижелон» (Республика Таджикистан) // Metallurgy: технологии, инновации, качество «Металлургия–2017»: тр. XX Междунар. науч.-практ. конф. (г. Новокузнецк, 15–16 ноября 2017 г.). Новокузнецк, 2017. Ч. 1. С. 118–122.
12. Lacouture B., Wilson B., Oliver J., Lumsden B. Increased extraction of thin sulfide minerals in operation Red Dog factory // 28 International Mineral Processing Congress (IMPC 2016): Proceedings of a meeting held (Quebec, 11–15 September 2016). Quebec: Canadian Institute of Mining Metallurgy and Petroleum, 2016.
13. Секисов А.Г., Зыков Н.В., Королёв В.С. Дисперсное золото. Геологический и технологический аспекты. М.: Изд-во «Горная книга», 2012. 224 с.
14. Adams M.D. Gold ore processing: project development and operations. Amsterdam: Elsevier Science, 2016. 980 p.
15. Аксёнов А.В., Васильев А.А., Охотин В.Н., Швец А.А. Применение ультратонкого измельчения при переработке минерального сырья // Известия вузов. Цветная металлургия. 2014. № 2. С. 20–25. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2014-2-20-25>
16. Chen T.T., Cabri L.J., Dutrizac J.E. Characterizing gold in refractory sulfide gold ores and residues // JOM. 2002. Vol. 54. P. 20–22. <https://doi.org/10.1007/BF02709181>
17. Барченков В.В. Основные технологические процессы переработки золотосодержащих руд. СПб.: Изд-во «Интермедия», 2013. 469 с.
18. Ковалев В.Н., Голиков В.В., Рылов Н.В. Особенности разработки технологических схем обогащения углеводородсодержащих золотосульфидных руд // Журнал Сибирского федерального университета. Химия. 2017. Т. 10. № 1. С. 99–109. <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0010>
19. Меретуков М.А., Санакулов К.С., Зимин А.В., Арустамян М.А. Золото: химия для металлургов и обогащателей. М.: ИД «Руда и Металлы», 2014. 412 с.
20. Рубинштейн Ю.Б. Кинетика флотации. М.: Изд-во «Недра», 1980. 375 с.

### References

1. Madzhidov BS. Precious mineral resources of the Republic of Tajikistan. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' = Mining informational and analytical bulletin*. 2017;5:404–412. (In Russ.)
2. Rakhmanov OB, Aksenov AV, Karimov MI, Nazarov KhM. Gold and silver recovery from a refractory gold-containing arsenic flotation concentrate obtained at the Ikkijelon deposit with the addition of sodium chloride in the process of autoclave oxidation. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(4):896–905. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-4-896-905>
3. Soxibnazarov MD. The history of golden of Tajikistan. *Vestnik Tadjikskogo gosudarstvennogo universiteta prava, biznesa i politiki = Bulletin of the Tajik State University of Law, Business and Politics*. 2010;1:34–39. (In Russ.)
4. Solikhov MM, Aksenov AV, Vasiliev AA, Karimov MI, Rakhmanov OB. Search for optimal processing technology for Taror deposit refractory gold ores (Republic of Tajikistan). *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(2):180–190. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-2-182-192>
5. Solikhov MM, Rakhmanov OB, Aksenov AV, Zakharonov RI. Taror deposit data analysis. *Perspektivy razvitiya tekhnologii pererabotki uglevodorodnyh i mineral'nyh resursov: materialy VI Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem = Development prospects of technology for hydrocarbon and mineral resources processing: materials of VI All-Russian scientific and practical conference with international participation*. 21–22 April 2016, Irkutsk. Irkutsk; 2016, p. 82–85. (In Russ.)
6. Strizhko LS, Bobokhonov B, Boboev IR. Research of

technology development for the gold recovery from oxidized ores on one of the greatest deposits of the republic of Tajikistan. *Tsvetnye Metally*. 2012;7:41–44. (In Russ.)

7. Zakharov BA, Meretukov MA. Gold: refractory ores. Moscow: Ruda i metally; 2013, 452 p. (In Russ.)

8. Meretukov MA. Gold. Chemistry. Mineralogy. Metallurgy. Moscow: Ruda i metally; 2008, 518 p. (In Russ.)

9. Lodejshchikov VV. Technology for gold and silver extraction from refractory ores: monograph. Irkutsk: OAO «Irgiredmet»; 1999, 342 p.; 452 p. (In Russ.)

10. Chen Yong, Song Yongsheng, Li Wenjuan, Cai Liulu. Mineralogical characteristics of a micro-fine and low grade refractory gold ore. In: *International Conference on Materials Applications and Engineering 2017 (ICMAE2017): MATEC Web of Conferences*. 2018;142:02011. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814202011>

11. Rakhmanov OB, Aksenov AV, Nemchinova NV, Solihov MM, Chernoshvec EA. Search for the optimal processing technology for the gold-bearing ore of the Ikkijelon deposit (Republic of Tajikistan). In: *Metallurgiya: tekhnologii, innovacii, kachestvo. Metallurgiya – 2017: trudy XX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Metallurgy: technologies, innovations, quality. Metallurgy-2017: Proceedings of XX International scientific and practical Conference*. 15–16 November 2017, Novokuznetsk. Novokuznetsk; 2017, p.118–122. (In Russ.)

12. Lacouture B, Wilson B, Oliver J, Lumsden B. Increased extraction of thin sulfide minerals in operation Red Dog factory. In: *28 International Mineral Processing*

*Congress (IMPC 2016): Proceedings of a meeting held 11–15 September 2016, Quebec*. Quebec: Canadian Institute of Mining Metallurgy and Petroleum; 2016.

13. Sekisov AG, Zykov NV, Korolev VS. Dispersed gold. Geological and technological aspects. Moscow: Gornaya kniga; 2012, 224 p. (In Russ.)

14. Adams MD. *Gold ore processing: project development and operations*. Amsterdam: Elsevier Science; 2016, 980 p.

15. Aksenov AV, Vasiliev AA, Okhotin VN, Shvets AA. Application of ultrafine grinding for mineral raw materials processing. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya = Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2014;(2):20–25. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2014-2-20-25>

16. Chen TT, Cabri LJ, Dutrizac JE. Characterizing gold in refractory sulfide gold ores and residues. *JOM*. 2002;54:20–22. <https://doi.org/10.1007/BF02709181>

17. Barchenkov VV. The main technological processes of gold-bearing ore processing. Saint-Petersburg: Intermediya; 2013, 469 p. (In Russ.)

18. Kovalev VN, Golikov VV, Rylov NV. Features of the development of processing flow sheets of carbon-gold-sulphide ores. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Himiya = Journal of Siberian Federal University. Chemistry*. 2017;10(1): 99–109. (In Russ.)

19. Meretukov MA, Sanakulov KS, Zimin AV, Arustamyan MA. Gold: chemistry for metallurgists and concentrators. Moscow: Ruda i Metally; 2014, 412 p. (In Russ.)

20. Rubinshtein YuB. Flotation kinetics. Moscow: Nedra; 1980, 375 p. (In Russ.)

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Солихов Мирзобедил Мирзошарифович**,  
младший научный сотрудник,  
ООО НИИПИ «ТОМС»,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83/1, Россия;  
✉ e-mail: mirzo.solikhov88@mail.ru

**Mirzobedil M. Solikhov**,  
Junior Researcher,  
Institute of Technologies of Mineral Separation LLC,  
83/1, Lermontov St., Irkutsk 664074 Russia;  
✉ e-mail: mirzo.solikhov88@mail.ru

**Аксёнов Александр Владимирович**,  
кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры металлургии цветных металлов,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;  
e-mail: aksenov@tomsgroup.ru

**Aleksandr V. Aksenov**,  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Non-Ferrous  
Metals Metallurgy,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074 Russia;  
e-mail: aksenov@tomsgroup.ru

**Каримов Мурад Ильясович**,  
кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры металлургии,  
Горно-металлургический институт Таджикистана,  
735730, г. Бустон, ул. Московская, 6, Таджикистан;  
e-mail: murodkhon.k@rambler.ru

**Murad I. Karimov**,  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Metallurgy Department,  
Mining and Metallurgical Institute of Tajikistan,  
6, Moskovskaya St., Buston 735030, Tajikistan;  
e-mail: murodkhon.k@rambler.ru

**Минеев Геннадий Григорьевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
профессор-консультант кафедры металлургии  
цветных металлов,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;  
e-mail: kafmcm@istu.edu

**Gennadiy G. Mineev**,  
Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Consulting Professor of the Department of Non-Ferrous  
Metals Metallurgy,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074 Russia;  
e-mail: kafmcm@istu.edu



**Рахманов Одилжон Бозорович,**  
младший научный сотрудник,  
ООО НИИПИ «ТОМС»,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83/1, Россия;  
e-mail: rakhmanov.salam@mail.ru

**Odilzhon B. Rakhmanov,**  
Junior Researcher,  
Institute of Technologies of Mineral Separation LLC,  
83/1, Lermontov St., Irkutsk 664074 Russia;  
e-mail: rakhmanov.salam@mail.ru

**Заявленный вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

**Contribution of the authors**

The authors contributed equally to this article.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interests**

The authors declare no conflict of interests.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

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

**Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 10.01.2021; одобрена после рецензирования 11.06.2021; принята к публикации 18.08.2021.

**Information about the article**

The article was submitted 10.01.2021; approved after reviewing 11.06.2021; accepted for publication 18.08.2021.



## Математическое моделирование теплового режима агрегата печь-ковш с учетом внутренних тепловых источников

© Д.Д. Черемисин\*, С.А. Новокрещенов\*\*, В.С. Швыдкий\*\*, В.П. Жуков\*\*\*

\*АО «Уралэнергочермет», г. Екатеринбург, Россия

\*\*Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
г. Екатеринбург, Россия

\*\*\*АО «Уралмеханобр», г. Екатеринбург, Россия

**Резюме:** Цель – исследование методами математического моделирования процессов теплообмена огневого рафинирования черновой меди в агрегате печь-ковш. Основным металлургическим агрегатом при моделировании был принят агрегат печь-ковш, предназначенный для апробации технологии рафинирования с использованием донной продувки в пузырьковом режиме с применением газообразных восстановителей (углеводородов) и окислителя. Используются методы математического моделирования, позволяющие описывать свойства реального процесса на основе математической формализации физических законов и закономерностей. Вместо дорогостоящего мазута, используемого в качестве жидкого восстановителя, предложено использовать газообразные восстановители. Показано, что их использование в режиме продувки «снизу» позволяет достигнуть высоких технико-экономических показателей процесса. Этому также способствуют перенос части технологических операций непосредственно в ковш, исключение необходимости повторного расплавления и разогрева рафинируемой меди. Показано, что одной из проблем является необходимость поддержания заданного теплового режима, обеспечивающего как саму возможность проведения операций рафинирования, так и ввода в расплав при донной продувке газообразного реагента, от которого зависят гидрогазодинамические параметры. Предложена оригинальная методика учета в математических моделях влияния тепловых эффектов химических реакций (на примере экзотермических реакций окислительного периода рафинирования). Использование двух различных методов анализа позволило достаточно полно идентифицировать величину влияния основных экзотермических реакций на тепловой режим процесса рафинирования. Представленные математические модели позволяют определить удельное влияние различных технологических параметров (состав и расход топлива, температура и степень обогащения дутья, конструкция футеровки и т.д.) на динамику изменения температурного поля расплава и технико-экономические параметры плавки в целом.

**Ключевые слова:** рафинирование меди, печь-ковш, донная продувка, тепловой баланс, газообразные восстановители, гидрогазодинамические параметры

**Для цитирования:** Черемисин Д.Д., Новокрещенов С.А., Швыдкий В.С., Жуков В.П. Математическое моделирование теплового режима агрегата печь-ковш с учетом внутренних тепловых источников. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 4. С. 509–518. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-509-518>

## Mathematical modelling of the thermal regime of a ladle- furnace unit considering internal heat sources

Dmitry D. Cheremisin\*, Sergey A. Novokreschenov\*\*,  
Vladimir S. Shvydkiy\*\*, Vladimir P. Zhukov\*\*\*

\*Uralenergochermet JSC

\*\*Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

\*\*\*Uralmekhanobr JSC, Yekaterinburg, Russia

**Abstract:** We apply mathematical modelling to study heat transfer processes during fire refining of blister copper in a ladle-furnace unit. A ladle-furnace unit was designed to test the refining technology using bottom blowing in a bubble mode by gaseous reducing agents (hydrocarbons) and an oxidiser. Mathematical modelling allows the properties of a real process to be described based on mathematical formalisation of physical laws and regularities. It was proposed to use gaseous reducing agents, rather than expensive residual fuel, as a liquid-reducing agent. The use of gaseous reduc-

ing agents in the bottom blowing mode produces higher technical and economic indicators of the process. In addition, some technological operations were transferred directly to the ladle, thereby eliminating the need for re-melting and heating of refined copper. One of the identified problems was the need to maintain the predetermined thermal regime, which provides the very possibility of both performing refining operations and introducing a gaseous reagent (determining the hydro-gas-dynamic parameters) into the melt during bottom blowing. An original method for considering the thermal effects of chemical reactions in mathematical models was presented using an example of exothermic reactions during oxidative refining. The use of two different methods of analysis allowed a comprehensive assessment of the influence of the main exothermic reactions on the thermal regime of the refining process. The presented mathematical models can be used for determining the specific effect of various technological parameters (composition and fuel consumption, temperature and degree of blast enrichment, lining design, etc.) on the dynamics of changes in the temperature field of the melt and the technical and economic parameters of melting as a whole.

**Keywords:** copper refining, ladle furnace, bottom blowing, heat balance, gaseous reducing agents, hydro-gas-dynamic parameters

**For citation:** Cheremisin DD, Novokreschenov SA, Shvydkiy VS, Zhukov VP. Mathematical modelling of the thermal regime of a ladle-furnace unit considering internal heat sources. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(4):509–518. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-509-518>

## ВВЕДЕНИЕ

Технический прогресс в области производства тяжелых цветных металлов развивается по пути совершенствования технологических процессов, решения экологических проблем производства и повышения качества конечной продукции [1–12].

В практике ведущих стран производителей меди на стадии огневого рафинирования распространено использование природного газа как восстановителя. Его доля среди прочих реагентов в настоящее время составляет более 35%. Спецификой работы уральских предприятий является то, что процесс огневого рафинирования осуществляется централизованно. С заводов-производителей на профильное предприятие комбината ОАО «Уралэлектромедь» привозят черновую медь, которую повторно расплавляют и рафинируют в стационарных анодных отражательных печах емкостью 350 т, где на стадии восстановления огневого рафинирования используют дорогостоящий мазут.

Применение в восстановительном периоде огневого рафинирования донной продувки расплава газообразными углеводородами [13, 14] в пузырьковом режиме позволяет значительно повысить степень использования восстановителя [15], в том числе за счет более равномерного распределения реагента в объеме расплава и большей удельной поверхности контакта фаз «восстановитель – расплав». Данный метод в совокупности с

возможностью переноса части объема производства в новый для цветной металлургии агрегат – печь-ковш – на площадку завода-производителя выведет технико-экономические показатели процесса на значительно более качественный уровень.

Реализация процесса сопряжена с определенными трудностями в поддержании заданного уровня температур расплава, выборе оптимального гидрогазодинамического режима донной продувки, оптимизирующего полноту и скорость химических взаимодействий при огневом рафинировании черновой меди. Для решения настоящих проблем был разработан комплекс нестационарных математических моделей, основными из которых являются модель теплового состояния расплава [16], гидродинамическая модель движения (всплытия) газовых пузырей [17], диффузионно-кинетическая модель восстановления оксида меди (I) продуктами неполного сгорания природного газа [13].

Моделирование любого объекта сопряжено с принятием ряда допущений, приближений, аппроксимаций, в той или иной степени влияющих на качество и адекватность получаемых результатов. Среди основных путей совершенствования математических моделей можно выделить не только уточнение за счет учета большего количества влияющих факторов, но и адаптацию элементов принятых математических моделей.

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ РАСПЛАВА  
ЧЕРНОВОЙ МЕДИ В ОКИСЛИТЕЛЬНОМ  
ПЕРИОДЕ РАФИНИРОВАНИЯ**

При производстве меди на АО «Урал-электромедь» черновую медь выпускают из конвертера с температурой порядка 1300°C, но в процессе разлива и транспортировки температура расплава снижается до 1100–1150°C, и для реализации процесса рафинирования необходимо подвести дополнительную тепловую энергию для достижения заданной температуры расплава. Одновременно с этим в работах [18–20] показано определяющее влияние температурного режима на изменение размера и динамики всплытия газового пузыря [21, 22], что, в свою очередь, воздействует на скорость и глубину химического взаимодействия газа и расплава. В то же время химическое взаимодействие на поверхности контакта «расплав – газовый пузырь» будет продуцировать изменение объема пузыря, а в результате экзо- или эндотермичности химических реакций – оказывать воздействие на тепловой и температурный режимы расплава, что показано в работе [23].

Основное уравнение математической модели [16] теплового режима печи-ковша было дополнено новым членом – уравнением теплопроводности в дифференциальной форме:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) + \frac{q\Sigma}{c \cdot m_{расп}}, \quad (1)$$

где  $t$  – температура;  $x$  и  $y$  – горизонтальная и

вертикальная координаты;  $\tau$  – время;  $\alpha = \lambda / (c \cdot \rho)$  – коэффициент температуропроводности;  $m_{расп}$  – масса расплава,  $q\Sigma$  – суммарный тепловой поток экзотермических реакций.

Аналитически второе слагаемое в правой части уравнения, описывающее влияние внутренних источников тепла на стадии окисления, имеет следующий вид:

$$\frac{q\Sigma}{c \cdot m_{расп}} = \frac{1}{c \cdot m_{расп} \cdot \tau_{ок}} \times \left( \sum (m_{элемент} \cdot \Delta H_{элемент}) \right), \quad (2)$$

где  $\Delta H$  – удельные тепловые эффекты реакций окисления Cu, Pb, Sb, As, Ni, Fe;  $m_{элемент}$  – расчетные массы окисляемых компонентов;  $\tau_{ок}$  – время проведения окислительного периода плавки, принятое равным 1,5 ч.

Величина теплового эффекта реакций изменяется в зависимости от температурных условий, и анализ табличных данных<sup>1</sup> по каждой из химических реакций в отдельности позволил математически описать зависимость  $\Delta H(t)$ . Графическая интерпретация зависимости изменения величины суммарного теплового потока  $q\Sigma$  от температуры  $t$  представлена на рис. 1.

Полученная зависимость, заданная в виде логистического уравнения  $y_1(t)$ , позволила учесть нестационарный характер процесса и уточнить математическую модель теплового режима агрегата печь-ковш для огневого рафинирования меди [16]:

$$y_1(t) = \frac{1000}{4,087} \left[ 18,1751 - 0,00014646426 \cdot t - 1,6071429 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 - \frac{0,907189 + 0,001388 \cdot t - 5,178571 \cdot 10^{-7} \cdot t^2}{1 + \left( \frac{t}{1246,8345} \right)^{16882,45132}} \right], \quad Bm / M^3.$$

<sup>1</sup> Outokumpu HSC Chemistry for Windows. Chemical Reaction and Equilibrium Software with Extensive Thermochemical Database [Электронный ресурс]. URL: <http://www.chemistry-software.com/pdf/HSC/full%20manual%20HSC%20Chemistry%205.pdf> (12.11.2020).

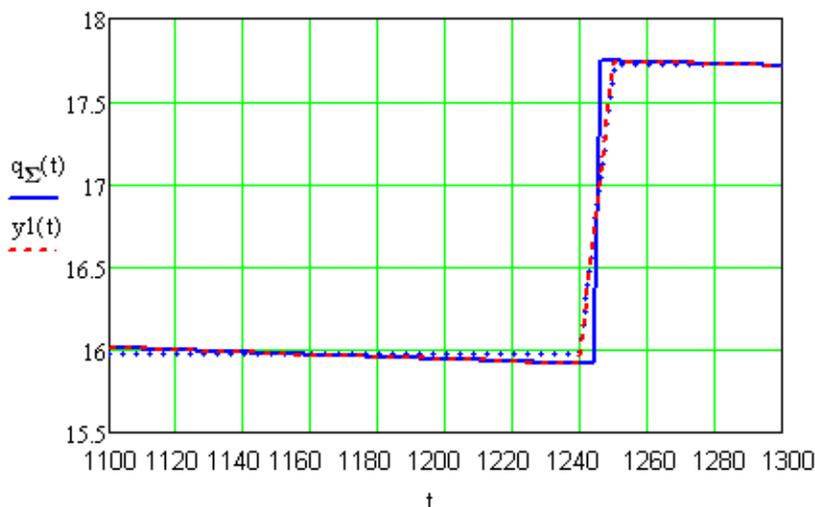


Рис. 1. Изменение величины суммарного теплового потока экзотермических реакций с изменением температуры  
 Fig. 1. Value of total heat flux of exothermic reactions vs temperature

Численное решение в плоской постановке, найденное с использованием метода конечных элементов, представлено на

рис. 2 в виде изотерм поля температур в сечении ковша.

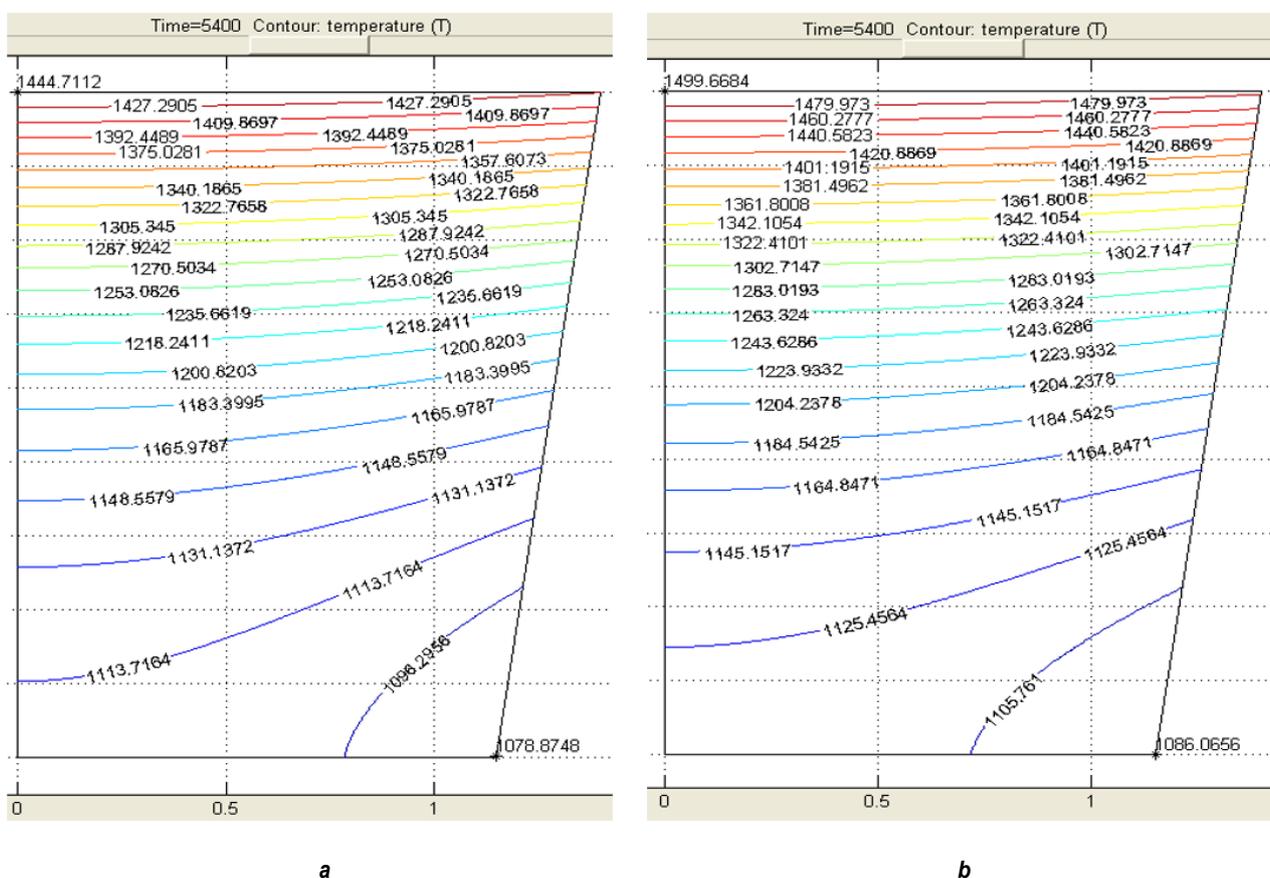


Рис. 2. Расчетное температурное поле расплава при температуре газа под крышкой 1850°C и времени нагрева 90 мин слева (а) – без учета; справа (б) – с учетом экзотермических реакций  
 Fig. 2. Calculated temperature field of the melt at the gas temperature under the cover of 1850°C and the heating time of 90 min: on the left (a) – ignoring exothermic reactions; on the right (b) – taking into account exothermic reactions

На данном этапе моделирования было принято, что окисляемые примеси равномерно распределены в объеме расплава и выделение тепла происходит непрерывно в течение всего окислительного периода рафинирования. В дальнейшем модель можно уточнить, выделив отдельно реакционную зону, хотя при пузырьковом режиме движения газов эта область будет находиться в большей части объема ванны.

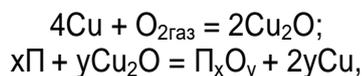
Анализ результатов моделирования с учетом и без учета тепловых эффектов химических реакций окисления показывает, что для температуры газов под крышкой 1850°C, начальной температуры расплава 1100°C, времени, соответствующего длительности нагрева 1,5 ч, уровень среднеинтегральной температуры различается на 24°C, что является весьма значительной величиной в условиях необходимости поддержания температур процесса рафинирования в достаточно узком диапазоне. Максимальная температура для данных условий увеличилась почти на 55°C, минимальная – на 7°C до уровня 1086°C, однако следует учитывать, что данные абсолютные величины получены без учета движения расплава в ковше, происходящего под действием свободной и вынужденной конвекции, и всплытия газовых пузырей.

### ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ СТАДИИ ПРОЦЕССА ОГНЕВОГО РАФИНИРОВАНИЯ МЕДИ В АГРЕГАТЕ ПЕЧЬ-КОВШ

Другим способом провести комплексную оценку теплотехнических характеристик агрегата является составление теплового баланса процесса. На основе материального баланса по известной методике<sup>2,3</sup> был состав-

лен тепловой баланс процесса огневого рафинирования меди в печи-ковше и представлен в табличной форме. Расчет горения топлива произведен по методике<sup>4</sup>, за основу взят усредненный состав газа, используемого на предприятии, а воздух, подаваемый на горелки, подогревается до 200°C. Продувка ведется смесью кислорода и воздуха в соотношении 40:60. Параметры футеровки и конструкции печи-ковша емкостью 36 т соответствуют параметрам проекта переоборудования<sup>5</sup> разливочного ковша ОАО «Уралэлектромедь».

На основе табличных данных [13] для внесения в приходную часть теплового баланса статьи «Тепло экзотермических реакций в окислительном периоде рафинирования» (табл. 1) были рассчитаны величины суммарных тепловых эффектов химических реакций окисления основных примесей Pb, Sb, As, Ni, Fe, а также реакции образования оксида меди (I):



где П – металл-примесь.

Тепловой и топливный КПД агрегата составили 17,64% и 19,41%, соответственно, удельный расход условного топлива – 15,29 кг у.т/т меди. Исходя из производительности имеющихся в парке предприятий и предлагаемых к установке горелочных устройств, расчетное время достижения температуры 1300°C – 197 мин (11820 с). Представленные теплотехнические характеристики агрегата можно улучшить за счет дополнительной футеровки ковша, подогрева топлива до 300°C, продувки чистым кислородом (вместо смеси

<sup>2</sup> Старцев В.А., Воронов Г.В., Лобанов В.И., Шумахер Э.А., Шумахер Э.Э. Скрап-карбюраторный процесс при производстве стали в мартеновских печах: учеб. пособ. Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2004. 225 с.

<sup>3</sup> Зобнин Б.Ф. Казяев М.Д., Китаев Б.И., Лисиенко В.Г., Телегин А.С., Ярошенко Ю.Г. Теплотехнические расчеты металлургических печей. 2-е изд. М.: Metallurgia, 1982. 360 с.

<sup>4</sup> Гушин С.Н., Зайнуллин Л.А., Казяев М.Д., Юрьев Б.П., Ярошенко Ю.Г. Топливо и расчеты его горения: учеб. пособ. Екатеринбург: ООО «Уральский центр академического обслуживания», 2007. 88 с.

<sup>5</sup> Разработка математической модели теплового режима печи-ковша для рафинирования меди с использованием природного газа: отчет о НИР / ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ»; рук. С.А. Новокрещенов. Екатеринбург, 2009. 72 с. Док. № 0420.

**Таблица 1.** Тепловой баланс агрегата печь-ковш для огневого рафинирования черновой меди  
**Table 1.** Heat balance of the ladle furnace unit for fire refining of blister copper

Приходная часть			Расходная часть		
Статья	Значение, МДж	Доля, %	Статья	Значение, МДж	Доля, %
Химическое тепло сгорания топливовоздушной смеси	16 135,6	90,88	Полезно затраченное тепло (на получение металла)	3 132,0	17,64
Физическое тепло топлива	15,5	0,09	Потери с отходящими газами	13 560,3	76,37
Физическое тепло воздуха, подаваемого на горелки	1 222,0	6,88	В том числе дымовые газы	13 382,5	75,37
Физическое тепло дутья	56,9	0,32	Продукты продувки	177,8	1,00
Тепло экзотермических реакций в окислительном периоде рафинирования	324,9	1,83	Тепловые потери теплопроводностью	973,3	5,48
–	–	–	–	118,8	0,67
			В том числе дно ковша	315,4	1,78
			Стенки ковша (расплав)	180,4	1,02
			Стенки ковша (под крышкой)	358,6	2,02
			Крышка ковша	89,4	0,50
Итого	17 755,0	100,00	Неучтенные потери	89,4	0,50
			Итого	17 755,0	100,00

кислорода и воздуха). В табл. 2 представлен сопоставительный анализ влияния факторов (1 – температура подогрева воздуха, подаваемого на горелки, 2 – обогащение окислительного дутья кислородом, 3 – футеровка ковша, 4 – состав топлива) на расчетную продолжительность процесса нагрева расплава в

окислительном периоде рафинирования.

Расчетная длительность нагрева расплава определена на основе расходных и приходных статей теплового баланса и лимитирована мощностью горелочных устройств, выраженной фиксированным номинальным расходом топлива 120 м<sup>3</sup>/ч для всех вариантов.

**Таблица 2.** Влияние различных факторов на расчетную длительность процесса нагрева расплава с учетом тепловых эффектов экзотермических реакций рафинирования меди

**Таблица 2.** Effect of various factors on the estimated duration of melt heating taking into account the thermal effects of exothermic reactions of copper refining

Температура подогрева воздуха, °С (1)	25	100	200	300
Расчетное время процесса нагрева, с	12986	12633	12080	11529
Соотношение воздуха и кислорода в дутье, % (2)	100:0	80:20	60:40	0:100
Расчетное время процесса нагрева, с	12986	12863	12725	12219
Вариант футеровки агрегата (3)*	базовый вариант футерования	вариант с дополнительной футеровкой	–	–
Расчетное время процесса нагрева, с	12986	12554	–	–
Вид топлива (4)	природный газ	пропан-бутановая смесь	–	–
Расчетное время процесса нагрева, с	12986	11446	–	–

\*Стандартный, не переоборудованный разливочный ковш, расчетное время нагрева – 13605 с.

Анализ данных табл. 2 показывает более значительное сокращение расчетной длительности нагрева за счет применения подогрева подаваемого на горелочные устройства воздуха в сравнении с обогащением донного дутья кислородом, даже несмотря на снижение объема подаваемого «холодного» газа непосредственно в расплав. Считаем целесообразным футерование разливочного ковша, обеспечивающее существенное снижение расчетной длительности нагрева. Опционально приведено значение для нагрева с использованием пропан-бутановой смеси на этапе полигона без подключения к газовым сетям.

При составлении табл. 2 рассмотрено влияние факторов в отдельности относительно базового варианта (температура подаваемого на горелки воздуха 25°C, продувка снизу атмосферным воздухом, ковш футерован, отопление природным газом; значение расчетной длительности процесса нагрева – 12986 с). Представленная балансовая модель позволяет учитывать все эти факторы и в совокупности, например, для температуры подогрева воздуха 300°C, продувки чистым кислородом и дополнительной футеровки печи-ковша расчетная длительность процесса нагрева составит 10717 с. Но следует учесть, что балансовый метод исследования предполагает рассмотрение расплава как гомогенного, однородного по температуре нагреваемого тела, а в условиях реального эксперимента, даже при условии принятия допущения о «неподвижности расплава», время достижения заданной среднеинтегральной температуры ограничено теплопроводностью самого расплава. Поэтому для выбора окончательного режима нагрева необходимо учитывать нестационарный характер процесса нагрева, что и позволяет

реализовать математическая модель температурного поля расплава, представленная выше в настоящей работе.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе двух различных математических моделей проведена оценка основных теплотехнических характеристик окислительной стадии процесса, показана принципиальная возможность достижения и поддержания температуры, необходимой для проведения огневого рафинирования меди в агрегате печь-ковш. Представленные математические модели позволяют определить удельное влияние различных технологических параметров (состав и расход топлива, температура и степень обогащения дутья, конструкция футеровки и т.д.) на динамику изменения температурного поля расплава и технико-экономические параметры плавки в целом, а также будут использованы на дальнейших этапах моделирования продувки металлических расплавов газами.

Модели дополнены авторской методикой учета влияния экзотермических реакций рафинирования, позволяющей значительно их уточнить. Составленный тепловой баланс показал достаточно низкий «удельный вес» подводимой в результате протекания основных экзотермических реакций теплоты в расплаве в окислительном периоде плавки в сравнении с количеством тепла, поступающим за весь период плавки из всех источников. Однако если рассматривать в отдельности окислительный период рафинирования меди, показано, что тепловые эффекты реакций окисления значительно влияют на температуру расплава на локальном временном отрезке, находящемся ближе к концу окислительного периода огневого рафинирования черновой меди.

## Список литературы

1. Dong Joon Min, Tsukihashi F. Recent advances in understanding physical properties of metallurgical slags // Metals and Materials International. 2017. Vol. 23. Iss. 1. P. 1–19. <https://doi.org/10.1007/s12540-017-6750-5>
2. Sarfo Prince, Young Jamie, Ma Guojun, Young Courtney. Characterization and recovery of valuables from waste copper smelting slag // Advances in Molten Slags, Fluxes, and Salts: Proceedings of the 10th International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts (Berlin, 1st January 2016). Berlin: Springer, Cham, 2016. P. 889–898. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-48769-4\\_95](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48769-4_95)
3. Шнеерсон Я.М., Иванова Н.Ф. Применение автоклавных методов для рафинирования труднообогатимых медных полиметаллических концентратов //

- Цветные металлы. 2003. № 7. С. 63–67.
4. Davenport W.G., King M.J., Schlesinger M.E., Biswas A.K. Extractive metallurgy of copper. London: Oxford, Pergamon, 2002. 452 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.elsevier.com/books/extractive-metallurgy-of-copper/davenport/978-0-08-044029-3> (12.05.2021).
5. Комков А.А., Камкин Р.И. Поведение меди и примесей при продувке медеплавильных шлаков газовой смесью CO–CO<sub>2</sub> // Цветные металлы. 2011. № 6. С. 26–31.
6. Coursol P., Valencia C.N., Mackey V.P., Bell S., Davis B. Minimization of copper losses in copper smelting slag during electric furnace treatment // JOM. 2012. Vol. 64. No. 11. P. 1305–1313. <https://doi.org/10.1007/s11837-012-0454-6>
7. Лукавий С.Л., Федоров А.Н., Хабиев М.П., Хабиев Р.П., Мин М.Г. Исследование динамической вязкости высокомедистых шлаковых расплавов // Цветные металлы. 2012. № 2. С. 32–35.
8. Булатов К.В., Жуков В.П. Технологические возможности металлургической переработки промпродуктов обогащения полиметаллических руд и обеднения шлаков медеплавильного производства в агрегате «Победа» // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 2. С. 421–433. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-421-433>
9. Паньшин А.М., Якорнов С.А., Скопов Г.В. Переработка техногенных отходов металлургических предприятий Уральской горно-металлургической компании // Техноген-2019: сб. науч. тр. Екатеринбург: УрО РАН, 2019. С. 29–34.
10. Selivanov E.N., Popov A.I., Selmenskikh N.I., Lebed A.V. Oxide inclusions in copper during its fire refining // Non-ferrous Metals. 2013. No. 2. P. 19–22.
11. Жуков В.П., Холод С.И., Лисиенко В.Г., Лаптева А.В. Возможность оптимизации состава шихты анодной плавки черновой меди методом математического планирования // Цветные металлы. 2017. № 9. С. 35–38. <https://doi.org/10.17580/tsm.2017.09.05>
12. Жмурова В.В., Немчинова Н.В., Васильев А.А. Гидрохимическая очистка от меди и свинца золотосодержащих катодных осадков // Цветные металлы. 2019. № 8. С. 64–74. <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.08.07>
13. Жуков В.П., Новокрещенов С.А., Агеев Н.Г. Математическое моделирование кинетики восстановления оксида меди (I) продуктами неполного сгорания природного газа. Сообщение 2 // Известия вузов. Цветная металлургия. 2013. № 3. С. 58–62.
14. Широков А.В., Пискунов И.Н., Миллер О.Г. Исследование кинетики раскисления меди продуктами неполного сгорания природного газа // Цветная металлургия. 1966. № 11. С. 34–37.
15. Вольхин А.И., Елисеев Е.И., Жуков В.П., Смирнов Б.Н. Анодная и катодная медь: физико-химические и технологические основы. Челябинск: Южно-Уральское книжное изд-во, 2001. 431 с.
16. Швыдкий В.С., Новокрещенов С.А., Гольцев В.А., Берняев О.Г. Разработка математической модели теплового режима печи-ковша для проведения процессов огневого рафинирования меди // Творческое наследие Б.И. Китаева: тр. Междунар. науч.-практ. конф. (г. Екатеринбург, 11–14 февраля 2009 г.). Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2009. С. 324–328.
17. Новокрещенов С.А., Швыдкий В.С., Жуков В.П., Овчинников Ю.Н., Черемисин Д.Д. Математическое моделирование гидродинамики пузырькового режима при донной продувке печи-ковша. Сообщение III // Известия вузов. Цветная металлургия. 2013. № 5. P. 58–62. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2013-5-58-62>
18. Новокрещенов С.А., Швыдкий В.С., Жуков В.П., Черемисин Д.Д. Математическое моделирование теплового режима печи-ковша при пузырьковой продувке расплава газом. Сообщение IV // Известия вузов. Цветная металлургия. 2016. № 1. P. 72–78. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2016-1-72-78>
19. Шияев М.И., Толстых А.В., Деренок А.Н., Хромова Е.М. Моделирование тепломассообмена при формировании пузырей в барботажных аппаратах // Теоретические основы химической технологии. 2003. Т. 37. № 6. С. 575–583.
20. Pis'menov S.A., Povolotskii D.Ya., Ustyugov A.A. Bath hydrodynamics with gas injection in a ladle-furnace unit: physical modeling // Steel in Translation. 2007. Vol. 37. No. 3. P. 189–190. <https://doi.org/10.3103/S0967091207030023>
21. Пиптюк В.П., Поляков В.Ф., Самохвалов С.Е., Исаев О.Б., Павлов С.Н., Травинчев А.А. Изучение теплового состояния ванны установки ковш-печь // Металлург. 2011. № 7. С. 50–53.
22. Драганов Б.Х., Алмаев Р.А. Анализ динамики и теплообмена паровых пузырьков в газожидкостной среде // Энергетика и автоматика. 2014. № 3. С. 21–26.
23. Новокрещенов С.А., Жуков В.П., Черемисин Д.Д., Холод С.И. Математическое описание внутренних источников тепла в процессе огневого рафинирования меди в печи-ковше // Цветные металлы. 2011. № 4. С. 28–30.

## References

1. Dong Joon Min, Tsukihashi F. Recent advances in understanding physical properties of metallurgical slags. *Metals and Materials International*. 2017;23(1):1–19. <https://doi.org/10.1007/s12540-017-6750-5>
2. Sarfo Prince, Young Jamie, Ma Guojun, Young Courtney A. Characterization and recovery of valuables from waste copper smelting slag. In: *Advances in Molten Slags, Fluxes, and Salts: Proceedings of the 10th International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts*. 1st January 2016, Berlin. Berlin: Springer, Cham; 2016, p. 889–898. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-48769-4\\_95](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48769-4_95)
3. Schneerson YaM, Ivanova NF. Using pressure oxidation methods for refining refractory polymetallic copper concentrates. *Tsvetnye Metally*. 2003;7:63–67. (In Russ.)
4. Davenport WG, King MJ, Schlesinger ME, Biswas AK. *Extractive metallurgy of copper*. London: Oxford,



Pergamon; 2002. 452 p. Available from: <https://www.elsevier.com/books/extractive-metallurgy-of-copper/davenport/978-0-08-044029-3> [Accessed 12th May 2020].

5. Komkov AA, Kamkin RI. Behaviors of copper and impurity elements during expulsion copper melt slags with CO<sub>2</sub> gas mixture. *Tsvetnye Metally*. 2011;6:26–31. (In Russ.)

6. Coursol P, Valencia CN, Mackey VP, Bell S, Davis B. Minimization of copper losses in copper smelting slag during electric furnace treatment. *JOM*. 2012; 64(11):1305–1313. <https://doi.org/10.1007/s11837-012-0454-6>

7. Lukavy SL, Fedorov AN, Habiev MP, Abiev RP, Min MG. Researching of dynamic viscosity of high-copper slag melts. *Tsvetnye Metally*. 2012; 2:32–35. (In Russ.)

8. Bulatov KV, Zhukov VP. Technological capabilities for metallurgical processing of industrial products in polymetallic ore preparation and copper smelting slag depletion in the Pobeda smelting unit. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(2):421–433. (In Russ.)

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-421-433>

9. Panchin AM, Jakornov SA, Skopov GV. Processing of technogenic waste of metallurgical enterprises of the Ural mining and metallurgical company. In: *Technogen-2019: Collected scientific works*. Yekaterinburg: Ural branch of the Russian Academy of Sciences; 2019, p. 29–34. (In Russ.)

10. Selivanov EN, Popov AI, Selmenskikh NI, Lebed AB. Oxide inclusions in copper during its fire refining. *Tsvetnye Metally*. 2013;2:19–22. (In Russ.)

11. Zhukov VP, Kholod SI, Lisenko VG, Lapteva AV. The possibility of optimization of composition of anode smelting charge of blister copper by mathematical planning. *Tsvetnye Metally*. 2017;9:35–38. (In Russ.)

12. Zhmurova VV, Nemchinova NV, Vasiliev AA. Removal of copper and lead from gold-bearing cathode deposits by hydrochemical treatment. *Tsvetnye Metally*. 2019;8:67–74. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.08.07>

13. Zhukov VP, Novokreshchenov SA, Ageyev NG. Mathematical simulation of copper (I) oxide reduction kinetics by the products of incomplete consumption of natural gas. Report 2. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya = Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2013;(3):58–62. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2013-3-231-236>

14. Shirokov AV, Piskunov IN, Miller OG. Studying kinet-

ics of copper deoxidation by the products of natural gas incomplete combustion. *Tsvetnaya metallurgiya = Non-ferrous metallurgy*. 1966;11:34–37. (In Russ.)

15. Vol'hin AI, Eliseev EI, Zhukov VP, Smirnov BN. *Anode and cathode copper: physicochemical and technological fundamentals*. Chelyabinsk: Yuzhno-Ural'skoe knizhnoe izdatel'stvo; 2001, 431 p. (In Russ.)

16. Shvydkij VS, Novokreshchenov SA, Gol'cev VA, Bernyaev OG. Development of a mathematical model of a ladle furnace thermal regime for carrying out fire refining of copper. *Tvorcheskoe nasledie B.I. Kitaeva: trudy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = B.I. Kitaev's creative heritage: Proceedings of International scientific and practical conference*. 11–14 February 2009, Ekaterinburg. Ekaterinburg: Ural State Technical University; 2009, p. 324–328. (In Russ.)

17. Novokreshchyonov SA, Shvydky VS, Zhukov VP, Ovchinnikov YuN, Cheremisin DD. Mathematical modeling of bubble mode modeling in case of bottom blowing-through of ladle-furnace. Report III. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya = Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2013;(5):58–62. (In Russ.)

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2013-5-58-62>

18. Novokreshchenov SA, Shvydkii VS, Zhukov VP, Cheremisin DD. Mathematical modeling of ladle furnace thermal conditions during gas-bubble melt blowing. Report IV. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya = Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2016;(1):72–78. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2016-1-72-78>

19. Shilyaev MI, Tolstykh AV, Derenok AN, Khromova EM. Modeling of heat and mass transfer during bubble formation in bubblers. *Teoreticheskie osnovy himicheskoy tekhnologii = Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2003;37(6):539–546. (In Russ.)

20. Pis'menov SA, Povolotskii DYa, Ustyugov AA. Bath hydrodynamics with gas injection in a ladle-furnace unit: physical modeling. *Steel in Translation*. 2007;37(3):189–190. <https://doi.org/10.3103/S0967091207030023>

21. Piptyuk VP, Polyakov VF, Samokhvalov SE, Isaev OB, Pavlov SN, Travinchev AA. Investigation of metal bath thermal state for a ladle-furnace plant. *Metallurg*. 2011;7:50–53. (In Russ.)

22. Draganov BH, Almaev RA. Analysis of dynamics and of heat exchange vapor bubble in gas-liquid environments. *Energetika i avtomatika*. 2014;3:21–26.

23. Novokreshchenov SA, Zhukov VP, Cheremisin DD, Kholod SI. Mathematical description of internal thermal source in process of fire refining of copper in ladle furnace. *Tsvetnye Metally*. 2011;4:28–30. (In Russ.)

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Черемисин Дмитрий Дмитриевич,**

кандидат технических наук,

инженер,

АО «Уралэнергочермет»,

620137, г. Екатеринбург, ул. Александровская, 3/А,

Россия;

✉ e-mail: e1.ry@e1.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Dmitry D. Cheremisin,**

Cand. Sci. (Eng.),

Engineer,

Uralenergochermet JSC,

3/A, Aleksandrovskaya St., Yekaterinburg 620137,

Russia;

✉ e-mail: e1.ry@e1.ru

**Новокрещенов Сергей Александрович,**  
кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры экономики и управления  
на металлургических и машиностроительных  
предприятиях,  
Уральский Федеральный университет им. первого  
Президента России Б.Н. Ельцина,  
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия;  
e-mail: novokreschenov@e1.ru

**Швыдкий Владимир Серафимович,**  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры теплофизики и  
информатики в металлургии,  
Уральский Федеральный университет им.  
первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия;  
e-mail: vshvit\_1@isnet.ru

**Жуков Владимир Петрович,**  
доктор технических наук, профессор,  
ведущий научный сотрудник,  
АО «Уралмеханобр»,  
620144, г. Екатеринбург, ул. Хохрякова, 87, Россия;  
e-mail: zhukov.v.p@mail.ru

#### **Заявленный вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### **Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 25.12.2020; одобрена после рецензирования 15.04.2021; принята к публикации 19.08.2021.

**Sergey A. Novokreschenov,**  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Economy  
and Management at Metallurgical and Machine-Building  
Enterprises,  
Ural Federal University named after the first  
President of Russia B.N. Yeltsin,  
19, Mira St., Yekaterinburg 620002, Russia;  
e-mail: novokreschenov@e1.ru

**Vladimir S. Shvydkiy,**  
Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Professor of the Department of Thermal Physics  
and Information Science in Metallurgy,  
Ural Federal University named after the first  
President of Russia B.N. Yeltsin,  
19, Mira St., Yekaterinburg 620002, Russia;  
e-mail: vshvit\_1@isnet.ru

**Vladimir P. Zhukov,**  
Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Leading Researcher,  
Uralmekhanobr JSC,  
87, Khokhryakov St., Yekaterinburg 620144, Russia;  
e-mail: zhukov.v.p@mail.ru

#### **Contribution of the authors**

The authors contributed equally to this article.

#### **Conflict of interests**

The authors declare no conflict of interests.

#### **Information about the article**

The article was submitted 25.12.2020; approved after reviewing 15.04.2021; accepted for publication 19.08.2021.



## Определение коррозионных характеристик в координатах Нейквиста при защите поверхности стали латексами

© А.А. Яковлева, Е.А. Анциферов, С.В. Садловский

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

**Резюме:** Цель – исследование коррозионного процесса на образцах стали Ст3, защищенных латексным покрытием 69Б-2к, выпускаемым ООО «Капител» (г. Иркутск). В исследованиях применялся метод электрохимической импедансной спектроскопии образцов стали с нанесенным трехкратно покрытием из латекса с помощью потенциостата-гальваностата PGSTAT302+FRA2, оснащенного программным обеспечением NOVA 1.8. Коррозионные исследования проводили при термостатировании ( $25 \pm 0,2^\circ\text{C}$ ) рабочего пространства. Для определения скорости коррозии были проведены гравиметрические испытания с фиксированием изменений массы образцов за контролируемый промежуток времени (до 10 ч). В качестве электролита использовали 3% раствор хлорида натрия. Показано, что для описания механизма коррозионного процесса в большинстве случаев приемлемым оказывается использование эквивалентной электрохимической схемы с элементами Варбурга и Cotangent Hyperbolic, моделирующей протекание реакции на границе электрод-электролит. По результатам визуальных, гравиметрических и электрохимических исследований показано, что для поверхности стали Ст3 с покрытием из латекса 69Б-2к длительное время импеданс почти не изменяется. Очевидно, что поверхностный процесс связан с лимитирующей стадией диффузии растворителя через защитный слой. При этом электрохимически определенная скорость коррозии невелика и составила  $\sim 0,164$  мм/год (для контрольных образцов – 0,75 мм/год). Таким образом, проведенные исследования подтвердили достаточно высокие защитные качества латекса 69Б-2к. Коррозионные показатели латекса связаны с его составом, компоненты которого не только обладают хорошими адгезионными качествами, но и активны по отношению к другим взаимодействиям, таким как химические взаимодействия компонентов между собой и с кристаллитами на поверхности металлов. По результатам экспериментальных исследований разработана эквивалентная электрическая схема. Модельный расчет, проведенный на ее основе, позволяет описывать экспериментальную кривую в координатах Нейквиста практически полностью.

**Ключевые слова:** коррозия, механизм, импеданс, эквивалентная схема, антикоррозионное покрытие, латекс

**Для цитирования:** Яковлева А.А., Анциферов Е.А., Садловский С.В. Определение коррозионных характеристик в координатах Нейквиста при защите поверхности стали латексами. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 4. С. 519–527. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-519-527>

## Determination of corrosion characteristics of steel protected by a latex coating in Nyquist coordinates

Ariadna A. Yakovleva, Evgeniy A. Antsiferov, Sergey V. Sadlovsky

*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

**Abstract:** This paper investigates the corrosion process of steel St3 protected by latex coating 69B-2k produced by *Kapitel Ltd* (Irkutsk). Electrochemical impedance spectroscopy of steel samples with a threefold latex coating was carried out by a PGSTAT302 + FRA2 potentiostat-galvanostat equipped with NOVA 1.8. Corrosion studies were carried out under thermostating ( $25 \pm 0.2^\circ\text{C}$ ) of the working environment. The corrosion rate was determined by gravimetric tests with the recording of mass changes over a controlled period of time (up to 10 h). A 3% sodium chloride solution was used as the electrolyte. In most cases, the mechanism of the corrosion process can be reliably described by an equivalent electrochemical circuit with Warburg and Cotangent Hyperbolic elements, which simulates the reaction at the electrode-electrolyte interface. According to the conducted visual, gravimetric and electrochemical studies of the St3 steel surface protected with the 69B-2k latex coating, the impedance remains almost unchanged for a prolonged period of time. It is obvious that the surface process is associated with the limiting stage of solvent diffusion through the protective layer. Thus, the electrochemically determined corrosion rate was low and amounted to  $\sim 0.164$  mm/year (for reference samples – 0.75 mm / year). Our studies confirmed high protective qualities of latex 69B-2k. The corrosion properties of the coating under study are related to its composition, the components of which not only exhibit good adhesion, but are also active with respect to other interactions, including chemical interactions of the components with each other and with metal sur-

face crystallites. The model calculation of the process, carried out using the developed equivalent electrochemical circuit, describes experimental curves in Nyquist coordinates almost comprehensively.

**Keyword:** corrosion, mechanism, impedance, equivalent circuit, corrosion resistant coating, latex

**For citation:** Yakovleva AA, Antsiferov EA, Sadlovsky SV. Determination of corrosion characteristics of steel protected by a latex coating in Nyquist coordinates. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(4):519–527. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-519-527>

## ВВЕДЕНИЕ

Коррозионные явления на поверхности стальных конструкций настолько масштабны и разнообразны по своим проявлениям, что до настоящего времени продолжают активно разрабатываться всевозможные приемы защиты и противодействия им. Существенный интерес материаловедения связан с антикоррозионной защитой стальных поверхностей покрытиями на основе органических связующих [1–3].

Представляемая работа относится к разработке технологии и созданию специализированных полимерных покрытий, а также к необходимости детального изучения механизма взаимодействия покрытия с металлической основой, оценке свойств защитных пленок, их устойчивости во времени и решению других вопросов, связанных с этим. Цель работы состоит в исследовании коррозионного процесса на стали Ст3, защищенной латексным покрытием 69Б-2к, выпускаемым ООО «Капиталь» (г. Иркутск).

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При проведении коррозионных исследований использовали стальной стержень длиной около 7 см и диаметром 5 мм, вставленный в стеклянную трубку большего диаметра и залитый эпоксидной смолой. Для крепления к прибору на одном конце стержня выполнена резьба. Другая торцевая сторона стержня была зачищена на точильном станке до металла и являлась именно той поверхностью, на которой проводили коррозионные испытания. Рабочая поверхность была отполирована алмазной пастой до зеркального состояния и обезжирена спиртом. Затем образец погружали в ультразвуковую ванну на 5 мин, дополнительно обезжировали изопропиловым спиртом и выдерживали в сушильном шкафу около 10 мин при температуре 40°C. Формирование на рабочей поверхности

защитной пленки производили трехкратным нанесением латекса микродозатором с высушиванием предыдущего слоя на воздухе.

В качестве защитной пленки был испытан латекс 69Б-2к, основой его состава является смесь стирол-акриловых латексов, полученных методом радикальной эмульсионной полимеризации сополимеров акриловой кислоты и бутилакрилата, в качестве эмульгаторов использованы сульфонал и неонол – добавки, способствующие повышению антикоррозионных свойств покрытий.

В каждой серии опытов использовали как минимум три образца, что позволяло усреднять результаты взвешивания и отслеживать динамику взаимодействия образца со средой.

После коррозионных исследований образцы промывали дистиллированной водой, высушивали до постоянной массы в сушильном шкафу при температуре 40°C и взвешивали. Взвешивание образца до начала и в конце опыта позволяет проконтролировать достоверность полученных результатов и дает сведения о массе прокорродировавшего за время эксперимента металла. Результаты такого гравиметрического анализа позволяют оценивать скорость коррозии.

Основным методом исследования был метод электрохимической импедансной спектроскопии (ЭИС). Метод ЭИС относится к неразрушающим методам изучения механизма коррозии и основан на экспериментальном определении импеданса электрохимической системы [4–7], он позволяет определять скорости и механизмы поверхностных процессов на основе электрохимических характеристик (плотности тока, перенапряжения, мнимой и действительной составляющих сопротивления). В основе анализа результатов лежит их сравнение с известными моделями эквивалентных электрических цепей, отражающими свойства стандартов (комбинации сопротив-

лений, емкостей и индуктивностей). Несмотря на известные преимущества данного метода исследования, имеются работы, в которых авторы отмечают в качестве недостатка метода невозможность однозначного выбора эквивалентной схемы [8]. Авторами предложена собственная упрощенная эквивалентная схема, позволяющая удовлетворительно моделировать коррозионное поведение стали Ст10 в растворе  $\text{NH}_4\text{Cl}$  с концентрацией  $0.5 \text{ моль/дм}^3$ .

Действительно, известно большое количество сложных эквивалентных схем, дающих удовлетворительное совпадение при моделировании конкретных электрохимических систем [9–19]. На начальных этапах исследования коррозионных закономерностей, очевидно, удобнее рассматривать те несколько базисных теоретических схем, которые оперируют простыми элементами (сопротивление, емкость, индуктивность), соединенными по 2–3 элемента в простые (последовательные или параллельные) цепи.

В нашей работе электрохимические характеристики коррозии получены на приборе потенциостат-гальваностат PGSTAT302+ FRA2 фирмы «AutoLab» с программным обеспечением NOVA 1.8. Система PGSTAT302+FRA2 позволяет проводить измерение импеданса в диапазоне от 1 МОм до 100 ГОм и получать исследуемые точки на графиках каждые 100 нс, что важно для анализа результатов коррозионных исследований.

В работе была использована классическая трехэлектродная ячейка, которая состоит из рабочего электрода (исследуемый стальной стержень), хлорсеребряного электрода сравнения и вспомогательного платинового электрода. Сама ячейка представляет конусную стеклянную емкость с рубашкой для термостатирования и специальной крышкой. Перед экспериментом ячейку заполняли электролитом. В качестве электро-

лита использовали 3% раствор хлорида натрия, что соответствует ГОСТам для изучения коррозионных процессов (ГОСТ Р 9.907<sup>1</sup>, ГОСТ 9.908<sup>2</sup>, ГОСТ 9.08<sup>3</sup>). Коррозионные исследования проводили при поддерживаемой термостатом температуре  $25 \pm 0,2^\circ\text{C}$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Принцип измерения импеданса заключается в том, что на электрохимическую систему, находящуюся в равновесии, оказывают воздействие малым сигналом и измеряют отклик системы. Если к электрохимической системе приложить переменный ток, то через систему будет идти ток синусоидальной формы, имеющий такие характеристики, как сдвиг фаз  $\varphi$  (разница фаз тока и напряжения) и  $\omega$  – угловая частота.

Импеданс  $Z$  (полное комплексное сопротивление в системе, по которой протекает переменный ток) в любой момент времени  $t$  может быть представлен как

$$Z = Z_0 \cos \varphi + Z_0 \sin \varphi \cdot ctg(\omega t),$$

где  $Z_0$  – некоторая постоянная для данных амплитудных значений величина.

Чаще уравнение для импеданса имеет более простой вид, при получении которого использована формула Эйлера:  $e^{j\alpha} = \cos \alpha + j \sin \alpha$  для некоторого угла  $\alpha$ , а также другие представления о комплексных величинах [7]:

$$Z = Z' - jZ'',$$

где  $Z'$  и  $Z''$  – активная и реактивная составляющие импеданса;  $j$  – мнимая единица ( $j = \sqrt{-1}$ ).

Графическое представление импеданса в осях  $Z' - Z''$  (координатах Нейквиста) является одним из важных этапов коррозионных

<sup>1</sup>ГОСТ Р 9.907. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы, сплавы, покрытия металлические. Методы удаления продуктов коррозии после коррозионных испытаний. Введ. 01.01.2009. М.: Стандартинформ, 2009.

<sup>2</sup>ГОСТ 9.908. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости. Введ. 01.01.87. М.: ИПК Изд-во стандартов, 1999.

<sup>3</sup>ГОСТ 9.008–82. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. М.: Изд-во госстандартов, 1982.

исследований. Координаты Найквиста – комплексная омическая плоскость – на оси абсцисс представляют действительную составляющую  $Z'$ , на оси ординат – мнимую составляющую сопротивления  $Z''$ .

Использование спектроскопии электрохимического импеданса для описания поверхностных явлений основано на проведении сравнения величин  $Z_{расч}$  и  $Z_{теор}$  и получении численных параметров изучаемого процесса. Теоретическое рассмотрение и создание физической, а затем математической модели для  $Z_{теор}$  обычно проводят параллельно с конструированием электрической эквивалентной схемы из простейших элементов (сопротивлений, индуктивностей и емкостей), определенных в эксперименте для  $Z_{расч}$  [4, 5]. На рис. 1 представлены результаты испытаний (годографы импеданса): слева показана развертка процесса во времени, справа –

один из годографов импеданса, на котором демонстрируется анализ получаемых закономерностей.

При анализе полученных данных было просмотрено множество моделей эквивалентных цепей из базы данных, но найти такую модель, которая полностью соответствовала бы изучаемым режимам, не удалось.

За основу принята простая модель ячейки с диффузионными затруднениями, в которой сопротивление металлического электрода и ионного проводника (электролита) являются чисто омическими  $R$ , а на межфазной границе возникает двойной электрический слой, имеющий емкость  $C$ . Моделирование проводили с использованием лестничной схемы с элементом Варбурга с учетом протекания изменений на границе электрод-электролит (рис. 2). Однако оказалось, что такая модель подходит не ко всей части годографа, а только к участку, лежащему левее минимума.

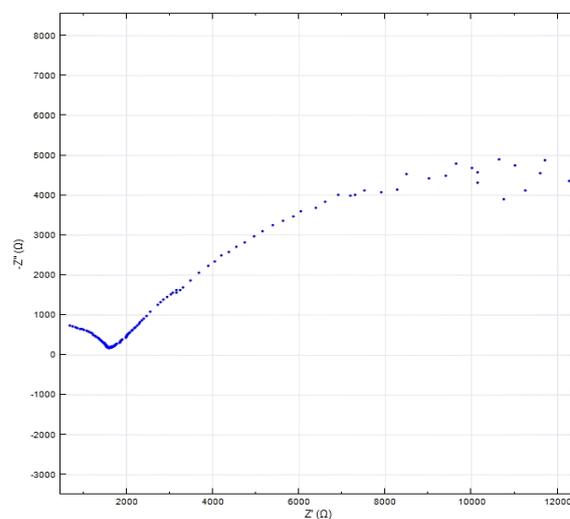
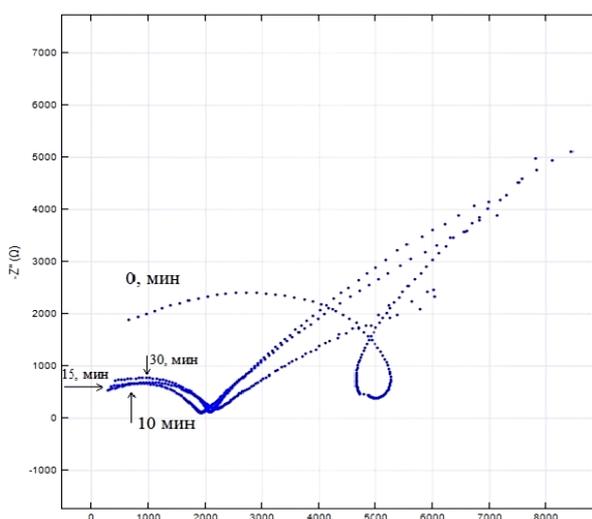


Рис. 1. Диаграмма Найквиста для электрода, покрытого стирол-акриловым латексом 69В-2к  
 Fig. 1. Nyquist diagram for an electrode coated with styrene-acrylic latex 69B-2k

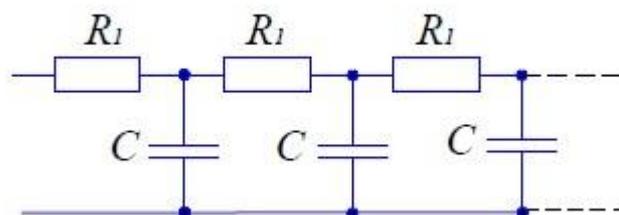


Рис. 2. Исходная схема элемента для моделирования [4]  
 Fig. 2. Initial diagram of the element for modeling [4]

По рис. 1 видно, что первоначально сопротивление в исследуемой системе большое, пленка «работает» и затрудняет проникновение воды и ионов электролита через ее поры. Однако уже к  $Z' = 2000$  Ом и далее к  $Z' \rightarrow 8000$  Ом (в области низких частот) разброс точек на графике все более усиливается и превращается почти в хаотический. Это может свидетельствовать о каких-либо электрических наводках извне. Прежде всего, такие наводки для данной зоны электрохимической цепи связаны с активизацией диффузионных процессов – явлениями пробоя пленки. На наш взгляд, данная ситуация на эквивалентной схеме может быть представлена следующим образом (рис. 3).

Представленная на рис. 3 схема соответствует импедансу цепи, состоящей из последовательно задействованных процессов: активного сопротивления  $R_0$ , характеризующего перенос заряда, и импеданса Варбурга:

$$Z_W = (1 - j) \frac{W}{\sqrt{\omega}}$$

характеризующего диффузионный процесс ( $W$  – постоянная Варбурга).

Сам импеданс Варбурга, в свою очередь, фактически отвечает последовательному соединению активного сопротивления  $R$  и ем-

кости  $C$ , которые зависят от частоты, меняясь пропорционально величине  $(\sqrt{\omega})^{-1}$ .

Анализ литературных данных с расшифровкой эквивалентных электрических схем свидетельствует, что выбранная нами схема отвечает окислительно-восстановительной реакции, протекающей без специфической адсорбции [20, 21]. При условии, когда составляющие импеданса Варбурга существенно отличаются друг от друга, показано, что независимо от частоты ток может опережать напряжение по фазе [22].

Результаты экспериментов показывают, что такое опережение тока по фазе от напряжения составляет  $45^\circ$  – важный нюанс при интерпретации результатов, который был учтен при получении теоретического графика (рис. 4 а).

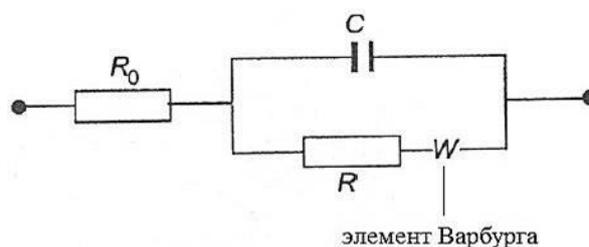
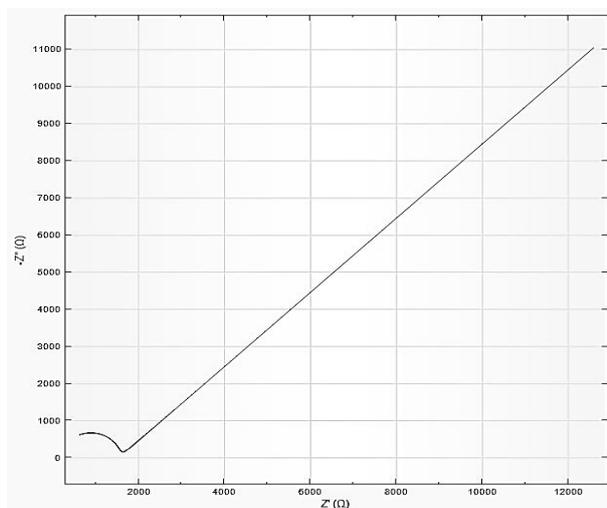
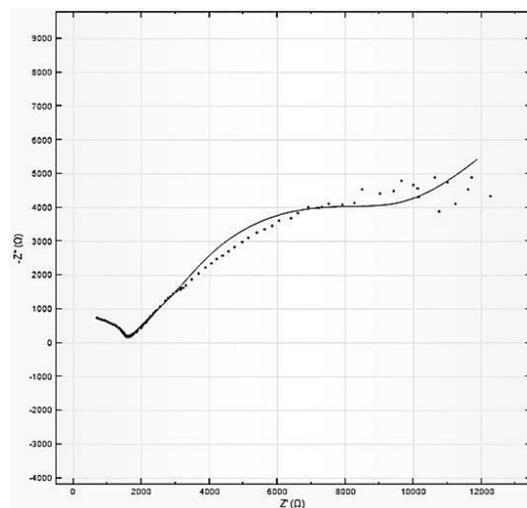


Рис. 3. Эквивалентная схема с элементом Варбурга  
Fig. 3. Equivalent circuit with Warburg element



a



b

Рис. 4. Теоретическая диаграмма Найквиста: а – рассчитанная; б – с добавлением элемента Cotangent Hyperbolic и наложением на практическую

Fig. 4. Theoretical Nyquist diagram: a – calculated; b – with the added Cotangent Hyperbolic element and superimposed on the practical one

Для большей сходимости теоретического и практического спектров импеданса был использован элемент под названием Cotangent Hyperbolic (котангентный гиперболический), который описывает уравнение, связывающее константы импеданса  $Z_0$  и адмиттанса  $Y_0$ :

$$Z_0 = \frac{1}{Y_0 \sqrt{j\omega}} \tanh(B \sqrt{j\omega}),$$

где  $B$  – константа [4, 5].

Добавленный элемент Cotangent Hyperbolic обычно встречается в коррозионных средах, где наблюдается полубесконечная диффузия, описываемая законами Фика [23, 24]. Эквивалентная электрохимическая схема приобретает более гибкий вид. Будучи наложенной на экспериментальную кривую, она демонстрирует хорошее совпадение (см. рис. 4 б) и может быть использована для описания процессов на границе электрод-электролит.

На рис. 5 представлена соответствующая эквивалентная электрохимическая схема, где также указаны численные значения некоторых простейших элементов (сопротивлений, емкостей и констант адмиттанса), которые были использованы при расчете математической модели.

Без импеданса Варбурга и сопротивления переноса заряда невозможно было бы описать процессы на покрытых латексами поверхностях, имеющих, очевидно, поврежденные участки. Об этом свидетельствует значение средней скорости, определенное по ЭИС и составляющее 0,16357 мм/год.

Для поверхности стали Ст3 с латексным покрытием импеданс длительное время почти не изменяется, потому что поверхностный процесс по своей природе однозначен и связан с лимитирующей стадией диффузии

агрессивного растворителя через защитный слой.

В результате гравиметрических испытаний были рассчитаны изменения масс по известной начальной массе образцов  $m_0$  и их массе  $m_1$  после выдерживания в коррозионной среде в течение 10 ч и определено среднее значение из двух параллельных замеров по выражению:  $\frac{m_1 - m_0}{m_0} \cdot 100$ .

Для покрытых латексом 69Б-2к образцов оно составило 0,0096%.

Снижение массы образцов в ходе исследований дает возможность определения скорости коррозии [25–27].

Средняя скорость коррозии защищенных образцов составила 0,166, в то время как для контрольных образцов – 0,75 мм/год. Эти данные подтверждают достаточно высокие защитные качества латекса 69Б-2к.

На наш взгляд, коррозионные показатели латекса связаны с его составом, компоненты которого не только обладают хорошими адгезионными качествами, но и активны по отношению к другим взаимодействиям, таким как химические взаимодействия компонентов между собой и с кристаллитами на поверхности металлов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Примененный в настоящей работе подход позволяет провести анализ коррозионного процесса на поверхности стали Ст3, защищенной латексным покрытием. По результатам экспериментальных исследований разработана эквивалентная электрическая схема. Схема учитывает несколько конструкций: активное сопротивление, отвечающее за перенос заряда через границу электрод – электролит, а также сопротивления и емкости в элементах Варбурга и Cotangent Hyperbolic,

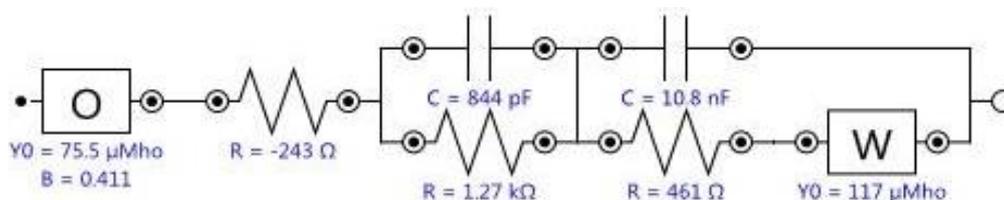


Рис. 5. Эквивалентная схема с элементом Cotangent Hyperbolic  
 Fig. 5. Equivalent circuit with the Cotangent Hyperbolic element

связанные с замедленностью диффузии электрохимически активных веществ. Модельный расчет, проведенный на ее основе,

позволяет описывать экспериментальную кривую в координатах Нейквиста практически полностью.

### Список литературы

1. Шинкарева Е.В., Кошевар В.Д. Антикоррозионная грунтовка на основе водной эпоксидной эмульсии и углеродных наночастиц // Журнал прикладной химии. 2016. Т. 89. № 1. С. 68–76.
2. Смирнов М.А., Соколова М.П., Дмитриев И.Ю., Власова Е.Н., Розова Е.Ю., Ельяшевич Г.К. Барьерные свойства и структура неорганических слоев на границе раздела полианилин-сталь // Журнал прикладной химии. 2015. Т. 88. № 7. С. 1007–1082.
3. Яковлева А.А., Анциферов Е.А., Гусева Е.А., Садловский С.В. Влияние защитного покрытия на основе органического связующего на коррозионную устойчивость стали // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2019. Т. 9. № 4. С. 600–611. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2019-9-4-600-611>
4. Стойнов З.Б., Графов Б.М., Саввова-Стойнова Б.С., Елкин В.В. Электрохимический импеданс. М.: Изд-во «Наука», 1991. 336 с.
5. Barsoukov E., Macdonald J.R. Impedance spectroscopy: theory, experiment, and applications / eds. E. Barsoukov, J.R. Macdonald. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2005. 608 p.
6. Kelly R.G., Scully J.R., Shoesmith D.W., Buchheit R.G. Electrochemical techniques in corrosion science and engineering. New York; Basel: Marcel Dekker, 2002.
7. Orazem M.E. Electrochemical impedance spectroscopy. Gainesville, Florida: Department of Chemical Engineering University of Florida, 2008. 525 p.
8. Секушин Н.А. Способ представления экспериментальных данных по импеданс спектроскопии // Электрохимия. 2009. Т. 45. № 11. С. 1403–1408.
9. Секушин Н.А. Эквивалентная схема импеданса Варбурга // Электрохимия. 2009. Т. 45. № 7. С. 889–894.
10. Рыбалка К.В., Бекетаева Л.А., Давыдов А.Д. Оценка скорости коррозии стали AISI 1016 анализом поляризационных кривых и методом измерения омического сопротивления // Электрохимия. 2021. Т. 57. № 1. С. 19–24. <https://doi.org/10.31857/S0424857021010096>
11. Вольфович Ю.М. Электрохимические суперконденсаторы (обзор) // Электрохимия. 2021. Т. 57. № 4. С. 197–238. <https://doi.org/10.31857/S0424857021040101>
12. Ключев А.П., Андреев В.Н., Давыдов А.Д., Графов Б.М. Исследование влияния ингибитора на коррозионное поведение стали методом шумовой спектроскопии Чебышева и методом спектроскопии электрохимического импеданса // Электрохимия. 2020. Т. 56. № 12. С. 1131–1137. <https://doi.org/10.31857/S0424857020120099>
13. Чулкин П.В., Рагойша Г.А., Стрельцов Е.А. Исследование электрохимической коррозии и защиты платины в концентрированных растворах хлоридов щелочных металлов методом потенциодинамической наногравиметрии // Электрохимия. 2017. Т. 53. № 1. С. 3–10. <https://doi.org/10.7868/s0424857017010042>
14. Тран М.Т.Т., Триболле Б., Вивьер В., Оразем М.Е. Импеданс реакций, контролируемых массопереносом // Электрохимия. 2017. Т. 53. № 9. С. 1046–1055 <https://doi.org/10.7868/S0424857017090055>
15. Вэй Ё.-Ж., Сиа Д.-Х., Сон Ш.-Ж. Обнаружение коррозионного растрескивания в нержавеющей стали 304 NG в подкисленном растворе NaCl с использованием электрохимических шумов, теории хаоса и вейлвет-анализа // Электрохимия. 2016. Т. 52. № 6. С. 627–642. <https://doi.org/10.7868/S0424857016060128>
16. Григорян Н.С., Абрашов А.А., Ваграмян Т.А., Костюк А.Г. Пассивация черных и цветных металлов в растворе на основе сложных эфиров галловой кислоты // Химия и технология органических веществ. 2017. № 4. С. 55–63.
17. Costa J.S., Agnoli R.D., Ferreira J.Z. Corrosion behavior of a conversion coating based on zirconium and colorants on galvanized steel by electrodeposition // Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração. 2015. Vol. 12. No. 2. P. 167–175. <https://doi.org/10.4322/2176-1523.0852>
18. Katsounaros I., Cherevko S., Zeradhanin A.R., Mayrhofer K.J.J. Oxygen electrochemistry as a cornerstone for sustainable energy conversion // Angewandte Chemie. 2014. Vol. 53. Iss. 1. P. 102–121. <https://doi.org/10.1002/anie.201306588>
19. Gotti G., Evrard D., Fajerweg K., Gros P. Oxygen reduction reaction features in neutral media on glassy carbon electrode functionalized by chemically prepared gold nanoparticles // Journal of Solid State Electrochemistry. 2016. Vol. 20. No. 6. P. 1539–1550. <https://doi.org/10.1007/s10008-016-3159-x>
20. Щербачков В.В., Артемкина Ю.М., Ермаков В.И. Диэлектрические характеристики воды и электропроводность водных растворов электролитов // Электрохимия. 2017. Т. 53. № 12. С. 1479–1486. <https://doi.org/10.7868/S0424857017120015>
21. Xia Da-Hai, Behnamian Ya. Electrochemical noise: a review of experimental setup, instrumentation and DC removal // Russian Journal of Electrochemistry. 2015. Vol. 51. Iss. 7. P. 593–601. <https://doi.org/10.1134/S1023193515070071>
22. Breimesser M., Ritter S., Seifert H.P., Suter T., Virtanen S. Development of time-frequency analysis in electrochemical noise for detection of pitting corrosion // Corrosion. The Journal of Science & Engineering. 2019. Vol. 75. Iss. 2. P. 183–191. <https://doi.org/10.5006/2900>
23. Ньюман Дж. Вязкий подслои // Электрохимия. 2020. Т. 56. № 3. С. 282–288. <https://doi.org/10.31857/S0424857020030093>
24. Мартемьянов С.А. Статистическая теория турбулентного массопереноса в электрохимических системах // Электрохимия. 2017. Т. 53. № 10. С. 1212–1224.

<https://doi.org/10.7868/S0424857017100024>  
25. Ehsani A., Mahjani M.G., Hosseini M., Safari R., Moshrefi R., Shiri H.M. Evaluation of thymus vulgaris plant extract an eco-friendly corrosion inhibitor for stainless steel 304 in acidic solution by mean of electrochemical impedance spectroscopy, electrochemical noise analysis and density functional theory // *Journal Colloid and Interface Science*. 2017. Vol. 490. P. 444–451.  
<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2016.11.048>  
26. Luo Bing, Xia Da-Hai. Characterization of pH effect on

corrosion resistance of nuclear steam generator tubing alloy by in-situ scanning electrochemical microscopy // *Acta Physico-Chimica Sinica*. 2014. Vol. 30. No. 1. P. 59–66. <https://doi.org/10.3866/PKU.WHXB201311221>  
27. Hermoso-Diaz I.A., Gonzalez-Rodrigues J.G., Uru-churu-Chavarin J. Use of EIS and electrochemical noise fractal analysis to study *Salvia hispanica* as green corrosion inhibitor for carbon steel // *International Journal of Electrochemical Science*. 2016. Vol. 11. P. 4253–4266. <https://doi.org/10.20964/2016.06.47>

## References

1. Shinkareva EV, Koshevar VD. Anticorrosion primer based on aqueous epoxy emulsion and carbon nanoparticles. *Zhurnal prikladnoj himii = Russian Journal of Applied Chemistry*. 2016;89(1):68–76. (In Russ.)
2. Smirnov MA, Sokolova MP, Dmitriev IYu, Vlasova EN, Rozova EYu, El'yashevich GK. Barrier properties and structure of inorganic layers at polyaniline-steel interface. *Zhurnal prikladnoj himii = Russian Journal of Applied Chemistry*. 2015;88(7):1007–1082. (In Russ.)
3. Yakovleva AA, Antsiferov EA, Guseva EA, Sadlovsky SV. Effect of an organic binder protective coating on the corrosion resistance of steel. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2019;9(4):600–611. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2019-9-4-600-611>
4. Stoinov ZB, Grafov BM, Savvova-Stoinova BS, Elkin VV. *Electrochemical impedance*. Moscow: Nauka; 1991, 336 p. (In Russ.)
5. Barsoukov E, Macdonald JR. *Impedance spectroscopy: theory, experiment, and applications* / eds. E Barsoukov, JR Macdonald. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons; 2005, 608 p.
6. Kelly RG, Scully JR, Shoesmith DW, Buchheit RG. *Electrochemical techniques in corrosion science and engineering*. New York; Basel: Marcel Dekker; 2002.
7. Orazem ME. *Electrochemical impedance spectroscopy*. Gainesville, Florida: Department of Chemical Engineering University of Florida; 2008, 525 p.
8. Sekushin NA. Method of presentation of experimental data in impedance spectroscopy. *Elektrokhimiya = Russian Journal of Electrochemistry*. 2009;45(11):1403–1408. (In Russ.)
9. Sekushin NA. Equivalent circuit of Warburg impedance. *Elektrokhimiya = Russian Journal of Electrochemistry*. 2009;45(7):889–894. (In Russ.)
10. Rybalka KV, Beketaeva LA, Davydov AD. Estimation of corrosion rate of AISI 1016 steel by the analysis of polarization curves and using the method of measuring Ohmic resistance. *Elektrokhimiya = Russian Journal of Electrochemistry*. 2021;57(1):19–24. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0424857021010096>
11. Volfkovich YuM. Electrochemical supercapacitors. *Elektrokhimiya = Russian Journal of Electrochemistry*. 2021;57(40):197–238. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0424857021040101>
12. Klyuev AL, Andreev VN, Davydov AD, Grafov BM. Study of the effect of inhibitor on the corrosion behavior of steel using Chebyshev noise spectroscopy and electrochemical impedance spectroscopy. *Elektrokhimiya = Russian Journal of Electrochemistry*. 2020;56(12):1131–1137. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0424857020120099>
13. Chulkin PV, Ragoisha GA, Streltsov EA. Platinum electrochemical corrosion and protection in concentrated alkali metal chloride solutions investigated by potentiodynamic nanogravimetry. *Elektrokhimiya = Russian Journal of Electrochemistry*. 2017;53(1):3–10. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/s0424857017010042>
14. Tran MTT, Tribollet B, Vivier V, Orazem ME. On the impedance response of reactions influenced by mass transfer. *Elektrokhimiya = Russian Journal of Electrochemistry*. 2017;53(9):1046–1055. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0424857017090055>
15. Wei Yong-Jia, Xia Da-Hai, Song Shi-Zhe. Detection of SCC of 304 NG stainless steel in an acidic NaCl solution using electrochemical noise based on chaos and wavelet analysis. *Elektrokhimiya = Russian Journal of Electrochemistry*. 2016;52(6):627–642. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0424857016060128>
16. Grigoryan NS, Abrashov AA, Vagramyan TA, Kostyuk AG. Chromate-free passivation of ferrous and nonferrous metals in solution on the basis of esters of gallic acid. 2017;4:55–63. *Khimiya i tekhnologiya organicheskikh veshchestv = Chemistry and Technology of Organic Substances*. (In Russ.)
17. Costa JS, Agnoli RD, Ferreira JZ. Corrosion behavior of a conversion coating based on zirconium and colorants on galvanized steel by electrodeposition. *Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração*. 2015;12(2):167–175. <https://doi.org/10.4322/2176-1523.0852>
18. Katsounaros I, Cherevko S, Zeradjani AR, Mayrhofer KJJ. Oxygen electrochemistry as a cornerstone for sustainable energy conversion. *Angewandte Chemie*. 2014;53(1):102–121. <https://doi.org/10.1002/anie.201306588>
19. Gotti G, Evrard D, Fajerweg K, Gros P. Oxygen reduction reaction features in neutral media on glassy carbon electrode functionalized by chemically prepared gold nanoparticles. *Journal of Solid State Electrochemistry*. 2016;20(6):1539–1550. <https://doi.org/10.1007/s10008-016-3159-x>
20. Shcherbakov VV, Ermakov VI, Artemkina YM. Dielectric characteristics of water and electric conductivity of aqueous electrolytes. *Elektrokhimiya = Russian Journal of Electrochemistry*. 2017;53(12):1479–1486. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0424857017120015>
21. Xia Da-Hai, Behnamian Ya. Electrochemical noise: a review of experimental setup, instrumentation and



DC removal. *Russian Journal of Electrochemistry*. 2015;51(7):593–601.

<https://doi.org/10.1134/S1023193515070071>

22. Breimesser M, Ritter S, Seifert HP, Suter T, Virtanen S. Development of time-frequency analysis in electrochemical noise for detection of pitting corrosion. *Corrosion. The Journal of Science & Engineering*. 2019;75(2):183–191. <https://doi.org/10.5006/2900>

23. Newman J. Viscous sublayer. *Elektrokhimiya = Russian Journal of Electrochemistry*. 2020;56(3):282–288. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0424857020030093>

24. Martemianov SA. Statistical theory of turbulent mass transfer in electrochemical systems. *Elektrokhimiya = Russian Journal of Electrochemistry*. 2017;53(10):1212–1224. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0424857017100024>

25. Ehsani A, Mahjani MG, Hosseini M, Safari R, Moshrefi R, Shiri H.M. Evaluation of thymus vulgaris

plant extract an eco-friendly corrosion inhibitor for stainless steel 304 in acidic solution by mean of electrochemical impedance spectroscopy, electrochemical noise analysis and density functional theory. *Journal Colloid and Interface Science*. 2017;490:444–451. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2016.11.048>

26. Luo Bing, Xia Da-Hai. Characterization of pH effect on corrosion resistance of nuclear steam generator tubing alloy by in-situ scanning electrochemical microscopy. *Acta Physico-Chimica Sinica*. 2014;30(1):59–66. <https://doi.org/10.3866/PKU.WHXB201311221>

27. Hermoso-Diaz IA, Gonzalez-Rodrigues JG, Uruchuru-Chavarin J. Use of EIS and electrochemical noise fractal analysis to study *Salvia hispanica* as green corrosion inhibitor for carbon steel. *International Journal of Electrochemical Science*. 2016;11:4253–4266. <https://doi.org/10.20964/2016.06.47>

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

##### Яковлева Ариадна Алексеевна,

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры химии и пищевой технологии им. профессора В.В. Тутуриной, Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия; ✉ e-mail: ayakovistu@mail.ru

##### Анциферов Евгений Александрович,

кандидат химических наук, доцент, директор Института высоких технологий, Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия; e-mail: antsiferov@istu.edu

##### Садловский Сергей Владимирович,

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

#### Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

#### Информация о статье

Статья поступила в редакцию 09.06.2021; одобрена после рецензирования 23.07.2021; принята к публикации 16.08.2021.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

##### Ariadna A. Yakovleva,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Chemistry and Food Technology named after the Professor V.V. Tuturina, Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia; ✉ e-mail: ayakovistu@mail.ru

##### Evgeniy A. Antsiferov,

Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor, Director of the School of High Technologies, School of High Technologies, Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia; e-mail: antsiferov@istu.edu

##### Sergey V. Sadlovsky,

Postgraduate student, Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia; e-mail: vip.sadlovskiy@mail.ru

#### Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

#### Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

#### Information about the article

The article was submitted 09.06.2021; approved after reviewing 23.07.2021; accepted for publication 16.08.2021.

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: [pqp@istu.edu](mailto:pqp@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.**

«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 секретарь.

Факс: **(3952) 405-100**, e-mail: [pqp@istu.edu](mailto:pqp@istu.edu)

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

# ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Научный журнал  
№ 4 (159) 2021

12+

Редактор Я.В. Макшанцева  
Художественный редактор Е.В. Хохрин  
Ответственный секретарь Г.П. Привалова  
Перевод на английский язык Н.Г. Поповой, В.В. Батицкой  
Верстка Н.П. Дзюндзя

Выход в свет 31.08.2021 г. Формат 60x90/8.  
Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 16,25.  
Тираж 500 экз. Заказ 136. 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, 2021

