

Том 25 № 1
2021

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

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 № 1

2021

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Том 25 № 1

2021

Редакционная коллегия

Издательство Иркутского
национального исследовательского
технического университета

Журнал основан в 1997 г.
Периодичность издания –
6 раз в год

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

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

Учредитель Иркутский национальный
исследовательский технический
университет

Подписной индекс в каталоге
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: pgr@istu.edu

КОРНЯКОВ М.В., д.т.н., ректор Иркутского национального исследовательского технического университета, главный редактор (г. Иркутск, Россия)
НЕМЧИНОВА Н.В., д.т.н., профессор, заведующая кафедрой металлургии цветных металлов Иркутского национального исследовательского технического университета, заместитель главного редактора (г. Иркутск, Россия)
БАЖИН В.Ю., д.т.н., декан факультета переработки минерального сырья Санкт-Петербургского горного университета (г. Санкт-Петербург, Россия)
БАЛИКОВ С.В., д.т.н., главный научный сотрудник Иркутского научно-исследовательского института благородных и редких металлов и алмазов (г. Иркутск, Россия)
БЛЮМЕНШТЕЙН 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)
ГАЛЕВСКИЙ Г.В., д.т.н., заведующий кафедрой металлургии цветных металлов и химической технологии Сибирского государственного индустриального университета (г. Новокузнецк, Россия)
ДАМБИЕВ Ц.Ц., д.т.н., профессор Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления (г. Улан-Удэ, Россия)
ЗАЙДЕС С.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой машиностроительных технологий и материалов Иркутского национального исследовательского технического университета (г. Иркутск, Россия)
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)
МАМАЧЕНКОВ 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)
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)
СУСЛОВ К.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники Иркутского национального исследовательского технического университета (г. Иркутск, Россия)
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)
ФИШОВ А.Г., д.т.н., профессор Новосибирского государственного технического университета (г. Новосибирск, Россия)
ХЕЙФЕЦ М.Л., д.т.н., директор Государственного научного учреждения «Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси» (г. Минск, Республика Беларусь)
ШОЛЬТЕС Бертольд, директор Института металловедения Кассельского университета (г. Кассель, Германия)

PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta

Vol. 25 No. 1

2021

Publishers of Irkutsk National
Research Technical University

Editorial board

KORNYAKOV M.V., Dr. Sci. (Eng.), Rector of Irkutsk National Research Technical University, Editor-in-Chief (Irkutsk, Russia)
NEMCHINOVA N.V., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Metallurgy of Nonferrous Metals, Irkutsk National Research Technical University, Deputy Editor-in-Chief (Irkutsk, Russia)
BAZHIN V.Yu., Dr. Sci. (Eng.), Dean of the Mineral Resources Processing Faculty, Saint Petersburg Mining University (Saint Petersburg, Russia)
BALIKOV S.V., Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher of Irkutsk Scientific Research Institute of Noble and Rare Metals and Diamonds (Irkutsk, Russia)
BLUMENSTEIN V.Yu., Dr. Sci. (Eng.), Professor of Kuzbass State Technical University (Kemerovo, Russia)
BOLDYREV A.I., Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia)
BOROVNIKOV Yu.S., Dr. Sci. (Eng.), Acting Rector of Novgorod State University n.a. Yaroslav-the-Wise (Veliky Novgorod, Russia)
VOROPAI N.I., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Head of the Energy Systems Institute n.a. L.A. Melentyev of the SB RAS (Irkutsk, Russia)
GAVLIK U., Professor of the Department of Production Technology and Automation, Krakow University of Technology (Krakow, Poland)
GALEVSKY G.V., Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of Nonferrous Metallurgy and Chemical Technology of the Siberian State Industrial University (Novokuznetsk, Russia)
DAMBIYEV Ts.Ts., Dr. Sci. (Eng.), Professor of the East Siberian State University of Technology and Management (Ulan-Ude, Russia)
ZAIDIS S.A., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Machine Building Technologies and Materials, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)
ZAKARYUKIN V.P., Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Transport Electricity of Irkutsk State Railway University (Irkutsk, Russia)
KARPENKO E.I., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of the Laboratory of Plasma Energy Processes and Technologies of the Institute of Physical Materials Science of the SB RAS (Ulan-Ude, Russia)
KLER A.M., Dr. Sci. (Eng.), Chief researcher of the Energy Systems Institute n.a. L.A. Melentyev of the SB RAS (Irkutsk, Russia)
KOLOSOK I.N., Dr. Sci. (Eng.), Leading researcher of the Energy Systems Institute n.a. L.A. Melentyev of the SB RAS (Irkutsk, Russia)
KRYUKOV A.V., Dr. Sci. (Eng.), Academician of the Russian Academy of Transport, Corresponding member of the Academy of Sciences of the Higher School of the Russian Federation and the Russian Academy of Engineering, Honored Power Engineer of the Republic of Buryatia, Professor of the Department of Transport Electric Power Industry of Irkutsk State Railway University (Irkutsk, Russia)
KURBATSKY V.G., Dr. Sci. (Eng.), Leading researcher of the Energy Systems Institute n.a. L.A. Melentyev of the SB RAS (Irkutsk, Russia)
MAMYACHENKOV S.V., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Metallurgy of Nonferrous Metals of the Ural Federal University n.a. the first President of Russia B.N. Yeltsin (Ekaterinburg, Russia)
MATLIN M.M., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Machine Parts and Hoisting-and-Transport Devices, Volgograd State Technical University (Volgograd, Russia)
NOVITSKY N.N., Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher of the Energy Systems Institute n.a. L.A. Melentyev of the SB RAS (Irkutsk, Russia)
OGAR P.M., Dr. Sci. (Eng.), Professor of Bratsk State University (Bratsk, Russia)
PAZDERIN A.V., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Automated Electric Systems of the Ural Federal University n.a. the first President of Russia B.N. Yeltsin (Ekaterinburg, Russia)
PANTELEEV V.I., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Electrical Complexes and Systems of the Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia)
SENDEROV S.M., Dr. Sci. (Eng.), Deputy Director of the Energy Systems Institute n.a. L.A. Melentyev of the SB RAS (Irkutsk, Russia)
STENNIKOV V.A., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of the Energy Systems Institute n.a. L.A. Melentyev of the SB RAS (Irkutsk, Russia)
STYCZYNSKI S.A., Professor of the Otto-von-Guericke University (Magdeburg, Germany)
SUSLOV K.V., Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)
TYURINA E.A., Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher of the Energy Systems Institute n.a. L.A. Melentyev of the SB RAS (Irkutsk, Russia)
FANG LIU, Professor, Central Southern University (Changsha, Hunan Province, China)
FEDYAEV A.A., Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of Industrial Heat and Power Engineering of Bratsk State University (Bratsk, Russia)
FISHOV A.G., Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Novosibirsk State Technical University (Novosibirsk, Russia)
KHEIFETS M.L., Dr. Sci. (Eng.), Director of the Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)
SCHOLTES B., Director of the Institute of Metal Science of the University of Kassel (Kassel, Germany)

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

Subscription index in the catalog
of 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

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Том 25 № 1

2021

СОДЕРЖАНИЕ

Содержание	4
------------------	---

Машиностроение и машиноведение

Макарук А.А., Самойленко О.В., Иванов Ю.Н., Чашин Н.С., Минаев Н.В. Методика расчета технологических параметров превентивного деформирования упрочняемых деталей типа «стенка».....	8
Мокрицкий Б.Я., Шелковников В.Ю. Использование инструментальных материалов для диагностики технологической системы резания.....	17

Энергетика

Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Суслов К.В., Черепанов А.В. Оперативное определение запасов статической устойчивости в системах электроснабжения с установками распределенной генерации.....	31
Калабин Д.А., Липовка А.Ю., Липовка Ю.Л. Компьютерное моделирование и натурные замеры потокораспределения действующей тепловой сети.....	44
Луковенко А.С., Зеньков И.В. Методы расчета надежности системы электроснабжения.....	57
Лукутин Б.В., Киушкина В.Р. Характеристики энергетической безопасности децентрализованного района и автономного объекта электрификации.....	66
Якшин С.В. Аналитический метод решения задачи потокораспределения тепловой сети.....	80

Металлургия и материаловедение

Василькова А.О., Васильков Н.В., Хмельницкая О.Д., Войлошников Г.И. Анализ современного состояния способов переработки техногенного золотосодержащего сырья.....	97
Горланов Е.С. К вопросу о применении твердых электродов для электролиза криолитоглиноземных расплавов. Часть 2. Механизм пассивации и условия стабильного электролиза.....	108

Гипотезы. Сообщения. Дискуссии

Стенников В.А., Головщиков В.О., Романович Е.А. Нефтегазовая политика России в современных условиях и ее особенности в Российско-Китайском сотрудничестве в газовой сфере.....	122
--	-----

PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta

Vol. 25 No. 1

2021

CONTENTS

Contents.....	5
---------------	---



Mechanical Engineering and Machine Science



-  **Makaruk A.A., Samoylenko O.V., Ivanov Yu.N., Chashchin N.S., Minaev N.V.** Methodology for calculating technological parameters of preventive deformation of the hardened parts of the "wall" type.....
-  **Mokritskii B.Ya., Shelkovnikov V.Yu.** The use of tool materials for monitoring the state of cutting technological systems.....

8
17



Power Engineering



-  **Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Suslov K.V., Cherepanov A.V.** Timely determination of static stability margins in power supply systems equipped with distributed generation installations.....
-  **Kalabin D.A., Lipovka A.Yu., Lipovka Y.L.** Computer simulation and full-scale measurements of the load flow in a functioning heating network.....
-  **Lukovenko A.S., Zenkov I.V.** Methods for calculating the reliability of power supply systems.....
-  **Lukutin B.V., Kiushkina V.R.** The characteristics of energy security in decentralised zones and autonomous objects of electrification.....
-  **Yakshin S.V.** An analytical method for solving the problem of heat network load flow.....

31
44
57
66
80



Metallurgy and Materials Science



-  **Vasilkova A.O., Vasilkov N.V., Khmel'nitskaya O.D., Voyloshnikov G.I.** Analysis of the current state of technologies in the field of recycling technogenic gold-containing raw materials.....
-  **Gorlanov E.S.** On the question of using solid electrodes in the electrolysis of cryolite-alumina melts. Part 2. The mechanism of passivation and conditions of stable electrolysis.....

97
108



Hypotheses. Reports. Discussion



-  **Stennikov V.A., Golovshchikov V.O., Romanovich E.A.** Modern Russian oil and gas policy and its features in the Russian-Chinese cooperation in the gas sector.....

122



ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Уважаемые читатели!

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

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

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

«Вестник ИргТУ» реферируется и рецензируется.

Приглашаем вас к активному творческому сотрудничеству по научным направлениям:

- Машиностроение и машиноведение
- Энергетика
- Металлургия и материаловедение

Редколлегия





PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University
Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo 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



Методика расчета технологических параметров превентивного деформирования упрочняемых деталей типа «стенка»

© А.А. Макарук, О.В. Самойленко, Ю.Н. Иванов, Н.С. Чашин, Н.В. Минаев

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель – установить влияние превентивного деформирования на точность авиационных деталей, изготовленных из термически упрочненного алюминиевого сплава 1933Т2, после дробеударного упрочнения. Определение влияния превентивного предыскажения детали осуществляется на результатах обработки конструктивно-подобных образцов деталей типа «стенка» с различной технологической последовательностью. Первый образец имеет стандартную последовательность изготовления: фрезерование – дробеметное упрочнение – дробеструйная правка. Второй образец обрабатывается по следующей схеме: фрезерование – превентивное деформирование – упрочнение – дробеструйная правка. Деформация образцов определяется в контрольных точках отклонением от плоскостности на основе стрел прогибов. Превентивное деформирование выполняется на ребрах второго образца раскатным устройством. Расчет технологических параметров обработки раскатным устройством основан на принципе суперпозиции отдельных операций, таких как раскатка роликами, дробеструйное упрочнение. Определение параметров превентивного деформирования второго образца основывается на результатах обработки первого образца. Установлено, что отклонение обоих образцов от плоскостности после фрезерования составляет до 2,5 мм. Максимальное отклонение конструктивно-подобного образца № 1 (без превентивного деформирования) после дробеструйной обработки составляет 2,6 мм при наличии высокой степени насыщения поверхности. Максимальное отклонение конструктивно-подобного образца № 2 (с превентивным деформированием) после дробеструйной обработки не превышает 0,4 мм, что соответствует допустимому отклонению детали такой конструкции. Таким образом, способ обработки с внесения в деталь деформации с учетом имеющихся отклонений после фрезерования позволяет достаточно точно минимизировать последующие после дробеупрочнения отклонения от требуемой формы. Анализ результатов проведенных работ подтвердил, что превентивное деформирование детали уменьшает искажения поводок после дробеупрочнения. Следовательно, целесообразно использовать последовательность обработки: превентивное деформирование → упрочнение дробеметным методом → правка-доводка дробеструйным методом.

Ключевые слова: раскатка роликами, правка, превентивное деформирование, формообразование, упрочнение, полотно

Для цитирования: Макарук А.А., Самойленко О.В., Иванов Ю.Н., Чашин Н.С., Минаев Н.В. Методика расчета технологических параметров превентивного деформирования упрочняемых деталей типа «стенка». *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 1. С. 8–16. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-1-8-16>

Methodology for calculating the technological parameters of preventive deformation of the hardened parts of the "wall" type

Alexander A. Makaruk, Oleg V. Samoylenko, Yuri N. Ivanov,
Nikolay S. Chashchin, Nikolay V. Minaev

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The article aims to establish the effect of preventive deformation on the accuracy of aircraft parts made from the thermally hardened aluminium alloy 1933T2, after blasting hardening. Determination of the impact of preventive deformation was carried out by analysing structural parts of the "wall" type produced using various technological sequences. Sample 1 was produced using a standard manufacturing sequence: milling – blasting hardening – blasting correction. Sample 2 was produced as follows: milling – preventive deformation – hardening – blasting correction. The deformation of the samples was determined at checkpoints by deviations from flatness based on bending deflections. In sample 2, preventive deformation was performed on its ridges by a rolling device. The calculation of the technological parameters of the rolling device was conducted following the principle of superposition of individual operations, such as rolling and blasting hardening. The definition of the parameters of preventive deformation of sample 2 was based on the results ob-

tained for sample 1. It was established that, for both samples, the deviation from flatness after milling comprised 2.5 mm. The maximum deviation of sample 1 (without preventive deformation) after blasting hardening was 2.6 mm under a high degree of surface saturation. The maximum deviation of sample 2 (with preventive deformation) after blasting hardening did not exceed 0.4 mm, which corresponds to the acceptable deviation of such structural parts. Thus, the inclusion of the preventive deformation stage in the manufacturing process, with consideration of the deviations resulting from the milling stage, allows minimisation of deviations from the required form after blasting hardening. An analysis of the obtained results confirmed that preventive deformation of structural parts reduces distortions after blasting hardening. Therefore, it is advisable to use the following manufacturing sequence: preventive deformation → hardening by a blasting method → correction by a blasting method.

Keywords: rolling, flattening, preventive deformation, shaping, hardening, sheet

For citation: Makaruk AA, Samoylenko OV, Ivanov YuN, Chashchin NS, Minaev NV. Methodology for calculating technological parameters of preventive deformation of the hardened parts of the "wall" type. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(1):8–16. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-1-8-16>

ВВЕДЕНИЕ

Неизбежно возникающие в процессе дробеметного упрочнения отклонения формы тонкостенных деталей каркаса летательных аппаратов, имеющих в своей конструкции продольно-поперечное оребрение и изготавливаемые из термически упрочненного алюминиевого сплава 1933Т2, не всегда в полной мере могут быть устранены последующей правкой дробеструйной обработкой [1–8]. Согласно отраслевой нормативной документации, данный метод является единственно допустимым. Применение традиционных методов правки пластическим деформированием, таких как прессовая обработка, вполне разумно ограничено в связи с требованием по сохранению полученных при упрочнении свойств поверхностного слоя.

Повышение точности изготавливаемых деталей возможно за счет внесения предсказаний еще на этапе правки после фрезерования, величина которых рассчитывается на основе моделирования с использованием нелинейного конечно-элементного анализа [8–14] или определяется на основе производственного опыта по упрочнению деталей такой же или аналогичной конструкции [15–18].

Разработанная комбинированная технология правки-упрочнения подкрепленных ребрами деталей для обеспечения требуемой формы включает в себя следующие основные операции:

– внесение предсказаний формы раскаткой роликами на этапе правки после механообработки;

– упрочнение дробеметным способом;
– дополнительная правка дробеструйным методом.

Целью экспериментального исследования являлся сравнительный анализ результатов упрочнения по двум схемам:

1) фрезерование – дробеметное упрочнение – дробеструйная правка;

2) фрезерование – превентивное деформирование – упрочнение – дробеструйная правка.

ХОД ПРОВЕДЕНИЯ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

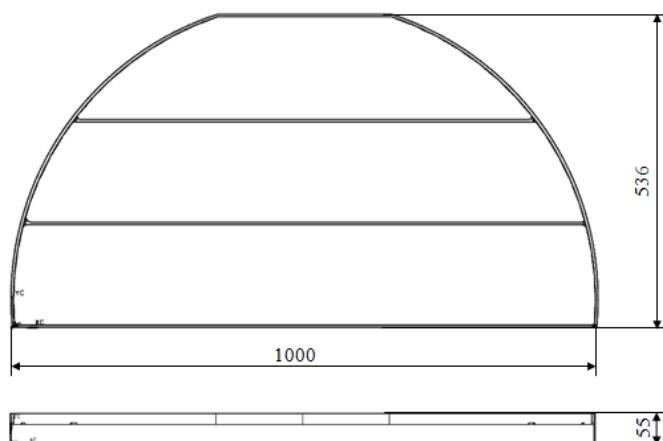
Для проведения исследования фрезерованием из плиты были изготовлены конструктивно-подобные образцы (КПО) детали «стенка» (рис. 1).

Каждому КПО был присвоен порядковый номер (№ 1, № 2) и нанесена соответствующая маркировка.

Контроль отклонений от плоскостности КПО № 1, № 2 выполнялся в контрольных точках (КТ) согласно схеме, показанной на рис. 2.

Исходные (после фрезерования) стрелы прогибов $f^{\text{исх}}$ определялись в продольных сечениях ребер 1–4 КПО № 1, № 2 (см. рис. 2):

$$\begin{aligned} f_1^{\text{исх_№1(№2)}} &= \text{КТ9} - \frac{\text{КТ1} + \text{КТ8}}{2}; \\ f_2^{\text{исх_№1(№2)}} &= \text{КТ10} - \frac{\text{КТ2} + \text{КТ7}}{2}; \\ f_3^{\text{исх_№1(№2)}} &= \text{КТ11} - \frac{\text{КТ3} + \text{КТ6}}{2}; \\ f_4^{\text{исх_№1(№2)}} &= \text{КТ12} - \frac{\text{КТ4} + \text{КТ5}}{2}, \end{aligned} \quad (1)$$



Количество: 2 шт

a



b

Рис. 1. Конструктивно-подобные образцы детали: а – схема; б – фото
Fig. 1. Structurally similar samples of the part: a – diagram; b – image

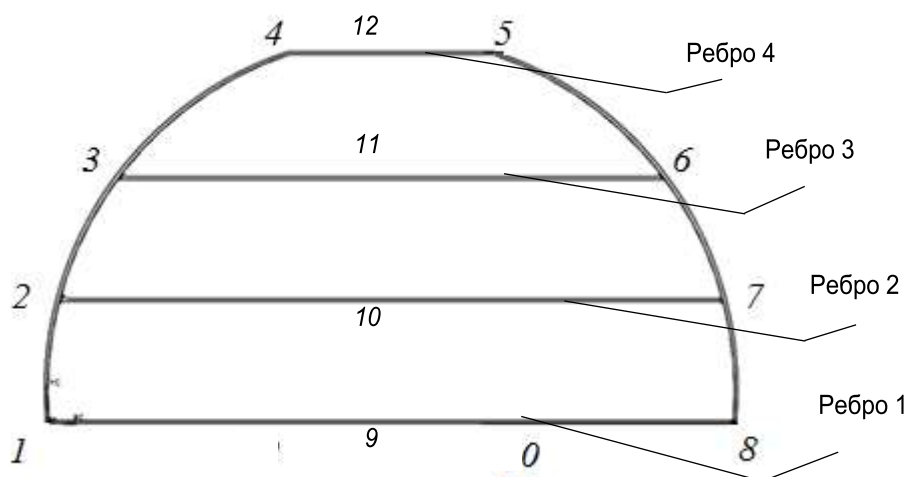


Рис. 2. Схема измерения конструктивно-подобного образца детали
Fig. 2. Measurement diagram of a structurally similar sample of a part

где кт1 – кт12 – отклонение от плоскостности в контрольных точках 1–12, соответственно.

Далее было произведено дробеметное упрочнение КПО № 1, согласно технологическому процессу обработки детали «стенка», и выполнен контроль отклонений в КТ. Аналогично формулам (1) были рассчитаны стрелы прогибов после упрочнения $f_{упр_№1}$ в продольных сечениях ребер 1–4 КПО № 1.

На основе полученных значений [1–5] рассчитаны величины прогнозируемой деформации при дробеметном упрочнении в виде стрел прогибов $f_{прогн}$ в продольных сечениях ребер 1–4 КПО № 1:

$$\begin{aligned} f_{1\text{прогн}} &= f_{1\text{упр_№1}} - f_{1\text{исх_№1}}; \\ f_{2\text{прогн}} &= f_{2\text{упр_№1}} - f_{2\text{исх_№1}}; \\ f_{3\text{прогн}} &= f_{3\text{упр_№1}} - f_{3\text{исх_№1}}; \\ f_{4\text{прогн}} &= f_{4\text{упр_№1}} - f_{4\text{исх_№1}}. \end{aligned} \quad (2)$$

Для КПО № 2 рассчитаны стрелы прогибов $f_{раск_№2}$ в продольных сечениях ребер 1–4, которые должны обеспечиваться раскаткой роликами с учетом имеющихся отклонений после фрезерования и возникающих при упрочнении (прогнозируемой деформации), полученных по результатам обработки КПО № 1:

$$\begin{aligned} f_1^{\text{раск_№2}} &= |f_1^{\text{исх_№2}} + f_1^{\text{прогн}}|; \\ f_2^{\text{раск_№2}} &= |f_2^{\text{исх_№2}} + f_2^{\text{прогн}}|; \\ f_3^{\text{раск_№2}} &= |f_3^{\text{исх_№2}} + f_3^{\text{прогн}}|; \\ f_4^{\text{раск_№2}} &= |f_4^{\text{исх_№2}} + f_4^{\text{прогн}}|. \end{aligned} \quad (3)$$

Требуемые при раскатке роликами ребер 1–4 КПО № 2 растягивающие усилия рассчитаны следующим образом:

$$\begin{aligned} F_1^{\text{раск_№2}} &= \frac{8f_1^{\text{раск_№2}} \cdot E \cdot J_1}{l_1^2 \cdot z_1} \cdot 80\%; \\ F_2^{\text{раск_№2}} &= \frac{8f_2^{\text{раск_№2}} \cdot E \cdot J_2}{l_2^2 \cdot z_2} \cdot 80\%; \\ F_3^{\text{раск_№2}} &= \frac{8f_3^{\text{раск_№2}} \cdot E \cdot J_3}{l_3^2 \cdot z_3} \cdot 80\%; \\ F_4^{\text{раск_№2}} &= \frac{8f_4^{\text{раск_№2}} \cdot E \cdot J_4}{l_4^2 \cdot z_4} \cdot 80\%, \end{aligned} \quad (4)$$

где E – модуль упругости 1-го рода обрабатываемого материала; l – длина ребра КПО; z – расстояние от точки приложения растягивающего усилия, возникающего при раскатке, до центра тяжести поперечного сечения (рис. 3); J – момент инерции поперечного сечения раскатываемого участка.

Следует учитывать, что для определения моментов инерции поперечных сечений раскатываемых участков использовалась схема, показанная на рис. 4. Согласно этой схеме, сечение КПО разбивалось на 4 зоны, содержащие соответствующее ребро и прилегающие к нему части полотна между смежными ребрами [6–9].

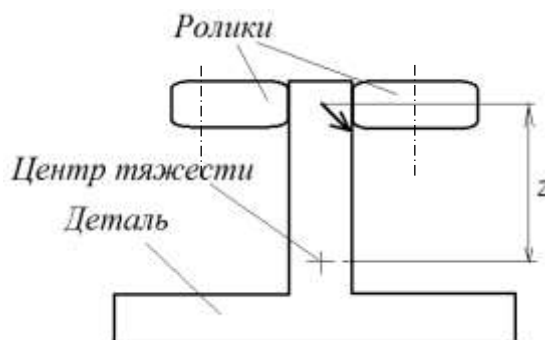


Рис. 3. Схема раскатки ребра конструктивно-подобного образца детали
 Fig. 3. Diagram of rolling the rib of the structurally similar sample of the part

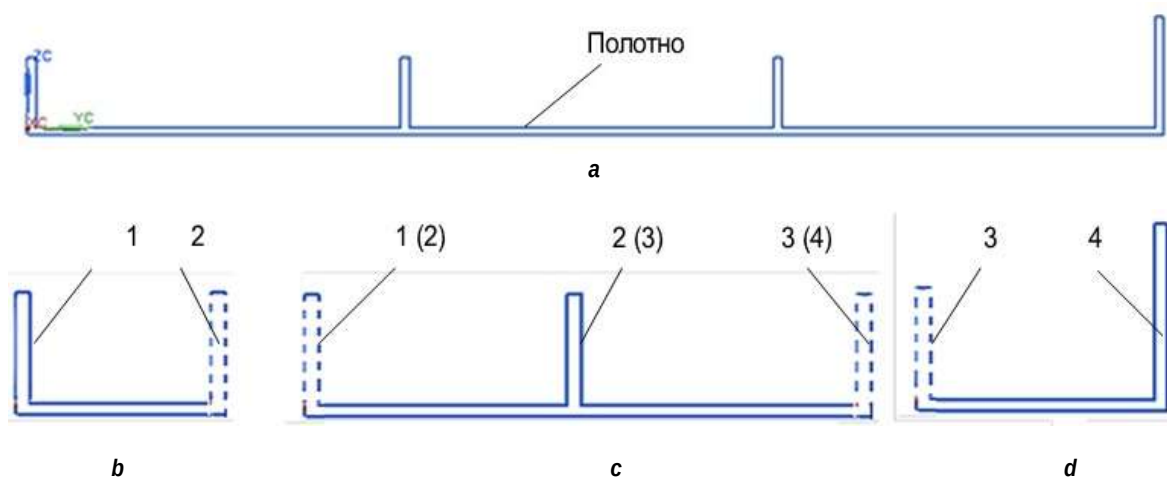


Рис. 4. Общий вид поперечного сечения серединной части конструктивно-подобного образца детали (а), расчетное поперечное сечение участка, образованного ребром 1 (b), расчетные поперечные сечения участков, образованных ребрами 2, 3 (c), расчетное поперечное сечение участка, образованного ребром 4 (d)
 Fig. 4. General view of the cross section of the middle part of the structurally-similar sample of the part (a), the calculated cross section of the area formed by the rib 1 (b), the calculated cross-sections of the areas formed by the ribs 2, 3 (c), the calculated cross section of the area formed by the rib 4 (d)



Далее для внесения предсказаний формы была произведена раскатка роликами ребер 1–4 КПО № 2 с соответствующими моментами затяжки силового болта раскатника, определенными по растягивающим усилиям с помощью тарифовочных графиков; выполнен контроль отклонений в КТ и рассчитаны стрелы прогиба ребер КПО № 2 [3, 4, 10–15]. По результатам измерений был сделан вывод о необходимости дополнительной раскатки ребра 1 с увеличенным моментом затяжки силового болта.

После раскатки было произведено дробеструйное упрочнение КПО № 2 (согласно технологическому процессу обработки детали «стенка»), выполнен контроль в КТ, аналогично (1) были рассчитаны стрелы прогибов в продольных сечениях ребер 1–4 КПО № 2 после упрочнения $f_{упр.№2}$.

На завершающей стадии эксперимента была произведена правка дробеструйной обработкой КПО № 1, 2, выполнен контроль отклонений в КТ. Аналогично формулам (1) были рассчитаны стрелы прогибов, полученные после дробеструйной обработки $f_{др.обр.№1(№2)}$ в продольных сечениях ребер 1–4 КПО № 1, 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В результате механической обработки КПО № 1 максимальное отклонение от плоскостности составило 2 мм, возросло до 2,75 мм после упрочняющей обработки. В процессе правки при помощи дробеструйной обработки на максимально возможных режимах получилось снизить данное отклонение до 2,6 мм, что свидетельствует о высокой степени насыщения поверхности и низкой в таком случае эффективности доводки при помощи дробеструйной обработки.

Изменение стрел прогибов в продольных сечениях ребер 1–4 КПО № 1, 2 при обработке показано на рис. 5, 6, соответственно.

Упрочнение КПО № 1 позволило определить прогнозируемую при упрочнении деформацию и на основе этих значений рассчитать требуемые режимы раскатывания (превентивного деформирования) для КПО № 2. Максимальное отклонение КПО № 2 после фрезерования составляло 2,5 мм, после превентивного деформирования и упрочнения оно снизилось до 0,9 мм. В процессе доводки дробеструйной обработкой удалось

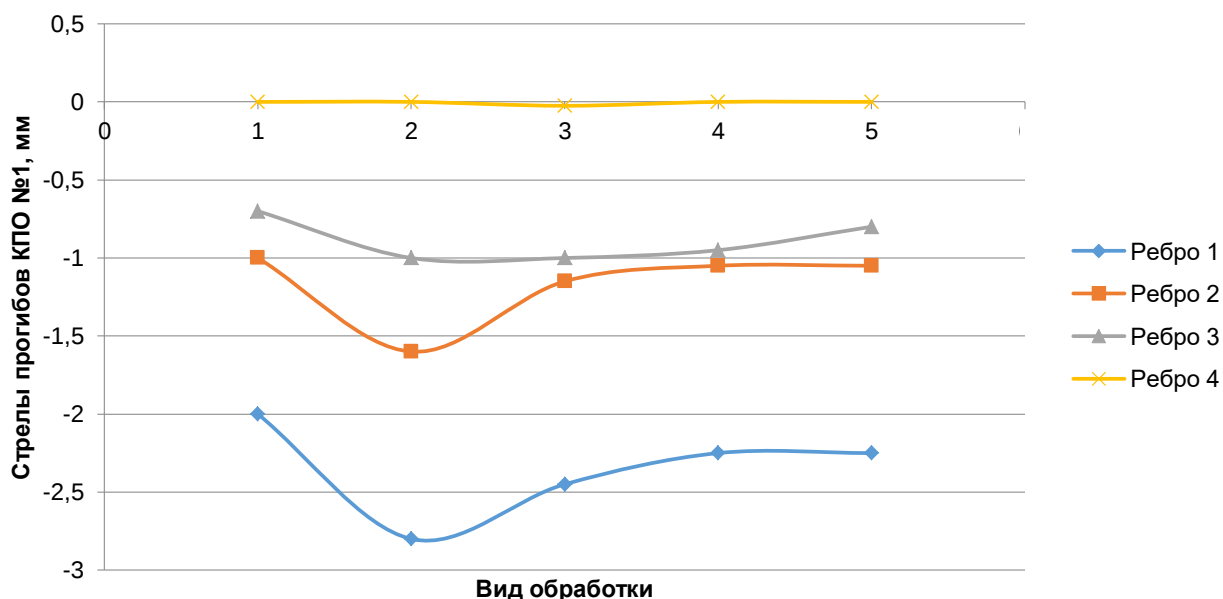


Рис. 5. Изменение стрел прогибов в продольных сечениях ребер 1–4 конструктивно-подобного образца № 1 при обработке: 1 – фрезерование; 2 – упрочняющая обработка; 3–5 – дробеструйная обработка (в т.ч. дополнительная)

Fig. 5. Variations of sagging deflections in the longitudinal sections of the ribs 1–4 of the structurally similar sample no.1 under machining: 1 – milling; 2 – hardening; 3–5 – shot peening (including additional processing)

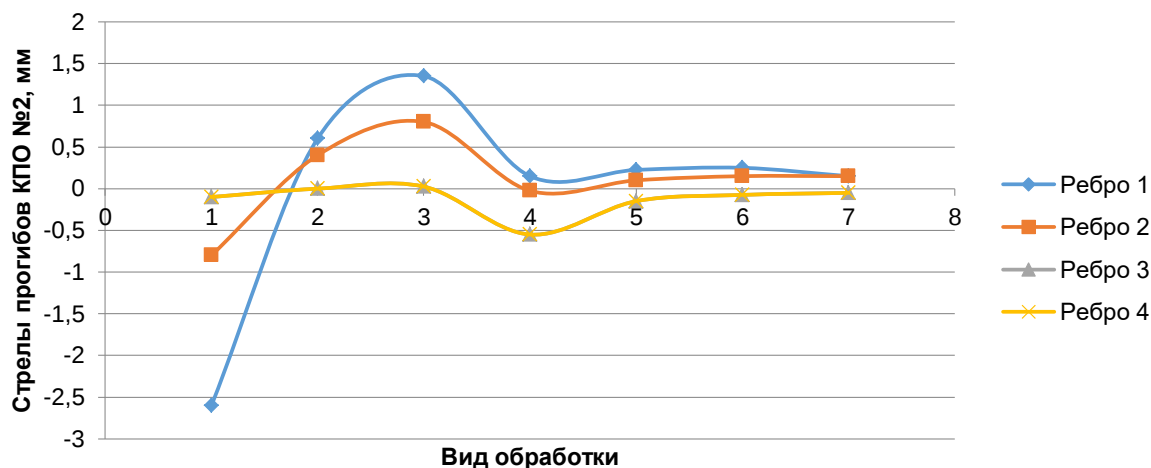


Рис. 6. Изменение стрел прогибов в продольных сечениях ребер 1–4 конструктивно-подобного образца № 2 при обработке: 1 – фрезерование; 2 – раскатка роликами (превентивное деформирование); 3 – дополнительная раскатка роликами (превентивное деформирование) ребра

№ 1; 4 – упрочняющая обработка; 5–7 – дробеструйная обработка (в т.ч. дополнительная)
Fig. 6. Variations of sagging deflections in the longitudinal sections of the ribs 1–4 of a structurally-similar sample no. 2 under machining: 1 – milling; 2 – rolling (preventive deformation); 3 – additional rolling of the rib no.1 (preventive deformation); 4 – hardening; 5–7 – shot peening (including additional processing)

снизить данное отклонение до 0,4 мм, что соответствует допустимому отклонению детали такой конструкции [5, 16–20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе анализа результатов проведенных работ определено, что наиболее оптимальной технологией, позволяющей выполнить упрочнение детали типа «стенка» с выдерживанием ее формы в пределах допуска и соблюдением требований нормативной документации является последовательность: превентивное деформирование → упрочнение дробеструйным методом → правка доводка дробеструйным методом.

С целью повышения производительности процесса внесение предсказаний формы целесообразно объединить с правкой детали после фрезерования. Используя на этих операциях раскатку роликами, можно определять требуемые для получения суммарной

деформации режимы обработки и с высокой точностью производить превентивное деформирование.

Стоит также отметить, что после упрочнения помимо предсказуемых поводов возникают и стохастические, что не позволяет определить такую величину предсказания, которая полностью бы нивелировалась при упрочнении детали, т.е. в любом случае останется ее «недогиб» или «перегиб». Для гарантированного устранения поводов после упрочнения с превентивным деформированием следует применять правку дробеструйной обработкой ребер, а не полотна. Поэтому необходимо закладывать определенную величину «недогиба» деталей при превентивном деформировании (примерно 80% согласно (4)). Как подтвердило проведение данных экспериментальных работ, это позволяет в итоге добиться требуемой точности.

Список литературы

1. Макарук А.А., Минаев Н.В. Технология формообразования и правки маложестких деталей методами местного пластического деформирования // Материалы Всерос. науч.-практ. семинара с междунар. участием. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2011. С. 117–121.
2. Макарук А.А., Минаев Н.В. Технология формообра-

- зования и правки маложестких деталей раскаткой роликами // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 6. С. 404–408.
3. Pashkov A.Ye., Makaruk A.A., Minaev N.V. Automation methods for forming and rectifying stiffened parts with rolling machines // International Journal of Engineering



and Technology. 2016. Vol. 7. No. 6. P. 2030–2037.

4. Пашков А.А. Автоматизация процесса дробеударного формообразования крупногабаритных панелей на установках контактного типа // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2015. № 4. С. 34–39.

5. Пашков А.Е., Дяк А.Ю. Внутренние силовые факторы процесса дробеметной обработки листовых деталей // Современный университет: образование, наука, культура: сб. матер. Междунар. науч.-практ. конф. студ., асп. и молод. ученых (г. Иркутск, 15 июня 2015 г.). Иркутск, 2005. С. 171–177.

6. Пашков А.Е., Викулова С.В., Вяткин А.С., Макарук А.А. К вопросу обеспечения точности определения интенсивности поверхностного упрочнения // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2010. № 1. С. 102–107.

7. Беляков В.И., Мовшович А.Я., Кочергин Ю.А. Изготовление листовых деталей методом раскатки // Системы обработки информации. 2010. Вып. 9. С. 12–14.

8. Tu Fubin, Delbergue D., Miao Hongyan, Klotz T., Brochu M., Bocher P, et al. A sequential DEM-FEM coupling method for shot peening simulation // Surface and Coatings Technology. 2017. Vol. 319. P. 200–212. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.03.035>

9. Murugaratnam K., Utili S., Petrinic N. A combined DEM-FEM numerical method for Shot Peening parameter optimization // Advances in Engineering Software. 2015. Vol. 79. P. 13–26.

<https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2014.09.001>

10. Miao H.Y., Larose S., Perron C., Evesque M. On the potential applications of a 3D random finite element model for the simulation of shot peening // Advances in Engineering Software. 2009. Vol. 40. No. 10. P. 1023–1038. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2009.03.013>

11. Chen Zhuo, Yang Fan, Meguid S.A. Realistic finite element simulations of arc-height development in shot-peened Almen strips // Journal of Engineering Materials and Technology. 2014. Vol. 136. No. 4.

<https://doi.org/10.1115/1.4028006>

12. Koltsov V.P., Vinh Le Tri, Starodubtseva D.A. Determination of the allowance for grinding with flap wheels after shot peen forming // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2019. Vol. 632. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012096>

13. Starodubtseva D.A., Koltsov V.P., Vinh Le Tri. Grinding of aluminum alloy panels after shot peen forming on contact type installations // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2019. Vol. 632. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012109>

14. Starodubtseva D.A., Vinh Le Tri, Koltsov V.P. Formation of the surface roughness during grinding with flap wheels after shot peening // International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: MATEC Web Conference. 2018. Vol. 224. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822401070>

15. Koltsov V.P., Vinh Le Tri, Starodubtseva D.A. Surface roughness formation during shot peen forming // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2018. Vol. 327. Iss. 4. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/4/042125>

16. Дяк А.Ю. Определение степени покрытия автоматизированным методом // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 12. С. 19–25.

17. Охрименко Я.М. Основы технологии горячей штамповки. М.: Машгиз, 1975. 285 с.

18. Беляков В.И. Штамповка на специальном оборудовании. М.: Машгиз, 1983. 79 с.

19. Мовшович А.Я., Буденный М.М., Кочергин Ю.А. Некоторые аспекты унификации обратимой оснастки для металлорежущего оборудования // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2010. № 1. С. 66–70.

20. Фролов Е.А., Кравченко С.И., Носенко О.Г. Основные тенденции развития высоких технологий в машиностроении // Отраслевое машиностроение, строительство: сб. науч. тр. Вып. 2. Полтава: Изд-во Полтав. нац. техн. ун-та, 2014. С. 3–9.

References

1. Makaruk AA, Minaev NV. Technology of shaping and straightening of low-rigidity parts by local plastic deformation methods. In: *Materialy Vserossiyskogo nauchno-prakticheskogo seminar s mezhdunarodnym uchastiem = Proceedings of All-Russian scientific and practical seminar with international participation*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2011, p. 117–121. (In Russ.)

2. Makaruk AA, Minaev NV. Technology of shaping and dressing the low-rigid details by means of roller burnishing. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2013;15(6):404–408. (In Russ.)

3. Pashkov AYe, Makaruk AA, Minaev NV. Automation methods for forming and rectifying stiffened parts with rolling machines. *International Journal of Engineering and Technology*. 2016;7(6):2030–2037.

4. Pashkov AA. Automation of large-size panel shot-

peening on contact-type machines. *Vestnik Rybinskoy gosudarstvennoy aviacionnoy tekhnologicheskoy akademii imeni P.A. Solov'eva = Vestnik of P.A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technological Academy*. 2015;4:34–39. (In Russ.)

5. Pashkov AE, Diyak AYU. Internal stress factors of the sheet part peen forming process. In: *Sovremennyy universitet: obrazovanie, nauka, kul'tura: sbornik materialov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh = Modern university: education, science, culture: Proceedings of the international scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists*. Irkutsk; 2005, p. 171–177.

6. Pashkov AE, Vikulova SV, Vyatkin AS, Makaruk AA. Towards achievement of accuracy surface hardening intensity determination. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie = Modern technologies. Systems analysis. Modeling*. 2010;1(1):1–10.

tem analysis. Modeling. 2010;1:102–107. (In Russ.)

7. Belyakov VI, Movshovich AY, Kochergin YuA. Making of sheet details method of pinning-out. *Sistemi obrobki informacii* = Information Processing Systems. 2010;9:12–14.

8. Tu Fubin, Delbergue D, Miao Hongyan, Klotz T, Brochu M, Bocher P, et al. A sequential DEM-FEM coupling method for shot peening simulation. *Surface and Coatings Technology*. 2017;319:200–212.

<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.03.035>

9. Murugaratnam K, Utili S, Petrinic N. A combined DEM–FEM numerical method for shot peening parameter optimization. *Advances in Engineering Software*. 2015;79:13–26. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2014.09.001>

10. Miao HY, Larose S, Perron C, Evesque M. On the potential applications of a 3D random finite element model for the simulation of shot peening. *Advances in Engineering Software*. 2009;40(10):1023–1038.

<https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2009.03.013>

11. Chen Zhuo, Yang Fan, Meguid SA. Realistic finite element simulations of arc-height development in shot-peened Almen strips. *Journal of Engineering Materials and Technology*. 2014;136(4).

<https://doi.org/10.1115/1.4028006>

12. Koltsov VP, Vinh Le Tri, Starodubtseva DA. Determination of the allowance for grinding with flap wheels after shot peen forming. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2019. Vol. 632.

<https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012096>

13. Starodubtseva DA, Koltsov VP, Vinh Le Tri. Grinding of aluminum alloy panels after shot peen forming on contact type installations. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2019;632.

<https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012109>

14. Starodubtseva DA, Vinh Le Tri, Koltsov VP. Formation of the surface roughness during grinding with flap wheels after shot peening. In: *International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: MATEC Web Conference*. 2018;224. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822401070>

15. Koltsov VP, Vinh Le Tri, Starodubtseva DA. Surface roughness formation during shot peen forming. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2018;327(4).

<https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/4/042125>

16. Diyak AY. Shot coverage degree estimation by a computer-aided method. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2015;12:19–25. (In Russ.)

17. Ohrimenko YaM. *Basics of die forging technology*. Moscow: Mashgiz; 1975, 285 p. (In Russ.)

18. Belyakov VI. Stamping on special equipment. Moscow: Mashgiz; 1983, 79 p. (In Russ.)

19. Movshovich AJ, Budenny MM, Kochergin JuA. Some aspects of standardization of convertible rigging for metal cutting equipment. *Energobezopasnost. Energetika. Energoaudit* = Energy saving. Power engineering. Energy audit. 2010;1:66–70.

20. Frolov YeA, Kravchenko SI, Nosenko OG. The main tendencies of development of high technology in engineering. In: *Industrial engineering, construction: Collection of scientific works*. Iss. 2. Poltava: Poltava National Technical University; 2014, p. 3–9.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Макарук Александр Александрович,

кандидат технических наук,
доцент кафедры авиамашиностроения,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: makaruk_aa@mail.ru

Самойленко Олег Викторович,

научный сотрудник,
кафедра технологии и оборудования
машиностроительных производств,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: olegsamoylenko1@gmail.com

Иванов Юрий Николаевич,

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander A. Makaruk,

Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department
of Aircraft Engineering,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: makaruk_aa@mail.ru

Oleg V. Samoylenko,

Researcher,
Department of Machine-Building Production
Technology and Equipment,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: olegsamoylenko1@gmail.com

Yuri N. Ivanov,

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



Чашин Николай Сергеевич,

научный сотрудник,
Научно-исследовательская лаборатория обработки,
ремонта и диагностики композиционных материалов,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: chash.nik@ex.istu.edu

Минаев Николай Владимирович,

научный сотрудник,
кафедра технологии и оборудования
машиностроительных производств,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
✉ e-mail: minaev@istu.edu

Nikolay S. Chashchin,

Researcher,
Research Laboratory of Processing, Repair
and Diagnostics of Composite Materials, Irkutsk National
Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: chash.nik@ex.istu.edu

Nikolay V. Minaev,

Researcher,
Department of Machine-Building Production Technology
and Equipment,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
✉ e-mail: minaev@istu.edu

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготов-
ку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный
вариант рукописи.*

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 23.12.2020; одобрена
после рецензирования 15.01.2021; принята к публика-
ции 26.02.2021.

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 23.12.2020; approved after
reviewing 15.01.2021; accepted for publication
26.02.2021.



Использование инструментальных материалов для диагностики технологической системы резания

© Б.Я. Мокрицкий, В.Ю. Шелковников

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

Резюме: Цель – создать методику диагностирования динамического состояния звеньев «станок – приспособление – инструмент – деталь» технологической системы резания применительно к точению типовыми сменными твердосплавными пластинами специализированных нержавеющих сталей. Объектом исследований явились труднообрабатываемые коррозионностойкие нержавеющие стали марок 09X17H7Ю, 12X18H10T и 13X15H5 AM-3. Диагностирование выполнено путем имитационного моделирования покрытий пластин в программной среде Deform. В качестве критерия диагностирования использован период стойкости инструмента до достижения его износа 0,5 мм по задней грани. Оценка влияния покрытий на период стойкости инструмента осуществлена по параметрам «температура в зоне резания», «напряжения в инструментальном материале», «деформация инструмента». В результате моделирования было выбрано 10 рациональных покрытий, оказывающих наибольшее влияние на состояние технологической системы резания. Это позволяет осуществлять ее диагностику. Покрытия отличались своей архитектурой (конструкция, состав, структура и метод нанесения покрытий). Предложена методика диагностики состояния технологической системы резания и управления ее состоянием по результатам диагностики. Отклонение выявленного состояния технологической системы резания от желательного состояния оценено по периоду стойкости инструментов с разными покрытиями за равное время их работы. Эффективным считали такое состояние, при котором обеспечивался максимальный период стойкости за счет применения рационального покрытия. Разработана методика, позволяющая оценивать состояние технологической системы резания путем имитационного моделирования по параметрам «температура в зоне резания», «напряжения в инструментальном материале», «деформация инструмента». Методика также позволяет диагностировать состояние данной системы резания по параметру «период стойкости инструмента» и управлять ее состоянием по результатам диагностики за счет применения наиболее рациональных покрытий пластин. С помощью разработанной методики возможно выявить оптимальные параметры режима резания исследуемых труднообрабатываемых специализированных коррозионностойких сталей.

Ключевые слова: диагностика системы резания при точении, проектирование рациональных инструментальных материалов, имитационное моделирование.

Благодарности: Авторы выражают благодарность Э.С. Ситамову за помощь в проведении исследований.

Для цитирования: Мокрицкий Б.Я., Шелковников В.Ю. Использование инструментальных материалов для диагностики технологической системы резания. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 1. С. 17–30. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-1-17-30>

The use of tool materials for monitoring the state of cutting technological systems

Boris Ya. Mokritskiy, Vladislav Yu. Shelkovnikov

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

Abstract: The aim was to develop a methodology for monitoring the dynamic state of the links “machine tool – device – cutting tool – detail” comprising a cutting technological system as applied to turning specialized stainless steels using replaceable standard hardmetal inserts. The research object was the hard-to-treat non-corrosive stainless steels 09X17H7Ю, 12X18H10T and 13X15H5 AM-3. Monitoring was carried out by simulating plate coatings in the Deform software environment. The diagnostic criterion was the tool life period up to the wear level of 0.5 mm along the rear edge. The effect of coatings on the tool life period was assessed according to the following parameters: temperature in the cutting zone, tension in the tool material and tool deformation. As a result, 10 optimal coatings having the greatest impact on the state of the cutting technological system under study were selected. These coatings can be used for diagnosing the state of cutting technological systems. The coatings were distinguished in terms of architecture (design, composition,

structure and coating method). A technique for monitoring and managing the state of cutting technological systems according to the results of diagnostics was proposed. The deviation of the revealed state of the cutting technological system from the desired state was estimated by the life period of tools with different coatings for the same time of their operation. The state of the system under study was considered effective provided that the maximum tool life period due to the use of an optimal coating was achieved. A technique allowing assessment of the state of technological cutting systems by their simulation according to the parameters "temperature in the cutting zone", "tension in the tool material" and "tool deformation" was proposed. This technique also permits monitoring of the state of cutting systems by the parameter "tool life period" and managing their state according to the results of diagnostics through the use of the most optimal plate coatings. The developed technique can be used to reveal the optimal parameters of the cutting mode of hard-to-treat specialized corrosion-resistant steels.

Keywords: cutting system diagnostics under turning, design of rational tool materials, simulation

Acknowledgements: The authors appreciate the help provided by E.S. Sitamov in conducting the research.

For citation: Mokritskii BYa, Shelkovnikov VYu. The use of tool materials for monitoring the state of cutting technological systems. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(1):17–30. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-1-17-30>

ВВЕДЕНИЕ

Обработка нержавеющей сталей относится к сложной обработке. Это связано с физико-механическими характеристиками этих сталей и их эксплуатационными свойствами. Одним из приемов повышения эффективности токарной обработки таких сталей является применение покрытий на твердосплавных сменных пластинах токарных резцов. В общем виде эта задача решена [1–5], но требуются уточнения по вопросам точения типовыми отечественными пластинами для сталей марок 09X17H7Ю, 12X18H10Т, 13X15H5АМ-3. Эти стали являются специализированными высококоррозионностойкими, область их применения расширяется. В силу этого возникла необходимость разработать новые покрытия для отечественного инструментального твердого сплава (субстрата) марки ВК8 и оценить возможность применения покрытий для поддержания технологической системы резания в благоприятном динамическом состоянии, при котором бы качество обработанной поверхности и работоспособность инструмента отвечали современным требованиям.

Целью данного исследования является обеспечение возможности диагностики состояния технологической системы резания при точении сменными отечественными типовыми твердосплавными пластинами труднообрабатываемых коррозионностойких специализированных нержавеющей сталей за счет применения рациональных покрытий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработаны, изготовлены и испытаны при точении указанных сталей следующие инструментальные материалы: ВК8 + TiCN (5 мкм) + (TiAl)N (3 мкм) + Al₂O₃ (5 мкм) + TiC (5 мкм); ВК8 + Al₂O₃ (2 мкм) + (Ti)CN (5 мкм) + (TiAl)N (3 мкм) + TiN (3 мкм); ВК8 + (TiAl)N (3 мкм) + Al₂O₃ (3 мкм) + (TiAl)N (3 мкм) + Al₂O₃ (3 мкм); ВК8 + TiN (3 мкм) + TiC (3 мкм) + TiN (3 мкм) + TiC (3 мкм); ВК8 + TiC (3 мкм) + TiN (3 мкм) + (TiAl)N (2 мкм); ВК8 + TiCN (2 мкм) + TiC (3 мкм) + TiN (1,5 мкм); ВК8 + TiC (1,5 мкм) + TiN (3 мкм); ВК8 + TiN (2 мкм) + TiC (5 мкм); ВК8 + TiCN (0,5 мкм) + TiN (1 мкм); ВК8 + TiN (0,5 мкм) + TiC (1 мкм); ВК8 (цифра в скобках указывает толщину данного слоя покрытия).

В качестве базового инструментального материала взят сплав марки ВК8, остальные инструментальные материалы отличаются конструкцией, составом, структурой и методом нанесения покрытий. Конструкция покрытия, его состав указаны в примененной выше форме написания инструментального материала. Поясним на примере материала, указанного выше первым. Нижний (т.е. нанесенный на субстрат ВК8) слой является карбонитридом титана TiCN, толщина этого слоя 5 мкм, на этот слой нанесено покрытие нитрида титана с алюминием (TiAl)N толщиной 3 мкм, на него нанесено алмазоподобное покрытие оксида алюминия Al₂O₃ толщиной 5 мкм, на него нанесен верхний слой покрытия карбидом титана TiC толщиной 5 мкм. Попро-

сы технологии нанесения многослойных покрытий изложены в работах [1, 4, 6–10].

Для достижения поставленной цели применено совмещение разработки покрытий с помощью имитационного моделирования в программной среде Deform и их натурные экспериментальные испытания при точении, т.е. разрабатываются новые инструментальные материалы, а при их разработке имитационное моделирование используется как средство (как инструмент) виртуального компьютерного проектирования. Таким образом, в качестве входных параметров технологической системы резания использованы указанные выше инструментальные материалы и обрабатываемые материалы, в качестве выходных параметров, рис. 1, получены требующиеся параметры, позволяющие управлять состоянием системы резания, в том числе качеством обработанной поверхности (по параметрам шероховатости обработанной поверхности) и работоспособности инструментальных материалов. Для оценки шероховатости применен портативный прибор модели TR200.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Имитационное моделирование реализовано по схеме, представленной на рис. 2.

Из рис. 2 следует, что:

– из всего многообразия факторов, влияющих на эффективность технологического процесса резания и состояние системы «станок – приспособление – инструмент – деталь», нами учтены (слева на рис. 2) только износ инструмента, сила резания, температура резания и архитектура покрытия, иначе говоря, закладывая в имитационное проектирование архитектуру покрытия как средство достижения поставленной цели, мы здесь же регламентируем предельные значения износа, силы резания и температуры как взаимосвязанные параметры;

– на выходе (см. правую часть рис. 2) получаем удовлетворительное сложнапряженное состояние инструментального материала и прогнозируемые (ожидаемые) величины износа, силы резания и температуры;

– из всего многообразия возможных вариантов получения новых инструментальных материалов далее для исследования отобраны только те, которые отвечают соответствующим требованиям, например износ не более 0,5 мм (если обработка заготовки черновая), сила резания не более 400 Н (в зависимости от жесткости станка), температура 100°C (исходя из температурных особенностей применяемого субстрата).

Пример иллюстрации полученных результатов показан на рис. 3 [22].



Рис. 1. Примененная модель реализации процесса имитационного проектирования инструментальных материалов

Fig. 1. Applied implementation model of tool material simulation design



Рис. 2. Схема реализации имитационного моделирования новых инструментальных материалов
Fig. 2. Implementation scheme of simulation modeling of new tool materials

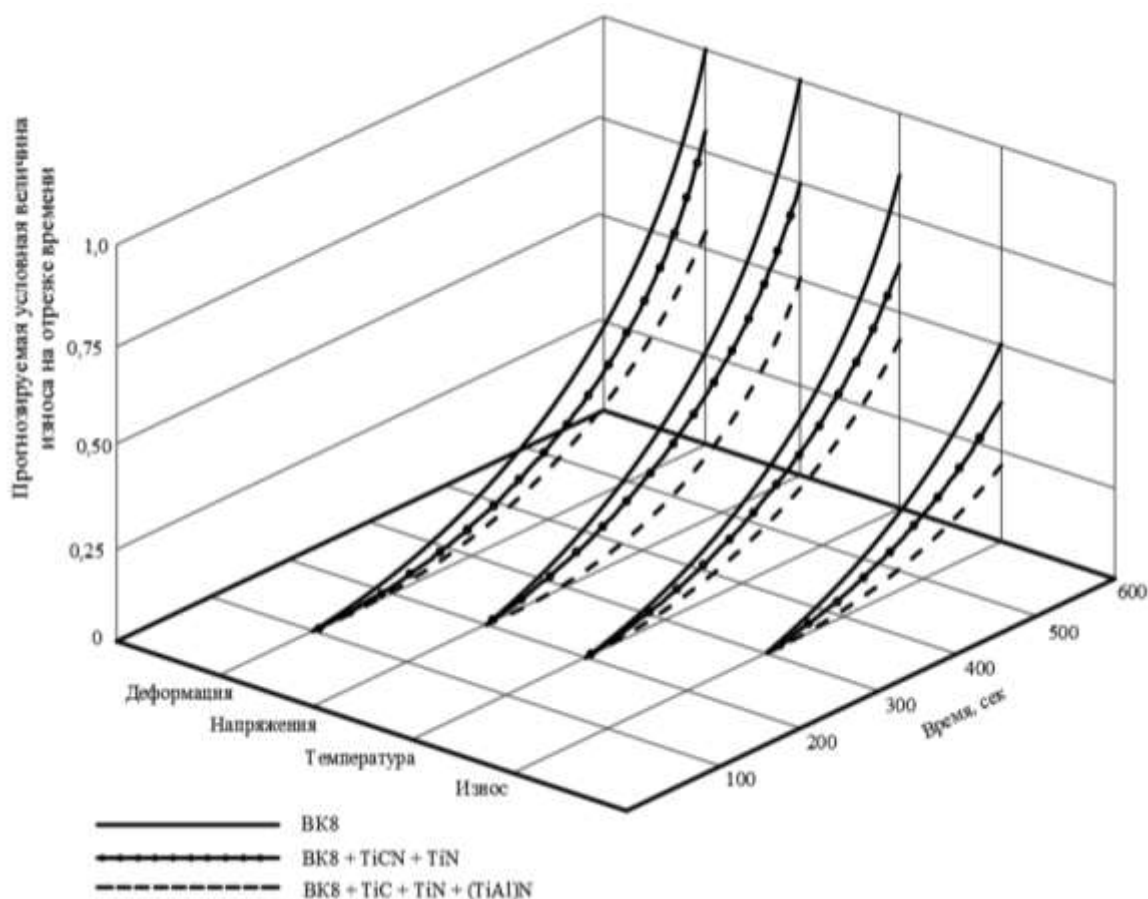


Рис. 3. Прогнозируемое при имитационном моделировании соотношение исследуемых параметров (условная величина износа, температура в зоне резания, напряжения в инструментальном материале, деформация инструментального материала) при использовании разных инструментальных материалов (BK8, BK8 + TiCN + TiN, BK8 + TiC + TiN + (TiAl)N) за лимитированное (600 с) время условного резания
Fig. 3. Simulation predicted ratio of the studied parameters (conditional wear value, temperature in the cutting zone, stresses in the tool material, tool material deformation) when using different tool materials (VK8, VK8 + TiCN + TiN, VK8 + TiC + TiN + (TiAl)N) for the limited time (600 s) of conditional cutting



Из рис. 3 следует, что:

– интенсивного износа инструмента (до 0,5 мм по задней грани) следует ожидать в интервале от 300 до 600 с, но параметры «температура резания», «величина деформации» и «напряжение» начинают увеличиваться значительно раньше и более интенсивно;

– интенсивность протекания указанных процессов значительно ниже при применении покрытий.

Результаты оценки качества поверхности детали, обработанной при использовании разных инструментальных материалов, приведены в табл. 1 и 2 применительно к точению стали 09Х17Н7Ю. Эти результаты получены при натурных экспериментальных испытаниях. Для этого инструментальные материалы были спроектированы, изготовлены (покрытия нанесены на субстрат ВК8), испытаны.

Исследовано 6 параметров (R_a , R_z , R_q , R_t , R_p , R_{3z}) шероховатости, которые, с нашей точки зрения, в данном случае были предпочтительными.

Из данных табл. 1 следует, что изменение глубины резания влечет за собой не только изменение периода работы инструмента до износа 0,5 мм, но и существенное изменение

величин указанных параметров шероховатости. При этом применение покрытия благоприятно и по величинам параметров шероховатости, и по периоду работы инструмента.



Рис. 4. Пластина квадратная, диаметр описывающей окружности 17,5 мм

Fig. 4. The square plate; the diameter of the circumscribing circle is 17.5 mm

Это во многом согласуется с результатами, приведенными в работах [11–24], но отличается тем, что получено применительно к достижению поставленной цели исследования. Для нас важно было оценить, насколько существенно это изменение параметров. В табл. 2 результаты данного исследования конкретизированы. Очевидно, что наиболее радикально изменение происходит по параметру R_a при изменении скорости резания.

Таблица 1. Соотношение величин параметров шероховатости при разных режимах резания разными инструментальными материалами (с дополнением о соответствующей работоспособности инструмента)

Table 1. Ratio of roughness parameter values for different cutting modes with different tool materials (complimented with corresponding tool performance)

№ опыта и глубина резания	Инструментальный материал ВК8		Инструментальный материал с покрытием ВК8+TiCN + (TiAl)N + TiN*	
1 – глубина резания 1 мм	Значения величин параметров шероховатости R_a 5,430 R_q 7,092 R_z 30,905 R_t 31,472 R_p 15,450 R_{3z} 12,654	Период времени работы инструмента 45 мин	Значения величин параметров шероховатости R_a 5,220 R_q 6,825 R_z 29,054 R_t 29,685 R_p 12,456 R_{3z} 11,658	Период времени работы инструмента 160 мин
2 – глубина резания 2 мм	R_a 6,800 R_q 9,354 R_z 45,320 R_t 48,985 R_p 17,80 R_{3z} 15,545	15 мин	R_a 5,346 R_q 8,235 R_z 42,116 R_t 44,012 R_p 14,021 R_{3z} 12,565	26 мин

*Преимущественно исследования выполнены для типовой квадратной твердосплавной пластины, рис. 4.

Таблица 2. Пример* влияния параметров режима резания на шероховатость поверхности
Table 2. Example* of the influence of cutting mode parameters on surface roughness

Параметры** шероховатости	Изменение величин, мкм, параметров шероховатости при изменении параметров режима резания	
	при увеличении глубины резания с 1 мм до 2 мм	при увеличении скорости резания с 50 м/мин до 60 м/мин
Ra	с 5,430 при глубине резания 1 мм на 6,800 при глубине 2 мм. Это соответствует 4 классу шероховатости	с 5,430 при скорости резания 50 м/мин на 7,230 при скорости 60 м/мин. Это соответствует изменению с 5 класса шероховатости на 4 класс
Rz	с 30,905 на 45,320. 3 класс шероховатости	с 30,905 на 52,657. 3 класс шероховатости
Rq **	с 7,092 на 9,354	с 7,092 на 12,111
Rt **	с 31,472 на 48,985	с 31,472 на 54,876
Rp **	с 15,345 на 17, 80	с 15,345 на 21,143
R3z **	с 12,654 на 15,545	с 12,654 на 18,853

*Точение квадратной пластиной стали 09X17H7Ю инструментальным материалом ВК8 с подачей 0,21 мм/об. заготовки.

**Значения не нормированы.

Приведенные результаты показывают, что архитектурой покрытия можно управлять состоянием технологической системы резания. По крайней мере, можно не только добиться повышения работоспособности инструмента, но и повысить качество обработанной поверхности без снижения производительности обработки. Это имеет практическую значимость.

Управлять состоянием технологической системы резания с позиции достижения поставленной цели исследования можно по разным параметрам, например по шероховатости, силе резания и т.д. Ниже это показано на примере использования параметров шероховатости, в том числе и для других специализированных труднообрабатываемых нержавеющей сталей марок 12X18H10T и 13X15H5 AM-3.

Изложенное выше позволяет заключить:

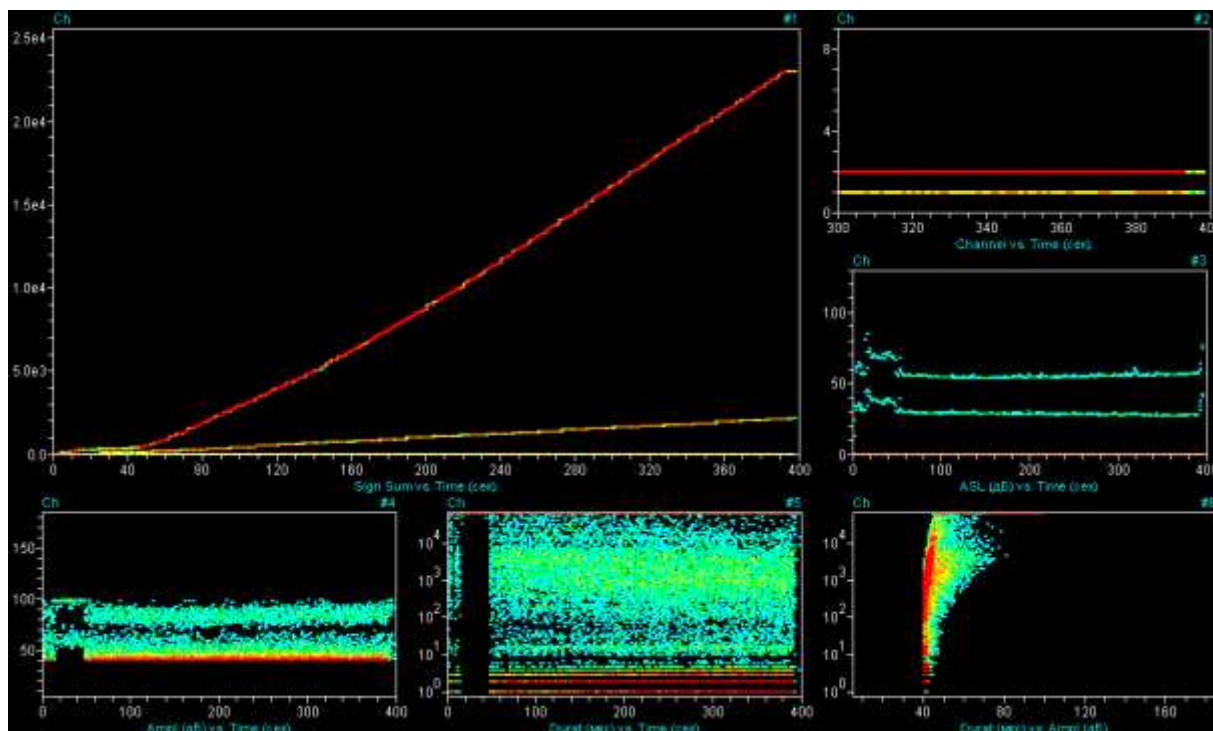
1. Факт взаимосвязи применяемого инструментального материала (входной параметр технологической системы резания) с величинами (выходной параметр системы резания) параметров шероховатости обработанной поверхности доказан указанными конкретными эксплуатационными испытаниями на примере обработки рассмотренных труднообрабатываемых нержавеющей сталей. Новизна этих сведений состоит в данных марках сталей и примененных разработанных инструментальных материалах.

2. Взаимосвязь инструментального материала с величинами параметров шероховатости можно использовать для управления величинами параметров шероховатости с целью повышения качества обработки за счет выбора и проектирования наиболее рациональных материалов путем обеспечения благоприятного динамического состояния системы резания.

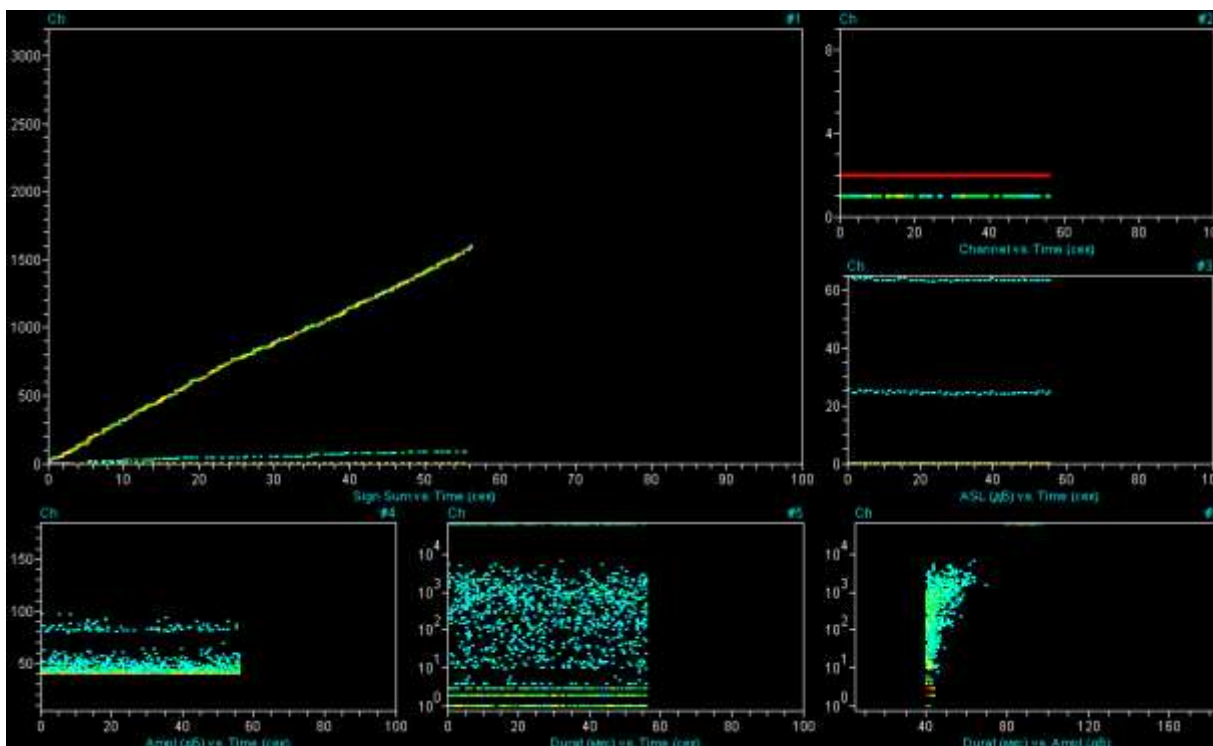
В качестве проверочного действия по обеспечению диагностики состояния технологической системы резания применен общепризнанный прием исследования сигналов акустической эмиссии, излучаемой в процессе резания с использованием прибора Малахит 15А/12. Прибор оснащен программным обеспечением международной акустической системы ASL.

В обобщенном виде это показано на рис. 5 и развито на рис. 6 и 7.

На рис. 5 приведены примеры скриншотов с экрана монитора акустической системы Малахит 15А/12, данную информацию условно можно подразделить на основную, дополнительную и разъяснительную. Основная информация на скриншоте приводится в левом верхнем углу – это зависимость во времени (горизонтальная ось) количества суммарных сигналов акустической эмиссии, регистрируемых с основного (верхняя линия) акустического датчика (он расположен на резце) и базового (нижняя линия) акустичес-



a



b

Рис. 5. Примеры записи параметров акустической эмиссии: а – при резании ВК8; б – при резании ВК8 + Ti(до 1 мкм) + TiN(1 мкм) + (NbZrTiAl)N(2,5 мкм); символ Ch на вертикальных осях графиков означает используемое средство обозначения, в данном случае это частоты сигналов акустической эмиссии; на левой части рис. 5 б символ «e» является общепринятым приемом записи малых чисел, символ показывает, сколько знаков после запятой значит приведенное число

Fig. 5. Examples of acoustic emission parameter recording: a – when cutting by VK8; b – when cutting by VK8 + Ti(up to 1 μ m) + TiN(1 μ m) + (Nb, Zr, Ti, Al)N(2.5 μ m); the character Ch on the vertical axes of the graphs is an identification mark used, in this case, for the frequency of acoustic emission signals; on the left side of Fig. 5 b the symbol "e" is a widely used recording method of small numbers. The symbol indicates how many places after the decimal point has the given number

кого датчика, расположенного на станине станка. На рис. 1 а представлен случай, когда запись акустических параметров велась только 55 с при резании инструментальным материалом ВК8. Были осуществлены и более длительные записи.

Параметр количества сигналов акустической эмиссии во многом аналогичен принятому в российских ГОСТах параметру «суммарный счет числа акустических активных событий» при принятом уровне фильтрации сигналов. Соответственно, расстояние по вертикали между верхней и нижней линиями графика характеризует интенсивность (разницу между количеством регистрируемых сигналов от базового и основного датчиков) прироста сигналов акустической эмиссии по времени ее регистрации. Символ Ch на вертикальной оси графика означает используемое средство обозначения. В данном случае это частоты сигналов акустической эмиссии. На левой части графика символ «е» является общепринятым приемом записи малых чисел. Символ показывает, сколько знаков после запятой означает показанное на оси число. Например, запись «20е4» следует понимать как 200000,0 регистрируемых суммарных сигналов акустической эмиссии.

Дополнительные параметры приведены на скриншоте под основными. Таким образом, слева внизу показан график распределения суммарного числа акустических сигналов по их амплитуде. Слева вторым внизу показан график распределения суммарных акустических сигналов по их длительности, что характеризует превалирование кратких (по механизму хрупкого разрушения материала инструмента) сигналов над длительными (по механизму вязкого разрушения) сигналами. Разъяснительные параметры приведены в правом ряду сверху вниз. Необходимость в них возникает при более тщательном анализе параметров акустических сигналов. Справа вверху показан график частной (упрощенной) зависимости сигналов по информационным каналам (от основного и базового датчиков). Судя по графикам, частоты сигналов лежат в нижней части значений. Ниже показан график частотной зависимости (по децибелам) акустических сигналов во времени по

общепринятой международной системе ASL. В отличие от верхнего графика здесь в начальный момент резания выявлен значительный разброс высокочастотных сигналов. Справа внизу показан график распределения суммарного числа акустических сигналов по их амплитудам (в децибелах). Из графика следует, что амплитуды сигналов превышают 40 децибел с ростом их частот при росте амплитуд. Для сравнения на рис. 5 б приведен скриншот при резании инструментальным материалом ВК8 + Ti (до 1мкм) + TiN (1мкм) + (NbZrTiAl)N (2,5 мкм). Различие между рис. 5 а и 5 б существенно.

Поясним информацию, приведенную на рис. 5, с помощью схемы, приведенной на рис. 6. Выберем произвольно две реперные точки по времени (например, $t_1 = 15$ с, $t_2 = 55$ с) регистрации числа суммарных сигналов Ch. Линия 1 иллюстрирует запись числа сигналов от базового датчика (он закреплен на задней бабке токарного станка), она наклонена к горизонтали под некоторым углом φ_1 . Линия 2 иллюстрирует запись от основного датчика (он закреплен на корпусе резца, установленного в резцедержатель токарного станка). Линия 2 наклонена к горизонтали под углом φ_2 . Разница в углах наклона линий 1 и 2 условно символизирует разницу в числе сигналов, регистрируемых датчиками. Тот факт, что число сигналов от основного датчика больше, чем от базового, свидетельствует об активности акустически значимых событий именно в зоне резания. Это различие в момент времени t_1 обозначим Δt_1 , в момент времени t_2 обозначим Δt_2 . Из значений на оси Ch сигналов определим их величины: $\Delta t_1 = 100 - 48 = 52$ сигнала; $\Delta t_2 = 1220 - 280 = 940$ сигналов.

По ним определим разницу: $\Delta_{1-2} = t_2 - t_1 = 940 - 52 = 888$ сигналов. Условно назовем это число приростом числа акустических сигналов за время (t_1 и t_2) между выбранными его реперными точками. Условимся это число считать акустическим образом, которое характеризует состояние технологической системы резания при заданных условиях эксплуатации (точение нержавеющей стали марки 09Х17Н7Ю типовой квадратной смен-

ной твердосплавной пластиной ВК8 при скорости резания 50 м/мин, подаче 0,21 мм/об. заготовки, глубине резания 1 мм).

Изменим условия эксплуатации и проследим изменения в акустических образах (да-

лее скриншоты не приводятся, даны их условные схемы, аналогичные тем, которые приведены на рис. 6). Например, изменим только глубину резания, пусть она будет равна 2 мм. Соответственно, линиями 3 и 4 (они

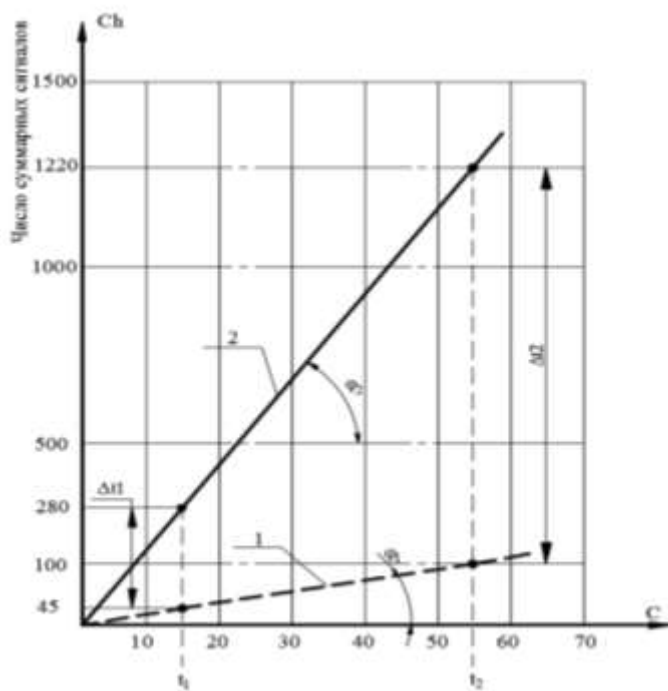


Рис. 6. Изменение числа суммарных акустических сигналов за время резания
Fig. 6. Change in the number of total acoustic signals during cutting

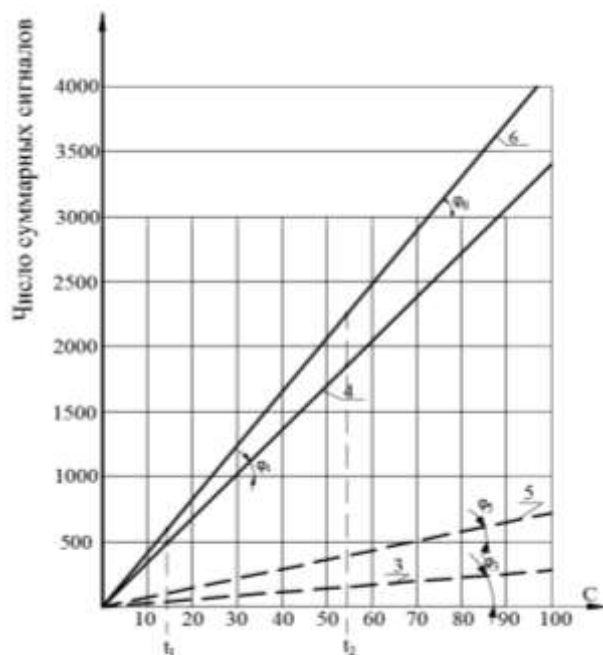


Рис. 7. Изменение числа суммарных акустических сигналов во время резания с разной скоростью резания (нижние линии – скорость резания 50 м/мин, верхние линии – скорость резания 60 м/мин)
Fig. 7. Change in the number of total acoustic signals when cutting with different cutting speeds (lower lines – cutting speed is 50 m/min, upper lines – cutting speed is 60 m/min)

соответствуют резанию со скоростью 50 м/мин) на рис. 7 отмечены линии, аналогичные линиям 1 и 2, приведенным на рис. 6. Линии 5 и 6 соответствуют резанию при скорости 60 м/мин.

Из рис. 7 следует, что:

- увеличение глубины резания и скорости резания привело к увеличению сигналов от базового датчика, причем увеличение скорости резания привело к более значительному приросту числа сигналов;

- число сигналов от основного датчика тоже возросло с увеличением глубины резания и скорости резания, но прирост числа сигналов почти аналогичен (Это свидетельствует о доминирующем термомеханическом пластическом механизме разрушения лезвия режущей пластины. Подтверждено результатами анализа остальных (дополнительно к левому верхнему) записей на аналогичных графиках соответствующих скриншотов).

Рассчитаем соответствующие приросты числа акустических сигналов (t_1 и t_2) между выбранными его реперными точками.

$$\Delta_{3-4} = 1490 - 410 = 1080 \text{ сигналов.}$$

$$\Delta_{5-6} = 1910 - 503 = 1407 \text{ сигналов.}$$

Из приведенных данных следует, что акустические образы процессов совершенно различны. Это позволяет считать, что данный подход и полученные результаты пригодны для использования диагностики состояния технологической системы резания. Поскольку данные рис. 7 отличаются от данных рис. 6 изменением параметров (глубиной резания и скоростью резания) режима резания, то есть основания считать, что факт влияния параметров режима резания на число суммарных акустических сигналов Ch установлен и может быть использован для поиска оптимальных параметров режима резания с целью обеспечения благоприятного динамического состояния технологической системы резания.

Ниже приведен пример применения акустической эмиссии в технологической системе резания для достижения цели исследования.

При указанных оптимальных параметрах режима резания провоцировали искажение динамического состояния технологической

системы резания путем недостаточной фиксации (усилия зажима) пиноли задней бабки станка, вращающийся центр которой поддерживал один из концов обрабатываемой заготовки. Результаты приведены в табл. 3, там же показан случай, когда ослабляли зажим прижимных планок перемещения суппорта в поперечном направлении, а также случай, когда с недостаточным усилием зажимали корпус резца в резцедержателе станка, когда имели место все эти специально внесенные искажения в элементы токарного станка.

Термин «класс шероховатости» использован потому, что он все еще традиционно используется на предприятиях.

Анализ данных табл. 3 позволяет сделать следующие выводы:

1. Изменение (увеличение) значений параметров шероховатости происходит при любом варианте провоцирования нарушения элементов станка.

2. Величина этого изменения различна на разных параметрах шероховатости. Различная она при разных вариантах провоцирования нарушения элементов станка.

3. Одновременное нарушение состояния элементов станка не приводит к суммированию величин параметров шероховатости. Величина такого изменения носит переменный характер.

4. При разных вариантах нарушения состояния элементов станка по величине Ra отмечено снижение качества обработки на 2 класса шероховатости, по Rz – на 1 класс.

На примере приведенных данных можно заключить: доказанный факт наличия взаимосвязи параметров режима резания с качеством обработанной поверхности можно использовать для диагностирования технологической системы резания на предмет оптимизации режимов резания и необходимости поднастройки элементов станка на обеспечение постоянства динамического состояния системы резания.

Оценка динамического состояния технологической системы резания косвенно подтверждена [20] результатами анализа параметров акустической эмиссии, которые регистрировались в процессе резания.



Таблица 3. Величины параметров шероховатости при разных вариантах искажений в элементах токарного станка
Table 3. Values of roughness parameters for different variants of distortions in lathe elements

№ варианта	Наименование элемента станка, в котором провоцировано нарушение состояния	Величины, мкм, некоторых* параметров шероховатости		
		№ столбца таблицы		
		1	2	3
		Ra	Rz	Rt
1	Пиноль задней бабки	9,712 4 класс шероховатости	45,822 3** класс шероховатости	48,994
2	Прижимные планки перемещения суппорта	9,600 4 класс шероховатости	48,742 3** класс шероховатости	54,156
3	Зажим резца	12,369 3** класс шероховатости	56,441 3** класс шероховатости	58,980
4	Вариант 1 + вариант 2	18,768 3** класс шероховатости	89,143 2** класс шероховатости	92,332
5	Вариант 1 + вариант 3	21,145 2** класс шероховатости	92,036 2** класс шероховатости	106,148
6	Вариант 1 + вариант 2 + вариант 3	34,126 2** класс шероховатости	123,430 2** класс шероховатости	121,894

*Из использованных в табл. 1 параметров выбраны только три указанных параметра в силу того, что Ra и Rz являются типичными, а Rt принят дополнительным из-за того, что он характеризует общую высоту неровностей.

**Такое низкое качество обработки поверхности допускается (ГОСТ 2789-73¹, ГОСТ 2309-73 ЕСКД², ГОСТ 25142-82³) только для изготовления установочных поверхностей, находящихся в соприкосновении, но неподвижных по отношению друг к другу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенный подход показал возможности управления и диагностирования технологической системы резания за счет применения соответствующих инструментальных материалов. Разработана методика разработки таких материалов. Показаны примеры реализации подхода. Выявлены наиболее рацио-

нальные инструментальные покрытия, необходимые при токарной обработке специализированной нержавеющей стали марки 09X17H7Ю и других труднообрабатываемых сталей. Покрытия выявлены по результатам имитационного компьютерного моделирования и подтверждены экспериментально.

Список литературы

1. Bouzakis K.D., Michailidis N., Skordaris G., Bouzakis E., Biermann D., M'Saoubi R. Cutting with coated tools: coating technologies, characterization methods and performance optimization // CIRP Annals. 2012. Vol. 61. Iss. 2. P. 703–723.
<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.05.006>
2. 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 & 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)
3. Chandrakanth Shet, Xiaomin Deng. Finite element analysis of the orthogonal metal cutting process // Journal of Materials Processing Technology. 2000. Vol. 105. Iss. 1-2. P. 95–109.
4. Shatla M., Kerk Ch., Altan T. Process modeling in machining. Part I: determination of flow stress data // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2001. Vol. 41. P. 1511–1534.
[https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(01\)00016-5](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(01)00016-5)

¹ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. Введ. 01.01.1975. М.: Стандартинформ, 2018.

²ГОСТ 2.309-73. Единая система конструкторской документации. Обозначения шероховатости поверхностей. Введ. 01.01.1975. М.: Стандартинформ, 2007.

³ГОСТ 25142-82. Шероховатость поверхности. Термины и определения. Введ. 01.01.1983. М.: Изд-во стандартов, 2018.

5. Rao G.V.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>
6. Morozova A., Mokritskii B., Vereshchagin V. Structure simulation and analysis of metal-cutting tool simulation results // *Aviamechanical engineering and transport (AVENT 2018): Proceedings of the International Conference*. 2018. P. 286–291. <https://doi.org/10.2991/avent-18.2018.55>
7. Beake B.D., Fox-Rabinovich G.S., Losset Ya., Yamamoto K., Aguirre M.H., Veldhuis S.C., et al. Why can TiAlCrSiYN-based adaptive coatings deliver exceptional performance under extreme frictional conditions // *Faraday Discussions*. 2012. Vol. 156. [Электронный ресурс]. URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2012/FD/c2fd00131d#!divAbstract> (12.03.2020).
8. 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.
9. 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>
10. Fox-Rabinovich G.S., Weatherley G.C., Dodonov A.I., Kovalev A.I., Shuster L.S., Dosbaeva G.K., et al. Nano-crystalline filtered arc deposited (FAD) TiAlN PVD coatings for high-speed machining applications // *Surface and Coatings Technology*. 2004. Vol. 177–178. P. 800–811. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.05.004>
11. Матвеев В.И. Точные измерения – основа качества и безопасности // *Контроль. Диагностика*. 2019. № 8. С. 4–11. <https://doi.org/10.14489/td.2019.08.pp.004-011>
12. Mokritskii B.Y., 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>
13. Vereschaka A.A., Mokritskii B.Ya., Sitnikov N., Ogan'yan G.V., Aksenenko A.Yu., Mokritskii B.J. 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. Vol. 45. P. 110–123. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JNanoR.45.110>
14. Dobryshkin A., 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. Chapter 2. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/753/3/032024>
15. 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. Chapter 2. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/753/3/032069>
16. Vasilchenko S., Cherny S., Khrulkov V. Improving Dynamic and Energy Characteristics of Electromechanical Systems with Single-Phase Rectifiers // *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*. 2020. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM48468.2020.9111902>
17. Одинокоев В.И., Евстигнеев А.И., Дмитриев Э.А. Численное моделирование процесса заполнения металлом кристаллизатора с отражателем УНПС // *Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия*. 2019. Т. 62. №. 10. P. 747–755. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-10-747-755>
18. Bashkov O., Li Xuewei, Bao Fengyuan, Kim V.A., Zhou Changhai. Acoustic emission that occurs during the destruction of coatings applied by microarc oxidation on an aluminum alloy // *International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (Sevastopol, 09–13 September 2019)*. Sevastopol, 2019. Vol. 19. Part 5. P. 2522–2525. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.174>
19. Odiokov V.I., Dmitriev E.A., Evstigneev A.I. Simulation of molten metal pouring into the continuous casting machine mold // *International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (Sevastopol, 09–13 September 2019)*. Sevastopol, 2019. Vol. 19. Part 5. P. 2274–2277. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.596>
20. Li X., Bashkov O.V., Bao F., Kim V.A., Zhou C., Shakirova O.G. The research of the features destruction of the of oxide coatings on aluminum alloy by using the method of acoustic emission // *14th International Conference on Films and Coatings: Journal of Physics Conference Series*. 2019. Vol. 1281. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1281/1/012050>
21. Чирков А.П. Роль метрологического обеспечения в инновационной деятельности // *Главный метролог*. 2013. № 1. С. 20–24.
22. Ситамов Э.С., Мокрицкий Б.Я. Результаты сравнительного исследования износостойкости твердосплавного инструмента при обработке нержавеющей стали // *Металлообработка*. 2018. № 4. С. 7–13.
23. Чирков А.П. Количественная оценка влияния метрологии на экономику // *Справочник. Инженерный журнал*. 2013. № 8. С. 45–51.
24. Матвеев В.И. Точные измерения – основа качества и безопасности // *Контроль. Диагностика*. 2019. № 8. С. 4–11. <https://doi.org/10.14489/td.2019.08.pp.004-011>



References

1. Bouzakis KD, Michailidis N, Skordaris G, Bouzakis E, Biermann D, M'Saoubi R. Cutting with coated tools: coating technologies, characterization methods and performance optimization. *CIRP Annals*. 2012;61(2):703–723. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.05.006>
2. 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 & 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)
3. Chandrakanth Shet, Xiaomin Deng. Finite element analysis of the orthogonal metal cutting process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2000;105(1-2):95–109.
4. Shatla M, Kerk Ch, Altan T. Process modeling in machining. Part I: determination of flow stress data. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2001;41:1511–1534. [http://doi.org/10.1016/S0890-6955\(01\)00016-5](http://doi.org/10.1016/S0890-6955(01)00016-5)
5. Rao GVG, 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>
6. Morozova A, Mokritskii B, Vereshchagin V. Structure simulation and analysis of metal-cutting tool simulation results. In: *Aviamechanical engineering and transport (AVENT 2018): Proceedings of the International Conference*. 2018:286–291. <https://doi.org/10.2991/avent-18.2018.55>
7. Beake BD, Fox-Rabinovich GS, Losset Ya, Yamamoto K, Aguirre MH, Veldhuis SC, et al. Why can TiAlCrSiYN-based adaptive coatings deliver exceptional performance under extreme frictional conditions. *Faraday Discussions*. 2012;156. Available from: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2012/FD/c2fd00131d#divAbstract> [Accessed 12th March 2020]. (In Russ.)
8. 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.
9. 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;719–720:96–101. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.719-720.96>
10. Fox-Rabinovich GS, Weatherley GC, Dodonov AI, Kovalev AI, Shuster LS, Dosbaeva GK, et al. Nanocrystalline filtered arc deposited (FAD) TiAlN PVD coatings for high-speed machining applications. *Surface and Coatings Technology*. 2004;177–178:800–811. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.05.004>
11. Matveev VI. Precise measurements – the basis of quality and safety 2019. *Kontrol'. Diagnostika = Testing. Diagnostics*. 2019;8:4–11. (In Russ.) <https://doi.org/10.14489/td.2019.08.pp.004-011>
12. 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;719–720:96–101. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.719-720.96>
13. Vereschaka AA, Mokritskii BYa, Sitnikov N, Oganyan GV, Aksenenko AYU, Mokritskii BJ. Study of mechanism of failure and wear of multi-layered composite nanostructured 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>
14. Dobryshkin A, 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). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/753/3/032024>
15. 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). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/753/3/032069>
16. 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*. 2020. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM48468.2020.9111902>
17. Odinov VI, Evstigneev AI, Dmitriev EA. Numerical simulation of metal filling into a CCM mold equipped with a deflector. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019;62(10):747–755. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-10-747-755>
18. Bashkov O, Li Xuewei, Bao Fengyuan, Kim VA, Zhou Changhai. Acoustic emission that occurs during the destruction of coatings applied by microarc oxidation on an aluminum alloy. In: *International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment*. 09–13 September 2019, Sevastopol. Sevastopol; 2019, vol. 19, part 5, p. 2522–2525. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.174>
19. Odinov VI, Dmitriev EA, Evstigneev AI. Simulation of molten metal pouring into the continuous casting machine mold In: *International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment*. 09–13 September 2019, Sevastopol. Sevastopol; 2019, vol. 19, part 5, p. 2274–2277. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.596>
20. Li X, Bashkov OV, Bao F, Kim VA, Zhou C, Shakirova OG. The research of the features destruction of the of oxide coatings on aluminum alloy by using the method of acoustic emission. In: *14th International Conference on Films and Coatings: Journal of Physics Conference Series*. 2019, vol. 1281.

<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1281/1/012050>

21. Chirkov AP. The role of metrological support in innovation. *Glavnii metrolog = Chief Metrologist*. 2013;1:20–24. (In Russ.)

22. Sitamov ES, Mokritskii BYa. Results of comparative investigation of wear-resistance of meldomed tools for stainless steel processing. *Metallrobrabotka*. 2018;4:7–13. (In Russ.)

23. Chirkov AP. A quantitative assessment of the impact on the economy of metrology. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal = Handbook. An Engineering Journal*. 2013;8:45–51. (In Russ.)

24. Matveev VI. Precise measurements – the basis of quality and safety. 2019. *Kontrol'. Diagnostika = Testing. Diagnostics*. 2019;8:4–11. (In Russ.)

<https://doi.org/10.14489/td.2019.08.pp.004-011>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Мокрицкий Борис Яковлевич,

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры «Технология машиностроения»,
Комсомольский-на-Амуре государственный
университет,
681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27,
Россия;
✉ e-mail: boris@knastu.ru

Шелковников Владислав Юрьевич,

магистрант,
Комсомольский-на-Амуре государственный
университет,
681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27,
Россия;
e-mail: ttechnopark@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 12.01.2021; одобрена после рецензирования 02.02.2021; принята к публикации 26.02.2021.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Boris Ya. Mokritskiy,

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

Vladislav Yu. Shelkovnikov,

Master's Degree Student,
Komsomolsk-na-Amure State University,
27 Lenin Prospect, Komsomolsk-na-Amure 681013,
Russia;
e-mail: ttechnopark@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 12.01.2021; approved after reviewing 02.02.2021; accepted for publication 26.02.2021.



Оперативное определение запасов статической устойчивости в системах электроснабжения с установками распределенной генерации

© Ю.Н. Булатов*, А.В. Крюков****, К.В. Суслов***, А.В. Черепанов**

*Братский государственный университет, г. Братск, Россия

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

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

Резюме: Цель исследований – разработка методики, обеспечивающей оперативное определение запасов статической апериодической устойчивости в системах электроснабжения, в узловых точках которых подключены установки распределенной генерации. Использовались математические методы и алгоритмы, основанные на применении уравнений предельных режимов. Переходные процессы анализировались для различных точек пространства регулируемых параметров режима по данным имитационного моделирования в среде Matlab с применением пакетов Simulink и SimPowerSystems. На основе полученных результатов расчета и компьютерного моделирования реализована эффективная методика анализа запасов устойчивости в электрических сетях с установками распределенной генерации, применимая в задачах проектирования, а также оперативного и противоаварийного управления. Теоретический анализ и результаты компьютерного моделирования показывают эффективность использования предлагаемой методики расчета запасов устойчивости; невырожденность матрицы Якоби уравнений предельных режимов в точке решения обеспечивает гарантированную надежность получения результатов. Показано, что альтернативный подход к решению задачи оперативного определения запасов апериодической устойчивости может быть реализован на основе уравнений предельных режимов с повышенной нелинейностью. Динамическое моделирование электрической сети с установками распределенной генерации подтвердило правильность определения запасов устойчивости, рассчитанных с помощью уравнений предельных режимов. Разработанная методика оперативного определения запасов апериодической устойчивости может быть рекомендована для практического применения при проектировании систем электроснабжения или оперативном управлении синхронными генераторами; в частности, представленная методика позволит реализовать мультиагентную систему противоаварийного управления установками распределенной генерации, размещенными в распределительных электрических сетях общего назначения.

Ключевые слова: электроэнергетические системы, установки распределенной генерации, уравнения предельных режимов, запасы статической апериодической устойчивости

Благодарности: Исследования выполнены при финансовой поддержке по гранту государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 0667-2020-0039).

Для цитирования: Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Суслов К.В., Черепанов А.В. Оперативное определение запасов статической устойчивости в системах электроснабжения с установками распределенной генерации. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 1. С. 31–43. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-1-31-43>

Timely determination of static stability margins in power supply systems equipped with distributed generation installations

Yuri N. Bulatov*, Andrey V. Kryukov****, Konstantin V. Suslov***, Alexander V. Cherepanov**

*Bratsk State University, Bratsk,

**Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

***Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The article aims to develop a methodology to ensure timely determination of the margins of static aperiodic stability in power supply systems, at the nodal points of which distributed generation units are installed. The authors used mathematical methods and algorithms based on the application of limiting regime equations. Transitional processes were analysed for various points in the space of controlled mode parameters according to the simulation modelling in Matlab

using the Simulink and SimPowerSystems packages. On the basis of the obtained results, an effective technique for analysing stability margins in electrical networks with distributed generation units was implemented. This method is applicable in design problems, as well as in operational and emergency control. The conducted theoretical analysis and computer modelling showed the effectiveness of the proposed methodology for calculating stability margins; the nondegeneracy of the Jacobi matrix of limiting regime equations at the solution point ensures the guaranteed reliability of the results. It was shown that an alternative approach to solving the problem of timely determination of aperiodic stability margins can be implemented on the basis of limiting regime equation with increased nonlinearity. Dynamic modelling of an electrical network with distributed generation units confirmed the correctness of determining the stability margins calculated using limiting regime equations. The developed technique can be recommended for practical use in the design of power supply systems or in operational control of synchronous generators. In particular, the presented methodology can be used to implement a multi-agent emergency control system for distributed generation installations located in general-purpose distribution electrical networks.

Keywords: electric power systems, distributed generation units, limiting regime equations, margins of static aperiodic stability

Acknowledgments: The research was carried out with the financial support under a state assignment grant from the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation (project No. 0667-2020-0039).

For citation: Bulatov YuN, Kryukov AV, Suslov KV, Cherepanov AV. Timely determination of static stability margins in power supply systems equipped with distributed generation installations. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(1):31–43. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-1-31-43>

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании и эксплуатации электроэнергетических систем (ЭЭС) возникают задачи определения предельных режимов и запасов статической аperiodической устойчивости (САУ) [1–3]. В связи с планируемым переходом электроэнергетики на технологическую платформу интеллектуальных сетей Smart Grid, предполагающую масштабное применение установок распределенной генерации (РГ), сформулированные задачи становятся актуальными и для систем электроснабжения (СЭС), так как определяют важные факторы, связанные с обеспечением требуемого уровня надежности [4–6].

В современных СЭС начинают применяться установки РГ, использующие возобновляемые источники энергии [7–18]. К их числу можно отнести малые гидравлические электростанции и ветропарки, которые могут располагаться на значительных расстояниях от центров потребления; при этом запасы САУ снижаются, что оказывает существенное влияние на противоаварийное управление для обеспечения устойчивости в послеаварийных режимах [19, 20]. Поэтому особую актуальность приобретают задачи создания цифровых моделей для оперативного определения запасов статической устойчивости в СЭС с установками РГ. Один из возможных

подходов к созданию таких моделей представлен ниже. В его основу положены уравнения предельных режимов.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Установившиеся режимы ЭЭС (СЭС) описываются следующей системой нелинейных уравнений:

$$\mathbf{F}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \mathbf{0}, \quad (1)$$

где $\mathbf{F}$ – нелинейная вектор-функция; $\mathbf{X}$, $\mathbf{Y}$ – соответственно, векторы нерегулируемых и регулируемых параметров режима.

Предельные по САУ режимы определяются уравнением (1) и условием:

$$\det \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}} = 0, \quad (2)$$

где $\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}}$ – матрица Якоби уравнений (1).

Дискриминантное равенство (2) определяет в пространстве параметров $\mathbf{Y}$ гиперповерхность L_F (рис. 1).

Для определения запаса САУ можно использовать евклидову норму вектора $\mathbf{K}$ [6]:

$$\begin{aligned}\mathfrak{Z} &= (\mathbf{K}^T \mathbf{K})^{\frac{1}{2}} = \left(\sum_{i=1}^m k_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} = \\ &= \left(\sum_{i=1}^m \mu_i^2 (y_{iL} - y_{i0})^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \\ \mu_i &= \frac{1}{k_{iH} y_{i0}},\end{aligned}\quad (3)$$

где y_{iL} , y_{i0} – значения i -й компоненты вектора $\mathbf{Y}$; индекс «0» отвечает исходному режиму, а индекс «L» – предельному; k_{iH} – нормативный коэффициент; в выражении для μ_i вместо y_{i0} может использоваться номинальное значение y_{iHOM} , такой подход может применяться в случае если y_{i0} имеет близкие к нулю или равные ему значения.

Соотношение (3) позволяет рассматривать запас устойчивости как расстояние¹ в пространстве $\mathbf{Y}$ от гиперповерхности L_F до

точки $\mathbf{Y}_0$ (рис. 1). Для каждой точки $\mathbf{Y}_0$ конкретный предельный режим определяется в соответствующем ему направлении утяжеления $\Delta \mathbf{Y}_k$, которому соответствует свое значение запаса $\mathfrak{Z}_k$; при этом существует критическое направление $\Delta \mathbf{Y}^*$, отвечающее наименьшей длине $\mathfrak{Z}_{\min}$ вектора $\mathbf{K}$. Поэтому для достоверной оценки $\mathfrak{Z}$ необходим поиск критической траектории утяжеления:

$$\mathbf{Y}^*(T) = \mathbf{Y}_0 + T \Delta \mathbf{Y}^*.$$

Такая траектория может быть найдена на основе уравнений предельных режимов (УПР) [6].

Методика, позволяющая находить параметры предельного режима $\mathbf{X}_L^*$, $\mathbf{Y}_L^*$ для критического направления утяжеления $\Delta \mathbf{Y}^*$ и отвечающий ему запас устойчивости, описана ниже.

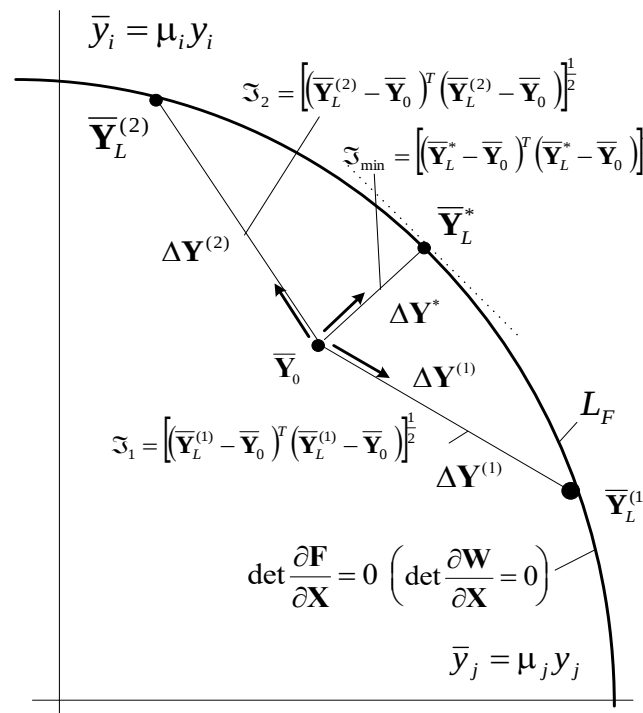


Рис. 1. К определению запаса устойчивости
Fig. 1. To stability margin determination

¹В метрике, определяемой коэффициентами μ_i .

МЕТОДИКА ОПЕРАТИВНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАПАСОВ СТАТИЧЕСКОЙ АПЕРИОДИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЙ ПРЕДЕЛЬНЫХ РЕЖИМОВ

Поиск запаса $\mathfrak{Z}_{\min}$, отвечающего направлению утяжеления $\Delta \mathbf{Y}^*$, можно осуществлять путем решения следующей задачи минимизации:

$$\mathfrak{Z}_{\min} = \min (\mathbf{DY}^T \mathbf{M}^2 \mathbf{DY})^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

с учетом ограничений: $\mathbf{F}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}_0 + \mathbf{DY}) = \mathbf{0}$,
 где $\mathbf{Y}_0$ – значение вектора $\mathbf{Y}$ для режима, в котором определяется запас;

$\mathbf{DY} = [dy_1 \ dy_2 \ \dots \ dy_n]^T$ – вектор, поэлементное суммирование которого с вектором $\mathbf{Y}_0$ обеспечивает определение параметров предельного режима $\mathbf{Y}_L^*$; $\mathbf{M} = \text{diag} \mu_i$.

Решение сформулированной задачи можно выполнить методом Лагранжа с использованием вектора неопределенных множителей Λ и следующей функции:

$$\begin{aligned} L(\mathbf{X}, \mathbf{Y}_0 + \mathbf{DY}, \Lambda) &= \\ &= (\mathbf{DY}^T \mathbf{M}^2 \mathbf{DY})^{\frac{1}{2}} + \\ &+ \mathbf{F}^T(\mathbf{X}, \mathbf{Y}_0 + \mathbf{DY}) \Lambda. \end{aligned}$$

Для поиска минимума $L(\mathbf{X}, \mathbf{Y}_0 + \mathbf{DY}, \Lambda)$ можно записать уравнения:

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \mathbf{DY}} &= \mathbf{M}^2 \mathbf{DY} (\mathbf{DY}^T \mathbf{M}^2 \mathbf{DY})^{-\frac{1}{2}} + \\ &+ \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{DY}} \right)^T \Lambda = \mathbf{0}; \\ \frac{\partial L}{\partial \mathbf{X}} &= \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}} \right)^T \Lambda = \mathbf{0}; \\ \frac{\partial L}{\partial \Lambda} &= \mathbf{F}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}_0 + \mathbf{DY}) = \mathbf{0}. \end{aligned} \quad (5)$$

Одно из решений этой системы отвечает

исходному режиму с параметрами $\mathbf{X}_0, \mathbf{Y}_0$ при нулевых значениях векторов Λ и $\mathbf{DY}$ и потому может считаться тривиальным. Искомое решение отвечает предельным параметрам $\mathbf{X}_L^*, \mathbf{Y}_L^*$, минимизирующим целевую функцию (4) при ненулевой длине вектора $\mathbf{DY}$. Оно соответствует критическому направлению утяжеления $\Delta \mathbf{Y}^*$. При ненулевом векторе Λ второе уравнение системы (5) эквивалентно условию (2). Поэтому точка $\mathbf{Y}_L^*$, полученная при $\Lambda \neq \mathbf{0}; \mathbf{DY} \neq \mathbf{0}$, располагается на гиперповерхности L_F .

В заданной матрицей $\mathbf{M}$ метрике выполнение первого уравнения системы (5) обеспечивает достижение точки $\mathbf{Y}_L^*$, расположенной на кратчайшем расстоянии от точки $\mathbf{Y}_0$. При ненулевом векторе Λ второе уравнение системы (5) отвечает нахождению точки $\mathbf{Y}_L^*$ на гиперповерхности L_F . Выполнение третьего уравнения показывает, что режим является сбалансированным.

Геометрическая интерпретация системы (5) показана на рис. 2. На нем представлен фрагмент границы L_F и эллипсоид, который описывается уравнением:

$$\mathbf{DY}^T \mathbf{M}^2 \mathbf{DY} - \mathfrak{Z}_{\min}^2 = 0.$$

Нетривиальное решение $\mathbf{X}_L^*, \mathbf{Y}_L^*$ можно рассматривать как точку касания эллипсоида и гиперповерхности L_F .

Умножив первое уравнение системы (5) на скаляр $(\mathbf{DY}^T \mathbf{M}^2 \mathbf{DY})^{\frac{1}{2}}$, можно записать:

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \mathbf{DY}} &= \mathbf{M}^2 \mathbf{DY} + \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{DY}} \right)^T \Lambda (\mathbf{DY}^T \mathbf{M}^2 \mathbf{DY})^{\frac{1}{2}} = \mathbf{0}; \\ \frac{\partial L}{\partial \mathbf{X}} &= \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}} \right)^T \Lambda = \mathbf{0}; \\ \frac{\partial L}{\partial \mathbf{DY}} &= \mathbf{F}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}_0 + \mathbf{DY}) = \mathbf{0}. \end{aligned} \quad (6)$$

Собственный вектор Λ матрицы $\left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}}\right)^T$ определяется с точностью до произвольного множителя, что дает возможность провести следующую замену переменных:

$$\mathbf{R} = \mathfrak{Z}_{\min} \Lambda = \left(D\mathbf{Y}^T \mathbf{M}^2 D\mathbf{Y}\right)^{\frac{1}{2}} \Lambda.$$

С учетом этой замены уравнения (6) можно записать так:

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial D\mathbf{Y}} &= \mathbf{M}^2 D\mathbf{Y} + \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial D\mathbf{Y}}\right)^T \mathbf{R} = \mathbf{0}; \\ \frac{\partial L}{\partial \mathbf{X}} &= \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}}\right)^T \mathbf{R} = \mathbf{0}; \\ \frac{\partial L}{\partial D\mathbf{Y}} &= \mathbf{F}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}_0 + D\mathbf{Y}) = \mathbf{0}. \end{aligned} \quad (7)$$

С помощью первого уравнения этой системы можно найти вектор:

$$D\mathbf{Y} = -\mathbf{M}^{-2} \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial D\mathbf{Y}}\right)^T \mathbf{R}.$$

После преобразований можно получить модификацию УПР, обеспечивающую нахождение предельного режима в направлении $\Delta \mathbf{Y}^*$:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{F}\left(\mathbf{X}, \mathbf{Y}_0 - \mathbf{M}^{-2} \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial D\mathbf{Y}}\right)^T \mathbf{R}\right) &= \mathbf{0}, \\ \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}}\right)^T \mathbf{R} &= \mathbf{0}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Если нагрузки задаются постоянными мощностями, то уравнения установившегося режима (1) могут быть представлены в виде

$$\mathbf{Y} - \mathbf{F}(\mathbf{X}) = \mathbf{0}.$$

Тогда для матрицы $\left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial D\mathbf{Y}}\right)^T$ можно записать следующее соотношение:

$$\left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial D\mathbf{Y}}\right)^T = \mathbf{E}.$$

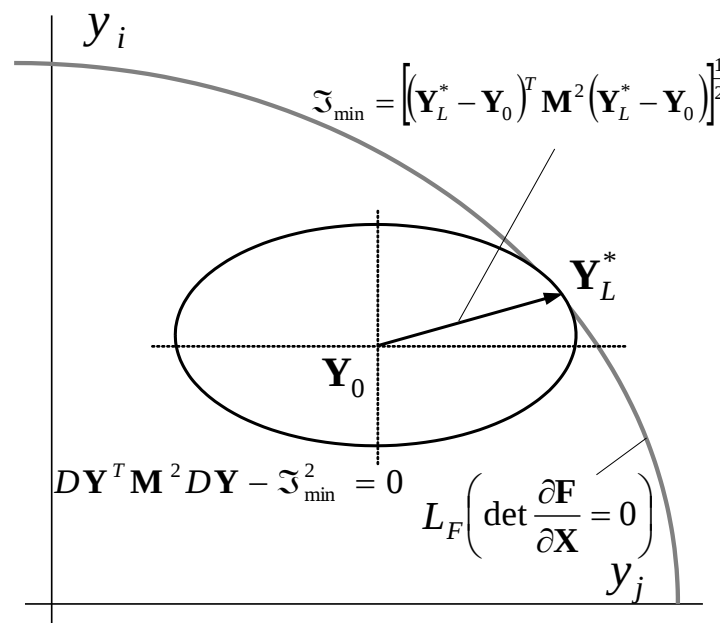


Рис. 2. Геометрическая интерпретация поиска критического направления утяжеления
Fig. 2. Geometrical interpretation of the critical weighting direction search

В общем случае зависимость Y от X определяется уравнениями (1) и матрица $\left(\frac{\partial F}{\partial DY}\right)^T$ является блочно-диагональной. Выражения для определения ее компонент приведены в работе [6].

Для решения уравнений (8) можно использовать метод Ньютона, который широко применяется при определении режимов ЭЭС, при этом на каждом шаге расчета необходимо решать следующую систему линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial X} & \frac{\partial F}{\partial R} \\ \frac{\partial V}{\partial X} & \frac{\partial V}{\partial R} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta R \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} F \\ V \end{bmatrix},$$

где $\frac{\partial F}{\partial R} = -M^{-2} \left(\frac{\partial F}{\partial DY} \right)^T$; $\frac{\partial V}{\partial R} = \left(\frac{\partial F}{\partial X} \right)^T$.

Для преодоления затруднений, вызванных наличием тривиального решения уравнений (8), можно использовать условие, не допускающее, чтобы вектор R в искомой точке был нулевым; для этого вводится фиктивная переменная α и система (8) записывается в виде:

$$F \left[X, Y_0 - M^{-2} \left(\frac{\partial F}{\partial DY} \right)^T R (1 + \alpha) \right] = 0;$$

$$V(X, R) = \left(\frac{\partial F}{\partial X} \right)^T R = 0;$$

$$U(R) = R^T \left(\frac{\partial F}{\partial DY} \right) M^{-2} \left(\frac{\partial F}{\partial DY} \right)^T R - \Im_1^2 = 0,$$

где $\Im_1 \neq 0$ – фиктивная величина запаса.

Фактическое значение запаса устойчивости $\Im$ определяется после завершения процесса итераций по формуле:

$$\Im = (1 + \alpha) \sqrt{R^T \left(\frac{\partial F}{\partial DY} \right) M^{-2} \left(\frac{\partial F}{\partial DY} \right)^T R}.$$

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Определение запасов САУ на основе описанного выше подхода проведено применительно к сети, к узловым точкам которой подключены две установки РГ. План и электрическая схема сети показаны на рис. 3. Мощности установок РГ приняты равными 24 МВт.

Результаты моделирования представлены на рис. 4 и в табл. 1.

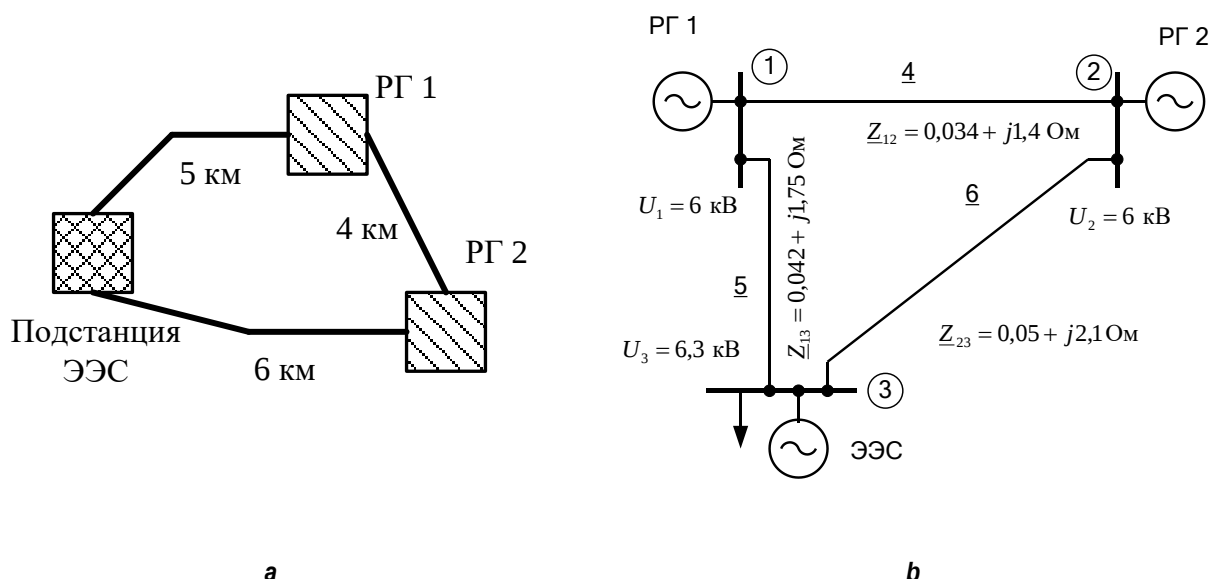


Рис. 3. Схема сети
 Fig. 3. Network diagram

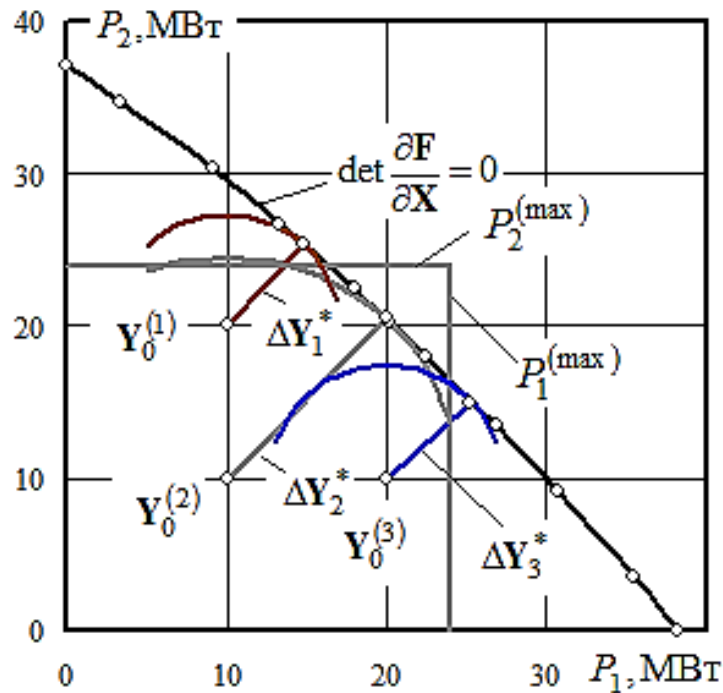


Рис. 4. Определение предельных режимов в направлении ΔY^* :
дуги окружностей отвечают уравнениям $DY^T M^2 DY - Z_{\min}^2 = 0$ при $M=E$

Fig. 4. Determination of limiting modes in the direction ΔY^* :
the arcs of circles correspond to the equations $DY^T M^2 DY - Z_{\min}^2 = 0$ when $M=E$

Таблица 1. Запасы устойчивости
Table 1. Stability margins

Мощности установок и запасы устойчивости	Номер режима			
	1	2	3	4
$y_{10} = P_{10}, \text{ МВт}$	10,00	20,00	10,00	20,00
$y_{20} = P_{20}, \text{ МВт}$	20,00	10,00	10,00	20,00
$Z^*, \text{ МВт}$	7,20	7,38	14,50	0,34
$Z^*, \%$	55,00	58,00	145,00	1,70

Примечание: запас устойчивости в мегаваттах определялся по выражению:

$$Z^* = \sqrt{\sum_{k=1}^2 (P_{Lk} - P_{01})^2} =$$

$$= (1 + \alpha) \sqrt{\mathbf{R}^T \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{DY}} \right) \mathbf{M}^{-2} \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{DY}} \right)^T \mathbf{R}};$$

запас устойчивости в процентах рассчитывался так

$$Z^* = 100 \sqrt{\sum_{k=1}^2 \left(\frac{P_{Lk} - P_{01}}{P_{01}} \right)^2}.$$

Представленные в табл. 1 и на рис. 4 результаты позволяют сделать вывод о том, что на основе УПР может быть реализована эффективная методика оперативного определения запасов САУ для СЭС с установками РГ, применяемая в задачах проектирования, а также оперативного и противоаварийного управления (ОУ и ПАУ). Невырожденность матрицы Якоби УПР в точке решения [6] обеспечивает надежность получения результатов, что весьма важно в задачах оперативного и противоаварийного управления.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАПАСОВ УСТОЙЧИВОСТИ НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЙ ПРЕДЕЛЬНЫХ РЕЖИМОВ С ПОВЫШЕННОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ

Возможен альтернативный подход к решению задачи определения запасов устойчивости, основанный на использовании следующей системы уравнений [6]:

$$\mathbf{V}(\mathbf{X}) = \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}} \right)^T \mathbf{F}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}_0) = \mathbf{0}. \quad (9)$$

Для практического применения этих уравнений необходимо преодолеть описанную выше трудность, связанную с тем, что уравнения (9) балансируются при значениях параметров $\mathbf{X} = \mathbf{X}_0$, отвечающих исходному режиму. Для ее преодоления в систему (9) можно ввести дополнительную переменную и скалярное уравнение

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{V}(\mathbf{X}) &= \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}} \right)^T \mathbf{F}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}_0) = \mathbf{0}; \\ u(\mathbf{X}, c) &= \mathbf{F}^T(\mathbf{X}, \mathbf{Y}_0) \cdot \mathbf{F}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}_0) - 1 - c^2 = 0, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где c – переменная, которая определяет значение запаса устойчивости.

Результаты моделирования, выполненные применительно к схеме, показанной на рис. 3 б, проиллюстрированы на рис. 5 и в табл. 2.

Таблица 2. Запасы устойчивости
 Table 2. Stability margins

№	P_{10} , МВт	P_{20} , МВт	$\mathfrak{Z}$, МВт	$\mathfrak{Z}^*$, %
	5	5	21.52	430
1	10	20	7,2	55
2	10	25	3,47	25
3	15	15	7,4	49
4	19	19	1,8	9
5	25	10	3,74	28

Примечание: $\mathfrak{Z} = \sqrt{\sum_{k=1}^2 (P_{L1} - P_{01})^2}$.

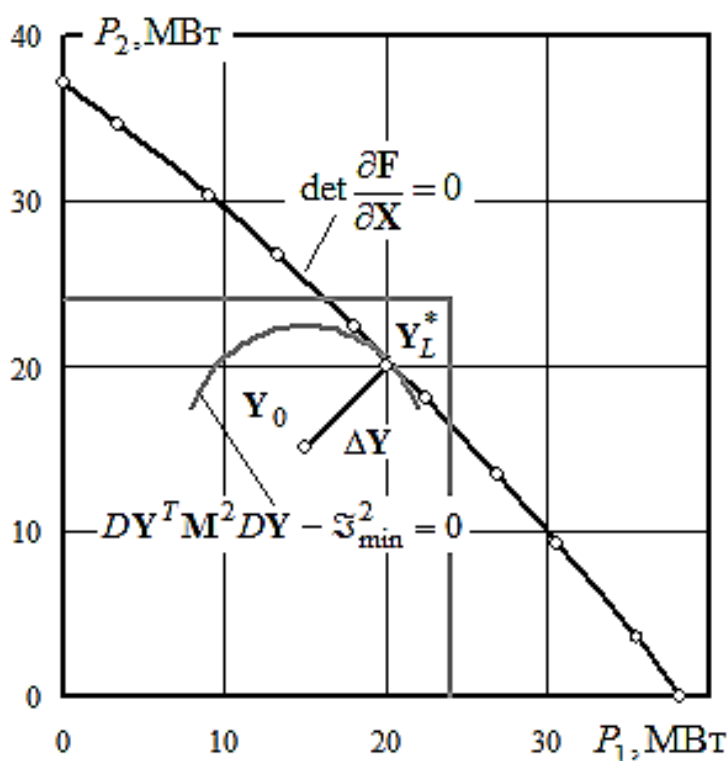


Рис. 5. Определение предельных режимов в направлении $\Delta \mathbf{Y}^*$ с использованием уравнений предельных режимов повышенной нелинейности

Fig: 5. Determination of limiting modes in the direction $\Delta \mathbf{Y}^*$ using limiting mode equations with increased nonlinearity

Таким образом, на основе уравнений (9) может быть реализован альтернативный подход к решению задачи оперативного определения запасов САУ. Однако уравнения (10) имеют повышенную нелинейность по сравнению с системой (8). Поэтому требуются дополнительные исследования, направленные на разработку алгоритмов, обеспечивающих надежную сходимость итерационных процессов их решения.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Дополнительно проведено моделирование переходных процессов в системе Matlab для сети с установками РГ, схема которой представлена на рис. 3, при следующих значениях параметров Y : $y_{10} = P_{10} = 15$ МВт; $y_{20} = P_{20} = 15$ МВт (устойчивый режим); $y_{10} = P_{10} = 23,7$ МВт; $y_{20} = P_{20} = 17$ МВт (неустойчивый режим). В качестве установок РГ в исследуемой системе используются две малых ГЭС номинальной мощностью по 24 МВт, в качестве генераторов на которых используются синхронные машины (СМ). Схема модели, разработанной в системе Matlab, представлена на рис. 6. В ней использовались блоки пакетов моделирования системы Matlab. Системы возбуждения СМ (блоки

Excitation System1 и Excitation System2) моделировались апериодическим звеном первого порядка с передаточной функцией:

$$\frac{1}{0.025s + 1}$$

Блок Hydraulic Turbine на рис. 6 включает модели главного сервомотора с изодромным регулятором, ограничителя и гидравлической турбины. Сервомотор с регулятором представлен следующей передаточной функцией:

$$\frac{0,1s + 1}{(0,1s + 1) \cdot (0,25s + 1) + n_i \cdot 0,1s}$$

где n_i – коэффициент усиления изодромного регулятора (при моделировании принимался равным 10 о.е.).

Для турбины применялась передаточная функция, учитывающая гидроудар

$$\frac{1 - a \cdot 0,344s}{1 + 0,5a \cdot 0,344s}$$

где a – положение открытия направляющего аппарата (принималось в диапазоне 0...1).

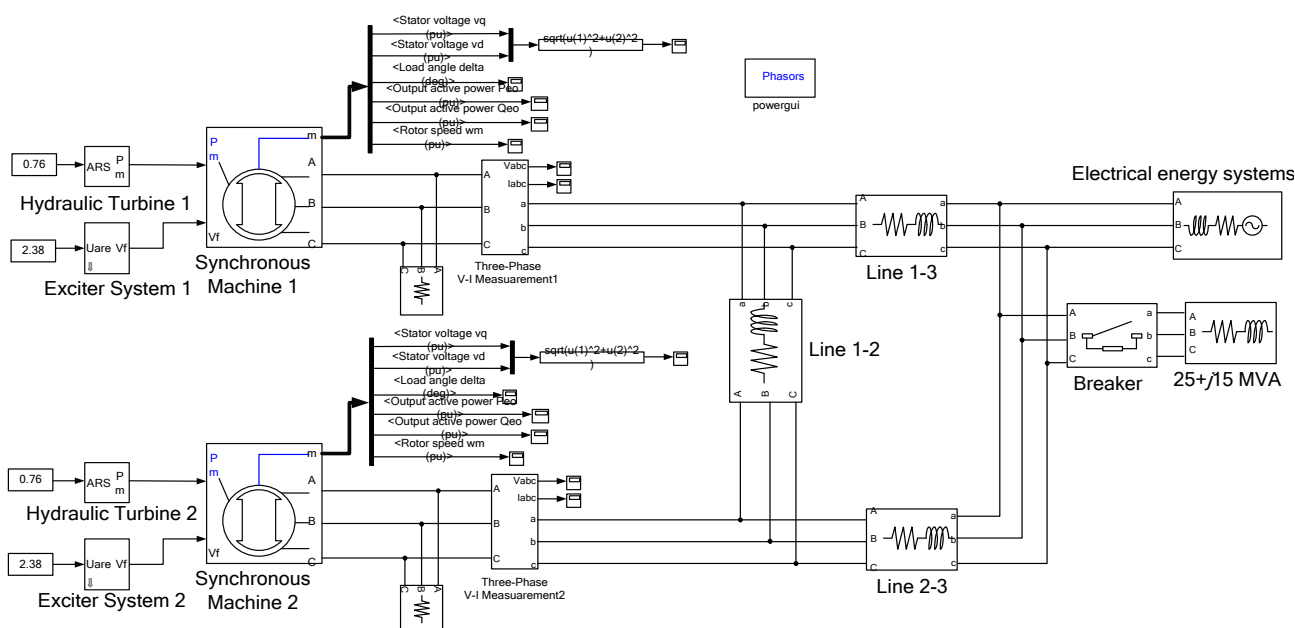


Рис. 6. Схема модели исследуемой сети в Matlab
Fig. 6. Model diagram of the studied network in Matlab

Синхронные генераторы установок РГ моделировались блоком, отвечающим СМ и имеющим следующие параметры: номинальная мощность 24 МВ·А; напряжение 6 кВ; частота 50 Гц; постоянная инерции – 2,86 с; число пар полюсов – 3. Линии электропередач (блоки Line на рис. 6) представлялись в виде последовательно соединенных RL цепей, сопротивления которых указаны на рис. 3. Моделирование переходных процессов вы-

полнялось при кратковременном включении на подстанции ЭЭС нагрузки мощностью $25 + j15$ МВ·А. Для чистоты эксперимента моделировались синхронные гидрогенераторы без автоматических регуляторов возбуждения и скорости. Результаты моделирования в виде временных зависимостей мощностей, скоростей вращения роторов и напряжений генератора РГ1 представлены на рис. 7.

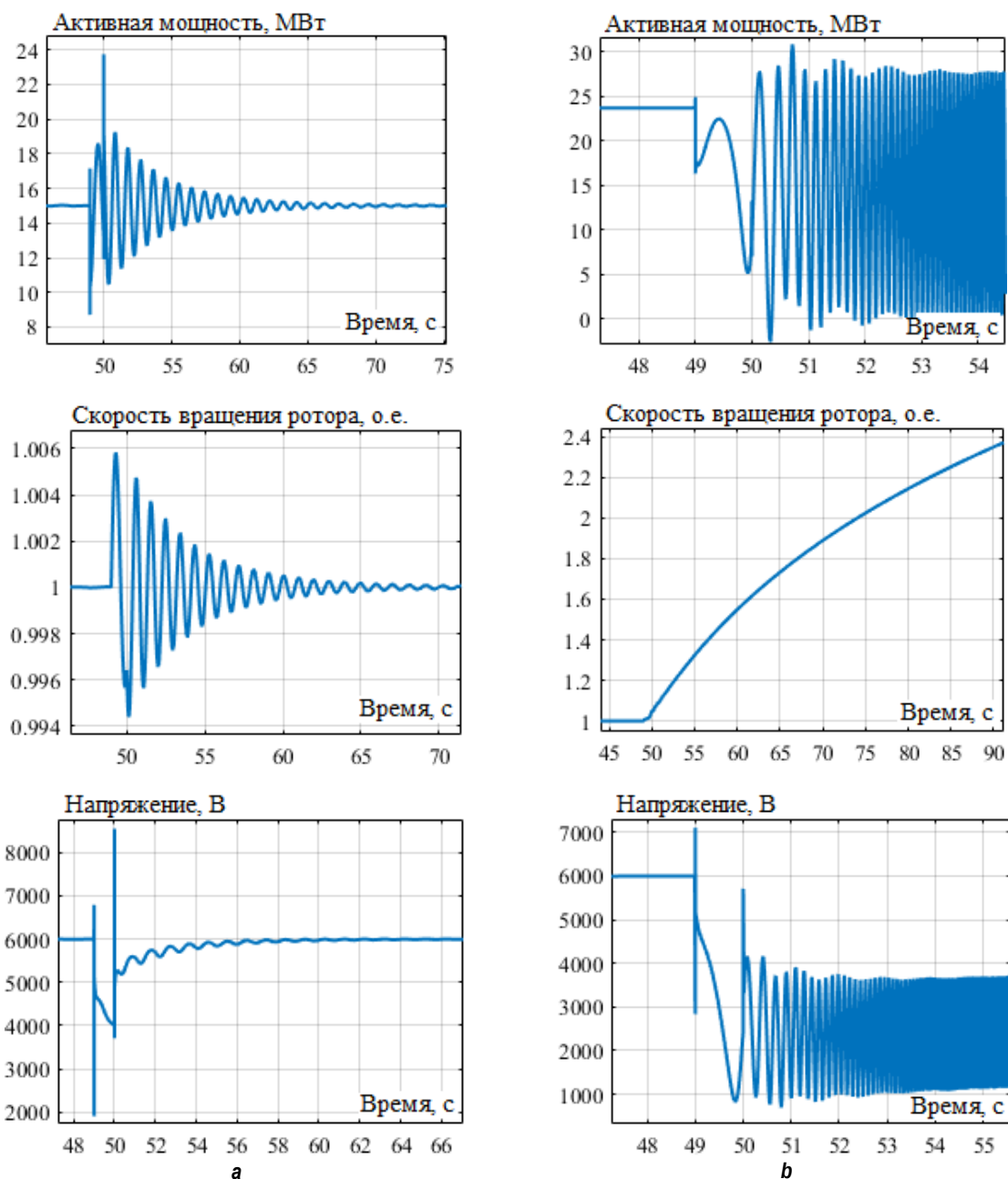


Рис. 7. Осциллограммы мощности, скорости вращения ротора и напряжения генератора установки РГ1 при кратковременном включении мощной нагрузки в полной схеме сети: а – устойчивый режим; б – неустойчивый режим
 Fig. 7. Waveforms of power, rotor speed and DG1 plant generator voltage at a short-term enabling of a powerful load in the complete network diagram: a – stable mode; b – unstable mode



Результаты компьютерного моделирования подтвердили правильность определения запасов устойчивости ЭЭС с установками РГ, рассчитанные с помощью уравнений предельных режимов. При значениях параметров режима, находящегося вне области САУ и вносимом возмущении в ЭЭС в виде подключения дополнительной нагрузки, наблюдалась ожидаемая потеря устойчивости генераторов установок РГ (рис. 7 б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ представленных выше результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. На основе уравнений предельных режимов возможно реализовать эффективную

методику оперативного определения областей запасов устойчивости в СЭС с установками РГ. Невырожденность матрицы Якоби УПР в точке решения обеспечивает надежность получения результатов, что весьма важно в задачах оперативного и особенно противоаварийного управления.

2. Альтернативный подход к решению задачи оперативного определения запасов САУ может быть реализован на основе УПР с повышенной нелинейностью.

3. Результаты компьютерного моделирования динамических процессов в среде Matlab подтверждают правильность расчета запасов устойчивости ЭЭС с использованием предлагаемой методики.

Список литературы

1. Васин В.П., Кондакова В.Г. Исследование областей существования режима электроэнергетических систем с помощью степенных рядов // Известия Российской Академии наук. Энергетика. 1995. № 1. С. 47–57.
2. Ayuev B.I., Davydov V.V., Erokhin P.M. Fast and reliable method of searching power system marginal states // IEEE Transactions on Power Systems. 2016. Vol. 31. No. 6. P. 4525–4533. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2538299>
3. Makarov Yu.V., Ma Jian, Dong ZhaoYang. Determining Static Stability Boundaries Using A Non-Iterative Method // IEEE Power Engineering Society General Meeting. 2007. <https://doi.org/10.1109/PES.2007.385897>
4. Кирштейн Б.Х., Литвинов Г.Л. Анализ установившихся режимов электроэнергетических систем и топическая геометрия уравнений балансов мощности над комплексными мультиполями // Автоматика и телемеханика. 2014. Вып. 10. С. 110–124.
5. Гаджиев М.Г., Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н. Управляемость, наблюдаемость и устойчивость электроэнергетических систем // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2017. Т. 5. № 1. С. 72–84.
6. Крюков А.В. Предельные режимы электроэнергетических систем. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2012. 236 с.
7. Rugthaicharoencheep N., Auchariyamet S. Technical and economic impacts of distributed generation on distribution system // International Journal of Electrical, Electronic and Communication Sciences. 2012. Vol. 6. P. 385–389. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1327636>
8. Buchholz B.M., Styczynski Z. Smart Grids – fundamentals and technologies in electricity networks. Heidelberg New York Dordrecht, London: Springer, 2014. 396 p.
9. Magdi S.M., Fouad M. AL-Sunni. Control and optimization of distributed generation systems. Cham: Springer International Publishing; Imprint: Springer, 2015. 578 p.
10. Voropai N.I., Stychinsky Z.A. Renewable energy sources: theoretical foundations, technologies, technical characteristics, economics. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität, 2010. 223 p.
11. Saleh M.S., Althaibani A., Esa Y., Mhandi Y., Mohamed A.A. Impact of clustering microgrids on their stability and resilience during blackouts // Proceedings on International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies. New York: IEEE, 2016. P. 195–200. [Электронный ресурс]. URL: https://academicworks.cuny.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1623&context=cc_pubs (12.05.2020).
12. Mohsen F., Saberian A.M., Hashim H., Mohd A.M.R. Application of smart power grid in developing countries // IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference. 2013. <https://doi.org/10.1109/PEOCO.2013.6564586>
13. Wang Jun, Huang Alex Q., Sung Woongje, Yu Liu, Baliga B.J. Smart Grid technologies // IEEE Industrial Electronics Magazine. 2009. Vol. 3. Issue 2. P. 16–23. <https://doi.org/10.1109/MIE.2009.932583>
14. Shen Xinwei, Zhu Shouzheng, Zheng Jinghong, Han Yingduo, Li Qingsheng, Nong Jing, et al. Active distribution network expansion planning integrated with centralized and distributed Energy Storage System // IEEE General Meeting Power & Energy Society. 2015. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2015.7286069>
15. Martínez Ceseña E., Capuder T., Mancarella P. Flexible distributed multienergy generation system expansion planning under uncertainty // IEEE Power and Energy Society General Meeting (Boston, 17–21 July 2016). Boston: IEEE, 2016. Vol. 7. P. 348–357. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2016.7741088>
16. Olivares D.E., Etemadi A.H., Kazerani M., Gomis-Bellmunt O., Palma-Behnke R. Trends in Microgrid control // IEEE Transactions on Smart Grid. 2014. Vol. 5. No. 4. P. 1905–1919.
17. Ellabban O., Abu-Rub H., Blaabjerg F. Renewable energy resources: current status, future prospects and their enabling technology // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. Vol. 39. P. 748–764. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2014.07.113>
18. Xie Wenjing, Xia Xiaohua. Distributed energy dispatch of electrical energy storage systems using consensus control approach // IFAC-PapersOnLine. 2018. Vol. 51. Issue 13. P. 229–234.

<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.07.283>

19. Bulatov Yu., Kryukov A. Prevention of outages in power systems with distributed generation plants // *Energy Systems Research*. 2019. Vol. 2. No. 1. P. 68–83.

20. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V. Emergency control in

power supply systems with distributed generation plants // *International Russian Automation Conference (Sochi, 9–16 September 2018)*. Sochi: IEEE, 2019. P. 38–42. <https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501807>

References

1. Vasin VP, Kondakova VG. Studying the existence domains of the electric power system mode using power series. *Известия Российской академии наук. Энергетика*. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Energetika* = *Thermal Engineering*. 1995;1:47–57. (In Russ.)
2. Ayuev BI, Davydov VV, Erokhin PM. Fast and reliable method of searching power system marginal states. In: *IEEE Transactions on Power Systems*. 2016;31(6):4525–4533. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2538299>
3. Makarov YuV, Ma Jian, Dong ZhaoYang. Determining static stability boundaries using a non-iterative method. In: *IEEE Power Engineering Society General Meeting*. 2007. <https://doi.org/10.1109/PES.2007.385897>
4. Kirshtein BKh, Litvinov GL. Analyzing stable regimes of electrical power systems and tropical geometry of power balance equations over complex multifields. *Avtomatika i Telemekhanika* = *Automation and Remote Control*. 2014;75(10):1802–1813. (In Russ.)
5. Gadjiyev MH, Misrikhanov MSh, Ryabchenko VN. Controllability, observability and stability of electric power systems (review copyright results). *Mashinostroenie: setevoy elektronnyj nauchnyj zhurnal*. 2017;5(1):72–84. (In Russ.)
6. Kryukov AV. *Limiting modes of electric power systems*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2012, 236 p. (In Russ.)
7. Rugthaicharoencheep N, Auchariyamet S. Technical and economic impacts of distributed generation on distribution system. *International Journal of Electrical, Electronic and Communication Sciences*. 2012;6:385–389. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1327636>
8. Buchholz BM, Styczynski Z. *Smart Grids – fundamentals and technologies in electricity networks*. Heidelberg New York Dordrecht, London: Springer; 2014, 396 p.
9. Magdi SM, Fouad M. AL-Sunni. *Control and optimization of distributed generation systems*. Cham: Springer International Publishing; Imprint: Springer; 2015, 578 p.
10. Voropai NI, Stychinsky ZA. *Renewable energy sources: theoretical foundations, technologies, technical characteristics, economics*. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität; 2010, 223 p.
11. Saleh MS, Althaibani A, Esa Y, Mhandi Y, Mohamed AA. Impact of clustering microgrids on their stability and resilience during blackouts. In: *Proceedings on International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies*. New York: IEEE; 2016, p. 195–200. Available from: https://academicworks.cuny.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1623&context=cc_pubs [Accessed 12th May 2020].
12. Mohsen F, Saberian AM, Hashim H, Mohd AMR. Application of smart power grid in developing countries. In: *IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference*. 2013. <https://doi.org/10.1109/PEOCO.2013.6564586>
13. Wang Jun, Huang Alex Q, Sung Woongje, Yu Liu, Baliga BJ. Smart Grid technologies. In: *IEEE Industrial Electronics Magazine*. 2009;3(2):16–23. <https://doi.org/10.1109/MIE.2009.932583>
14. Shen Xinwei, Zhu Shouzheng, Zheng Jinghong, Han Yingduo, Li Qingsheng, Nong Jing, et al. Active distribution network expansion planning integrated with centralized and distributed Energy Storage System. In: *IEEE General Meeting Power & Energy Society*. 2015. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2015.7286069>
15. Martínez Ceseña E, Capuder T, Mancarella P. Flexible distributed multienergy generation system expansion planning under uncertainty. In: *IEEE Power and Energy Society General Meeting*. 17–21 July 2016, Boston. Boston: IEEE; 2016, vol. 7, p. 348–357. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2016.7741088>
16. Olivares DE, Etemadi AH, Kazerani M, Gomis-Bellmunt O, Palma-Behnke R. Trends in microgrid control. In: *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2014;5(4):1905–1919.
17. Ellabban O, Abu-Rub H, Blaabjerg F. Renewable energy resources: current status, future prospects and their enabling technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014;39:748–764. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.113>
18. Xie Wenjing, Xia Xiaohua. Distributed energy dispatch of electrical energy storage systems using consensus control approach. *IFAC-PapersOnLine*. 2018;51(13):229–234. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.07.283>
19. Bulatov Yu, Kryukov A. Prevention of outages in power systems with distributed generation plants. *Energy Systems Research*. 2019;2(1):68–83.
20. Bulatov YuN, Kryukov AV. Emergency control in power supply systems with distributed generation plants. In: *International Russian Automation Conference*. 9–16 September 2018, Sochi. Sochi: IEEE; 2019, p. 38–42. <https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501807>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Булатов Юрий Николаевич,
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой электроэнергетики
и электротехники,
Братский государственный университет,
665709, г. Братск, ул. Макаренко, 40, Россия;
e-mail: bulatovyura@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yuri N. Bulatov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Head of the Department of Electric Power Engineering
and Electrical Engineering,
Bratsk State University,
40, Makarenko St., Bratsk 665709, Russia;
e-mail: bulatovyura@yandex.ru



Крюков Андрей Васильевич,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры электроснабжения
и электротехники,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
профессор кафедры электроэнергетики транспорта,
Иркутский государственный университет
путей сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия;
e-mail: and_kryukov@mail.ru

Суслов Константин Витальевич,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой электроснабжения
и электротехники,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
✉ e-mail: souslov@istu.edu

Черепанов Александр Валерьевич,
кандидат технических наук,
доцент кафедры электроэнергетики транспорта,
Иркутский государственный университет
путей сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия;
e-mail: smart_grid@mail.ru

Andrey V. Kryukov,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Power Supply
and Electrical Engineering,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
Professor of the Department of Electric
Power Engineering of Transport,
Irkutsk State Transport University,
15, Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: and_kryukov@mail.ru

Konstantin V. Suslov,
Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Head of the Department of Power Supply
and Electrical Engineering,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
✉ e-mail: souslov@istu.edu

Alexander V. Cherepanov,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department
of Electric Power Engineering of Transport,
Irkutsk State Transport University,
15, Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: smart_grid@mail.ru

Заявленный вклад авторов

Булатов Ю.Н. участвовал в разработке методов экспресс-расчетов запасов САУ в ЭЭС с установками РГ, выполнил моделирование в Matlab переходных процессов в исследуемой ЭЭС для различных точек пространства регулируемых параметров режима. Крюков А.В. участвовал в разработке методов экспресс-расчетов запасов САУ в ЭЭС с установками РГ, рассчитал области САУ для исследуемой электрической сети с установками распределенной генерации. Суслов К.В. и РГ. Черепанов А.В. участвовали в разработке методов экспресс-расчетов запасов САУ в ЭЭС с установками РГ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 13.10.2020; одобрена после рецензирования 16.12.2020; принята к публикации 26.02.2021.

Contribution of the authors

Bulatov Yu.N. participated in the development of express calculation methods of static aperiodic stability (SAS) margins in electrical energy systems (EES) with distributed generation (DG) plants; performed a Matlab simulation of transient processes in the studied EES for various points of the space of mode controlled parameters. Kryukov A.V. participated in the development of express calculation methods of SAS margins in EES with DG plants, calculated SAS areas for the investigated electrical network with distributed generation plants. Suslov K.V. and Cherepanov A.V. participated in the development of express calculation methods of SAS margins in EES with DG plants.

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 13.10.2020; approved after reviewing 16.12.2020; accepted for publication 26.02.2021.



Компьютерное моделирование и натурные замеры потокораспределения действующей тепловой сети

© Д.А. Калабин, А.Ю. Липовка, Ю.Л. Липовка

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

Резюме: Цель – выявить закономерности распределения тепловой энергии по потребителям с различной степенью оснащённости средствами регулирования в реальных условиях работы сети централизованного теплоснабжения и сопоставить результаты компьютерного моделирования с натурными замерами. Для проведения компьютерного моделирования использованы известные математические методы расчета потокораспределения в гидравлических цепях. Экспериментальные исследования режимов работы системы теплоснабжения проведены с использованием массивов сохранённых данных системы управления и мониторинга тепловых энергоустановок на базе программно-логистического комплекса Siemens Simatic PCS7, ультразвукового расходомера Portaflow 300, стационарных электромагнитных преобразователей расхода, поверенных и аттестованных манометров и термометров. Получены графики фактических гидродинамических режимов тепловой сети при температурах наружного воздуха от +8 до -37°C, а также в условиях нештатных режимов (снижения температуры в подающем трубопроводе и перепада давлений на вводе тепловой сети). Предложено совместное использование моделирования с помощью компьютерной программы JA_Net и натурных замеров теплогидравлических режимов работы сетей системы централизованного теплоснабжения с абонентами, имеющими различную степень оснащённости средствами автоматизации. Показано, что предложенный комплексный метод качественной и количественной оценки работоспособности сетей централизованного теплоснабжения позволяет выявлять особенности управления гидравлическими режимами сетей при подключении новых потребителей с различной степенью автоматизации. Экспериментально подтверждено отсутствие реакции на нештатные ситуации абонентов, системы теплоснабжения которых оснащены средствами регулирования тепловой нагрузки. Установлено, что стабильность расхода теплоносителя в системах потребителей обусловлена автоматической корректировкой степени открытия регулирующих клапанов в индивидуальных пунктах. В дальнейшем планируется разработка методических рекомендаций по нивелированию разбалансированности тепловой сети в условиях неравномерной оснащённости объектов средствами автоматизации при реализации проектов комплексной модернизации потребителей тепла или подключения новых объектов к существующим сетям теплоснабжения.

Ключевые слова: тепловая сеть, гидравлические режимы, экспериментальные замеры, математическое моделирование, компьютерная модель, централизованное теплоснабжение

Для цитирования: Калабин Д.А., Липовка А.Ю., Липовка Ю.Л. Компьютерное моделирование и натурные замеры потокораспределения действующей тепловой сети. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 1. С. 44–56. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-1-44-56>

Computer simulation and full-scale measurements of the load flow in a functioning heating network

Dmitry A. Kalabin, Aleksey Yu. Lipovka, Yuri L. Lipovka

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Abstract: The article aims to identify patterns in the distribution of heating energy to consumers with a varying availability of regulation equipment under real conditions of a central heating network, as well as to compare the results of computer simulation with full-scale measurements. For computer simulation, well-known mathematical methods for calculating the load flow in hydraulic circuits were used. Experimental studies of the operation modes of heat supply systems were carried out using the data of the control and monitoring systems of thermal power plants using the Siemens Simatic PCS7 software, a Portaflow 300 ultrasonic flow meter, stationary electromagnetic flow transducers, verified and certified manometers and thermometers. The graphs of the actual hydrodynamic modes of the heating network under study were obtained at outdoor air temperatures from +8 to -37°C, as well as under abnormal conditions (temperature drop in the supply pipeline and pressure drop at the heating network input). It was proposed to use jointly the simulation by means of the JA_Net software and full-scale measurements of the thermohydraulic operating modes of a centralised heat supply

system, whose consumers have a various degree of regulation equipment. It was shown that the proposed complex method of qualitative and quantitative assessment of the efficiency of district heating networks makes it possible to identify the features of control of their hydraulic modes when connecting new consumers with a varying degree of automation. According to the obtained characteristics of changes in the flow rate of the coolant in the consumers' internal systems depending on the pressure drop at the tie-in point, the lack of response to emergency situations on part of the consumers whose heat supply systems are equipped with the means of qualitative and quantitative regulation of the heat load, is associated with the process of automatic adjustment of the degree of opening of flow controllers and control valves at individual points. In future work, we will develop guidelines for levelling the imbalance of the heating network under the conditions of uneven provision of facilities with automation equipment when implementing projects for the complex modernisation of heat consumers or connecting new facilities to existing heat supply networks.

Keywords: heating network, hydraulic modes, experimental measurements, mathematical simulation, computer model, district heating

For citation: Kalabin DA, Lipovka AYu, Lipovka YL. Computer simulation and full-scale measurements of the load flow in a functioning heating network. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(1):44–56. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-1-44-56>

ВВЕДЕНИЕ

Для анализа потокораспределения и управления теплогидравлическими режимами тепловых сетей у инженеров по режимам должен быть надежный инструмент, которым является компьютерная модель эксплуатируемой системы теплоснабжения. Такая модель дает возможность выполнять предварительные гидравлические расчеты и позволяет оценить работоспособность системы, т.е. проверять – находятся ли давления в подающем и обратном трубопроводах магистралей, распределительных сетей и ответвлений к потребителям в допустимых пределах в расчетных условиях, а также оценить живучесть системы в аварийных ситуациях.

В настоящее время одним из известных является информационно-вычислительный комплекс (ИБК) Ангара-ТС [1, 2], созданный на базе системы математических моделей и методов Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, предназначенный для расчета и анализа теплогидравлических режимов теплоснабжающих систем. Разработанные с помощью ИБК Ангара-ТС эксплуатационные режимы и наладочные мероприятия позволяют обеспечить требуемый уровень теплоснабжения. Известно, что, несмотря на большую надежность кольцевой структуры тепловых сетей по сравнению с радиальной, эксплуатируют тепловые сети в нормальных режимах по схеме без перетоков теплоносителя между тепловыми магистралями, что упрощает процессы регулировки сетей, обнаружения и локализации мест ава-

рий. В статье [3] предложена апробированная методика расчета подобных непростых сетей на базе оптимизационной постановки задачи секционирования тепловой сети с любопытным выбором в качестве критерия – значения избыточной гидравлической мощности системы теплоснабжения. Аналитическое решение задачи потокораспределения многоконтурной тепловой сети крайне сложно, в статье [4] описано использование этого решения при оптимизации параметров тепловой сети, предложен метод расщепления графа, позволяющий свести задачу потокораспределения к алгебраическому уравнению и получить его аналитическое решение, что существенно снизило объем вычислительной работы при моделировании и оптимизации гидравлической цепи. Крайне важным в централизованном теплоснабжении представляется определение эффективного радиуса теплоснабжения. Этот вопрос рассмотрен в [5]. Еще одним широко используемым программным продуктом для моделирования теплогидравлического режима работы тепловой сети является ИБК Zulu, с помощью набора инструментов которого решаются задачи конструкторского расчета тепловых сетей при проектировании новой или реконструкции существующей сети. В арсенале ИБК Zulu представлены функции моделирования аварийных ситуаций на тепловой сети, а также реализуется расчет нормативных и фактических тепловых потерь [6]. Развитие цифрового моделирования режимов работы сетей является ключевым направлением



развития и совершенствования управления инженерными системами жизнеобеспечения городов [6].

РАЗНОВИДНОСТИ И ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Среди других специализированных ИБК можно выделить ИГС CityCom-ТеплоГраф от ИВЦ Поток, а также ИБК Гидросистема от НТП Трубопровод. Эти системы адаптированы для выполнения разнообразных тепло-гидравлических расчетов систем теплоснабжения. Можно заметить, что в то время, когда на моделировании тепловых сетей специализируются отечественные ИБК, на рынке представлено множество иностранных ИБК, разработанных для моделирования систем водоснабжения обобщенных гидравлических систем, например широко известный ИБК EPANET от EPA, FluidFlow от Piping Systems, gPROMS от PSE, PIPENET от Sunrise, TNflow от UKTN, Flownex от CADFEM.

Высокие требования к технико-экономическим критериям и надежности централизованных систем теплоснабжения объектов всех назначений (промышленные, административные и т.д.) требуют постоянного поиска новейших конструкторских и проектных решений при производстве пусковых и наладочных работ на тепловых сетях, применения новых образцов дросселирующей и регуливающей арматуры для создания необходимых динамических характеристик. В исследовании [7] сделан акцент на техническое улучшение систем централизованного теплоснабжения и на одновременное использование географических баз данных с целью учета особенностей городского и промышленного теплопотребления. Экспериментально проверенная компьютерная модель [8] позволяет выбирать оптимальную рабочую точку, способствующую минимизации энергопотребления систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. В статье [9], посвященной в целом проблеме декарбонизации отопления, представлена пространственно-временная модель электро-теплоснабжения, способствующая оценить

влияние вариантов отопления на энерготранспортные сети с учетом потребности на тепловую энергию. Авторы [10] предложили довольно простой подход к моделированию тепловых сетей централизованного теплоснабжения, но только для радиальных сетей сельских населенных пунктов. Имитационная динамическая модель сетей централизованного теплоснабжения рассмотрена в статье [11]. В работе [12] приведена методика оптимального долговременного планирования развития городских сетей отопления, основанная на выборе различных сценариев сочетания сетей централизованного теплоснабжения с индивидуальными источниками энергии. При этом анализируются варианты использования различных технологий экономии энергии для различных групп зданий, расположенных в разных частях города. Предложения, высказанные в статье [13], предлагают эффективные решения по повышению эффективности принимаемых решений в сфере теплоснабжения. В связи с переходом централизованного теплоснабжения ряда европейских стран на низкоуглеродную энергетическую систему возникает необходимость коррекции существующей бизнес-модели, учитывающей новые внешние вызовы, которые дадут основание сделать вывод, будет ли в дальнейшем централизованное теплоснабжение играть существенную роль в будущей энергетической системе [14]. В статье [15] отмечается большой процент спроса на тепловую энергию от сетей централизованного теплоснабжения, которые имеют сложную, зачастую закольцованную, структуру для прогнозирования распределения теплоты, в которой разработана модель сети с использованием Matlab. В статье [16] авторами рассматривается вопрос управления протяженными системами централизованного теплоснабжения при помощи модели динамического моделирования тепловых волн в сети для определения температуры и массового расхода в ключевых точках с учетом потерь окружающей среды и тепловой инерции труб. Данный метод [16] позволяет уйти от устройства дорогостоящей системы мониторинга массового расхода и температуры теплоносителя в узловых точках системы тепло-

снабжения. В статье [17] авторами была проведена экспериментальная проверка модели, предложенная в [16] в условиях действующей системы теплоснабжения и на базе испытательного стенда. Для обеих экспериментальных установок текущая модель [16] показывает хорошее согласие между натурными замерами и результатами моделирования для большого диапазона скоростей воды. В статье [18] выполнен анализ динамики сети при моделировании систем централизованного теплоснабжения. Разработана математическая модель монопольного рынка тепла [19], основанная на классической модели монополии и базовых моделях теории гидравлических цепей. На основе модели [20], основанной на методе конечных объемов, авторы решают задачу определения задержек (инерцию системы) между точками генерации тепловой энергии и точками ее потребления. Результаты применения модели, описанные в [20], проливают свет на потребности и возможности в центральном теплоснабжении крупных городов и регионов в основном для внедрения интеллектуальных энергетических систем, размещения аккумуляторов энергии. В статье [21] авторами предложена компактная физическая модель, сохраняющая приемлемую точность вычислений, при этом значительно снижаются вычислительные итерации по сравнению с полной физической моделью. Компактная модель, описанная в [21], подходит для применения в сочетании с сетевыми моделями и моделями энергетических инфраструктур. Для определения потребления тепловой энергии из-за временной задержки при транспортировке теплоносителя в сетях централизованного теплоснабжения крупных городов авторами в статье [22] предлагается модель CFD (от англ. Computational Fluid Dynamics modeling), также известная как 3-мерное (3D) гидравлическое моделирование. Авторами [22] на основании анализа данных, полученных с помощью модели CFD, доказано, что такие физические параметры как расход теплоносителя, протяженность и диаметр трубопроводов тепловой сети имеют определяющую роль на время задержки в сети ЦТ, влияние температуры теплоносителя оказалось незначительным [22].

Цель работы – сопоставить рассчитанные на компьютерной программе JA_Net (автор А.Ю. Липовка) результаты потокораспределения с натурными замерами на действующей тепловой сети и выявить особенности управления гидравлическим режимом тепловых сетей при подключении новых потребителей с различной степенью автоматизации.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОСТОЯННЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

В настоящее время в системах теплоснабжения основными дросселирующими устройствами, применяемыми для изменения перепада давлений в тепловой сети на вводе к потребителю, остаются постоянные гидравлические сопротивления. Применение дросселирующих шайб для проведения наладки системы теплоснабжения и гидравлической увязки всех абонентов системы централизованного теплоснабжения приводит к необеспеченности отдельных потребителей расчетным количеством тепловой энергии при работе устройств, обеспечивающих погодозависимое регулирование в автоматизированных индивидуальных тепловых пунктах других потребителей, подключенных к одной и той же рассматриваемой тепловой сети. Для нивелирования сложившейся ситуации требуется на протяжении всего отопительного сезона поддерживать постоянный гидравлический режим в системах теплоснабжения всех потребителей по средствам устройства систем качественно-количественного регулирования тепловой энергии, например автоматических регуляторов перепада давления на трубопроводах теплоснабжения в тепловых камерах (ТК), в индивидуальных тепловых пунктах (ИТП) и узловых точках (УТ) тепловой сети.

В работе использованы известные математические методы расчета потокораспределения в гидравлических цепях, в том числе метод Тодина и экспериментальные исследования режимов работы системы теплоснабжения. Для проверки корректности работы компьютерной программы JA_Net, первоначально созданной на основе идеологии [23] и в дальнейшем использующей метод

[24], проведены экспериментальные замеры.

Для экспериментального исследования, первые результаты которого были опубликованы в [25], был выбран участок тепловой сети, потребители № 1–4 которого неравномерно оборудованы устройствами для выполнения автоматического качественно-количественного регулирования тепловой нагрузкой (рис. 1). В ИТП потребителя № 1 смонтирован регулятор перепада давления на ответвлениях к тепловым энергоустановкам (отопление, горячее водоснабжение, теплоснабжение калориферов приточных вентиляционных систем). В ИТП потребителей № 1, 4 установлены автоматические устройства для качественного регулирования тепловой нагрузки в зависимости от скорости ветра и температуры наружного воздуха, а также автоматические регуляторы перепада давления на вводе в здания.

В индивидуальных тепловых пунктах потребителей № 2, 3 с целью снижения пере-

пада давлений установлены дросселирующие шайбы, системы теплоснабжения не оборудованы тепломеханической автоматикой для качественно-количественного регулирования теплоносителем.

Объем тепловой энергии, потребляемой объектами, подключенными к исследуемой тепловой сети, складывается из тепловой энергии на отопление и горячее водоснабжение, а также из нагрузки на теплоснабжение калориферов вентиляционных систем потребителей № 1, 4 (рис. 2).

В ходе первых экспериментов, описанных в [25], была поставлена задача – выявить взаимосвязь изменения располагаемого перепада давлений и расхода теплоносителя у потребителей в зависимости от перепада давления на вводе тепловой сети, а также при значительном (экстремальном) его уменьшении вследствие нештатной работы централизованной системы теплоснабжения населенного пункта.

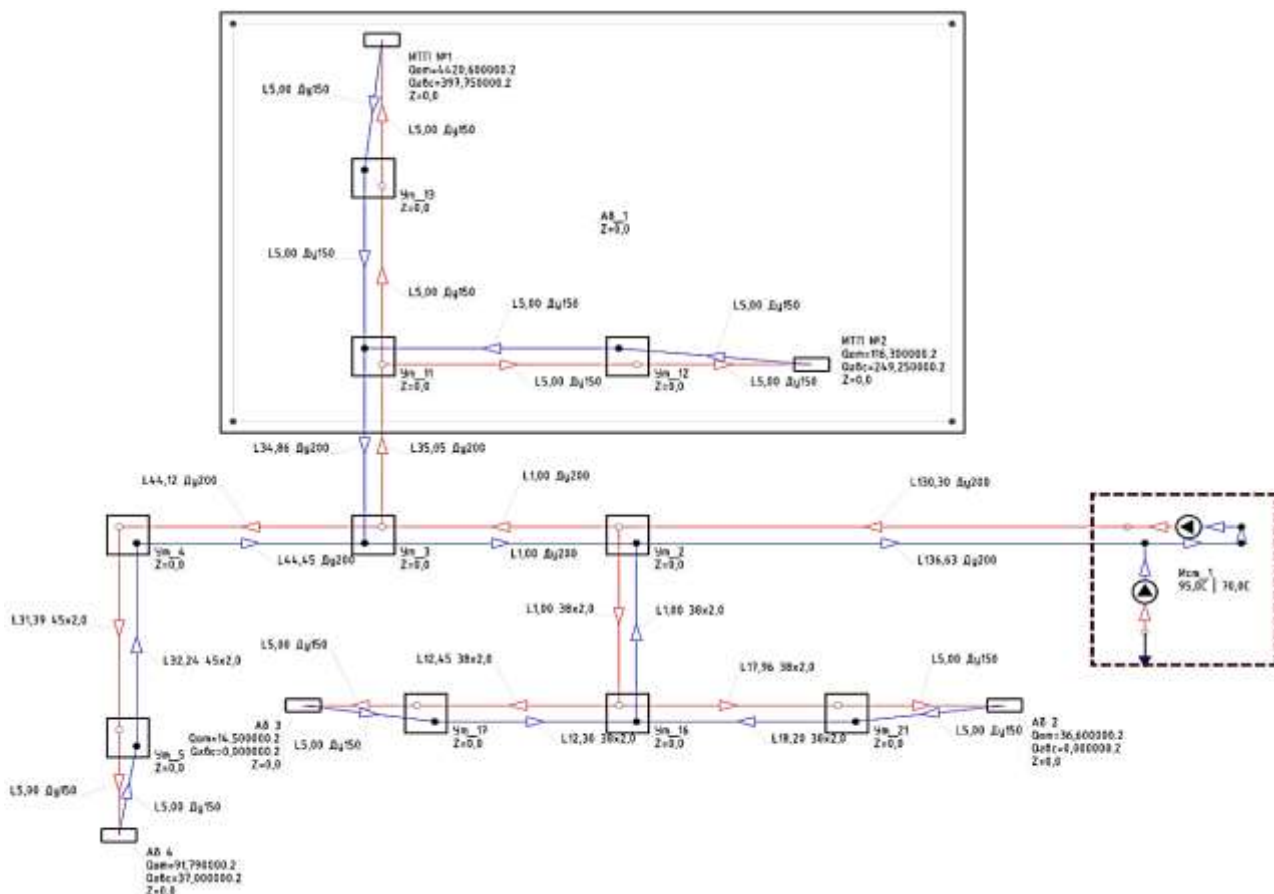


Рис. 1. Расчетная схема тепловой сети (топологическая модель)
Fig. 1. Design diagram of the heat network (topological model)

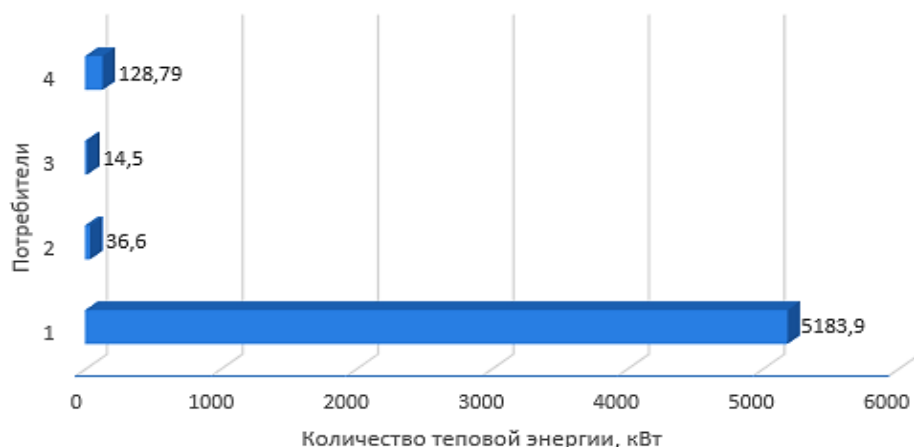


Рис. 2. Расчетные тепловые нагрузки потребителей, подключенных к исследуемой тепловой сети
 Fig. 2. Estimated heat loads of consumers connected to the investigated heat network

Результатом эксперимента стала наглядная визуализация факта невосприимчивости расходов теплоносителя во внутренних системах теплоснабжения от изменения располагаемого перепада давлений на вводе тепловой сети у потребителей № 1 и 4, оборудованных устройствами качественного регулирования тепловой нагрузкой. Совершенно иначе протекает реакция на изменение располагаемого перепада

да давлений на вводе тепловой сети у неавтоматизированных потребителей. Во внутренних системах теплоснабжения неавтоматизированных потребителей происходит резкое снижение расхода теплоносителя – на 29,3% у потребителя № 2 и на 37,5% у потребителя № 3.

Кривые зависимости расхода теплоносителя от перепада давлений на вводе тепловой сети показаны на рис. 3.

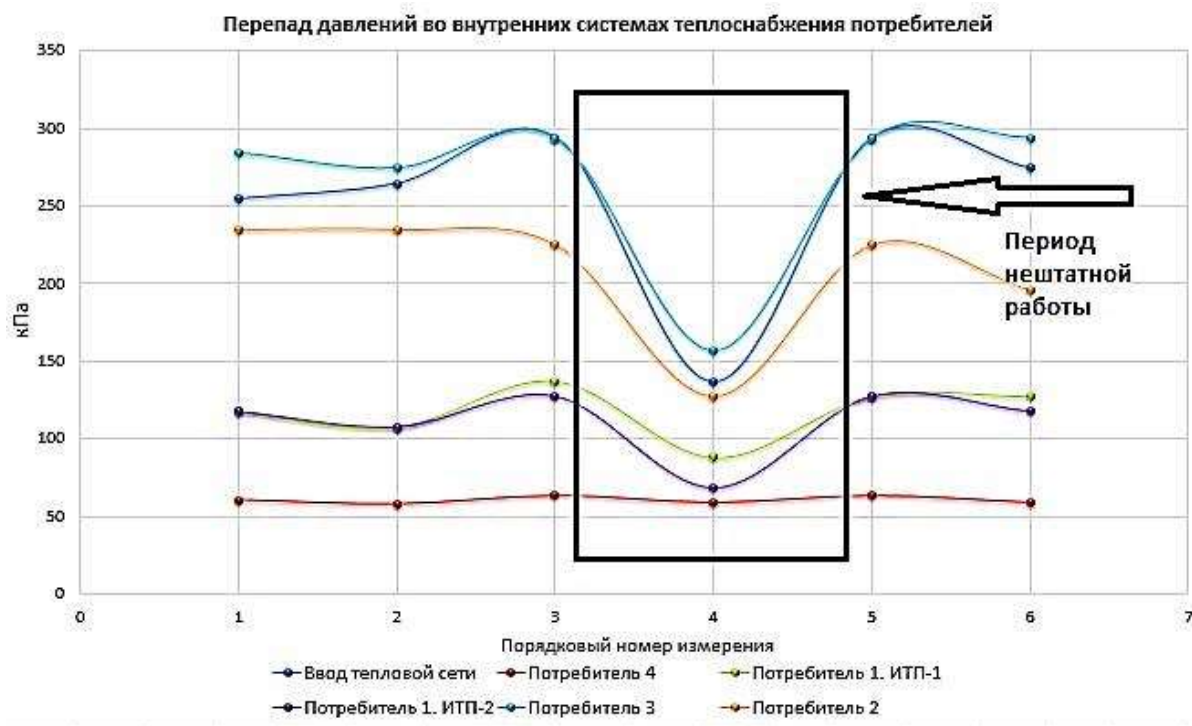


Рис. 3. Перепад давлений на вводе в индивидуальном тепловом пункте потребителей в условиях нештатной работы тепловой сети
 Fig. 3. Differential pressure at the input of the consumer individual heating point at abnormal operation of the heating network

При проведении повторных экспериментов ставилась цель – выявление закономерности распределения поступающей тепловой энергии на нужды теплоснабжения объектов, степень оснащённости которых средствами регулирования тепловой нагрузки неравномерна в реальных условиях «недогрева» теплоносителя в подающем трубопроводе тепловой сети.

В ходе проведения эксперимента применялись ультразвуковой расходомер Portoflow 300, стационарные расходомеры просвечивающего растрового электронного микроскопа, поверенные и аттестованные манометры и термометры на всех точках проведения замеров.

Принципом для выбора значений из массива натурных данных был определен нештатный режим работы централизованной системы теплоснабжения, то есть отклонение температуры теплоносителя в подающем трубопроводе относительно утвержденного температурного графика, следовательно – отклонение от значений температур, принятых при расчетах на этапе разработки про-

ектной документации систем теплоснабжения объектов. В нашем случае для препарирования были взяты значения температур и расходов теплоносителя на входе/выходе систем теплоснабжения потребителей при температурах наружного воздуха -21°C и -37°C . Температура в подающем трубопроводе тепловой сети при этом была одинаковой и составляла 105°C . Очевидно, что «недогрев» теплоносителя в подающем трубопроводе составил 39°C (согласно температурному графику при -37°C $T_1 = 144^{\circ}\text{C}$), при этом второй массив замеров производился в условиях штатной работы централизованной системы теплоснабжения – при -21°C температура теплоносителя в подающем трубопроводе тепловой сети должна составлять 112°C .

Для анализа распределения тепловой нагрузки в ситуации нештатной работы тепловой сети для каждого потребителя были определены проектные нагрузки при температурах наружного воздуха -21°C и -37°C (см. верхние прямые линии на рис. 4).

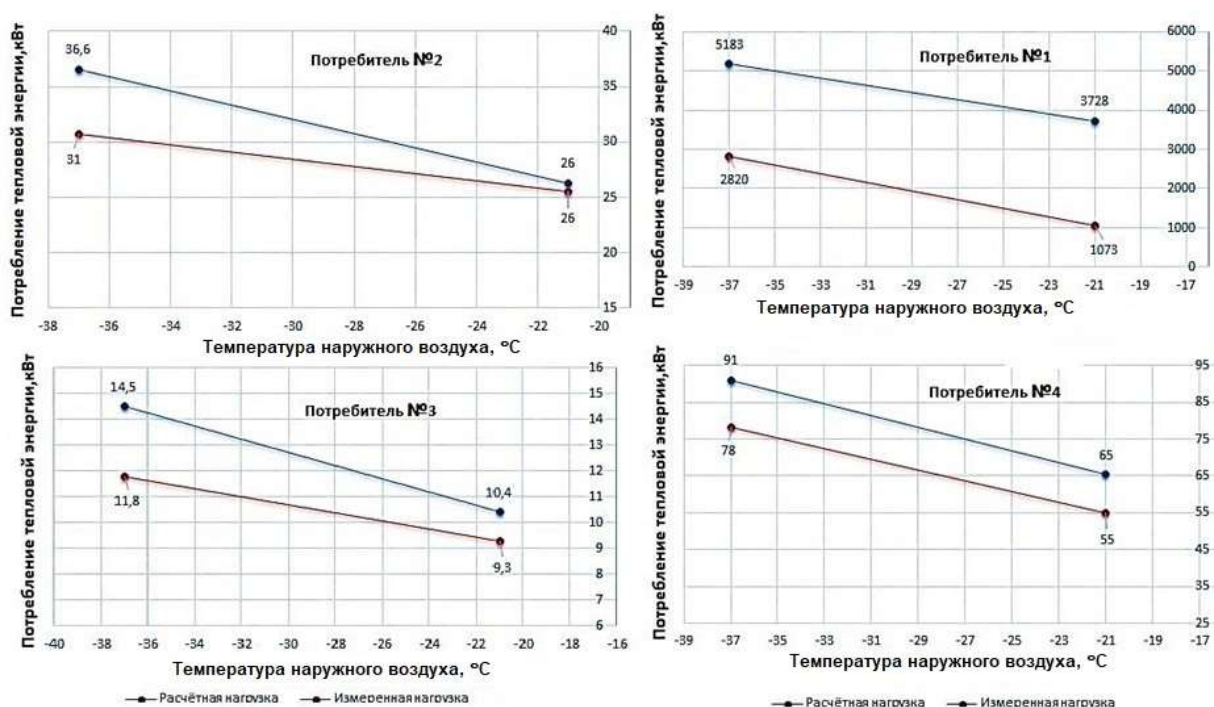


Рис. 4. Изменение тепловой нагрузки потребителей № 1–4
Fig. 4. Heat load variations of consumers no. 1–4

Из графиков видно, что при штатной работе тепловой сети измеренная в ходе эксперимента тепловая нагрузка потребителей, в независимости от степени автоматизации, соответствует с допустимой погрешностью проектным значениям. Из общей картины в режиме штатной работы выбивается лишь потребитель № 1, его измеренная тепловая нагрузка значительно ниже проектной. Данный факт связан с тем, что при проведении измерений не все тепловые энергоустановки потребителя № 1 были введены в работу в силу проходящих технологических процессов на объекте (рис. 4).

Однако в случае снижения температуры теплоносителя в подающем трубопроводе тепловой сети при нештатных режимах работы системы теплоснабжения города у оборудованных дросселирующими шайбами потребителей № 2, 3 происходит снижение поступающей тепловой энергии относительно проектных нагрузок (см. нижние линии на рис. 4). Прямые, соответствующие измеренным нагрузкам, не параллельны прямым, определяющим расчетные нагрузки.

В аналогичном случае у потребителей № 1, 4, оборудованных автоматическими средствами регулирования тепловой нагрузкой, происходит компенсация снижения температуры в подающем трубопроводе за счет увеличения расхода теплоносителя путем открытия регуляторов перепада давления и регули-

рующих клапанов температуры во внутренних системах теплоснабжения (рис. 5).

Стоит отметить, что у оборудованных средствами автоматической регулировки тепловой нагрузки потребителей восстановление параметров во внутренних системах теплоснабжения происходит не в полной мере и прямо пропорционально зависит от степени снижения параметров централизованной системы теплоснабжения населенного пункта.

В ходе проведения измерений и сопоставления с результатами компьютерного моделирования (рис. 6, 7) при удовлетворительной сходимости результатов в условиях снижения пьезометрического перепада и/или температуры в подающем трубопроводе тепловой сети авторами была замечена тенденция, при которой в период компенсации недостающей тепловой энергии автоматизированными потребителями происходит дополнительное снижение расхода теплоносителя в системах теплоснабжения потребителей, оборудованных дроссельными диафрагмами. Основываясь на этом наблюдении, необходимо проработать рекомендации при подключении новых потребителей, как правило, автоматизированных, к централизованным системам городов и населенных пунктов с целью повышения их надежности и живучести.

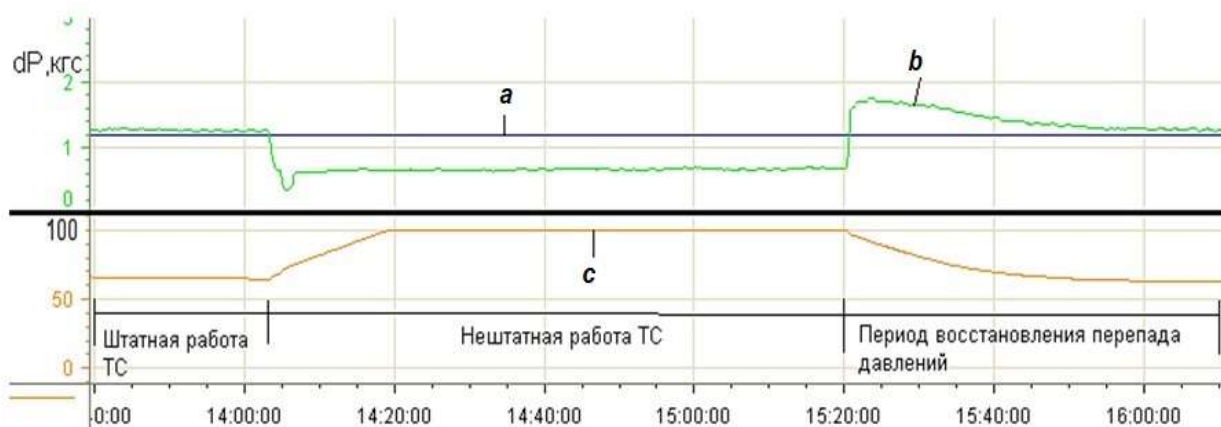


Рис. 5. Функционирование регулятора перепада давления в индивидуальном тепловом пункте № 2 потребителя № 1: а – установка по перепаду давлений; б – кривая изменения перепада давлений на вводе в индивидуальные тепловых пунктах; с – кривая работы автоматического регулятора

Fig. 5. Operation of the differential pressure controller in the no.2 individual heating station of no. 1 consumer: a – setting by pressure difference; b – curve of the pressure drop at the input of the individual heating stations; c – automatic controller curve

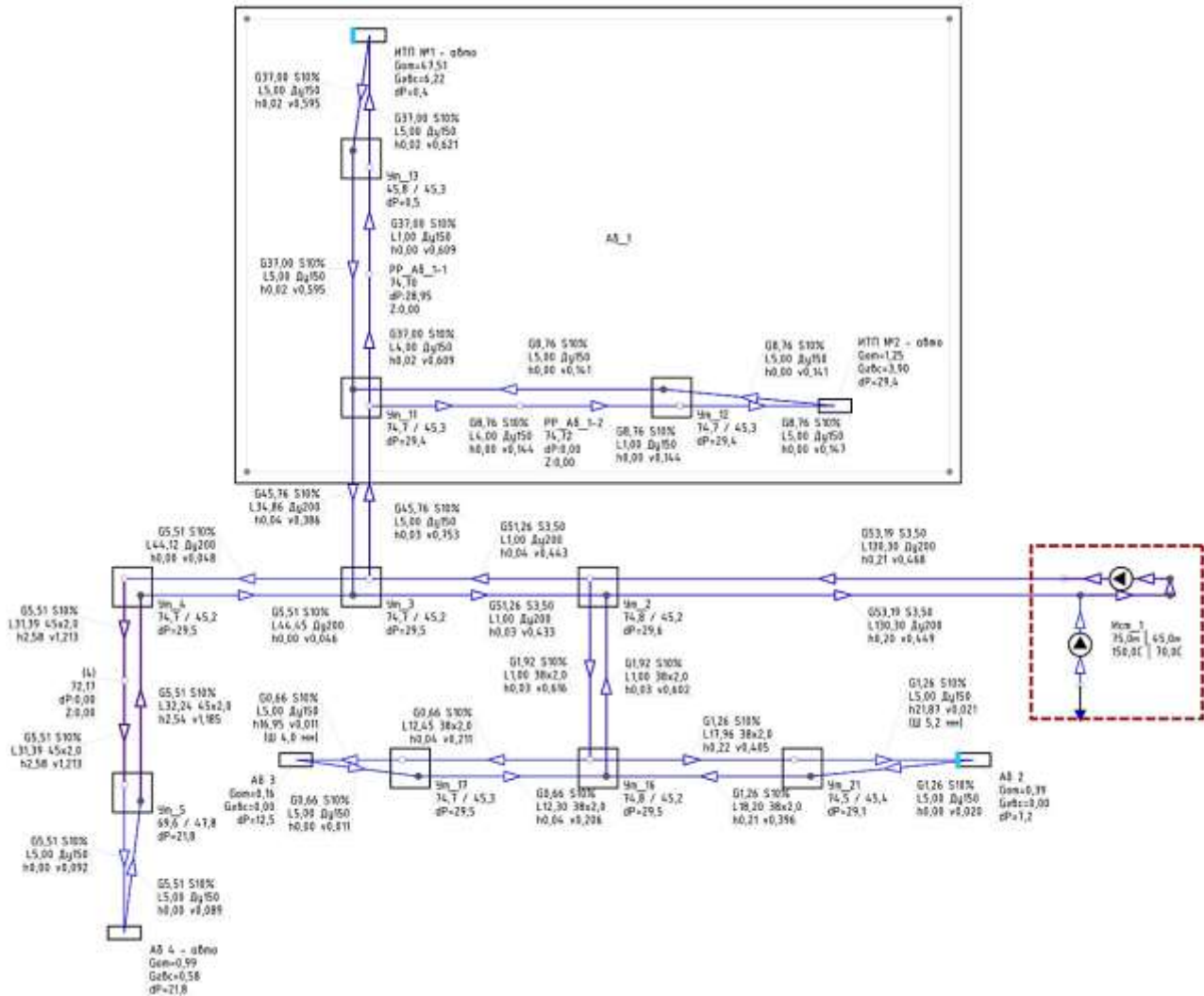


Рис. 6. Визуализация отдельного режима
Fig. 6. Single mode visualization

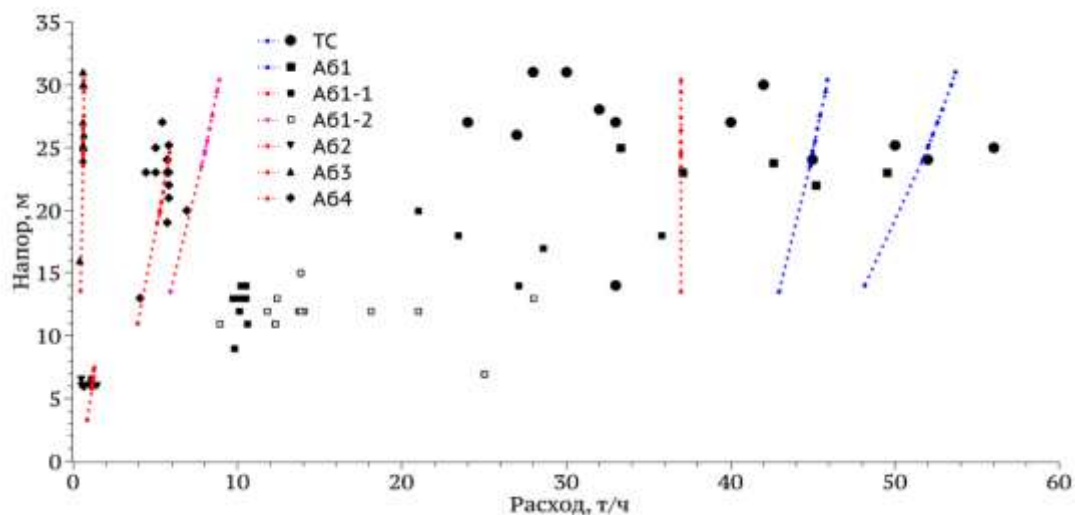


Рис. 7. Сопоставление результатов натурных замеров и математического моделирования
Fig. 7. Comparison of results of field measurements and mathematical modeling

Математическое моделирование показывает, что каждый элемент гидравлической системы оказывает влияние на нее. Проведен сравнительный численный эксперимент по моделированию приведенной тепловой сети активными (рис. 8) и пассивными (рис. 9) сопротивлениями. В обоих вариантах гидравлическая характеристика описывается квадратичным законом, но в случае активных сопротивлений парабола смещена (см. рис. 8).

По результатам выполнения наладочного расчета фиксируются целевые гидравличе-

ские характеристики узлов ввода, которые реализуются в виде дроссельных шайб. Подобные пассивные сопротивления элементов гидравлической сети делают ее предсказуемой. Наличие же автоматизированных пунктов приводит к тому, что часть системы непрерывно изменяется в форме адаптации гидравлических сопротивлений, что приводит к совершенно новым пропорциям гидравлических сопротивлений в сети и сводит на нет результаты предварительного наладочного расчета.

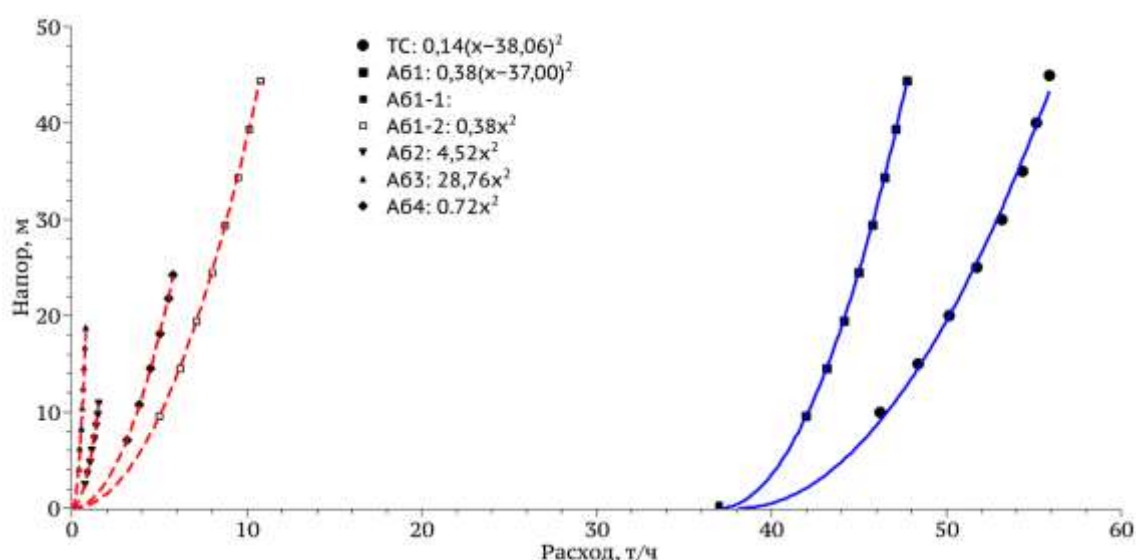


Рис. 8. Численный эксперимент по гидравлическому расчету системы с активными элементами
 Fig. 8. Numerical experiment on hydraulic calculation of a system with active elements

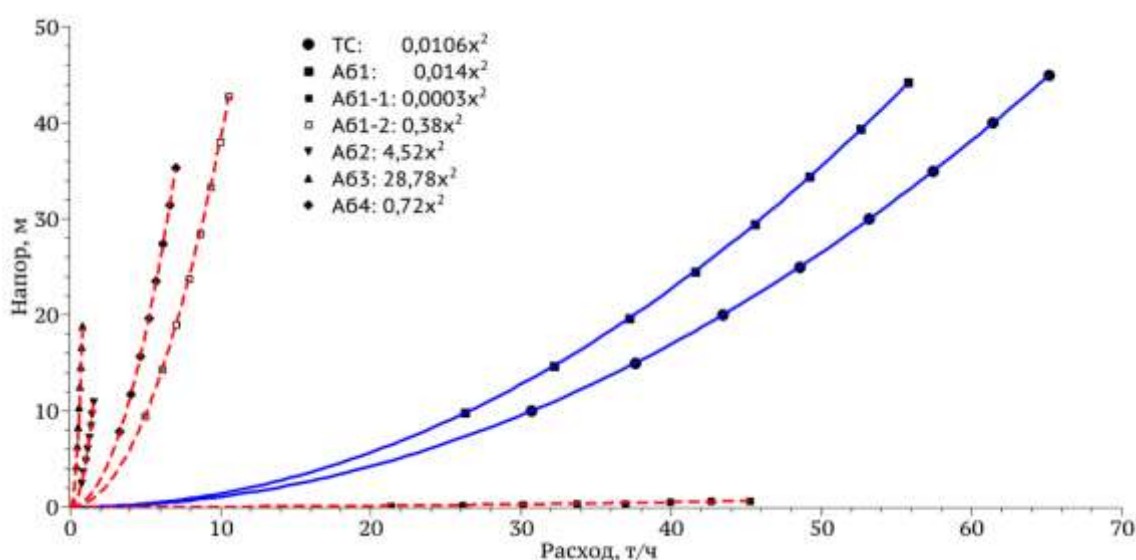


Рис. 9. Численный эксперимент по гидравлическому расчету системы с фиксированными сопротивлениями
 Fig. 9. Numerical experiment on hydraulic calculation of a system with fixed resistances



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделирование сетей централизованного теплоснабжения – необходимый инструмент для анализа и управления их гидравлическими и тепловыми режимами. Для оценки эффективности разработанной компьютерной программы результаты натурных исследований теплогидравлических режимов работы тепловых сетей действующей системы централизованного теплоснабжения с потребителями, имеющими различную степень оснащённости средствами автоматизации, сопоставлены с результатами компьютерного моделирования, что дало возможность оценить степень обоснованности принятия управленческих решений по стабилизации гидравлических режимов. Встроенные средства визуализации потокораспределения способствуют пониманию влияния комбинаций первичных независимых факторов, определяющих работоспособность сети, и позволяют достаточно быстро ориентироваться в вариантах управления гидравличе-

скими режимами протяженных и замкнутых сетей централизованного теплоснабжения. Сопоставление результатов расчета с натурными замерами при имитации нештатного режима демонстрирует некоторое расхождение результатов. Предположительно это происходит из-за наличия переходных процессов в реальной тепловой сети и не-синхронного сбора метрики в совокупности с расчетом стационарных режимов в математической модели. Расчет стационарных режимов даже при наличии активных элементов соответствует квадратичному характеру гидравлических характеристик как сети в целом, так и отдельных элементов, пусть и с небольшим смещением, в то же время натурные замеры явно не показывают их. Результатом использования компьютерной программы JA_Net стали проекты наладки и реконструкции тепловых сетей и элементов систем централизованного теплоснабжения населенных пунктов.

Список литературы

1. Шалагинова З.И., Токарев В.В. Прикладные проблемы и методические подходы к организации эксплуатационных режимов теплоснабжающих систем // Теплоэнергетика. 2019. № 10. С. 33–49. <https://doi.org/10.1134/S0040363619100059>
2. Шалагинова З.И. Разработка методики расчета узловых цен тепловой энергии на базе моделирования теплогидравлических режимов систем теплоснабжения для решения задач управления и оптимизации // Теплоэнергетика. 2018. № 10. С. 96–108. <https://doi.org/10.1134/S0040363618100077>
3. Токарев В.В. Разработка методики секционирования кольцевых тепловых сетей закрытых систем теплоснабжения // Теплоэнергетика. 2018. № 6. С. 84–94. <https://doi.org/10.1134/S0040363618060103>
4. Якшин С.В. Применение метода расщепления графа при оптимизации параметров тепловой сети // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 10. С. 129–140. <http://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-10-129-140>
5. Stennikov V., Mednikova E., Postnikov I., Penkovskii A. Optimization of the effective heat supply radius for the district heating systems. *Environmental and Climate Technologies*. 2019. Vol. 23. Iss. 2. P. 207–221. <https://doi.org/10.2478/rtuct-2019-0064>
6. Крицкий Г.Г., Игнатчик В.С. Цифровые технологии в инженерной инфраструктуре города // Актуальные проблемы военно-научных исследований. СПб., 2019. № S2. С. 167–184.
7. Dou Y., Togawa T., Dong Liang, Fujii M., Ohnishi S., Tanikawa H., et al. Innovative planning and evaluation system for district heating using waste heat considering spatial configuration: a case in Fukushima, Japan // *Resources, Conservation and Recycling*. 2018. Vol. 128. P. 406–416. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.03.006>
8. Xiong Wangqi, Wang Jiandong. Minimizing power consumption of an experimental HVAC system based on parallel grid searching // *Energies*. 2020. Vol. 13. No. 8. <https://doi.org/10.3390/en13082083>
9. Clegg S., Mancarella P. Integrated electricity-heat-gas modelling and assessment, with applications to the Great Britain system. Part I: High-resolution spatial and temporal heat demand modelling // *Energy*. 2019. Vol. 184. P. 191–203. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.078>
10. Brocklebank I., Beck S.B.M., Styring P. A simple approach to modeling rural and urban district heating // *Frontiers in Energy Research*. 2018. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2018.00103>
11. Larsen H.V., Pálsson H., Bøhm B., Ravn H.F. Aggregated dynamic simulation model of district heating networks // *Energy Conversion and Management*. 2002. Vol. 43. Iss. 8. P. 995–1019. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(01\)00093-0](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(01)00093-0)
12. Büchele R., Kranzl L., Hummel M. Integrated strategic heating and cooling planning on regional level for the case of Brasov // *Energy*. 2019. Vol. 171. P. 475–474. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.030>
13. Mednikova E., Stennikov V., Postnikov I., Penkovskii A. Development features of heat power industry legislation in Russia // *Environmental and Climate Technologies*.

2019. Vol. 23. Iss. 2. C. 22–35.

<https://doi.org/10.2478/rtuct-2019-0052>

14. Lygnerud K. Challenges for business change in district heating // *Energy, Sustainability and Society*. 2018. Vol. 8. No. 20. <https://doi.org/10.1186/s13705-018-0161-4>

15. Hermansson K., Kos C., Starfelt F., Kyprianidis K., Lindberg C.-F., Zimmerman N., et al. An automated approach to building and simulating dynamic district heating networks // *IFAC-PapersOnLine*. 2018. Vol. 51. Iss. 2. P. 855–860. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.04.021>

16. Sartor K., Thomas D., Dewalle P. A comparative study for simulating heat transport in large district heating networks // *International Journal of Heat and Technology*. 2018. Vol. 36. Iss. 1. P. 301–308. <https://doi.org/10.18280/ijht.360140>

17. Sartor K., Dewalle P. Experimental validation of heat transport modelling in district heating networks // *Energy*. 2017. Vol. 137. P. 961–968.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.161>

18. Guelpa E. Impact of network modelling in the analysis of district heating systems // *Energy*. 2020. Vol. 213. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118393>

19. Penkovskii A., Stennikov V. Mathematical modeling and optimization of the monopoly heating market // *International Journal of Energy Economics and Policy*. 2020. Vol. 10. No. 4. C. 342–351.

<https://doi.org/10.32479/ijeep.9284>

20. Betancourt Schwarz M., Mabrouk M.T., Santo Silva

C., Haurant P., Lacarrière B. Modified finite volumes method for the simulation of dynamic district heating networks // *Energy*. 2019. Vol. 182. P. 954–964. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.038>

21. Guelpa E., Verda V. Compact physical model for simulation of thermal networks // *Energy*. 2019. Vol. 175. P. 998–1008.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.064>

22. Zhao Jing, Shan Yu. An influencing parameters analysis of district heating network time delays based on the CFD method // *Energies*. 2019. Vol. 12. No. 7. <https://doi.org/10.3390/en12071297>

23. Хасилев В.Я., Меренков А.П., Каганович Б.М. [и др.]. Методы и алгоритмы расчета тепловых сетей / под ред. Хасилева В.Я., Меренкова А.П. М.: Энергия, 1978. 176 с.

24. Lipovka A.Y., Lipovka Yu.L. Application of «Gradient» algorithm to modeling thermal pipeline networks with pumping stations // *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2013. Vol. 6. № 1. P. 28–35. [Электронный ресурс]. URL: http://elib.sfu-kras.ru/bitstream/handle/2311/126983/03_Lipevka.pdf?sequence=1&isAllowed=y (29.05.2020).

25. Липовка Ю.Л., Калабин Д.А. Гидравлическая устойчивость в условиях неравномерной автоматизации систем теплоснабжения // *Энергосбережение и водоподготовка*. 2018. № 3. С. 19–24.

References

1. Shalaginova ZI, Tokarev VV. Applied problems and methodological approaches to planning and implementation of operating conditions at district heating systems. *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2019;10:33–49. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S0040363619100059>

2. Shalaginova ZI. The development of a method for calculating the nodal prices of the thermal energy by modeling the thermal and hydraulic regimes of the heat supply systems for solving control and optimization problems. *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2018;10:96–108. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S0040363618100077>

3. Tokarev VV. Developing a procedure for segmenting ring heat networks of closed heat supply systems. *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2018;6:84–94. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S0040363618060103>

4. Yakshin SV. Application of graph splittance method when optimizing heating network parameters. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(10):129–140. (In Russ.) <http://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-10-129-140>

5. Stennikov V, Mednikova E, Postnikov I, Penkovskii A. Optimization of the effective heat supply radius for the district heating systems. *Environmental and Climate Technologies*. 2019;23(2):207–221. <https://doi.org/10.2478/rtuct-2019-0064>

6. Krickij GG, Ignatchik VS. Digital technologies in engineering infrastructure of the city. In: *Aktual'nye problemy voenno-nauchnyh issledovaniy*. Saint-Petersburg; 2019, no. S2, p. 167–184. (In Russ.)

7. Dou Y, Togawa T, Dong Liang, Fujii M, Ohnishi S,

Tanikawa H, et al. Innovative planning and evaluation system for district heating using waste heat considering spatial configuration: a case in Fukushima, Japan. *Resources, Conservation and Recycling*. 2018;128:406–416. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.03.006>

8. Xiong Wangqi, Wang Jiandong. Minimizing power consumption of an experimental HVAC system based on parallel grid searching. *Energies*. 2020;13(8). <https://doi.org/10.3390/en13082083>

9. Clegg S, Mancarella P. Integrated electricity-heat-gas modelling and assessment, with applications to the Great Britain system. Part I: High-resolution spatial and temporal heat demand modelling. *Energy*. 2019;184:191–203. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.078>

10. Brocklebank I, Beck SBM, Styring P. A simple approach to modeling rural and urban district heating. *Frontiers in Energy Research*. 2018. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2018.00103>

11. Larsen HV, Pálsson H, Bøhm B, Ravn HF. Aggregated dynamic simulation model of district heating networks. *Energy Conversion and Management*. 2002;43(8):995–1019. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(01\)00093-0](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(01)00093-0)

12. Büchele R, Kranzl L, Hummel M. Integrated strategic heating and cooling planning on regional level for the case of Brasov. *Energy*. 2019;171:475–474. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.030>

13. Mednikova E, Stennikov V, Postnikov I, Penkovskii A. Development features of heat power industry legislation in Russia. *Environmental and Climate Technologies*. 2019;23(2):22–35.

14. Lygnerud K. Challenges for business change in district



heating. *Energy, Sustainability and Society*. 2018;8(20). <https://doi.org/10.1186/s13705-018-0161-4>

15. Hermansson K, Kos C, Starfelt F, Kyprianidis K, Lindberg C.-F, Zimmerman N, et al. An automated approach to building and simulating dynamic district heating networks. *IFAC-PapersOnLine*. 2018;51(2):855–860. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.04.021>

16. Sartor K, Thomas D, Dewallef P. A comparative study for simulating heat transport in large district heating networks. *International Journal of Heat and Technology*. 2018;36(1):301–308. <https://doi.org/10.18280/ijht.360140>

17. Sartor K, Dewallef P. Experimental validation of heat transport modelling in district heating networks. *Energy*. 2017;137:961–968. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.161>

18. Guelpa E. Impact of network modelling in the analysis of district heating systems. *Energy*. 2020;213. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118393>

19. Penkovskii A, Stennikov V. Mathematical modeling and optimization of the monopoly heating market. *International Journal of Energy Economics and Policy*. 2020;10(4):342–351. <https://doi.org/10.32479/ijeep.9284>

20. Betancourt Schwarz M, Mabrouk MT, Santo Silva C, Haurant P, Lacarrière B. Modified finite volumes method

for the simulation of dynamic district heating networks. *Energy*. 2019;182:954–964. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.038>

21. Guelpa E, Verda V. Compact physical model for simulation of thermal networks. *Energy*. 2019;175:998–1008. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.064>

22. Zhao Jing, Shan Yu. An influencing parameters analysis of district heating network time delays based on the CFD method. *Energies*. 2019;12(7). <https://doi.org/10.3390/en12071297>

23. Hasilev VYa, Merenkov AP, Kaganovich BM, et al. Methods and algorithms for heat network calculation / eds. VYa Hasilev, AP Merenkov. Moscow: Energiya; 1978, 176 p. (In Russ.)

24. Lipovka AY, Lipovka YuL. Application of «Gradient» algorithm to modeling thermal pipeline networks with pumping stations. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2013;6(1):28–35. Available from: http://elib.sfu-kras.ru/bitstream/handle/2311/126983/03_Lipovka.pdf?sequence=1&isAllowed=y [Accessed 29th May 2020].

25. Lipovka YuL, Kalabin DA. Hydraulic stability of heat supply systems. *Energobezrezhenie i vodopodgotovka*. 2018;3:19–24. (In Russ.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Калабин Дмитрий Александрович,
аспирант,
Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, Россия;
✉ e-mail: promenergetik@mail.ru

Липовка Алексей Юрьевич,
кандидат технических наук,
доцент кафедры градостроительства,
Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, Россия;
e-mail: alex.lipovka@gmail.com

Липовка Юрий Львович,
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры инженерных систем зданий
и сооружений,
Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, Россия;
e-mail: ylipovka@sfu-kras.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 11.01.2021; одобрена после рецензирования 05.02.2021; принята к публикации 26.02.2021.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitry A. Kalabin,
Postgraduate Student,
Siberian Federal University,
79, Svobodny pr., Krasnoyarsk 660041, Russia;
✉ e-mail: promenergetik@mail.ru

Aleksey Yu. Lipovka,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Urban Planning,
Siberian Federal University,
79, Svobodny pr., Krasnoyarsk 660041, Russia;
e-mail: alex.lipovka@gmail.com

Yuri L. Lipovka,
Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Professor of the Department of Engineering Systems
of Buildings and Structures,
Siberian Federal University,
79, Svobodny pr., Krasnoyarsk 660041, Russia;
e-mail: ylipovka@sfu-kras.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 11.01.2021; approved after reviewing 05.02.2021; accepted for publication 26.02.2021.



Методы расчета надежности системы электроснабжения

© А.С. Луковенко*, И.В. Зеньков**

*Красноярское предприятие МЭС Сибири, филиал ПАО «ФСК ЕЭС», г. Красноярск, Россия

**Федеральный исследовательский центр информационных
и вычислительных технологий, г. Красноярск, Россия

Резюме: Цель – определение показателей надежности системы электроснабжения с применением модели искусственной нейронной сети. Для разработки модели расчета технической надежности использованы алгоритм расчета показателей надежности систем электроснабжения, метод интенсивности отказов системы электроснабжения, модель прогнозирования с использованием искусственных нейронных сетей. Установлено, что систему электроснабжения образует разомкнутая радиальная схема электроснабжения. Определена интенсивность отказов подсистемы электроснабжения с помощью расчета интенсивности отказов i -го элемента подсистемы. В результате рассчитанной вероятности безотказной работы подсистемы для различных условий (5 временных интервалов) установлено, что при увеличении времени эксплуатации со 100 до 500 ч происходит линейное увеличение интенсивности отказов системы с 0,0051 до 0,0073 1/ч. Проведено сравнение полученных значений наработки до отказа основной и такой же резервной подсистемы, находящейся в ненагруженном режиме с абсолютно надежным переключателем (269,62 ч) с основной и такой же резервной подсистемы, находящейся в нагруженном режиме (202,21 ч), значения различны между собой на 67,41 ч, что говорит о более высокой степени надежности первого способа. Разработан программный комплекс «Прогноз_ИНС_2020». В результате сравнения результатов традиционного расчета интенсивности отказов системы электроснабжения и с помощью программного комплекса «Прогноз_ИНС_2020» получена допустимая точность не более 2,17%, что говорит о жизнеспособности данного программного комплекса при расчетах надежности на действующих энергетических предприятиях. Предлагаемые методы оценки технической надежности как с помощью традиционной модели, так и с применением модели на основе искусственной нейронной сети позволяют оценить состояние систем электроснабжения, что способствует предотвращению опасных аварийных ситуаций.

Ключевые слова: система электроснабжения, наработка на отказ, интенсивность отказов, время восстановления, искусственная нейронная сеть

Для цитирования: Луковенко А.С., Зеньков И.В. Методы расчета надежности системы электроснабжения. Вестник Иркутского государственного технического университета. 2021. Т. 25. № 1. С. 57–65. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-1-57-65>

Methods for calculating the reliability of power supply systems

Anton S. Lukovenko*, Igor V. Zenkov**

*Krasnoyarsk enterprise MES Siberia Branch of PJSC FGC UES, Krasnoyarsk, Russia

**Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Krasnoyarsk, Russia

Abstract: The aim was to determine the reliability indicators of a power supply system using an artificial neural network model. A model for calculating technical reliability was developed using the following methods: an algorithm for calculating reliability indicators of power supply systems, the method of failure rate of a power supply system and a forecasting model using artificial neural networks. It was established that a power supply system is formed by an open radial power supply circuit. The failure rate of the power supply subsystem was determined by calculating the failure rate of i -th element of the subsystem. As a result of calculating the probability of failure-free operation of the subsystem for various conditions (5 time intervals), it was found that with an increase in the operating time from 100 to 500 h, a linear increase in the rate of system failures occurs from 0.0051 to 0.0073 1/h. A comparison of the obtained mean-to-failure values of the main and the same backup subsystem in the unloaded mode with an absolutely reliable switch (269.62 h) with the main and the same backup subsystem in the loaded mode (202.21 h) was carried out. The results differ by 67.41 h, which indicates a higher degree of reliability of the first method. The software package Prognoz_INS_2020 was developed. An acceptable accuracy of no more than 2.17% was obtained by comparing the results of the conventional calculation of the failure rate of power supply systems and using the Prognoz_INS_2020 software package. This indicates the efficiency of the proposed software package in reliability calculations at operating energy enterprises. The proposed

methods for assessing technical reliability both using the conventional model and a model based on an artificial neural network made it possible to assess the state of power supply systems, which helps to prevent dangerous emergencies.

Keywords: power supply system, mean time to failure (MTTF), failure rate, recovery time, artificial neural network

For citation: Lukovenko AS, Zenkov IV. Methods for calculating the reliability of power supply systems. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(1):57–65. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-1-57-65>

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в России, как и во всем мире, фиксируется возрастающее требование к качеству оказания услуг, и услуги в электроэнергетике не исключение, особенно в части технической надежности системы электроснабжения. Причины возникновения этой тенденции таковы: во-первых, это быстрое распространение сложных производств и систем, требующих постоянства технологических процессов (сложные химические, биотехнологические и полупроводниковые производства, корпоративные системы управления и т.д.). Во-вторых, рост качества жизни населения в развитых странах, ведущий к повышению требований к качеству электроснабжения как на стороне потребителей (распространение бытовых и электронных приборов, чувствительных к перепадам напряжения и силы тока, перерывам в электроснабжении бытовой аппаратуры), так и коммерческого сектора [1–6].

Помимо вышеперечисленных причин немаловажной остается и проблема морально устаревшего оборудования, которое эксплуатируется как в распределительных, так и магистральных электрических сетях [7–9]. Электросетевые организации активно борются с этой проблемой, проводя различные инвестиционные программы, научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, но в связи с большим объемом морально устаревшего и выработавшего нормативный срок службы оборудования отказы неизбежны. Кроме того, единоразово пополнить парк оборудования экономически невозможно [10–11].

О постоянном возврате к вопросу надежности говорят и аналитические отчеты, в которых ежемесячно упоминается об отказах

и/или поломках высоковольтного оборудования на электроэнергетических подстанциях, что приводит к выводу из строя не только оборудования, но и всей системы электроснабжения (СЭС) [12–14].

Решению данного вопроса в ПАО «Россети» уделяется немаловажное значение, о чем говорит технологический реестр по основным направлениям инновационного развития.

В технологический реестр включены технологии по основным направлениям инновационного развития ПАО «Россети»¹:

- переход и масштабное внедрение цифровых подстанций (ЦПС) класса напряжения 35–110 (220) кВ;
- переход к цифровым активно-адаптивным сетям с распределенной интеллектуальной системой автоматизации и управления;
- переход к комплексной эффективности бизнес-процессов и автоматизации систем управления;
- применение новых технологий и материалов в электроэнергетике;
- использование сквозных технологий.

Концепция интеллектуальных электрических сетей (ИЭС) предполагает не только обеспечение некоторого заданного уровня надежности, но и предоставление услуг по его изменению в соответствии с техническими и экономическими предпочтениями потребителя, что подразумевает наличие в сети инструментов для гибкого управления уровнем надежности. Для этого необходимо обеспечить постоянное наблюдение за состоянием сети с оценкой ее показателей надежности [15].

Цель исследования состоит в определении

¹Программа инновационного развития ПАО «Россети» на период 2016–2020 гг. с перспективой до 2025 г. М., 2016. 341 с. [Электронный ресурс]. URL: https://www.rosseti.ru/investment/policy_innovation_development/doc/innovation_program.pdf (15.09.2020).



нии показателей надежности системы электроснабжения с применением модели искусственной нейронной сети.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе систему электроснабжения образует разомкнутая радиальная схема электроснабжения. В этой схеме линии электропередачи связывают центр питания (ЦП) с каждым потребителем. Две секции шин в схеме соединений питающей подстанции потребителя соединены секционным выключателем, который в нормальном режиме работы сети находится в отключенном состоянии. При исчезновении напряжения, например, на 1-й секции шин этот выключатель включает автоматикой ввода резервного питания.

Подсистема с точки зрения надежности представляет собой нерезервированную часть системы, элементы которой соединены последовательно. При отказе любого элемента происходит отказ подсистемы².

Интенсивность отказов подсистемы электроснабжения определяется по формуле (1):

$$\lambda_{\text{пс}} = \sum_{i=1}^n \lambda_i = 0,00741791 \text{ ч}, \quad (1)$$

где λ_i – интенсивность отказов i -го элемента подсистемы, определяемая по формуле $\lambda_i = \frac{1}{T_i}$; n – количество элементов подсистемы, $n = 10$ (значение $n = 10$ принято для рассматриваемой подсистемы).

Результаты вычислений наработки на от-

каз i -го элемента подсистемы и значения интенсивности отказов сведены в табл. 1.

Наработка на отказ подсистемы находится по формуле (2) [12]:

$$T_{\text{пс}} = \frac{1}{\lambda_{\text{пс}}} = \frac{1}{0,0074179} = 134,8095 \text{ ч}, \quad (2)$$

где $\lambda_{\text{пс}}$ – интенсивность отказов подсистемы.

Вероятность безотказной работы подсистемы определяется по формуле (3):

$$P(t)_{\text{пс}} = e^{-\lambda_{\text{пс}} t} = e^{-0,0074179 \cdot 100} = 0,476262, \quad (3)$$

где t – наработка подсистемы, за которую определяется вероятность безотказной работы $t = 100$ ч.

Наработка на отказ и время восстановления i -го элемента T_i и $T_{\text{в}i}$ подчиняются экспоненциальному закону распределения. Интенсивность отказов, наработка на отказ и вероятность отказов рассчитываются по формулам (1)–(3).

Среднее время восстановления подсистемы определяется по формуле (4):

$$T_{\text{впс}} = T_{\text{пс}} \cdot \sum_{i=1}^n K_{ni} = 134,8095 \cdot 0,050919 = 6,864329 \text{ ч}, \quad (4)$$

где K_{ni} – коэффициент простоя i -го элемента; $K_{ni} = \frac{T_{\text{в}i}}{T_i}$, $T_{\text{в}i}$ – время восстановления i -го элемента.

Таблица 1. Результаты вычислений наработки на отказ i -го элемента подсистемы и значения интенсивности отказов

Table 1. Calculation results of mean time to failure of the i -th subsystem element and failure rate values

№	Наработка на отказе i -го элемента									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$T_i, \text{ч}$	1600	1700	1800	1900	2000	900	1000	1100	1200	1300
$\lambda_i, 1/\text{ч}$	0,000625	0,0005882	0,0005556	0,0005263	0,0005	0,0011111	0,001	0,0009091	0,0008333	0,0007692

Значения K_{ni} для каждого элемента занесены в табл. 2.

Коэффициенты готовности и простоя подсистемы определяются по формулам (4), (5) [16]:

$$K_{\text{ГПс}} = \frac{T_{\text{пс}}}{T_{\text{пс}} + T_{\text{впс}}} = \frac{134,8095}{134,8095 + 6,864329} = 0,951548; (5)$$

$$K_{\text{ППс}} = \frac{T_{\text{впс}}}{T_{\text{пс}} + T_{\text{впс}}} = \frac{6,864329}{134,8095 + 6,864329} = 0,048452. (6)$$

²Ефимов А.В., Галкин А.Г. Надежность и диагностика систем электроснабжения железных дорог: учебник. М.: УМК МПС России, 2000. 511 с.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ОТКАЗОВ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В НАГРУЖЕННОМ РЕЖИМЕ

Наработка системы на отказ определяется по формуле (7) [12]:

$$T_c = \frac{1,5}{\lambda_{nc}} = \frac{1,5}{0,0074179} = 202,2136 \text{ ч}, \quad (7)$$

где λ_{nc} – интенсивность отказов подсистемы; 1,5 – коэффициент надежности элементов подсистемы в нагруженном режиме [12].

Вероятность безотказной работы системы с нагруженным резервированием определяется по выражению 8 [12]:

$$\begin{aligned} P(t)_c &= 2e^{-\lambda_{nc}t} - e^{-2\lambda_{nc}t} = \\ &= 2e^{-0,0074179 \cdot 100} - e^{-2 \cdot 0,0074179 \cdot 100} = \\ &= 0,725698. \end{aligned} \quad (8)$$

Интенсивность отказов системы с нагруженным резервированием определяется по формуле 9 [12]:

$$\lambda(t)_c = \frac{2\lambda_{nc}(1-e^{-\lambda_{nc}t})}{2-e^{-\lambda_{nc}t}}. \quad (9)$$

Значения интенсивности отказов рассчитываются при показателе времени $t = 0, 100, 200, 300, 400, 500$ ч; результаты вычислений показаны в табл. 3.

По данным табл. 3 построена кривая зависимости интенсивности отказов системы от времени эксплуатации (рис. 1).

Наработка системы на отказ определяется по формуле (10):

$$T_c = \frac{2}{\lambda_{nc}} = \frac{2}{0,0074179} = 269,6180 \text{ ч}, \quad (10)$$

где 2 – коэффициент надежности элементов подсистемы с абсолютно ненадежным переключателем [12].

После расчета производится сравнение полученных значений наработки системы до отказа по формулам (7) и (10):

$$T_{c7} = 202,2136 \text{ ч}; T_{c10} = 269,6180 \text{ ч}.$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для более точного прогнозирования надежности СЭС и для предупреждения выхода из строя предлагается применять разработанный программный комплекс (ПК) «Прогноз_ИНС_2020», основанный на использовании аппарата искусственных нейронных сетей (ИНС). Положительной составляющей модели ИНС является возможность ее применения в случаях, когда затруднено использование традиционных методов [17–20].

Таблица 2. Коэффициенты простоя элементов подсистемы

Table 2. Downtime coefficients of subsystem elements

№	t восстановления i-го элемента									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$T_{i, \text{ч}}$	1600	1700	1800	1900	2000	900	1000	1100	1200	1300
$\lambda_i, 1/\text{ч}$	0,00063	0,00059	0,00056	0,00053	0,0005	0,00111	0,00100	0,000909	0,00083	0,00077
$T_{\theta, \text{ч}}$	6	6,5	7	7,5	8	5	6	7	8	9
K_{ni}	0,00375	0,00382	0,00389	0,00395	0,00400	0,00556	0,00600	0,00636	0,00667	0,00692
$\sum_{i=1}^n K_{ni}$	0,0500919									

Таблица 3. Значения интенсивности отказов системы с нагруженным резервированием

Table 3. Failure rate values of the system with parallel redundancy

Время эксплуатации, ч	0	100	200	300	400	500
$\lambda(t)_c, 1/\text{ч}$	0	0,005099	0,006469	0,006994	0,007222	0,007326

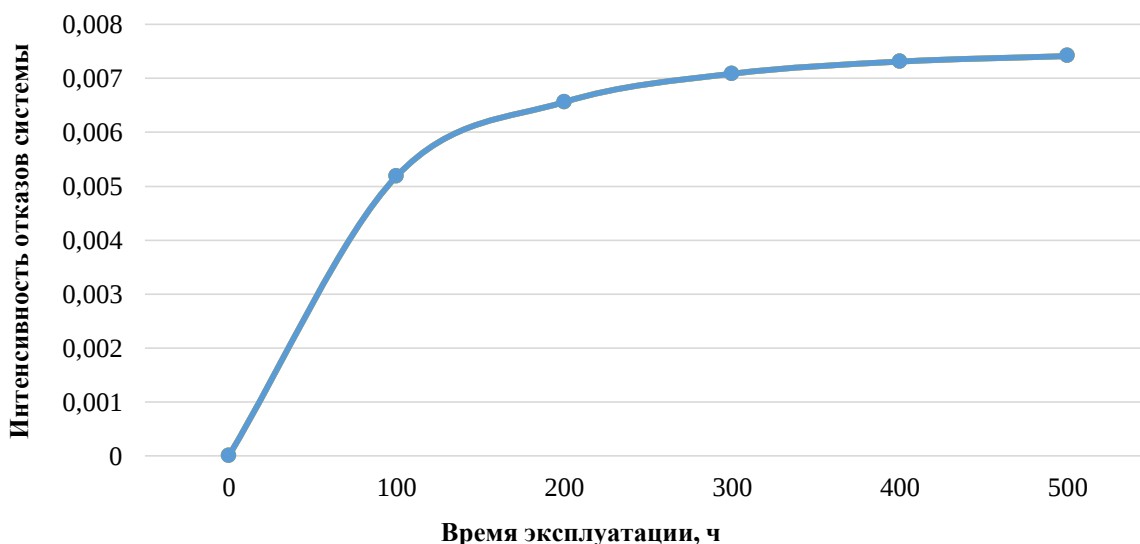


Рис. 1. Интенсивность отказов системы электроснабжения, состоящей из основной подсистемы и такой же резервной, находящейся в нагруженном режиме

Fig. 1. Failure rate of the power supply system including the main subsystem and the same backup system in the parallel mode

Разработанный программный комплекс предназначен для прогнозирования параметров электроснабжения. Расчет прогнозов осуществляется на следующих временных интервалах:

- краткосрочное прогнозирование с упреждением от 1 до 10–15 сут;
- среднесрочное прогнозирование с упреждением от 20 до 60 дней;
- долгосрочное прогнозирование до 1,5 лет.

На главном окне ПК два поля для выбора пути до файлов с исходными данными, а также путь для сохранения результатов прогнозирования, рис. 2.

Есть возможность выбора срока прогнозирования. В рамках первого прототипа реализован только краткосрочный прогноз.

При нажатии кнопки «Запустить» происходит запуск модуля прогнозирования и начинается обучение нейронной сети (см. рис. 2).

В качестве входных данных (статистической базы) заносится предыстория значений интенсивности отказов, наработка на отказ, коэффициенты простоя, рассчитанные при различных временных интервалах.

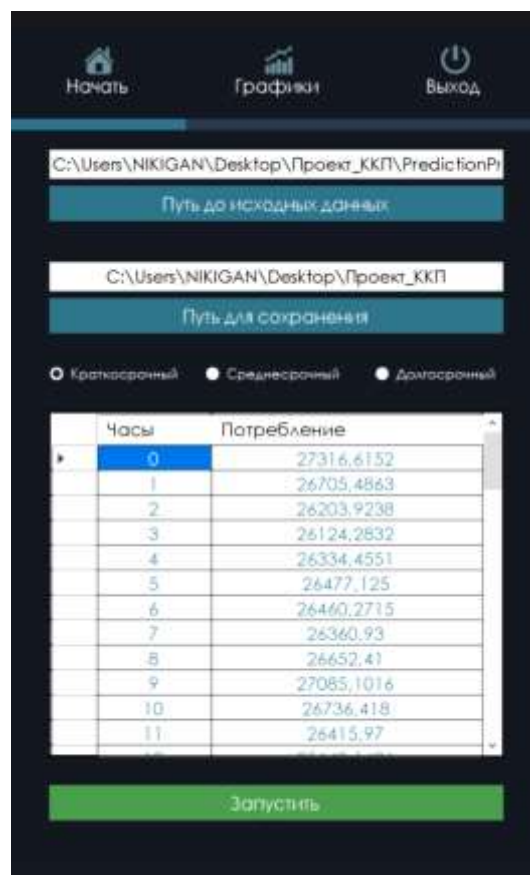


Рис. 2. Главное окно программного комплекса «Прогноз_ИНС_2020»

Fig. 2. The main window of Prognosis_INS_2020 software package

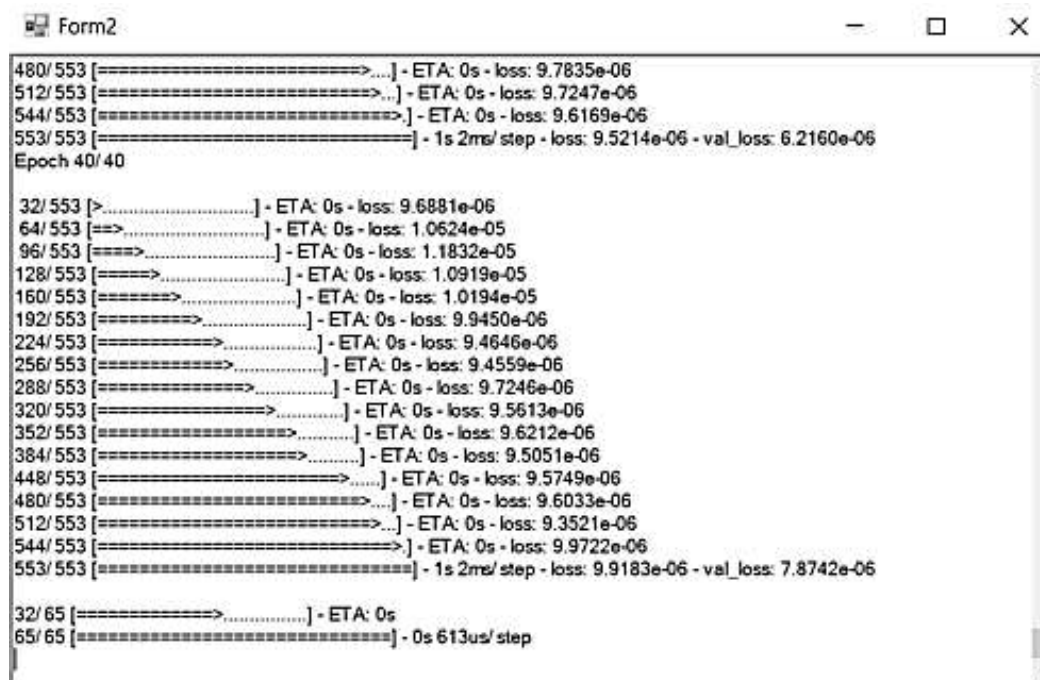


Рис. 3. Процесс обучения искусственной нейронной сети в рамках программного комплекса «Прогноз_ИНС_2020»
 Fig. 3. Training process of an artificial neural network within Prognoz_INS_2020 software package

После процесса обучения ИНС в рамках ПК «Прогноз_ИНС_2020» получается график прогноза (рис. 4).

Структура модуля синтеза нейронной се-

ти представляет многослойный персептрон.

Результаты расчета прогнозных значений ИНС с полученными традиционным способом значениями приведены в табл. 4.

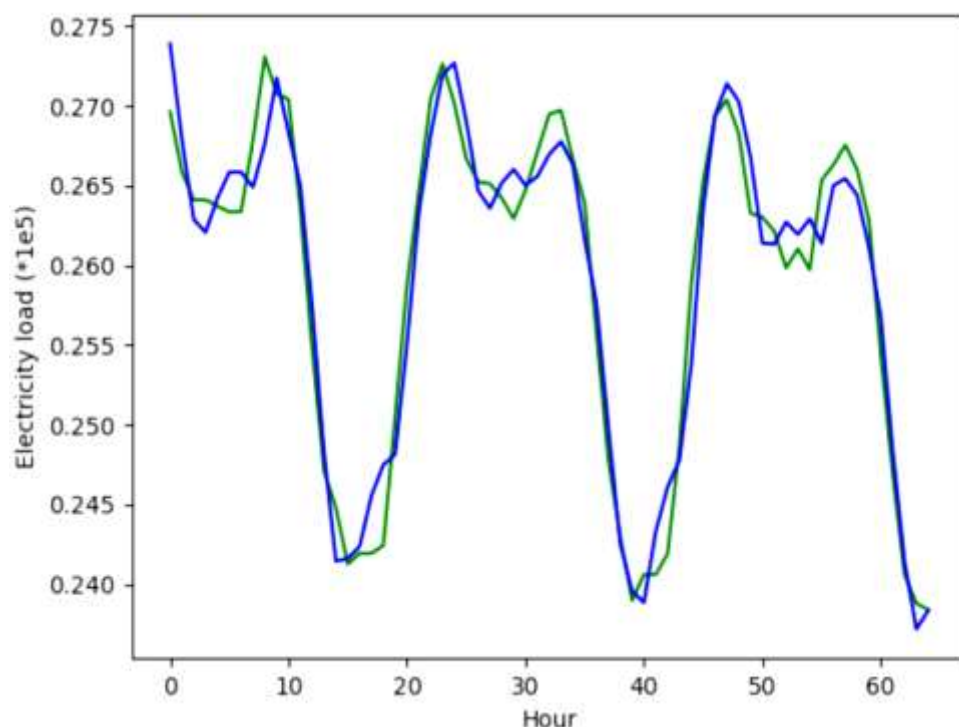


Рис. 4. График прогноза программного комплекса «Прогноз_ИНС_2020»
 Fig. 4. Forecast graph of Prognoz_INS_2020 software package



Таблица 4. Результаты расчета надежности системы электроснабжения традиционным методом и методом искусственных нейронных сетей

Table 4. Calculation results of power supply system reliability using a traditional method and a method of artificial neural networks

Значения	Расчет с применением программного комплекса «Прогноз_ИНС_2020»	Традиционный расчет: интенсивность отказа системы (см. табл. 3)	Погрешность, %
0	обучение	–	–
1	0,005210	0,005099	2,17
2	0,006482	0,006469	0,20
3	0,007008	0,006994	0,20
4	0,007104	0,007222	1,63
5	0,007247	0,007326	1,08

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При сравнении значения наработки СЭС до отказа (T_c) очевидно, что наработка до отказа из основной и такой же резервной подсистемы, находящейся в ненагруженном режиме с абсолютно надежным переключателем, составляет 269,62 ч, что значительно выше наработки до отказа системы, состоящей из основной и такой же резервной подсистемы, находящейся в нагруженном режиме, составляет 202,21 ч, что говорит о более высокой степени надежности применения СЭС, состоящей из основной и такой же резервной подсистемы, находящейся в ненагруженном режиме с абсолютно надежным переключателем.

2. Дано описание разработанного программного комплекса «Прогноз_ИНС_2020» и

выполнен сравнительный анализ результатов экспериментальных исследований и теоретических расчетов с помощью данного ПК надежности СЭС, который показал, что погрешность в полученных значениях не превышает 2,17%.

3. При наличии информации о состоянии электрооборудования СЭС появляется возможность выработать рекомендации по режимам работы, эксплуатации и загрузке оборудования без ущерба для их функционирования.

4. Применение модели прогнозирования на основе ИНС позволяет обработать большой объем информации, на основании которой можно сформировать оптимальные режимы работы системы электроснабжения.

Список литературы

1. Рыбаков В.В., Пешехонов Н.Е., Воронин А.Е. Актуальные проблемы учета требований к надежности электроэнергетической системы при построении системы электроснабжения специальных объектов // Известия Тульского государственного университета. 2018. Вып. 10. С. 392–398.
2. Malafeev A., Iuldasheva A. The structural reliability and adequacy assessment of the industrial electric power systems with local power plants // Machines. Technologies. Materials. 2018. Vol. 12. Iss. 4. P. 165–168.
3. Ayuev B.I., Davydov V.V., Erokhin P.M. Fast and reliable method of searching power system marginal states // IEEE Transactions on Power Systems. 2016. Vol. 31. No. 6. P. 4525–4533. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2538299>
4. Бык Ф.Л., Мышкина Л.С. Технологическая и эксплуатационная надежность системы электроснабжения // Надежность и безопасность энергетики. 2018. Т. 11. № 3. С. 200–207. <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2018-11-3-200-207>
5. Алейников Д.В. Разработка автоматизированной системы расчета надежности в моделях систем электроснабжения // Прикладная математика и фундаментальная информатика: IX Междунар. молодеж. науч.-практ. конф. с элементами научной школы, посвященная 80-летию со дня рождения академика РАН Ю.Г. Евтушенко (г. Омск, 23–30 апреля 2019 г.). Омск, 2019. С. 85–88.
6. Niwas R. Reliability analysis of a maintenance scheduling model under failure free warranty policy // Reliability: theory & applications. 2018. Vol. 13. No. 3. P. 49–65.
7. Ванин А.С. Определение расчетных состояний системы электроснабжения для анализа показателей надежности // Электричество. 2014. № 3. С. 11–18.
8. Urgun D., Singh C., Vittal V. Importance sampling using multilabel radial basis classification for composite power system reliability evaluation // IEEE Systems Journal. 2020. Vol. 14. Iss. 2. P. 2791–2800. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2019.2944131>
9. Ефимов А.Ю., Алехин А.О. Оценка надежности

электроснабжения потребителей первой и второй категории // Интеллектуальная электротехника. 2019. № 2. С. 74–84.

10. Latipov S.T., Aslanova G.N., Nematov L.A., Akhmedov A.A., Charieva M.R. Calculation of reliability indicators of power supply systems of consumers // Methodological problems in reliability study of large energy systems: E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 139. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913901037>

11. Rahmat M.K., Jovanovic S., Lo K.L. Reliability and availability modelling of uninterruptible power supply systems using Monte-Carlo simulation // International Review of Electrical Engineering. 2006. Vol. 1. No. 3. P. 374–380.

12. Володарский В.А. О расчете надежности систем из элементов нестареющего типа // Методы менеджмента качества. 2017. № 3. С. 50–55.

13. Mantilla-Florez B., Silva-Ortega J., Candelo-Becerra J. Fault effect analysis based on elements loadability to evaluate reliability in power systems // IEEE Latin America Transactions. 2018. Vol. 16. Iss. 10. P. 2649–2656. <https://doi.org/10.1109/TLA.2018.8795146>

14. Беляев Н.А., Егоров А.Е., Коровкин Н.В., Чудный В.С. Учет критерия балансовой надежности при оптимизации перспективной структуры энергосистемы // Надежность и безопасность энергетики. 2020. Т. 13. № 1. С. 11–16.

<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2020-13-1-11-16>

15. Tsumura T., Takeda T., Hirose K. A tool for calculating reliability of power supply for information and communication technology systems // INTELEC 2008 - 2008 IEEE

30th International Telecommunications Energy Conference (San Diego, 14–18 September 2008). San Diego: IEEE, 2008.

<https://doi.org/10.1109/INTLEC.2008.4664080>

16. Володарский В.А. Оценка параметров функций распределения при неполноте информации о постепенных отказах электрооборудования // Промышленная энергетика. 2019. № 8. С. 8–13.

17. Амузаде А.С., Танкович Т.И. Анализ показателей надежности систем электроснабжения // Ресурсосберегающие технологии сельского хозяйства: сб. науч. ст. Вып. 11 / под ред. Н.В. Кузьмина, В.А. Козлова, Н.М. Романченко. Красноярск: Изд-во КрасГАУ, 2019. С. 61–66.

18. Христинич Р.М., Луковенко А.С. Прогнозирование надежности и режимов работы тяговых трансформаторов в условиях предельной нагрузки // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 2. С. 130–136.

19. Карагодин В.В., Ревяков Б.А., Рыбаков Д.В. Подход к определению надежности систем электроснабжения // Труды военно-космической академии имени А.Ф. Можайского Вып. 663. СПб.: Изд-во Военно-космической акад. им. А.Ф. Можайского, 2018. С. 121–125.

20. Луковенко А.С. Повышение надежности работы оборудования электросетевого комплекса с применением нейросетевого моделирования // Электроэнергия. Передача и распределение. 2017. С. 23–30.

References

1. Rybakov VV, Peshehonov NE, Voronin AE. Actual Iss.s of accounting requirements the reliability of the electric energy system when building a power supply system special object. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta = Izvestiya Tula State University*. 2018;10:392–398. (In Russ.)

2. Malafeev A, Iuldasheva A. The structural reliability and adequacy assessment of the industrial electric power systems with local power plants. *Machines. Technologies. Materials*. 2018;12(4):165–168.

3. Ayuev BI, Davydov VV, Erokhin PM. Fast and reliable method of searching power system marginal states. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2016;31(6):4525–4533. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2538299>

4. Byk FL, Myshkina LS. Technological and operational reliability of power supply system. *Nadezhnost i bezopasnost energetiki = Safety and Reliability of Power Industry*. 2018;11(3):200–207. (In Russ.)

<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2018-11-3-200-207>

5. Aleynikov DV. Development of automated reliability calculation system in models of power supply systems. *Prikladnaya matematika i fundamental'naya informatika: IX Mezhdunarodnaya molodezhnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya s elementami nauchnoj shkoly, posvyashchennaya 80-letiyu so dnya rozhdeniya akademika RAN Yu.G. Evtushenko = Applied Mathematics and Fundamental Informatics: IX International youth*

scientific and practical conference with the elements of a scientific school dedicated to the 80th birth anniversary of the Academician RAS Yu.G. Evtushenko. 23–30 April 2019, Omsk. Omsk; 2019, p. 85–88. (In Russ.)

6. Niwas R. Reliability analysis of a maintenance scheduling model under failure free warranty policy. *Reliability: theory & applications*. 2018;13(3):49–65.

7. Vanin AS. Determination of the calculated states of the power supply system for the reliability indicator analysis. *Elektrichestvo*. 2014;3:11–18. (In Russ.)

8. Urgun D, Singh C, Vittal V. Importance sampling using multilabel radial basis classification for composite power system reliability evaluation. *IEEE Systems Journal*. 2020;14(2):2791–2800.

<https://doi.org/10.1109/JSYST.2019.2944131>

9. Efimov AYU, Alehin AO. Assessment of reliability of power supply consumers of the first and second category. *Intellektual'naya elektrotehnika = Smart Electrical Engineering*. 2019;2:74–84. (In Russ.)

10. Latipov ST, Aslanova GN, Nematov LA, Akhmedov AA, Charieva MR. Calculation of reliability indicators of power supply systems of consumers. In: *Methodological problems in reliability study of large energy systems: E3S Web of Conferences*. 2019;139. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913901037>

11. Rahmat MK, Jovanovic S, Lo KL. Reliability and availability modelling of uninterruptible power supply systems



using Monte-Carlo simulation. *International Review of Electrical Engineering*. 2006;1(3):374–380.

12. Volodarskii VA. On calculation of reliability of systems from non-ageing elements. *Metody menedzhmenta kachestva = Methods of quality management*. 2017;3:50–55. (In Russ.)

13. Mantilla-Florez B, Silva-Ortega J, Candelo-Becerra J. Fault effect analysis based on elements loadability to evaluate reliability in power systems. In: *IEEE Latin America Transactions*. 2018;16(10):2649–2656. <https://doi.org/10.1109/TLA.2018.8795146>

14. Belyaev NA, Egorov AE, Korovkin NV, Chudnyj VS. Consideration of capacity adequacy criterion in optimizing the prospective structure of electric power system. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry*. 2020;13(1):11–16. <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2020-13-1-11-16>

15. Tsumura T, Takeda T, Hirose K. A tool for calculating reliability of power supply for information and communication technology systems. In: *INTELEC 2008 - 2008 IEEE 30th International Telecommunications Energy Conference*. 14–18 September 2008, San Diego. San Diego: IEEE; 2008. <https://doi.org/10.1109/INTLEC.2008.4664080>

16. Volodarskii VA. Estimation of distribution function pa-

rameters with incompleteness of information on gradual failures of electrical equipment. *Promyshlennaya energetika*. 2019;8:8–13. (In Russ.)

17. Amuzade AS, Tankovich TI. In: NV Kuz'mina, VA Kozlova, NM Romanchenko (eds). Analysis of reliability indicators of power supply systems. *Resursosberegayushchie tekhnologii sel'skogo hozyajstva = Agricultural resource-saving technologies*. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Agrarian University; 2019, p. 61–66. (In Russ.)

18. Khristinich RM, Lukovenko AS. Power transformers reliability and mode of operation in the ultimate load prediction. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie = Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2015;2:130–136. (In Russ.)

19. Karagodin VV, Revyakov BA, Rybakov DV. An approach to determination of power supply system reliability. *Trudy voenno-kosmicheskoy akademii imeni A.F. Mozhajskogo = Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*. Saint-Petersburg: the Mozhaisky Military Space Academy. 2018, p. 121–125. (In Russ.)

20. Lukovenko AS. Improving reliability of the power grid complex equipment using neural network modeling. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie*. 2017;23–30. (In Russ.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Луковенко Антон Сергеевич,

кандидат технических наук,
электромонтер по обслуживанию ПС 220 кВ
Тайга – Центральная ГПС,
Красноярское предприятие МЭС Сибири, филиал
ПАО «ФСК ЕЭС»,
660111, г. Красноярск, ул. Пограничников,
105/5, Россия;
✉ e-mail: anlukov2.0@mail.ru

Зеньков Игорь Владимирович,

доктор технических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник,
Федеральный исследовательский центр
информационных и вычислительных технологий,
660049, г. Красноярск, пр. Мира, 53, Россия;
e-mail: zenkoviv@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 13.07.2020; одобрена после рецензирования 27.11.2020; принята к публикации 26.02.2021.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anton S. Lukovenko,

Cand. Sci. (Eng.),
Maintenance Electrician of 220 kV
Tayga Substation – Tsentralnaya Main Substation,
Krasnoyarsk enterprise MES Siberia Branch
of PJSC FGC UES
105/5, Pogranichnikov St., Krasnoyarsk 660111, Russia,
✉ e-mail: anlukov2.0@mail.ru

Igor V. Zenkov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Leading Researcher,
Federal Research Center for Information
and Computational Technologies,
53 Mira pr., Krasnoyarsk 660049, Russia,
e-mail: zenkoviv@mail.ru

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 13.07.2020; approved after reviewing 27.11.2020; accepted for publication 26.02.2021.



Характеристики энергетической безопасности децентрализованного района и автономного объекта электрификации

© Б.В. Лукутин*, В.Р. Киушкина**:*

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Инженерная школа энергетики, г. Томск, Россия

**«РЭА» Минэнерго России, г. Москва, Россия

***Научно-образовательный центр «Циркумполярная Чукотка», Чукотский
филиал Северо-Восточного федерального университета, г. Анадырь, Россия

Резюме: Цель – формирование группы объективных критериальных показателей оценки состояния энергетической безопасности децентрализованных удаленных районов севера и Арктических зон и автономных энергетических комплексов электроснабжения. Анализ возможностей возобновляемой энергетики, определяющей эффективность структуры децентрализованных энергетических комплексов с участием возобновляемых источников энергии, в изменении уровня их энергетической безопасности. Формирование индикативных показателей оценки энергетической безопасности объектов исследования проводилось на основе анализа соотношения максимально присущих угроз, территориальных и ситуативных факторов автономной энергетики севера и Арктических зон. На основе проведенного изучения состояния защищенности жизненно важных интересов объектов исследования были сформированы критериальные показатели территориального сегмента и автономного объекта электрификации, формирующих объективную оценку энергетической безопасности изолированных труднодоступных районов. Представлен анализ возможностей возобновляемых источников энергии в достижении отдельных позиций (ресурсной достаточности, экологической допустимости, технологической достижимости и надежности) энергетической безопасности рассматриваемого уровня. На основе проведенных исследований в качестве объектов индикативного анализа предложены группы свойств и процессов в территориальных рамках децентрализованного района, разнесенные по направлениям мониторинга энергетической безопасности локальных энергозон. Разделение совокупности сформированных критериальных показателей по уровням энергозоны и децентрализованного энергетического комплекса позволило учесть всю специфику данных объектов, охватить факторы взаимовлияния с сопутствующими системами в формировании состояния энергетической безопасности. При рассмотрении возможного варианта участия возобновляемых источников энергии в ресурсной и структурной обеспеченности автономного электроснабжения выяснено, что такая диверсификация отразится как на улучшении значений одних критериальных показателей энергетической безопасности исследуемого уровня, так и на ухудшении других.

Ключевые слова: энергетическая безопасность, уровень децентрализованной зоны, децентрализованные энергетические комплексы, детализация угроз, группа индикаторов, возобновляемые источники энергии

Для цитирования: Лукутин Б.В., Киушкина В.Р. Характеристики энергетической безопасности децентрализованного района и автономного объекта электрификации. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 1. С. 66–79. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-1-66-79>

The characteristics of energy security in decentralised zones and autonomous objects of electrification

Boris V. Lukutin*, Violetta R. Kiushkina**:*

*National Research Tomsk Polytechnic University,
School of Energy and Power Engineering, Tomsk, Russia

**Russian Energy Agency of the Ministry of Energy of the Russian Federation, Moscow, Russia

***Educational Scientific Centre Circumpolar Chukotka,
Chukotka Branch of the North-Eastern Federal University, Anadyr, Russia

Abstract: The article aims to develop a set of objective criteria for assessing the state of energy security in decentralised remote regions of the north, Arctic zones and autonomous energy supply complexes. The authors assessed the potential

of renewable energetics, which determines the effectiveness of decentralised energy complexes based on renewable energy sources, in improving the energy security of such entities. The indicators for assessing the energy security of research objects were developed on the basis of an analysis of the ratio of the most significant threats, as well as territorial and situational factors of the autonomous energy of the north and Arctic zones. A study of the security of the research objects allowed the development of a set of criteria for territorial segments and autonomous electrification objects, forming an objective assessment of the energy security of isolated hard-to-reach areas. An analysis of the possibilities of renewable energy sources in achieving certain positions (resource sufficiency, environmental acceptability, technological attainability and reliability) of the energy security of the considered level was conducted. Groups of properties and processes within the territorial framework of a decentralised region, separated by the directions of monitoring the energy security of local energy zones are proposed as objects of indicative analysis. The differentiation of the developed criteria by the levels of the energy zone and decentralised energy complex allowed consideration of all the specific features of these objects and cover the factors of mutual influence with accompanying systems in the formation of the state of energy security. When considering a possible option for the participation of renewable energy sources in the structural and resource provision of autonomous electricity supply, it was found that such diversification will affect both the improvement of some criteria of energy security of the considered level, as well as the deterioration of others.

Keywords: energy security, level of a decentralized zone, decentralized energy complexes, detailed description of threats, group of indicators, renewable energy sources

For citation: Lukutin BV, Kiushkina VR. The characteristics of energy security in decentralised zones and autonomous objects of electrification. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(1):66–79. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-1-66-79>

ВВЕДЕНИЕ

Анализ энергетической безопасности – мощный инструмент для формирования энергетической политики, которая позволит усовершенствовать энергетические системы любого уровня на основе принятия необходимых действий. Доктриной энергетической безопасности Российской Федерации установлено¹ понятие «энергетической безопасности» как состояния защищенности экономики и населения страны от угроз национальной безопасности в сфере энергетики, при котором обеспечивается выполнение предусмотренных законодательством РФ требований к топливо- и энергоснабжению потребителей.

Энергетическая безопасность как комплексное понятие, представленное в работах профессора В.В. Бушуева²⁻⁴ и ряде научных исследований [1–4], представляет собой совокупное обеспечение показателей ресурс-

ной достаточности, которая определяет физические возможности бездефицитного обеспечения энергоресурсами национальной экономики и населения; экономической доступности, определяющей рентабельность такого обеспечения при соответствующей конъюнктуре цен; экологической допустимости и технологической достижимости, характеризующей возможность добычи, производства и потребления энергоресурсов в существующих на каждом этапе технологий и экологических ограничений рамках, определяющих безопасность функционирования энергетических объектов.

Целью данной работы является формирование группы объективных критериальных показателей оценки состояния энергетической безопасности децентрализованных удаленных районов и автономных энергетических комплексов электроснабжения; анализ возможности возобновляемой энергетики,

¹Доктрина Энергетической безопасности Российской Федерации. Утв. Указом Президента Российской Федерации № 216 от 13.05.2019. [Электронный ресурс]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/14766> (12.03.2020).

²Бушуев В.В. Энергетическая безопасность как основной приоритет ЭС-2030: доклад // Энергетика и Стратегия национальной безопасности России: Круглый стол Комитета Госдумы по науке и наукоемким технологиям. М., 2010.

³Татаркин А.И., Куклин А.А., Мызин А.Л., Калина А.В. Комплексная методика диагностики энергетической безопасности территориальных образований Российской Федерации (вторая редакция). Ч. 1. Методические положения диагностики экономической безопасности территорий регионального уровня. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2002. 80 с.

⁴Энергетическая безопасность. Термины и определения / отв. ред. Н.И. Воропай. М.: Энергия, 2005. 60 с.

определяющей эффективность структуры децентрализованных энергетических комплексов с участием возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в изменении уровня их энергетической безопасности.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕРРИТОРИЙ СЕВЕРА И АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ

Энергетическая безопасность [5, 6] децентрализованных зон территорий Севера и Арктической зоны (АЗ) – уверенное состояние защищенности энергосозон от угроз, обусловленных инфраструктурной изоляцией территории расположения объекта электроснабжения, позволяющее обеспечить разумную диверсифицированность топливных ресурсов и структуры децентрализованных энергетических комплексов электроснабжения (ДЭКЭС) и благоприятные условия для функционирования и энергетической самодостаточности объектов локальной энергетики с поддержанием устойчивости иммунитета экосистем, с учетом суровых климатических условий длительного периода и абсолютно не допускающие наступления ситуации, граничащей с переходом к чрезвычайной при нарушении работы любых систем и подсистем энергохозяйства.

Обеспечение энергетической безопасности децентрализованных территорий Севера и АЗ является составляющей (рис. 1) региональной энергетической безопасности, комплексно характеризующей состояние энергообеспечения потребителей на территории субъекта или федеральных округов Российской Федерации [7, 8].

Обеспечение энергетической безопасности (ЭнБ) является обязательным требованием для любого уровня энергохозяйства, начиная от отдельного объекта. На территории децентрализованного района состояние энергетической безопасности формируют ДЭКЭС в совокупности с взаимосвязано сопутствующими системами (топливо-логистической цепи, экологической и экономической обеспеченности, доступности электрической энергии, природно-ресурсной ориентации, эксплуатационной надежности).

ДЭКЭС, являясь критически важными объектами изолированных территорий Севера, нарушение работы которых приведет к снижению безопасности жизнедеятельности населения и защищенности жизненно важных интересов децентрализованного района, жестко обуславливают требование к обеспечению индивидуальной энергетической безопасности.

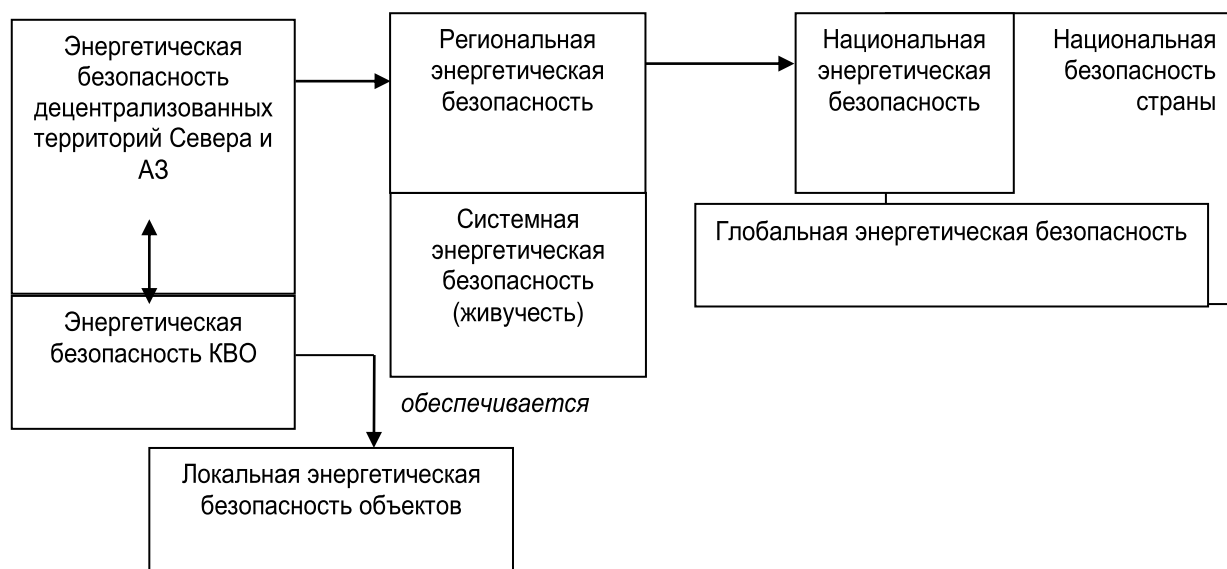


Рис. 1. Энергетическая безопасность децентрализованных энергетических комплексов электроснабжения в структуре отдельных уровней понятий

Fig. 1. Energy security of decentralized power supply systems in the structure of individual level concepts

Энергетическая безопасность ДЭКЭС (автономной системы электроснабжения) – необходимое и достаточное условие надежного и устойчивого электроснабжения инфраструктурно изолированных объектов труднодоступных территорий и состояние достаточной защищенности при функционировании (выполнении своих главных хозяйственных функций) и развитии в условиях высокой уязвимости и восприимчивости к угрозам и степени критичности рисков их воздействий.

Сущность ЭНБ как энергетической категории – защита энергетического благополучия децентрализованных энергозон, устойчивое сохранение жизнедеятельности изолированных территорий Севера и Арктических зон, самобытной культуры, комфортной среды проживания поселений через обеспечение всех составляющих и производных совокупности процессов функционирования энергетических хозяйств.

Исходя из 14 основных направлений обеспечения энергетической безопасности, обозначенных в Документе стратегического планирования в сфере обеспечения национальной безопасности РФ – Доктрине энергетической безопасности, для децентрализованных территорий можно выделить области, касающиеся надежного и устойчивого обеспечения потребителей энергоресурсами стандартного качества и услугами в сфере энергетики, технической доступности инфраструктуры ТЭК для различных групп потребителей.

Анализ состояния защищенности значимых интересов децентрализованных энергозон и существенных характеристических аспектов ДЭКЭС территорий Севера и АЗ позволяет формировать совокупности объективных показателей системы обеспечения их энергетической безопасности.

Предметом ЭНБ децентрализованных энергозон является процесс оперативного мониторинга состояния показателей функционирования, развития и своевременного прогнозирования их позиций в социально-экономическом эффекте и экологических ориентирах через заданные формы реагирования на: изменение состояния показателей в худшую сторону; предпосылки наступления

негативных ситуаций; естественно сложившиеся риски возникновения угроз; вероятность возникновения негативных воздействий; вероятность приближения к чрезвычайной ситуации; наличие реальных опасностей и последствия уже проявившихся.

Соответственно, для создания системы обеспечения ЭНБ, приоритетом в которой являются меры мониторинга состояния и возможных угроз ЭНБ, должна быть сформирована система объективных показателей на основе сбора большого массива данных и анализа состояния защищенности жизненно важных интересов децентрализованной энергозоны и расположенных в ней объектов энергообеспечения.

СОВОКУПНОСТЬ ФАКТОРОВ И УСЛОВИЙ В ФОРМИРОВАНИИ КРИТЕРИАЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Для решения задачи сформирована модель детализации отдельных локальных индикативных показателей для типовых зон децентрализованного электроснабжения Северных регионов. Классификация соотношений максимально присущих угроз и условий (1–7) (рис. 2), а также территориальных и ситуативных факторов автономной энергетики (Т1–Т3/А1–А3) [5] в схеме уточненного перечня индикаторов характеризует обоснование выделенных групп (рис. 3).

Совокупность реальных и потенциальных угроз энергетической безопасности децентрализованных энергозон составляют природные, внутриэкономические и внешнеэкономические для зоны, социальные, управленческо-правовые. Их источниками являются неблагоприятные сочетания сложившихся условий существования территорий, отражающиеся на внутренней среде энергохозяйства [5, 9]. Сама специфика такого совмещения имеет потенциал к порождению рисков с ярко выраженными факторами: риски несвоевременных поставок топливных ресурсов к ДЭКЭС (изучены факторы сбоев в логистических операциях при климатических проявлениях и воздействиях природных угроз, нарушения доступности транспортной инфраструктуры и т.п.); технические риски (изучены факторы технического несовершенства

оборудования, высокой деградации оборудования основных производственных фондов (ОПФ) ДЭКЭС, нарушения требований эксплуатации низкоквалифицированным персоналом, миграции трудоспособного населения и т.д.); риски неэффективной работы ДЭКЭС (изучены факторы нерациональной структуры, повышенного удельного потребления топливных энергоресурсов, высокой разнотипности оборудования, несвоевременности обслуживания при ограниченной доступности территориально-транспортной инфраструктуры и т.д.).

Группы индикативного перечня (рис. 3) представлены в виде связанных показателей внутри множеств «обеспечения характеристик», объединяющих определенные характеристики отраслевых аспектов

энергетической безопасности.

Совокупность факторов и условий функционирования децентрализованных энергозон обусловлена причинами, сложившимися в силу исторического освоения территорий, особенностями их географического расположения, неэффективностью региональной политики, слабостью механизмов реализации энергосберегающей политики, сниженного внимания к их развитию в прошлые годы, накоплением проблем и нереализованных мероприятий, обозначенных в планах осуществления стратегий развития и др. Неэффективность использования топливно-энергетических ресурсов сопровождается критической зависимостью от условий их транспортировки, возможностью ограничений, неприемлемыми тарифами.

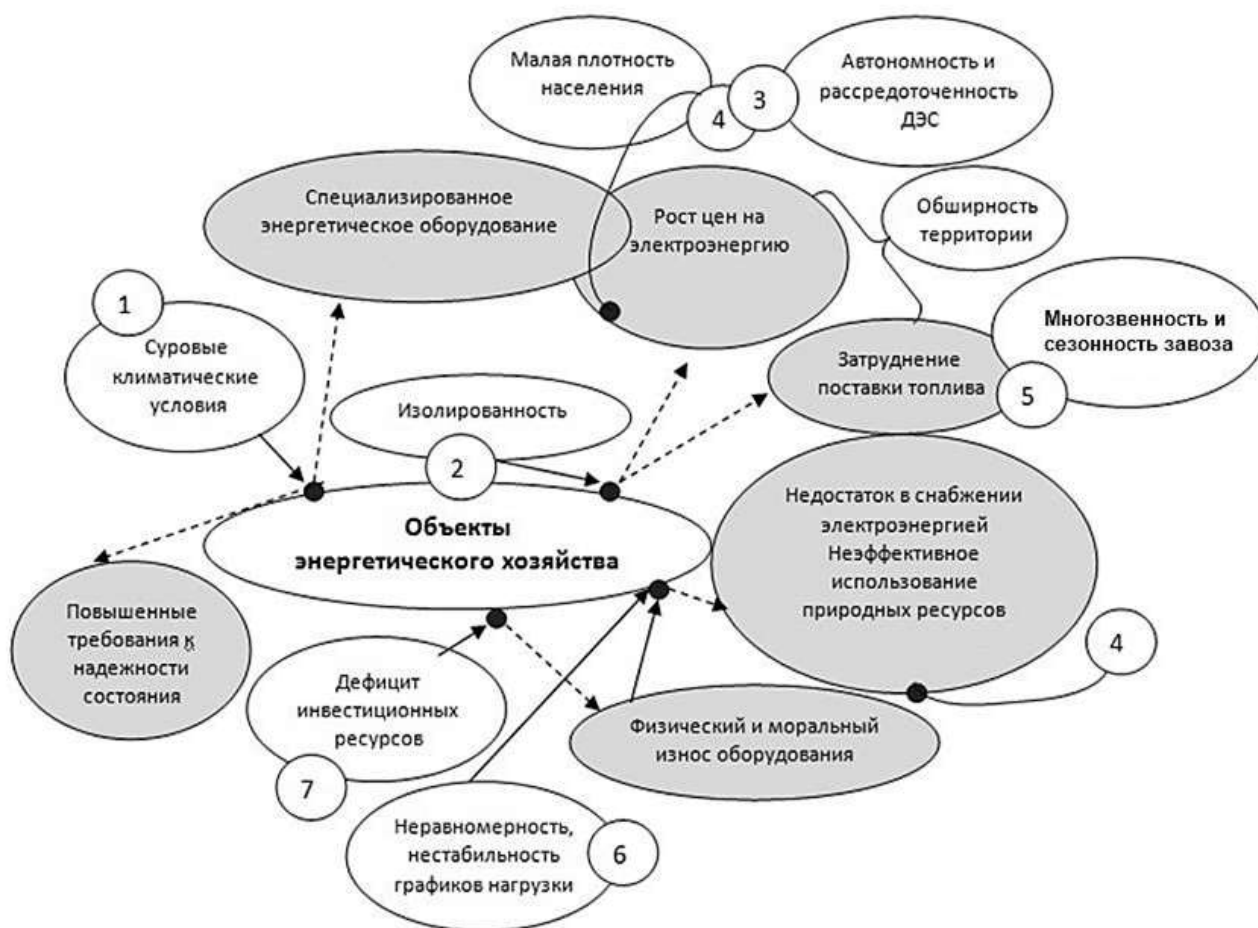


Рис. 2. Схема максимально проявляющихся факторов угроз в северных децентрализованных районах

Fig. 2. Diagram of the top threats in the northern decentralized areas

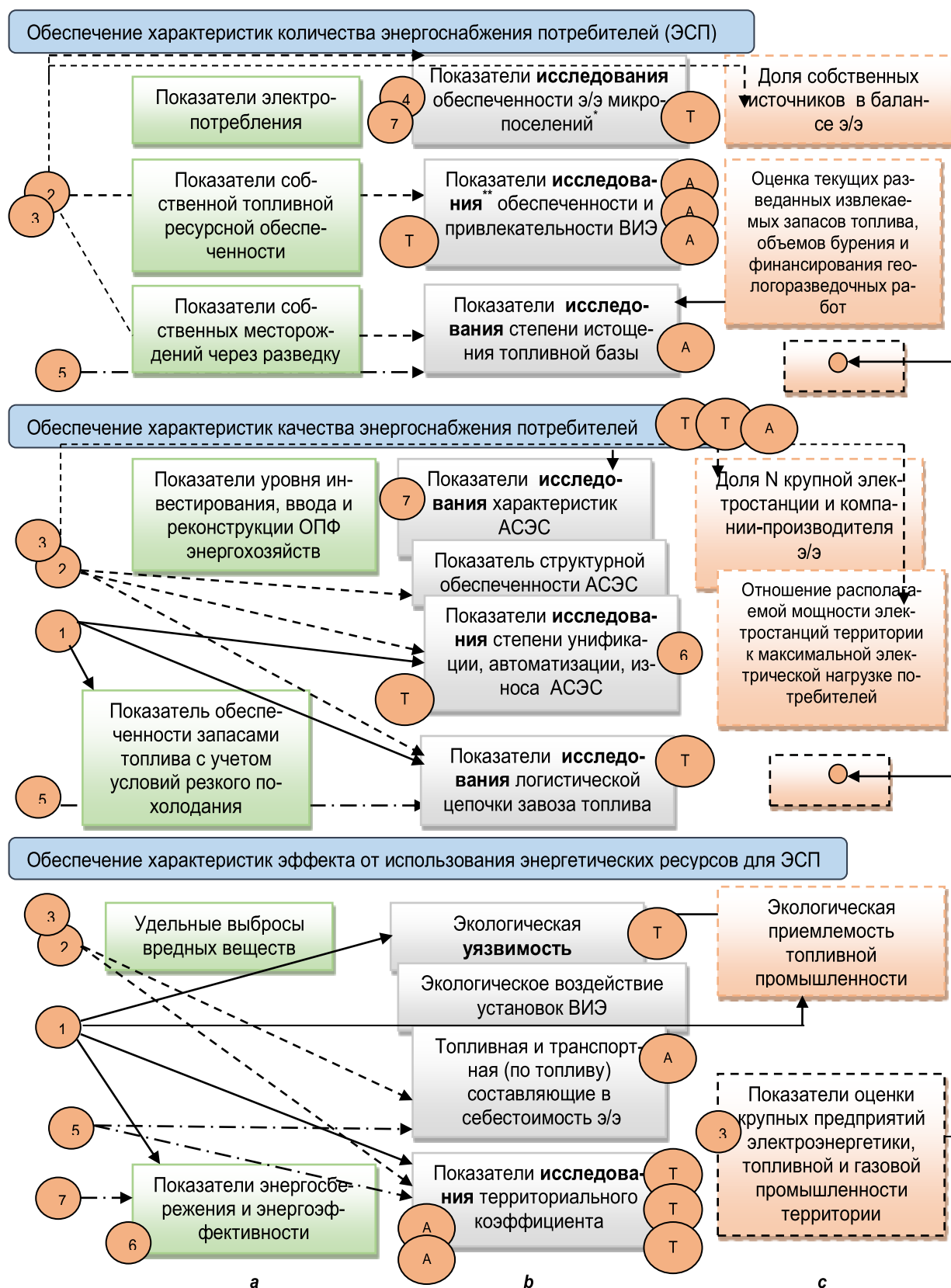


Рис. 3. Обобщенная схема показателей (а – сохраненных в перечне, б – введенных в перечень, с – исключенных из перечня) в конъюнктивном множестве условий децентрализации и территориальных особенностей

Fig. 3. A generalized diagram of indicators (a – saved in the list, b – included in the list, c – excluded from the list) in the conjunctive set of decentralization conditions and regional features

Примечание: в рис. 3 э/э – электроэнергия.



Источниками локальных рисков возникновения угроз ЭНБ децентрализованных энергозон в группе территориальных факторов (как специфических особенностей географического положения) выделены: (Т1) – экстремальные природно-климатические условия, зона вечной мерзлоты, высокочувствительность экосистем с низкой рекреационной возможностью; (Т2) – очаговый характер расселения и низкая плотность населения, самобытность и исторически сложившийся уклад жизнедеятельности; (Т3) – периферийное положение, зоны ограниченной доступности, сложность логистической цепи, неразвитость территориально-транспортной инфраструктуры.

В группе ситуативных факторов автономной энергетики выделены: (А1) – инфраструктурная изоляция – нерациональная структура генерирующих мощностей – основная доля в генерации – дизельные электростанции (ДЭС) – высокий износ ОПФ – низкий квалификационный уровень персонала; (А2) – высокая себестоимость производства электроэнергии – высокая транспортная топливная составляющая; (А3) – низкая платежеспособность населения.

Такая совокупность факторов с учетом труднодоступности, изолированности и суровости природных условий как угроза энергетической безопасности децентрализованных энергозон создает высокую уязвимость их благополучному состоянию.

Степень рисков даже в системе благоприятных значений показателей хоть и незначительна, но будет иметь место, так как исследуемые энергозоны не имеют должной способности «сопротивляться» воздействиям угроз природного или территориального характера, которые априори будут на них воздействовать.

«Группа А» представляет собой совокупность показателей, принятых в оценке ЭНБ по существующим методикам, не противоречащих приемлемости применения к специфике децентрализованных систем электроснабжения в условиях инфраструктурной изоляции, удаленности и суровости климатических условий. Отдельные индикаторы в данной группе показателей скорректированы,

внесены в состав единичных индикаторов и адаптированы к оценке децентрализованных районов и ДЭКЭС.

В ходе исследования сформирована «группа показателей Б», которая характеризует особенности и индивидуальные свойства исследуемых систем. Они подлежат учету в оценке уровня и состава угроз ЭНБ, максимально присущих исследуемым территориям и объектам. Включены индикаторы, затрагивающие одни из слабых и сложных кластеров в энергообеспечении инфраструктуры таких территорий.

Отдельная группа индикаторов посвящена оценке ключевых характеристик ДЭКЭС / автономных систем электроснабжения (АСЭС). В перечне введенных индикаторов представлена группа, отражающая направления, характеризующие степень социальной и экономической оправданности комплексного развития локального кластера и т.д.

Исключенные из перечня индикаторы «группы С» характеризуют показатели объектов крупной топливной промышленности и электроэнергетики либо не соответствуют сущности децентрализованных энергозон.

ИНДИКАТИВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ В СОСТАВЕ РЕГИОНАЛЬНОГО УРОВНЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Индикативный анализ энергетической безопасности выполняется по нескольким индикативным блокам, причем отдельные из них, как и единичные индикаторы других, имеют экономический характер [2, 6, 10–12].

Измерения энергетической безопасности включают количественные и качественные характеристики энергетической безопасности, характеризующие как ее традиционные проблемы, так и многие новые факторы, такие как социокультурные и технологические, экологической устойчивости и энергоэффективности. Это расширяет объем энергетической безопасности.

Исследования в области энергетической безопасности должны быть четко концептуализированы во взаимосвязи с уровнями ее рассмотрения, многоуровневым воздействием угроз и изменяющимися акцентами на те-

кущие аспекты устойчивого развития территорий. Соответственно, это должно вести к всестороннему методологическому усовершенствованию инструментов оценки и мониторинга состояния энергетической безопасности, разработке точных и надежных инструментов поддержки принятия управленческих решений и развитию энергетической политики, обеспечивающей внутреннюю согласованность [8, 13].

Показатели множеств, представленных на схеме рис. 2, выделяют индикаторы для диагностики энергетической безопасности уровня децентрализованной энергозоны (ее подсистем, сопутствующих систем, объектов и потребителей энергоресурсов), структурированные по направлениям текущего и перспективного состояния территории по энергетической безопасности:

1. Обеспеченность электрической энергией в оптимальном распределении электропотребления децентрализованной территории:

- коэффициент обеспеченности электрической энергией;
- уровень электропотребления в оценке Н-распределения, кВт·ч/год;
- душевое электропотребление в КБХ, кВт·ч/год.

2. Топливо-энергетическая (ресурсная) обеспеченность децентрализованной территории:

- доля доминирующего ресурса в общем потреблении топлива, %;
- возможность обеспечения потребности в топливных ресурсах из собственных источников, %;
- возможность обеспечения производства электроэнергии ресурсами ВИЭ, % / коэффициент обеспеченности ВИЭ;
- обеспеченность текущими разведанными извлекаемыми запасами и прогнозными ресурсами (достигнутая степень освоенности месторождений) при целенаправленности на собственное использование.

3. Региональное развитие электроэнергетики децентрализованной территории:

- темп совершенствования систем электроснабжения децентрализованных потребителей (в целесообразных вариантах);
- возможность и уровень развития сете-

вой инфраструктуры (подключение к системе централизованного электроснабжения);

- возможность и уровень объединения разрозненных АСЭС в крупные энергоузлы;
 - возможность и уровень реализации проектов сжиженного природного газа, атомных электростанций малой мощности и иных электростанций;
 - возможность и уровень газификации населенных пунктов;
 - коэффициент привлекательности ВИЭ;
 - уровень роста объемов инвестирования в энергохозяйства / соответствие объемов инвестирования технологическому и техническому состоянию энергохозяйств;
 - доступность генерирующих установок на основе ВИЭ в себестоимости производимой электроэнергии;
 - темп роста доли энергосберегающих технологий в производстве электро- и теплоэнергии на объектах ТЭК;
 - уровень снижения затрат на производство 1 кВт·ч электроэнергии;
 - уровень снижения доли топливной составляющей (привозного ресурса) в себестоимости производства электроэнергии;
 - уровень доступности территориально-транспортной инфраструктуры / характеристический показатель логистической цепи поставок топливных ресурсов;
 - территориальный коэффициент социально-экономической оправданности комплексного развития;
 - относительное изменение величины удельной энергоемкости ВРП [14, 17], %;
 - доля реализации мероприятий по достижению целевых показателей стратегических приоритетов региональной политики (энергетического фактора) / выполнение инвестиционных программ для развития энергетики децентрализованных энергозон.
4. Социально-экономическая (кадровая) обеспеченность децентрализованной территории:
- уровень укомплектованности инженерными и техническими кадрами объектов АСЭС;
 - кадровая потребность для энергохозяйств АСЭС / возможность обеспечения кадровой потребности местными учебными



заведениями разного уровня.

5. Обеспеченность сохранения экологического иммунитета:

- уровень выбросов загрязняющих веществ в атмосферу и водные пространства;
- уровень рекультивации земель от нарушений деятельностью ДЭКЭС;
- доля снижения экологических нарушений за счет внедрения ВИЭ;
- соотношение показателей экологического следа от установок традиционного типа и на основе ВИЭ.

Представленный перечень индикативных показателей явно показывает заметное влияние экономических факторов (в рамках анализа энергетической безопасности) на ситуативную оценку и воздействие на формирование состояния децентрализованных территорий рассматриваемого типа.

Действие экономических угроз весьма существенно проявляется в совокупности показателей работы систем энергетики, которые непосредственно представляют технические и технологические факторы энергетических комплексов и систем территории.

Ниже предлагается совокупность индикаторов энергетической безопасности ДЭКЭС, позволяющая достаточно полно оценить параметры и показатели развития и функционирования ДЭКЭС, характеризующие состав и глубину реализации потенциальных угроз в территориальных рамках децентрализованного района. В интегральной оценке энергетической безопасности децентрализованной территории они входят в индикативную группу блоков надежности топливо- и энергоснабжения, состояния ОПФ и энергоэффективности ДЭКЭС энергозоны:

1. Видовая диверсифицированность генерирующих источников ДЭКЭС/ уровень диверсифицированности структуры ДЭКЭС (ДЭС, ВИЭ, иные генерирующие источники):

– коэффициент структурной обеспеченности АСЭС (в том числе рациональность соотношения числа и мощности резервных и рабочих агрегатов ДЭС, рациональность соотношения установленных мощностей ДЭС и ВИЭ, возможность работы энергоустановок ВИЭ в автономном режиме).

2. Степень автоматизации и дистанцион-

ного управления АСЭС (в соотношении с дополнительными параметрами, включая скорости реакции на аварию):

– обеспеченность квалифицированным эксплуатационным персоналом АСЭС, %.

3. Степень износа генерирующего оборудования и электросетевого хозяйства АСЭС, %:

- уровень унификации генерирующего оборудования АСЭС (по видам оборудования);
- доля оборудования отечественного производства в составе ОПФ ДЭКЭС (оценка уровня импортозамещения).

4. Отношение среднегодового ввода установленной мощности и технического перевооружения АСЭС за последние 5 лет к установленной мощности, %:

– объем резервуарного парка ДЭС в соответствии с нормативным показателем обеспеченности запасами топливных ресурсов / уровень обеспеченности топлиохранилищ емкостями удовлетворительного состояния;

– уровень потенциальной обеспеченности спроса на ТЭР в условиях резкого похолодания, %.

5. Удельный расход условного топлива на производство электроэнергии АСЭС децентрализованной зоны, г у.т./кВт·ч:

– доля объема электроэнергии, вырабатываемой энергоэффективным электрооборудованием, в том числе ВИЭ;

– доля объема производимой электроэнергии установками на основе ВИЭ к потенциальной доле возможного объема производства электроэнергии на основе ВИЭ в общем производстве электрической энергии;

– коэффициент использования установленной мощности генерирующих установок, в том числе на основе ВИЭ;

– собственные нужды и относительная величина потерь электроэнергии в электрических сетях, %.

6. Уровень снижения количества аварийных ситуаций при электроснабжении на источниках электроснабжения и в электрических сетях, %:

– динамика снижения количества аварийных ситуаций, вызванных ошибками персонала (оценка компетентности кадрового персонала);

– динамика снижения количества аварийных ситуаций, возникших вследствие природно-климатических факторов.

Показатель видовой диверсифицированности генерирующих источников является установочным в оценке структуры ДЭКЭС с позиции отражения начальных условий обеспечения живучести автономных систем в оценке энергетической безопасности.

Электрификация автономных объектов сегодня наряду с дизельными электростанциями осуществляется ветро- и фотодизельными системами, позволяющими улучшить технико-экономические характеристики автономной системы электроснабжения и повысить энергетическую безопасность электрифицируемого объекта.

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ НА ПОКАЗАТЕЛИ ОЦЕНКИ В СОСТАВЕ РЕГИОНАЛЬНОГО УРОВНЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Установление критериев оптимизации, определяющих эффективность структуры в повышении уровня энергетической безопасности ДЭКЭС, целесообразнее реализовать через схемные решения. Рассмотрим решения с участием возобновляемых источников энергии.

Возобновляемая энергетика в силу объективных причин позволяет повысить отдельные индикативные показатели энергетической безопасности – в первую очередь ДЭКЭС. Основные преимущества ВИЭ в рассматриваемом аспекте состоят в возможности снижения топливной зависимости ДЭКЭС, снижения количества и тяжести аварийных ситуаций за счет более высокой надежности генерирующего оборудования ВИЭ по сравнению с дизельными генераторами. Известными недостатками ВИЭ являются изменчивость их энергетического потенциала и дороговизна оборудования (несмотря на устойчивый тренд удешевления). При этом рассмотрение различных сценариев участия ВИЭ в рамках энергетического перехода показывает возможность определения оптимальных моделей по стоимости, оптимального и целесообразного сочетания энергетических технологий, эффективных вариантов оптими-

зации энергетических комплексов [16–21].

Таким образом, возобновляемая энергетика на сегодня обладает реальными возможностями повышения энергетической безопасности удаленных дизельных ДЭКЭС экономически оправданными средствами. Экономическая целесообразность может быть достигнута за счет экономии средств на топливообеспечение дизельной электростанции.

Интеграция энергоустановок возобновляемой энергетикой в дизельный ДЭКЭС может осуществляться на принципах совместной или независимой работы, дизельной и возобновляемой частей генерирующих энергоустановок. В качестве энергоустановок возобновляемой энергетикой чаще всего используются наиболее универсальные ветро- и фотоэлектрические станции.

Следует отметить, что при построении фото- или ветродизельных ДЭКЭС установленная мощность дизельной части гибридной электростанции по соображениям энергетической безопасности не изменяется. Следовательно, суммарная установленная мощность и, соответственно, стоимость энергетического оборудования гибридного ДЭКЭС возрастают, однако количество необходимой электроэнергии для автономной системы электроснабжения не изменяется. Это приводит к изменению количественных характеристик индикаторов энергетической безопасности ДЭКЭС, затрагивающих сферу управления развитием энергохозяйства децентрализованной энергозоны.

Принципы взаимодействия дизельной и возобновляемой частей энергокомплекса напрямую связаны с характеристиками его энергетической безопасности. В частности, параллельная работа фото- или ветроэлектростанций на автономную дизельную систему электроснабжения не обеспечивает их независимую работу на потребителя при отказе ДЭС, что не позволяет рассматривать энергоустановки ВИЭ как дополнительные независимые энергоисточники и повысить соответствующие характеристики энергетической безопасности гибридной ДЭКЭС. Режим раздельной работы дизельной и возобновляемой частей генерирующих энергоустановок предусматривает накопители электроэнергии



в составе фото- и ветроэлектростанций, что позволяет с некоторыми ограничениями рассматривать их в качестве дополнительных источников электропитания, способствующих повышению соответствующих характеристик энергетической безопасности ДЭКЭС в важнейшем направлении оценки живучести энергетических комплексов.

Упомянутые ограничения связаны с нестабильностью возобновляемого энергоресурса и с ограниченным запасом электроэнергии в аккумулирующих системах. Для достижения большей стабильности первичных возобновляемых энергоносителей – ветра и солнца – перспективно построение гибридных ДЭКЭС с генерацией трех видов: ветроэлектрической, фотоэлектрической и дизельной (или другой топливной). Разные функции распределения во времени энергетического потенциала ветра и инсоляции обеспечивают большую суммарную стабильность первичных энергоносителей и позволяют с большей достоверностью рассматривать независимую ветро-солнечную составляющую гибридной генерации с системой аккумулирования электроэнергии основным энергоисточником, отводя ДЭС роль вспомогательного, обеспечивающего заряд аккумуляторов при временном недостатке возобновляемых энергоресурсов. Очевидно, что такая ДЭКЭС характеризуется минимальным потреблением топлива и, если этот показатель имеет приоритетный ранг, то, несмотря на высокую стоимость оборудования, эта схема позволяет максимально улучшить показатели энергетической безопасности, связанные с топливообеспечением.

Несомненно, при рассмотрении диверсификации ресурсной обеспеченности и структуры автономного электроснабжения как одного из решений в задачах обеспечения энергетической безопасности, более детальному анализу подлежит индикативный показатель коэффициента привлекательности ВИЭ, который в алгоритме своего определения содержит и модули критериального сравнения с местными ресурсами и направлениями развития иных энергоресурсов.

Необходимо отметить, что все чаще возобновляемые источники энергии стали обо-

значаться в контексте с вопросами содействия устойчивому экономическому и социальному развитию со стороны обеспечения энергетической безопасности стран и региональных объединений [22, 23].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Специфика, факторы и условия функционирования ДЭКЭС и децентрализованных энергетических районов севера и Арктических зон как отдельный уровень энергетических систем требуют комплексного решения в обеспечении нормального состояния энергетической безопасности, для чего необходима разработка специальной методологии оценки. К оценке энергетической безопасности децентрализованных энергозон с ДЭКЭС предлагается концептуально иной подход с набором индикаторов, обеспечивающих системный и комплексный подходы энергобезопасности рассматриваемых объектов в территориальных рамках децентрализованной зоны. Это позволяет получить объективную оценку энергетической безопасности децентрализованного района и автономного объекта электрификации.

Предлагаемая методология позволяет анализировать существующие угрозы энергетической безопасности, идентифицировать риски, исключать принятие неверных и даже однобоких решений, в том числе в целевом распределении средств на обеспечение и повышение энергетической безопасности. Показана роль участия ВИЭ в достижении отдельных позиций энергетической безопасности. В зависимости от конфигурации и алгоритма взаимодействия энергоустановок ВИЭ и дизельной составляющей ДЭКЭС возможно как улучшение значений одних критериальных показателей энергетической безопасности, так и ухудшение других.

Показатели составляющих оценки региональной энергетической безопасности должны систематически подвергаться дополнительному анализу в силу возможного изменения характера угроз, а также пересекающимся изучением прямых и обратных связей энергетики с экономикой децентрализованной территории. Это послужит возможному пересмотру направленности мер и выбору

наиболее эффективных путей управления энергетической безопасностью изолированных труднодоступных территорий в соответствии с актуализацией задач стратегических направлений развития региона.

Для решения задач по достижению и обеспечению интегральных показателей энер-

гетической безопасности рассматриваемых территорий должны быть определены региональные пороговые уровни для значений отдельных индикаторов в соответствии с внутренними целями социально-экономического развития и показателями федерального уровня в целом и на уровне субъектов РФ.

Список литературы

1. Богатырев Л.Л., Бочегов А.В., Воропай Н.И. Надежность топливо- и энергоснабжения и живучесть систем энергетики регионов России / под науч. ред. Н.И. Воропая, А.И. Татаркина. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2003. 392 с.
2. Куклин А.А., Мызин А.Л., Богатырев Л.Л., Пыхов П.А., Денисов О.А., Ананичева С.С. [и др.]. Отраслевые и региональные проблемы формирования энергетической безопасности / под ред. А.А. Куклина, А.Л. Мызина. Екатеринбург: Изд-во Институт экономики УрО РАН, 2008. 384 с.
3. Савельев В.А. Методика оценки энергетической безопасности регионов на примере Ивановской области // Повышение эффективности работы энергосистем: Труды ИГЭУ. Вып. 5. / под ред. В.А. Шуина, М.Ш. Мисриханова. М.: Энергоатомиздат, 2002. 247 с.
4. Сендеров С.М. Анализ трансформации стратегических угроз энергетической безопасности России до 2030 г. и приоритетные направления мер по их нейтрализации // Энергосбережение и энергоэффективность – динамика развития: сб. тез. докл. VIII Междунар. конгр. СПб.: ООО FarEXPO, 2018. С. 7–11.
5. Kiushkina V., Lukutin B. Energy security of northern and arctic isolated territories // Regional Energy Policy of Asian Russia: E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 77. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20197701008>
6. Kiushkina V.R., Antonenkov D.V. Specifics of assessing energy security of isolated energy service areas in territories with harsh climatic conditions // International Journal of Energy Technology and Policy. 2019. Vol.15. No. 2/3. P. 236–253. <https://doi.org/10.1504/IJETP.2019.098971>
7. Бушуев В.В., Воропай Н.И. Энергетический фактор в структуре национальной безопасности России // Энергетическая политика. 2017. № 1. С. 12.
8. Киушкина В.Р., Реев С.Н. Региональные показатели оценки и риски энергетической безопасности децентрализованных энергозон Арктических территорий // Арктика-2020. Арктика: шельфовые проекты и устойчивое развитие регионов: сб. матер. V Междунар. конф. (г. Москва, 19–20 февраля 2020 г.). М.: Системный Консалтинг, 2020. С. 32–33.
9. Smirnova E., Senderov S. Energy security problems at the regional level: situation analysis and main trends // Regional Energy Policy of Asian Russia: E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 77. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20197701009>
10. Senderov S., Rabchuk V. On the system of key indicators for monitoring the compliance with requirements of the Russia's Energy Security Doctrine in terms of reliable fuel and energy supply to domestic consumers of energy resources // Methodological Problems in Reliability Study of Large Energy Systems: E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 139. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913901007>
11. Ang B.W., Choong W.L., Ng T.S. Energy security: definitions, dimensions and indexes // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015. Vol. 42. P. 1077–1093. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.064>
12. Vivoda V. Evaluating energy security in the Asia-Pacific region: A novel methodological approach // Energy Policy. 2010. Vol. 38. Iss. 9. P. 5258–5263. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.05.028>
13. Pasqualetti M.J., Sovacool B.K. The importance of scale to energy security // Journal of Integrative Environmental Sciences. 2012. Vol. 9. Iss. 3. P. 167–180. <https://doi.org/10.1080/1943815X.2012.691520>
14. Сендеров С.М., Рабчук В.И. Индикаторы оценки доктрины энергобезопасности России по надежности топливо- и энергоснабжения // Энергетическая политика. 2019. № 3. С. 86–95.
15. Skufina T., Baranov S., Samarina V. Modeling the Production of GRP Regions of the North of Russia // Smart Innovation, Systems and Technologies: The International Science and Technology Conference "FarEastCon". 2019. Vol. 139. P. 173–179. https://doi.org/10.1007/978-3-030-18553-4_22
16. Lukutin B., Kiushkina V. Intellectual energy security monitoring of decentralized systems of electricity with renewable energy sources // International Conference Green Energy and Smart Grids: E3S Web of Conferences. 2018. Vol. 69. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186902002>
17. Bogdanov D., Breyer C. North-East Asian super grid for 100% renewable energy supply: optimal mix of energy technologies for electricity, gas and heat supply options // Energy Conversion and Management. 2016. Vol. 112. P. 176–190. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.01.019>
18. Gordievsky E., Sirotkin E., Miroshnichenko A. Development of mobile power complex model on renewable energy sources for autonomous electrical supply of Russian Far Eastern region // Proceedings - 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon (Chelyabinsk, 1–3 October 2019). Chelyabinsk: IEEE, 2019. P. 148–153. <https://doi.org/10.1109/URALCON.2019.8877665>



19. Elistratov V., Kudryasheva I. Regimes, management and economics of energy complexes on the basis of renewable energy sources for autonomous power supply // International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems 2019: E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 124. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912404023>

20. Киушкина В.Р. Эффекты вовлечения ВИЭ в мониторинг состояния энергетической безопасности северных и арктических зон РФ // Энергетическая политика. 2018. № 4. С. 109–117.

21. Miroshnichenko A., Sirotkin E., Bodrova E. On the possibility to solve the problems of electrical power supply to autonomous consumers by using renewable energy sources // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (Vladivostok, 1–4

October 2019). Vladivostok: IEEE, 2019. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2019.8934390>

22. Wang Qiang, Yang Xuan. Investigating the sustainability of renewable energy – An empirical analysis of European Union countries using a hybrid of projection pursuit fuzzy clustering model and accelerated genetic algorithm based on real coding // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 268. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121940>

23. Azzuni A., Aghahosseini A., Ram M., Bogdanov D., Caldera U., Breyer C. Energy security analysis for a 100% renewable energy transition in Jordan by 2050 // Sustainability. 2020. Vol. 12. Iss. 12. <https://doi.org/10.3390/su12124921>

References

1. Bogatyrev LL, Bochegov AV, Voropay NI. *Reliability of fuel and energy supply and survivability of energy systems in Russian regions* / eds. NI Voropay, AI Tatarkin. Yekaterinburg: Ural Federal University; 2003, 392 p. (In Russ.)

2. Kuklin AA, Myzin AL, Bogatyrev LL, Pykhov PA, Denisov OA, Ananicheva SS, et al. *Sectoral and regional problems of energy security formation*. Ekaterinburg: Institute of Economics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 2008, 384 p. (In Russ.)

3. Savel'ev VA. Methodology for energy security assessment in regions on example of the Ivanovo region. In: (eds.). Shuina VA, Misrihanova MSh. Improvement of power system efficiency: ISPEU Proceedings. Iss. 5. Moscow: Energoatomizdat; 2002, 247 p. (In Russ.)

4. Senderov SM. Analysis of changes in strategic threats to Russia's energy security for the period until 2030 and priority measures to neutralize them. *Energobezopasnost' i energoэффективность – dinamika razvitiya: sbornik tezisev dokladov VIII Mezhdunarodnogo Kongressa = Energy saving and energy efficiency – development dynamics*. Saint-Petersburg: OOO FarExPO; 2018, p. 7–11. (In Russ.)

5. Kiushkina V, Lukutin B. Energy security of northern and arctic isolated territories. In: *Regional Energy Policy of Asian Russia: E3S Web of Conferences*. 2019;77. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20197701008>

6. Kiushkina VR, Antonenkov DV. Specifics of assessing energy security of isolated energy service areas in territories with harsh climatic conditions. *International Journal of Energy Technology and Policy*. 2019;15(2/3):236–253. <https://doi.org/10.1504/IJETP.2019.098971>

7. Bushuev VV, Voropay NI. Energy factor in the structure of Russian national security. *Energeticheskaya politika = Energy policy*. 2017;1:12. (In Russ.)

8. Kiushkina VR, Reev SN. Regional assessment indicators and risks of energy security of decentralized energy zones of the Arctic territories. In: *Arktika-2020. Arktika: shel'fovye proekty i ustojchivoe razvitie regionov: sbornik materialov V Mezhdunarodnoj konferencii = Arctic: Off-shore Projects and Sustainable Development of Regions: collection of articles of V international conference*. 19–20 February 2020, Moscow. Moscow: Sistemnyj Konsalting; 2020, p. 32–33. (In Russ.)

9. Smirnova E, Senderov S. Energy security problems at the regional level: situation analysis and main trends. In: *Regional Energy Policy of Asian Russia: E3S Web of Conferences*. 2019;77. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20197701009>

10. Senderov S, Rabchuk V. On the system of key indicators for monitoring the compliance with requirements of the Russia's Energy Security Doctrine in terms of reliable fuel and energy supply to domestic consumers of energy resources. In: *Methodological Problems in Reliability Study of Large Energy Systems: E3S Web of Conferences*. 2019;139. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913901007>

11. Ang BW, Choong WL, Ng TS. Energy security: definitions, dimensions and indexes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015;42:1077–1093. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.064>

12. Vivoda V. Evaluating energy security in the Asia-Pacific region: A novel methodological approach. *Energy Policy*. 2010;38(9):5258–5263. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.05.028>

13. Pasqualetti MJ, Sovacool BK. The importance of scale to energy security. *Journal of Integrative Environmental Sciences*. 2012;9(3):167–180. <https://doi.org/10.1080/1943815X.2012.691520>

14. Senderov SM, Rabchuk VI. Assessment indicators of Russian energy security doctrine in the field of fuel and energy supply reliability. *Energeticheskaya politika = Energy policy*. 2019;3:86–95. (In Russ.)

15. Skufina T, Baranov S, Samarina V. Modeling the production of GRP regions of the north of Russia. In: *Smart Innovation, Systems and Technologies: The International Science and Technology Conference "FarEastCon"*. 2019;139:173–179. https://doi.org/10.1007/978-3-030-18553-4_22

16. Lukutin B, Kiushkina V. Intellectual energy security monitoring of decentralized systems of electricity with renewable energy sources. In: *International Conference Green Energy and Smart Grids: E3S Web of Conferences*. 2018;69. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186902002>

17. Bogdanov D, Breyer C. North-East Asian super grid

for 100% renewable energy supply: optimal mix of energy technologies for electricity, gas and heat supply options. *Energy Conversion and Management*. 2016;112:176–190. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.01.019>

18. Gordievsky E, Sirotkin E, Miroshnichenko A. Development of mobile power complex model on renewable energy sources for autonomous electrical supply of Russian Far Eastern region. In: *Proceedings - 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon*. 1–3 October 2019, Chelyabinsk. Chelyabinsk: IEEE; 2019, p. 148–153.

<https://doi.org/10.1109/URALCON.2019.8877665>

19. Elistratov V, Kudryasheva I. Regimes, management and economics of energy complexes on the basis of renewable energy sources for autonomous power supply. In: *International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems 2019: E3S Web of Conferences*. 2019;124. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912404023>

20. Kiushkina VR. Effects of RES involvement in the energy security monitoring of Russian northern and arctic

zones. *Energeticheskaya politika = Energy policy*. 2018;4:109–117. (In Russ.)

21. Miroshnichenko A, Sirotkin E, Bodrova E. On the possibility to solve the problems of electrical power supply to autonomous consumers by using renewable energy sources. In: *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies*. 1–4 October 2019, Vladivostok. Vladivostok: IEEE; 2019. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2019.8934390>

22. Wang Qiang, Yang Xuan. Investigating the sustainability of renewable energy – An empirical analysis of European Union countries using a hybrid of projection pursuit fuzzy clustering model and accelerated genetic algorithm based on real coding. *Journal of Cleaner Production*. 2020;268. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121940>

23. Azzuni A, Aghahosseini A, Ram M, Bogdanov D, Caldera U, Breyer C. Energy security analysis for a 100% renewable energy transition in Jordan by 2050. *Sustainability*. 2020;12(12). <https://doi.org/10.3390/su12124921>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Лукутин Борис Владимирович,

доктор технических наук, профессор,
профессор Инженерной школы энергетики,
Национальный исследовательский Томский
политехнический университет,
634050, г. Томск, ул. Усова, 7, Россия;
✉ e-mail: lukutin48@mail.ru

Киушкина Виолетта Рафиковна,

доктор технических наук, доцент,
заместитель руководителя Департамента энергетической
безопасности и специальных программ,
«Российское энергетическое агентство»
Минэнерго России,
129085, г. Москва, ул. Мира 105/1, Россия;
ведущий научный сотрудник,
Научно-образовательный центр «Циркумполярная
Чукотка», Чукотский филиал Северо-Восточного
федерального университета,
689000, г. Анадырь, ул. Студенческая, 3, Россия;
e-mail: viola75@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 17.07.2020; одобрена после рецензирования 12.11.2020; принята к публикации 26.02.2021.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Boris V. Lukutin,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the School of Energy
and Power Engineering,
National Research Tomsk Polytechnic University,
7, Usov St., Tomsk 634050, Russia;
✉ e-mail: lukutin48@mail.ru

Violetta R. Kiushkina,

Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Deputy Head of the Department of Energy Security
and Special Programs,
Russian Energy Agency of the Ministry of Energy
of the Russian Federation,
105/1, Mira St., Moscow 129085, Russia;
Leading Researcher,
Educational Scientific Centre Circumpolar Chukotka,
Chukotka Branch of the North-Eastern Federal University,
3, Studencheskaya St., Anadyr 689000, Russia;
e-mail: viola75@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 17.07.2020; approved after reviewing 12.11.2020; accepted for publication 26.02.2021.



Аналитический метод решения задачи потокораспределения тепловой сети

© С.В. Якшин

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

Резюме: Целью исследования является разработка метода аналитического решения задачи потокораспределения шести-, одиннадцати- и двенадцатиконтурной тепловой сети; решение задачи оптимизации многоконтурной тепловой сети, включающей в себя выбор целевой функции и определение ряда варьируемых технических параметров. Для ускорения процесса оптимизации традиционно использовался метод декомпозиции графа тепловой сети, смысл декомпозиции заключается в разрезании графа сети в некоторых узлах для перехода многоконтурной схемы к разветвленной схеме в виде дерева. Оптимизация каждой разветвленной схемы проводилась методом динамического программирования, в результате чего получились новые значения варьируемых параметров на текущей итерации. Далее выполнили возврат к многоконтурной схеме, решили задачу потокораспределения и вычислили значение целевой функции. Итерационная сходимость метода декомпозиции математически не была доказана. Автором предложен метод расщепления графа, который позволяет исключить процедуру декомпозиции при оптимизации тепловой сети. Применены математическое моделирование гидравлической цепи, метод расщепления графа, аналитический метод решения алгебраического уравнения четвертой степени, в результате чего определена схема минимального элемента многоконтурной тепловой сети, показана возможность последовательного и параллельного соединения минимальных элементов, получены аналитические зависимости для задачи потокораспределения тепловой сети указанных схем. Предложенный метод аналитического решения задачи потокораспределения многоконтурной тепловой сети позволяет свести задачу расчета сложной схемы сети к расчету нескольких минимальных элементов, что существенно снижает объем вычислительной работы при моделировании гидравлической цепи. Приведенные примеры показывают, что погрешность расчетов не превышает 3%.

Ключевые слова: тепловая сеть, линеаризация уравнений, гидравлический расчет, многоконтурность, потокораспределение, минимальный элемент сети

Для цитирования: Якшин С.В. Аналитический метод решения задачи потокораспределения тепловой сети. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 1. С. 80–96. <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2021-1-80-96>

An analytical method for solving the problem of heat network load flow

Sergey V. Yakshin

Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

Abstract: The author aimed to develop an analytical solution to the problem of the load flow of a six-, eleven- and twelve-circuit heat network, as well as to solve the problem of optimisation of a multi-circuit heat network, including the choice of the objective function and the determination of a number of variable technical parameters. For accelerating the optimisation process, the method of decomposition of the heat network graph was used. Decomposition involves is cutting the network graph at some nodes for the transition of a multi-circuit scheme to a branched scheme in the form of a tree. Optimisation of each branched circuit was carried out by the dynamic programming method, as a result of which new values of the variable parameters were obtained at the current iteration. Next, the author returned to the multi-circuit scheme to solve the load flow problem and calculate the value of the objective function. The iterative convergence of the decomposition method was not mathematically proven. The author proposed a method for splitting the graph, which eliminates the decomposition procedure when optimising a heat network. The following methods were applied: mathematical modelling of the hydraulic circuit, graph splitting method and the analytical method for solving the algebraic equation of the fourth degree. The following results were achieved: a scheme of the minimum element of a multi-circuit heat network was determined, the possibility of series and parallel circuits of minimum elements was shown, and analytical dependencies for the problem of load flow of a heat network of these schemes were obtained. The proposed analytical solution of

the load flow problem for a multi-circuit heat network allows the problem of calculating a complex network to be reduced to the calculation of several minimum elements, which significantly reduces the amount of computational work when modelling a hydraulic circuit. The provided examples show that the calculation error does not exceed 3%.

Keywords: heat network, linearization of equations, hydraulic calculation, multi-circuit, flow load, minimal network element

For citation: Yakshin S.V. An analytical method for solving the problem of heat network load flow. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(1):80–96. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-1-80-96>

ВВЕДЕНИЕ

В общем виде математическая модель движения жидкости состоит из системы дифференциальных уравнений, описывающей нестационарное турбулентное движение вязкой сжимаемой жидкости или газа в различных условиях окружающей среды. Однако для расчетов гидравлических трубопроводных систем в энергетике и коммунальном хозяйстве требуется быстрое получение интегральных расходов и перепадов давлений на всех ветвях системы. В связи с этим стационарные задачи сетевой гидравлики достаточно хорошо изучены.

В научной литературе известны относительно простые методы последовательных приближений для расчета потокораспределения в многоконтурных гидравлических сетях [1–5]. Методы поконтурной увязки перепадов давлений и поузловой увязки расходов обычно связывают с именами В.Г. Лобачева, Х. Кросса, М.М. Андрияшева [6–8]. Эти методы предназначены для численного решения системы уравнений потокораспределения. Они являются аналогом известных электротехнических методов контурных токов и узловых напряжений для расчета электрических цепей в сочетании с методом Ньютона для решения систем нелинейных алгебраических уравнений. В связи с этим они получили название «метод контурных расходов» (МКР) и «метод узловых давлений» (МД). В задаче потокораспределения гидравлической сети можно выделить подзадачи: поиск коэффициента гидравлического трения [9–12] и поиск параметров регулирующих устройств [13–15]. Это говорит о том, что на каждой итерации решения задачи потокораспределения возникают внутренние итерационные процессы. В этом случае можно сказать, что одним из направлений исследований в зада-

че потокораспределения гидравлической цепи является снижение количества итерационных процессов. В данной работе для упрощения изложения рассматриваются схемы гидравлических цепей с установившимся режимом течения и квадратичной зависимостью между потерей давления и расхода [16, 17].

С целью аналитического рассмотрения задачи в работе [18] был предложен метод расщепления графа (МРГ), который позволил систему из восьми алгебраических уравнений свести к решению одного алгебраического уравнения с одной независимой переменной и получить аналитическое решение этого уравнения [19]. Следующий этап исследования – разработка методов аналитического решения задачи потокораспределения. В настоящей работе предлагается один из таких методов. На примерах многоконтурных схем показана работоспособность метода.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Математическая модель для задачи анализа тепловой сети с заданными гидравлическими сопротивлениями трубопроводной системы формулируется на основе двух законов Кирхгофа [1]:

$$Ax = Q, \quad (1)$$

$$BZXx = BP, \quad (2)$$

$$\underline{w} \leq w \leq \overline{w}, \quad (3)$$

где $x = (x_1, \dots, x_n)^T$ – вектор расходов на ветвях; $Q = (Q_1, \dots, Q_n)^T$ – вектор расходов в узлах; A – матрица соединений для линейно независимых узлов; B – матрица контуров; Z – диагональная матрица гидравлических со-

противлений трубопроводов; X – диагональная матрица расходов на ветвях; P – вектор действующих давлений; w – вектор параметров схемы, имеющих ограничения; $\underline{w}$ – вектор нижних ограничений; $\overline{w}$ – вектор верхних ограничений.

МЕТОД РАСЩЕПЛЕНИЯ ГРАФА

На рис. 1 а показана четырехконтурная схема сети, включающая восемь трубопроводов различного диаметра. На ветви № 1 расположена насосная станция с заданным перепадом давления [18].

Для данной схемы тепловой сети (рис. 1 а) искомыми величинами являются гидравлические расходы в трубопроводах. Допустим условное расщепление второй ветви на два параллельных трубопровода с сохранением перепадов давлений и суммарных расходов. В результате получим граф с расщепленной второй ветвью (рис. 1 б), где гидравлическое сопротивление z_2 представлено в виде двух неизвестных гидравлических сопротивлений: s_1 – ветвь 2–3¹ и s_2 – ветвь 2–3². При этом к системе (1)–(3) необходимо добавить два уравнения (4)–(5):

$$s_1 x_4^2 = s_2 x_3^2, \quad (4)$$

$$s_3 x_7^2 = s_4 x_8^2. \quad (5)$$

Полученную систему уравнений для рис. 1 б приводим к одному алгебраическому уравнению с одной неизвестной величиной s_1 :

$$\frac{s_1 z_6}{s_5 \left[z_6 + z_7 \left(1 + \sqrt{\frac{z_6}{s_5}} \right)^2 \right]} = \frac{s_2 z_5}{s_6 \left[z_5 + z_8 \left(1 + \sqrt{\frac{z_5}{s_6}} \right)^2 \right]}, \quad (6)$$

новые обозначения $s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6$ гидравлических сопротивлений приведены в табл. 1.

В работе [19] трансцендентное уравнение (6) сведено к алгебраическому уравнению четвертой степени и получено его решение методом Феррари.

Схема минимального элемента тепловой сети. На схеме рис. 2 а представлен граф тепловой сети, который содержит 8 узлов и 12 ветвей. На ветви 1–2 расположен источник движущего давления. Условное расщепление ветви № 2 (рис. 2 б) позволяет увидеть аналогию с графом, представленным на рис. 1 б.

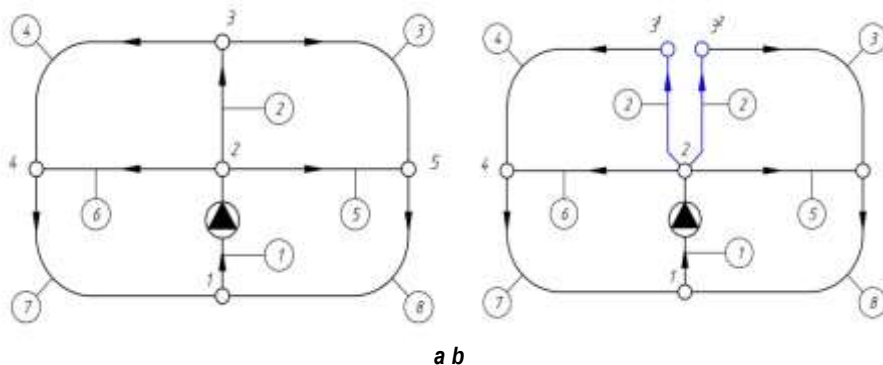


Рис. 1. Граф 4-контурной сети: а – замкнутая исходная схема сети; б – преобразование схемы с расщеплением второй ветви; ☼ – источник движущего давления; 1–5 – номера узлов (цифры в кружках – номера ветвей, стрелки на линиях – заданные направления потоков на ветвях)

Fig. 1. Graph of the four-circuit network: а – original closed circuit of a network; б – circuit transformation with the splitted second branch; ☼ – source of driving pressure; 1–5 – node numbers (numbers in circles stand for the numbers of branches, arrows on the lines indicate given directions of flows on the branches)

Таблица 1. Аналитические выражения для вектора расходов
Table 1. Analytical expressions for the flow rate vector

Вектор расходов на ветвях	
обозначения переменных величин	схема рис. 1 а
S_1 – независимая переменная величина, гидравлическое сопротивление, рис. 1 б, ветвь 2–3 ¹ .	$x_1 = \sqrt{\frac{P}{\frac{S_3 S_4}{(\sqrt{S_3} + \sqrt{S_4})^2} + z_1}}$
$S_2 = S_1 \frac{z_2}{(\sqrt{S_1} - \sqrt{z_2})^2}$	$x_2 = x_1 - x_5 - x_6$
$S_3 = (S_1 + z_4) \frac{z_6}{(\sqrt{S_1 + z_4} + \sqrt{z_6})^2} + z_7$	$x_3 = \frac{x_8}{\sqrt{\frac{S_6}{z_5} + 1}}$
$S_4 = (S_2 + z_3) \frac{z_5}{(\sqrt{S_2 + z_3} + \sqrt{z_5})^2} + z_8$	$x_4 = \frac{x_7}{\sqrt{\frac{S_5}{z_6} + 1}},$
$S_5 = S_1 + z_4$	$x_5 = x_8 - x_3$
$S_6 = S_2 + z_3$	$x_6 = x_7 - x_4$
–	$x_7 = \sqrt{\frac{P - z_1 x_1^2}{S_3}}$
–	$x_8 = \sqrt{\frac{P - z_1 x_1^2}{S_4}}$

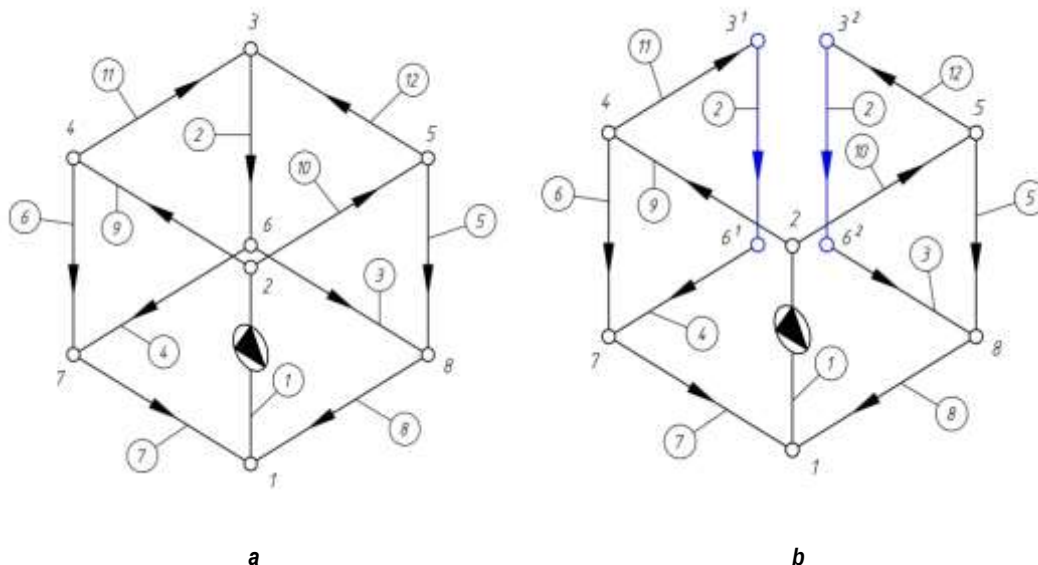


Рис. 2. Граф 6-контурной сети: а – замкнутая исходная схема сети; б – преобразование схемы с расщеплением второй ветви; ☼ – источник движущего давления; 1–8 – номера узлов (цифры в кружках – номера ветвей, стрелки на линиях – заданные направления потоков на ветвях)
Fig. 2. Graph of the six-circuit network: а – original closed circuit of a network; б – circuit transformation with the splitted second branch; ☼ – source of driving pressure; 1–8 – node numbers (numbers in circles stand for the numbers of branches, arrows on the lines indicate given directions of flows on the branches)



Для полного совпадения рис. 1 *b* и рис. 2 *b* необходимо найти суммарные гидравлические сопротивления для ветвей 1–2 (1), 2–4 (9), 2–5 (10) и ветвей 3–6 (2), 4–3 (11), 5–3 (12):

$$z_1^c = z_1 + z_9 \frac{z_{10}}{(\sqrt{z_9} + \sqrt{z_{10}})^2}; \quad (7)$$

$$z_2^c = z_2 + z_{11} \frac{z_{12}}{(\sqrt{z_{11}} + \sqrt{z_{12}})^2}. \quad (8)$$

В результате схему рис. 2 сводим к схеме рис. 1, где $z_1 = z_1^c$ и $z_2 = z_2^c$. Решаем уравнение (6) и находим параметр расщепления $s_1 = s_1^c$, который связан с гидравлическим сопротивлением ветви 3¹–6¹ (t_1 аналог s_1

рис. 1, табл. 1) выражением $t_1 = s_1^c \cdot \frac{z_2}{z_2^c}$. Расчет вектора расходов на ветвях

$x = (x_1, \dots, x_n)^T$ проводим с помощью табл. 2 (схема рис. 2).

Таблица 2. Аналитические выражения для вектора расходов

Table 2. Analytical expressions for the flow rate vector

Вспомогательные величины		Вектор расходов на ветвях
аналог величины рис. 1	схема рис. 2	схема рис. 2
–	t_1 – независимая переменная величина, гидравлическое сопротивление, рис. 2 <i>b</i> , ветвь 3 ¹ –6 ¹	$x_1 = \sqrt{\frac{P}{\frac{\psi_3 \psi_4}{(\sqrt{\psi_3} + \sqrt{\psi_4})^2} + z_1}}$
–	$t_2 = t_1 \frac{z_2}{(\sqrt{t_1} + \sqrt{z_2})^2}$	$x_2 = x_3 + x_4$
s_1 – независимая переменная величина, гидравлическое сопротивление, рис. 1 <i>b</i> , ветвь 2–3 ¹ .	$\psi_1 = t_1 + z_{11}$	$x_3 = \frac{x_8}{\sqrt{\frac{\psi_6}{z_5} + 1}}$
$s_2 = s_1 \frac{z_2}{(\sqrt{s_1} + \sqrt{z_2})^2}$	$\psi_2 = t_2 + z_{12}$	$x_4 = \frac{x_7}{\sqrt{\frac{\psi_5}{z_6} + 1}},$
$s_3 = s_5 \frac{z_6}{(\sqrt{s_5} + \sqrt{z_6})^2} + z_7$	$\psi_3 = \psi_5 \frac{z_6}{(\sqrt{\psi_5} + \sqrt{z_6})^2} + z_7 + z_9$	$x_5 = x_8 - x_3$
$s_4 = s_6 \frac{z_5}{(\sqrt{s_6} + \sqrt{z_5})^2} + z_8$	$\psi_4 = \psi_6 \frac{z_5}{(\sqrt{\psi_6} + \sqrt{z_5})^2} + z_8 + z_{10}$	$x_6 = x_7 - x_4$
$s_5 = s_1 + z_4$	$\psi_5 = t_1 + z_4 + z_{11}$	$x_7 = \sqrt{\frac{P - z_1 x_1^2}{\psi_3}}$
$s_6 = s_2 + z_3$	$\psi_6 = t_2 + z_3 + z_{12}$	$x_8 = \sqrt{\frac{P - z_1 x_1^2}{\psi_4}}$
–	–	$x_9 = \sqrt{\frac{P - z_1 x_1^2 - z_6 x_6^2 - z_7 x_7^2}{z_9}}$
–	–	$x_{10} = x_1 - x_9$
–	–	$x_{11} = x_9 - x_6$
–	–	$x_{12} = x_{10} - x_5$

В табл. 3 представлен сравнительный расчет схемы минимального элемента тепловой сети различными методами (МКР и МРГ).

Максимальное отличие объемных расходов, полученных в результате двух расчетов, составило 0,9% (см. табл. 3, столбец № 6).

Линеаризация уравнений потокораспределения. Проведем линеаризацию уравнений (1)–(3) [1].

$$Ax^* = Q, \quad (9)$$

$$BZ^*x^* = BP^*, \quad (10)$$

$$x_i^* \geq 0, \quad (11)$$

где $x^* = (x_1^*, \dots, x_n^*)^T$ – вектор расходов на ветвях; $Q = (Q_1, \dots, Q_n)^T$ – вектор расходов в узлах; A – матрица соединений для линейно независимых узлов; B – матрица контуров; $Z^* = (\sqrt{z_1}, \dots, \sqrt{z_n})$ – диагональная матрица гидравлических сопротивлений трубопроводов, $P^* = (\sqrt{P_1}, \dots, \sqrt{P_n})^T$ – вектор действующих давлений.

Параллельное соединение минимальных элементов тепловой сети. На схеме рис. 3 а представлен граф тепловой сети, который содержит 12 узлов и 20 ветвей. На

ветви 1–2 расположен насос постоянного перепада движущего давления.

В замкнутой схеме сети рис. 3 а проведем расщепление первой, второй, девятой и двадцатой ветвей. Полученная схема сети рис. 3 б имеет дополнительно восемь неизвестных гидравлических сопротивлений: k_{1_1} – ветвь 1^1-2^1 и k_{1_2} – ветвь 1^2-2^2 , k_{2_1} – ветвь 2^1-5^1 и k_{2_2} – ветвь 2^2-5^2 , k_{9_1} – ветвь 8^1-1^1 и k_{9_2} – ветвь 8^2-1^2 , k_{20_1} – ветвь 5^1-8^1 и k_{20_2} – ветвь 5^2-8^2 . Параметры расщепления находим после решения линеаризованной системы уравнений (9)–(11).

Найдем гидравлические сопротивления k_{20_1} , k_{20_2} и условные расходы $x_{1_{20}}^*$, $x_{2_{20}}^*$ для ветви 5–8 из системы уравнений (12)–(15):

$$k_{20_1} \cdot (x_{1_{20}}^*)^2 = z_4 \cdot (x_4^*)^2 + z_{17} \cdot (x_{17}^*)^2 + z_{18} \cdot (x_{18}^*)^2. \quad (12)$$

$$k_{20_2} \cdot (x_{2_{20}}^*)^2 = z_3 \cdot (x_3^*)^2 + z_{16} \cdot (x_{16}^*)^2 + z_{19} \cdot (x_{19}^*)^2. \quad (13)$$

$$x_{20}^* = x_{1_{20}}^* + x_{2_{20}}^*. \quad (14)$$

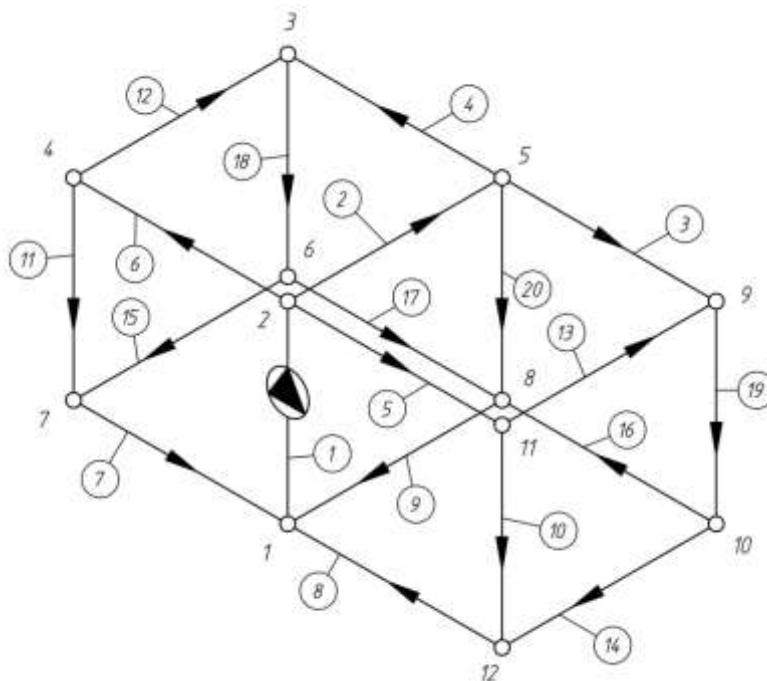
$$k_{20_2} = k_{20_1} \frac{z_{20}}{(\sqrt{k_{20_1}} - \sqrt{z_{20}})^2}. \quad (15)$$

Таблица 3. Потокораспределение для схемы тепловой сети рис. 2

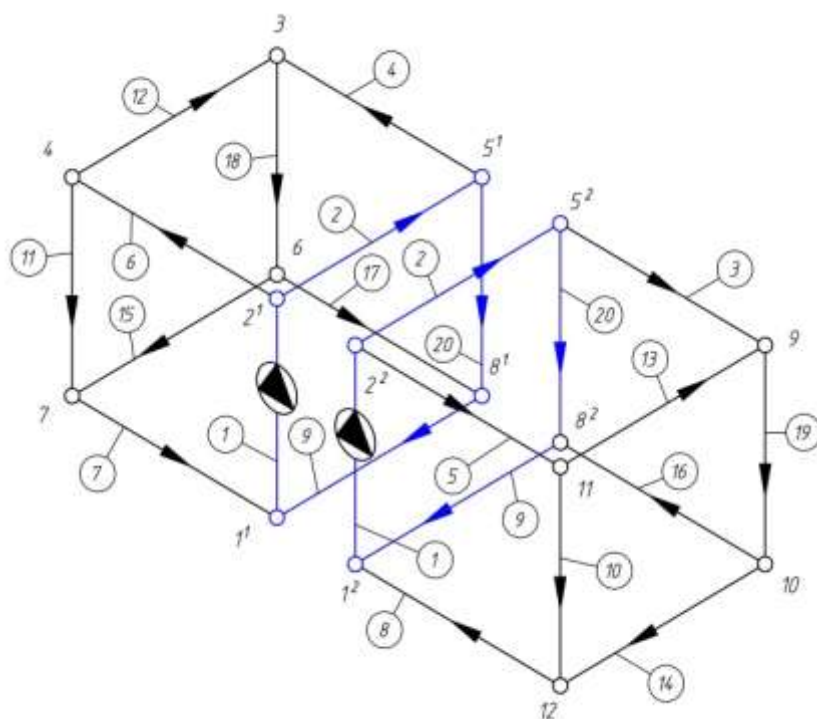
Table 3. Load flow for the heat network diagram in fig. 2

Ветвь	Диаметр ветви, м	Длина ветви, м	Объемный расход (метод контурных расходов), м ³ /с	Объемный расход (метод расщепления графа), м ³ /с	Погрешность расчетов, %
1–2	1,202	1000	1,902	1,902	$3 \cdot 10^{-3}$
3–6	0,514	1000	0,501	0,501	$-9 \cdot 10^{-2}$
6–8	0,414	2000	0,198	0,196	$9 \cdot 10^{-1}$
6–7	0,514	2000	0,303	0,305	$-7 \cdot 10^{-1}$
5–8	0,514	1000	0,713	0,713	$2 \cdot 10^{-2}$
4–7	0,514	1000	0,688	0,688	$5 \cdot 10^{-2}$
7–1	0,702	2000	0,991	0,993	$-2 \cdot 10^{-1}$
8–1	0,702	2000	0,911	0,909	$2 \cdot 10^{-1}$
2–4	0,9	1000	1,002	1,003	$-6 \cdot 10^{-3}$
2–5	0,802	1000	0,899	0,899	$1 \cdot 10^{-2}$
4–3	0,614	1000	0,314	0,315	$-1 \cdot 10^{-1}$
5–3	0,614	1000	0,187	0,187	$-1 \cdot 10^{-2}$

Примечание: движущее давление $P = 400000$ Па.



a



b

Рис. 3. Граф 11-контурной сети: а – замкнутая исходная схема сети; б – преобразование схемы с расщеплением второй ветви; – источник движущего давления; 1–12 – номера узлов (цифры в кружках – номера ветвей, стрелки на линиях – заданные направления потоков на ветвях)
Fig. 3. Graph of the eleven-circuit network: a – original closed circuit of a network; b – circuit transformation with the splitted second branch; – source of driving pressure; 1–12 – node numbers (numbers in the circles stand for the numbers of branches; arrows on the lines indicate given directions of flows on the branches)

Определяем диаметры $d20_1^*$ и $d20_2^*$:

$$d20_1^* = \sqrt[21]{\Delta \cdot (0,88 \cdot L_{20} \cdot \frac{\rho}{\pi^2 \cdot k20_1})^4}, \quad (16)$$

$$d20_2^* = \sqrt[21]{\Delta \cdot (0,88 \cdot L_{20} \cdot \frac{\rho}{\pi^2 \cdot k20_2})^4}, \quad (17)$$

где Δ – абсолютная шероховатость внутренней стенки трубы; L – длина трубы; ρ – плотность воды.

Параметры расщепления $k1_1$, $k1_2$, $k2_1$, $k2_2$, $k9_1$, $k9_2$ находим на основе полученных условных расходов $x1_{20}^*$, $x2_{20}^*$:

$$k1_1 = z_1 \cdot (\frac{x_1^*}{x_4^* + x_6^* + x1_{20}^*})^2; \quad (18)$$

$$d1_1^* = \sqrt[21]{\Delta \cdot (0,88 \cdot L_1 \cdot \frac{\rho}{\pi^2 \cdot k1_1})^4}; \quad (19)$$

$$k1_2 = z_1 \cdot (\frac{x_1^*}{x_3^* + x_5^* + x2_{20}^*})^2; \quad (20)$$

$$d1_2^* = \sqrt[21]{\Delta \cdot (0,88 \cdot L_1 \cdot \frac{\rho}{\pi^2 \cdot k1_2})^4}; \quad (21)$$

$$k2_1 = z_2 \cdot (\frac{x_2^*}{x_4^* + x1_{20}^*})^2; \quad (22)$$

$$d2_1^* = \sqrt[21]{\Delta \cdot (0,88 \cdot L_2 \cdot \frac{\rho}{\pi^2 \cdot k2_1})^4}; \quad (23)$$

$$k2_2 = z_2 \cdot (\frac{x_2^*}{x_3^* + x2_{20}^*})^2; \quad (24)$$

$$d2_2^* = \sqrt[21]{\Delta \cdot (0,88 \cdot L_2 \cdot \frac{\rho}{\pi^2 \cdot k2_2})^4}; \quad (25)$$

$$k9_1 = z_9 \cdot (\frac{x_9^*}{x_{17}^* + x1_{20}^*})^2; \quad (26)$$

$$d9_1^* = \sqrt[21]{\Delta \cdot (0,88 \cdot L_9 \cdot \frac{\rho}{\pi^2 \cdot k9_1})^4}; \quad (27)$$

$$k9_2 = z_9 \cdot (\frac{x_9^*}{x_{16}^* + x2_{20}^*})^2; \quad (28)$$

$$d9_2^* = \sqrt[21]{\Delta \cdot (0,88 \cdot L_9 \cdot \frac{\rho}{\pi^2 \cdot k9_2})^4}. \quad (29)$$

В результате расщепленную схему рис. 3 *b* сводим к двум схемам рис. 2 *a*. В табл. 4 представлен пример расчета схемы параллельного соединения минимальных элементов тепловой сети.

Из табл. 4 видно, что максимальное отличие объемных расходов, полученных в результате двух расчетов, составило 1,43%, столбец № 6.

Последовательное соединение минимальных элементов тепловой сети. На схеме рис. 4 *a* представлен граф тепловой сети, который содержит 14 узлов и 23 ветви, его можно представить как соединение двух минимальных элементов рис. 4 *b* по ветви 3–6 (2). Первый минимальный элемент содержит сетевой насос, установленный на ветви 1–2 (1).

По аналогии с рис. 2 производим расщепление по второй и двадцать третьей ветвям. При этом система уравнений графа рис. 4 *a* получит дополнительно четыре неизвестных гидравлических сопротивления: $k2_1$ – ветвь 3¹–6¹ и $k2_2$ – ветвь 3²–6², $k23_1$ – ветвь 9¹–10¹ и $k23_2$ – ветвь 9²–10². Параметры расщепления находим в результате решения линеаризованной системы уравнений (9)–(11). Найдем суммарное гидравлическое сопротивление для ветвей: 3¹–6¹ (2), 10–14 (14), 13–14 (16), 14–6 (17), 3–13 (19), 13–9 (21), 9¹–10¹ (23):



Таблица 4. Потокораспределение для схемы тепловой сети рис. 3
Table 4. Load flow for the heat network diagram in fig. 3

Ветвь	Диаметр ветви, м	Длина ветви, м	Объемный расход (метод расщепления графа), м ³ /с	Объемный расход (метод контурных расходов), м ³ /с	Погрешность расчетов, %
1–2	100	1,202	2,760	2,761	0,02
2–5	2000	0,9	1,216	1,217	0,12
5–9	1000	0,309	0,075	0,077	1,43
5–3	1000	0,414	0,141	0,143	1,35
2–11	1000	0,702	0,781	0,782	0,11
2–4	1000	0,702	0,764	0,762	-0,24
7–1	1000	0,702	0,764	0,762	-0,24
12–1	1000	0,702	0,781	0,782	0,11
8–1	2000	0,9	1,216	1,217	0,12
11–12	1000	0,414	0,387	0,387	-0,01
4–7	1000	0,414	0,392	0,392	0,09
4–3	2000	0,614	0,372	0,370	-0,58
11–9	2000	0,614	0,394	0,394	0,23
10–12	2000	0,614	0,394	0,394	0,23
6–7	2000	0,614	0,372	0,370	-0,58
10–8	1000	0,309	0,075	0,077	1,43
6–8	1000	0,414	0,141	0,143	1,35
3–6	1000	0,514	0,513	0,513	-0,04
9–10	1000	0,514	0,469	0,471	0,43
5–8	1000	0,614	0,999	0,997	-0,15

Примечание: движущее давление $P = 300000$ Па.

$$k23_1 = z_{23} \cdot \left(\frac{x_{23}^*}{x_{14}^*} \right)^2; \quad (30)$$

$$f_1(k23_1) = \frac{z_{16}(z_{14} + z_{21} + k23_1)}{(\sqrt{z_{16}} + \sqrt{z_{14} + z_{21} + k23_1})^2}; \quad (31)$$

$$f_2(k2_1, k23_1) = \frac{k2_1(z_{17} + z_{19} + f_1(k23_1))}{(\sqrt{k2_1} + \sqrt{z_{17} + z_{19} + f_1(k23_1)})^2}. \quad (32)$$

Найдем суммарное гидравлическое сопротивление для ветвей: 3²–6² (2), 10–12 (13), 11–12 (15), 12–6 (18), 3–11 (20), 11–9 (22), 9²–10² (23):

$$k23_2 = z_{23} \cdot \left(\frac{x_{23}^*}{x_{13}^*} \right)^2; \quad (33)$$

$$f_3(k23_2) = \frac{z_{15}(z_{13} + z_{22} + k23_2)}{(\sqrt{z_{15}} + \sqrt{z_{13} + z_{22} + k23_2})^2}; \quad (34)$$

$$f_4(k2_2, k23_2) = \frac{k2_2(z_{18} + z_{20} + f_3(k23_2))}{(\sqrt{k2_2} + \sqrt{z_{18} + z_{20} + f_3(k23_2)})^2}. \quad (35)$$

Определяем суммарное гидравлическое сопротивление z_2^s и соответствующий диаметр d_2^s :

$$z_2^s = \frac{f_2(k2_1, k23_1) \cdot f_4(k2_2, k23_2)}{(\sqrt{f_2(k2_1, k23_1)} + \sqrt{f_4(k2_2, k23_2)})^2}; \quad (36)$$

$$d_2^s = \sqrt[2]{\Delta \cdot (0,88 \cdot L_2 \cdot \frac{\rho}{\pi^2 \cdot z_2^s})^4}. \quad (37)$$

В результате схему рис. 4 а сводим к схеме рис. 2 б. Для перехода к схеме рис. 1 в качестве z_1 используем z_1^c (38) и для z_2 используем z_2^c (39):

$$z_1^c = z_1 + z_9 \frac{z_{10}}{(\sqrt{z_9} + \sqrt{z_{10}})^2}; \quad (38)$$

$$z_2^c = z_2^s + z_{11} \frac{z_{12}}{(\sqrt{z_{11}} + \sqrt{z_{12}})^2}. \quad (39)$$

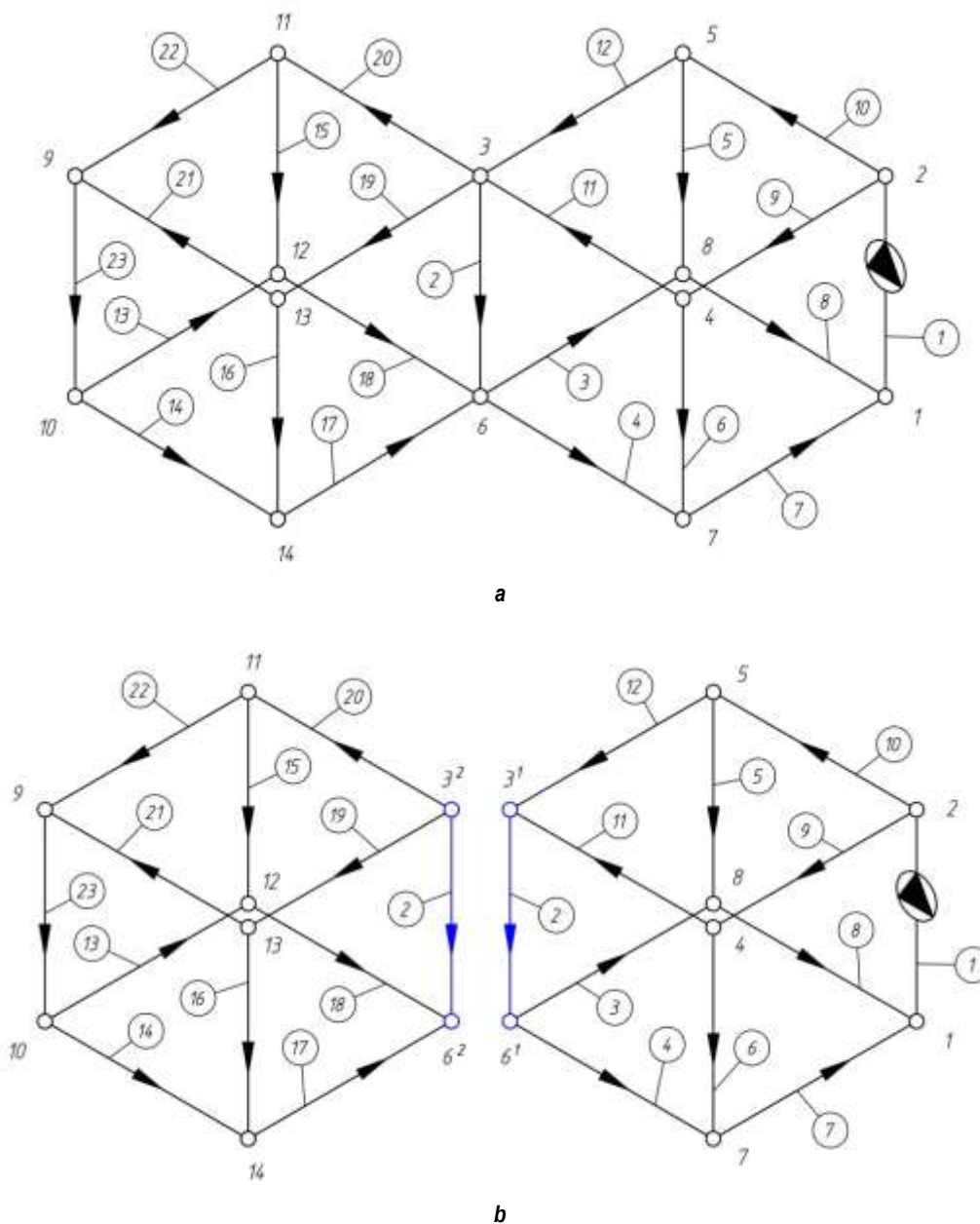


Рис. 4. Граф 12-контурной сети: – источник движущего давления; 1–14 – номера узлов (цифры в кружках – номера ветвей, стрелки на линиях – заданные направления потоков на ветвях)
Fig. 4. Graph of the twelve-circuit network: – source of driving pressure; 1–14 – node numbers (numbers in circles stand for the numbers of branches, arrows on the lines indicate given directions of flows on the branches)

Следующий шаг поиск расходов x_2 , x_{17} , x_{18} и движущего давления для второго минимального элемента без источника движущего давления (рис. 4 b):

$$x_2 = \frac{x_2^s}{1 + \sqrt{\frac{z_2}{z_{17} + z_{19} + f_1(w_1)}} + \sqrt{\frac{z_2}{z_{18} + z_{20} + f_3(w_2)}}}; \quad (40)$$

$$x_{17} = x_2 \cdot \sqrt{\frac{z_2}{z_{17} + z_{19} + f_1(w_1)}}; \quad (41)$$

$$x_{18} = x_2 \cdot \sqrt{\frac{z_2}{z_{18} + z_{20} + f_3(w_2)}}; \quad (42)$$

$$P^0 = z_2 x_2^2 + z_2 (x_{17} + x_{18})^2. \quad (43)$$



В результате часть схемы рис. 4 *b* второй минимальный элемент, условно отделенный от первого элемента, сводим к схеме рис. 2 *a*. При этом соблюдаем соответствие параметров рис. 2 и рис. 4: $P = P^0$, $d_1^0 = d_2$, $d_2^0 = d_{23}$, $d_3^0 = d_{13}$, $d_4^0 = d_{14}$, $d_5^0 = d_{15}$, $d_6^0 = d_{16}$, $d_7^0 = d_{17}$, $d_8^0 = d_{18}$, $d_9^0 = d_{19}$,

$d_{10}^0 = d_{20}$, $d_{11}^0 = d_{21}$, $d_{12}^0 = d_{22}$ (индекс 0 соответствует схеме рис. 2). В табл. 6 представлен пример расчета схемы последовательного соединения минимальных элементов тепловой сети.

Из табл. 6 очевидно, что погрешность достигает 3,178% на ветви 13–9. На всех остальных ветвях она не превышает 3%.

Таблица 5. Аналитические выражения для вектора расходов
Table 5. Analytical expressions for the flow rate vector

Вспомогательные величины		Вектор расходов на ветвях
аналог величины рис. 1	схема рис. 4	схема рис. 4
–	t_1 – независимая переменная величина, гидравлическое сопротивление, рис. 4 <i>a</i> , ветвь 3 ¹ –6 ¹ .	$x_1 = \sqrt{\frac{P}{\frac{\eta_3 \eta_4}{(\sqrt{\eta_3} + \sqrt{\eta_4})^2} + z_1^c}}$
–	$t_2 = t_1 \frac{z_2}{(\sqrt{t_1} - \sqrt{z_2})^2}$	$x_2^s = x_3 + x_4$
–	w_1 – независимая переменная величина, гидравлическое сопротивление, рис. 4 <i>a</i> , ветвь 9 ¹ –10 ¹ .	$x_3 = \frac{x_8}{\sqrt{\frac{\eta_6}{z_5} + 1}}$
–	$w_2 = w_1 \frac{z_{23}}{(\sqrt{w_1} - \sqrt{z_{23}})^2}$	$x_4 = \frac{x_7}{\sqrt{\frac{\eta_5}{z_6} + 1}}$
s_1 – независимая переменная величина, гидравлическое сопротивление, рис. 1 <i>b</i> , ветвь 2–3 ¹ .	$\eta_1 = f_2(t_1, w_1) + z_{11}$	$x_5 = x_8 - x_3$
$s_2 = s_1 \frac{z_2}{(\sqrt{s_1} - \sqrt{z_2})^2}$	$\eta_2 = f_4(t_2, w_2) + z_{12}$	$x_6 = x_7 - x_4$
$s_3 = s_5 \frac{z_6}{(\sqrt{s_1} + \sqrt{z_4} + \sqrt{z_6})^2} + z_7$	$\eta_3 = \eta_5 \frac{z_6}{(\sqrt{\eta_5} + \sqrt{z_6})^2} + z_7 + z_9$	$x_7 = \sqrt{\frac{P - z_1^c x_1^2}{\eta_3}}$
$s_4 = s_6 \frac{z_5}{(\sqrt{s_2} + \sqrt{z_3} + \sqrt{z_5})^2} + z_8$	$\eta_4 = \eta_6 \frac{z_5}{(\sqrt{\eta_6} + \sqrt{z_5})^2} + z_8 + z_{10}$	$x_8 = \sqrt{\frac{P - z_1^c x_1^2}{\eta_4}}$
$s_5 = s_1 + z_4$	$\eta_5 = f_2(t_1, w_1) + z_4 + z_{11}$	$x_9 = \sqrt{\frac{P - z_1 x_1^2 - z_6 x_6^2 - z_7 x_7^2}{z_9}}$
$s_6 = s_2 + z_3$	$\eta_6 = f_4(t_2, w_2) + z_3 + z_{12}$	$x_{10} = x_1 - x_9$
–	–	$x_{11} = x_9 - x_6$
–	–	$x_{12} = x_{10} - x_5$

Таблица 6. Потокораспределение для схемы тепловой сети рис. 4
Table 6. Load flow for the heat network diagram in fig. 4

Ветвь	Диаметр ветви, м	Длина ветви, м	Объемный расход (метод расщепления графа), м ³ /с	Объемный расход (метод контурных расходов), м ³ /с	Погрешность расчетов, %
1–2	1000	1,202	2,168	2,168	0,001
3–6	1000	0,514	0,259	0,259	-0,030
6–8	1000	0,414	0,347	0,348	0,283
6–7	2000	0,514	0,401	0,400	-0,275
5–8	1000	0,514	0,702	0,702	-0,023
4–7	1000	0,514	0,717	0,718	0,042
7–1	2000	0,702	1,119	1,118	-0,072
8–1	2000	0,702	1,049	1,050	0,078
2–4	2000	0,9	1,121	1,120	-0,092
2–5	2000	0,802	1,047	1,048	0,101
4–3	2000	0,614	0,404	0,402	-0,332
5–3	1000	0,614	0,345	0,346	0,353
10–12	2000	0,259	0,013	0,013	-1,017
10–14	2000	0,309	0,019	0,020	1,331
11–12	1000	0,514	0,230	0,229	-0,086
13–14	1000	0,514	0,228	0,228	0,013
14–6	1000	0,702	0,247	0,248	0,117
12–6	1000	0,702	0,242	0,242	-0,134
3–13	1000	0,9	0,244	0,244	0,221
3–11	1000	0,9	0,246	0,245	-0,235
13–9	2000	0,359	0,016	0,016	3,178
11–9	2000	0,359	0,016	0,016	-2,369
9–10	1000	0,259	0,032	0,032	0,410

Примечание: движущее давление $P = 500000$ Па.

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПОТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ

В качестве примера для изучения погрешности рассмотрим шестиконтурную схему (рис. 5).

Плоский граф тепловой сети рис. 5 *b* в результате расщепления второй и девятой вет-

вей получает четыре неизвестных параметра расщепления: k_{2_1} – ветвь 2^1-3^1 и k_{2_2} – ветвь 2^2-3^2 , k_{9_1} – ветвь 3^1-6^1 и k_{9_2} – ветвь 3^2-6^2 . Параметры расщепления k_{9_1} и k_{9_2} находим после решения линейаризованной системы уравнений (9)–(11).

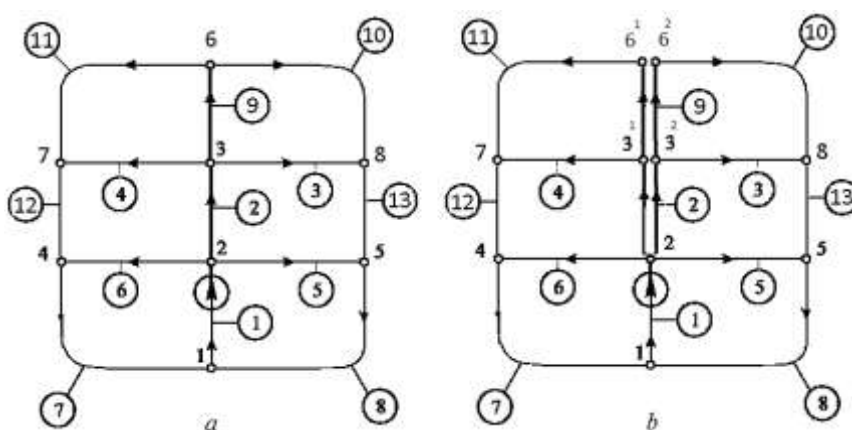


Рис. 5. Граф 6-контурной сети: *a* – замкнутая исходная схема сети; *b* – преобразование сети с расщеплением второй и девятой ветвей; $\odot$ – источник движущего давления; 1–8 – номера узлов (цифры в кружках – номера ветвей, стрелки на линиях – заданные направления потоков на ветвях)

Fig. 5. Graph of the six-circuit network: *a* – original closed circuit of a network; *b* – circuit transformation with the splitted second and ninth branches; $\odot$ – source of driving pressure; 1–8 – node numbers (the numbers in the circles stand for the numbers of branches, arrows on the lines indicate given directions of flows on the branches)



Определение $k9_1 = z_9 \cdot (\frac{x_9}{x_{11}})^2$ дает возможность записать $k9_1$ в развернутом виде (44), где видна явная зависимость $k9_1$ от параметров двух замкнутых контуров, содержащих ветвь № 9:

$$k9_1 = z_9 \cdot (1 + \frac{x_3}{x_4} \cdot \sqrt{\frac{z_3 \cdot z_{11}}{z_4 \cdot z_{10}}} \cdot \sqrt{\frac{1 - \frac{z_9 \cdot x_9^2}{z_3 \cdot x_3^2}}{1 - \frac{z_9 \cdot x_9^2}{z_4 \cdot x_4^2}}})^2. \quad (44)$$

В случае линеаризации уравнений (1)–(3) получим для $k9_1^*$ (45).

$$k9_1^* = z_9 \cdot (1 + \frac{x_3^*}{x_4^*} \cdot \sqrt{\frac{z_3 \cdot z_{11}}{z_4 \cdot z_{10}}} \cdot \frac{1 - \sqrt{\frac{z_9 \cdot x_9^*}{z_3 \cdot x_3^*}}}{1 - \sqrt{\frac{z_9 \cdot x_9^*}{z_4 \cdot x_4^*}}})^2. \quad (45)$$

Таким образом, источником погрешности является преобразование системы уравнений (1)–(3) к системе (9)–(11) и, соответственно, возникающая разница в выражениях (44)–(45). Исследуем изменение разницы значений величин $k9_1$ и $k9_1^*$ в зависимости от диаметра десятой ветви. Для этого на рис. 6 строим зависимости $\frac{x_9}{x_{11}}$ (кривая № 1) и

$\frac{x_9^*}{x_{11}^*}$ (кривая № 2) от диаметра десятой ветви

$$\begin{aligned} (d_1 = 1,202 \text{ м}, \quad d_2 = 0,9 \text{ м}, \quad d_3 = d_4 = 0,614 \text{ м}, \\ d_5 = d_6 = 0,702 \text{ м}, \quad d_7 = d_8 = 0,802 \text{ м}, \\ d_9 = 0,614 \text{ м}, \quad d_{inv} = d_{11} = 0,514 \text{ м}, \\ d_{12} = d_{13} = 0,614 \text{ м}, \\ L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = L_5 = L_6 = L_9 = L_{12} = L_{13} = 1000 \text{ м}, \\ L_7 = L_8 = 2000 \text{ м}, \quad L_{10} = L_{11} = 2000 \text{ м}). \end{aligned}$$

Из рис. 6 видно, что преобразование уравнений от системы (1)–(3) к системе (9)–(11) имеет две инвариантные точки:

$$\frac{x_9}{x_{11}} = \frac{x_9^*}{x_{11}^*} = 1 \text{ – перекрытие задвижкой ветви}$$

№ 10 ($d_{10} = 0$); $\frac{x_9}{x_{11}} = \frac{x_9^*}{x_{11}^*} = 2$ – симметрич-

ность схемы по величинам гидравлических сопротивлений относительно ветвей 1, 2, 9 ($d_{10} = d_{inv}$). На основе этих двух точек строим параболу интерполяции рис. 6 кривую № 3.

Максимальное отклонение кривой 2 от кривой 1 составляет 0,02, что приводит к максимальной погрешности 0,56% при расчете потокораспределения. Кривая 3 – это парабола интерполяции (46), которая дает квадратичное приближение к кривой 1. Максимальное отклонение кривой 3 от кривой 1 составляет 0,046, что приводит к погрешности не более 4% при расчете потокораспределения.

$$\frac{x_9}{x_{11}} = (\frac{d_{10}}{d_{inv}})^2 + 1. \quad (46)$$

В результате получаем возможность использовать параболу интерполяции (46) для нахождения $k9_1$ без линеаризации уравнений (1)–(3) и получать приемлемые результаты для инженерных расчетов.

ПРИМЕНЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО МЕТОДА

Задача потокораспределения в терминах нелинейного программирования для тепловой гидравлической цепи записывается в следующем виде [20]:

найти

$$\text{extr}(1/T) \sum_{i=1}^n z_i x_i^3, \quad (47)$$

$$Ax = Q_h, \quad (48)$$

$$\sum_{i=1}^n P_i^{\text{mov}} x_i - \sum_{i=1}^n z_i x_i^3 = 0, \quad (49)$$

$$\sum_{i=1}^n z_i x_i^3 = k(T - T_{\text{env}}), \quad (50)$$

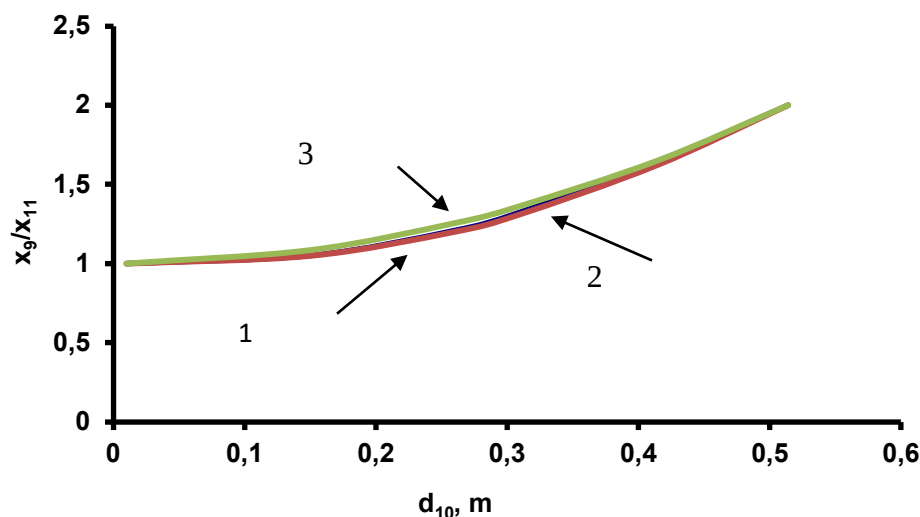


Рис. 6. Линии относительного объемного расхода: (1) $\frac{X_9}{X_{11}}$ – относительный объемный расход при

использовании метода контурных расходов; (2) $\frac{X_9^*}{X_{11}^*}$ – относительный объемный расход при использовании

линеаризации; (3) – парабола интерполяции $\frac{X_9}{X_{11}}$ при преобразовании системы уравнений от (1)–(3) к (9)–(11)

Fig. 6. Lines of relative volumetric flow rate: (1) $\frac{X_9}{X_{11}}$ – relative volumetric flow rate when using the contour flow rate method;

(2) $\frac{X_9^*}{X_{11}^*}$ – relative volumetric flow rate when using linearization; (3) – interpolation parabola $\frac{X_9}{X_{11}}$ when transforming the system of equations from (1)–(3) to (9)–(11)

где T и T_{env} – температуры жидкости и окружающей среды; $A = [a_{ij}] - (m-1) \times n$ – матрица соединений независимых узлов и ветвей; m – число узлов; n – число ветвей; Q_h – вектор внешних притоков и стоков в узлах; k – коэффициент теплопередачи; h – индекс тепловой цепи; P_i^{mov} – источник движущего давления.

Задача оптимизации функции (47) предполагает поиск варьируемых x_i (n – ветвей) и температуры жидкости. Получим $n+1$ – число независимых переменных. Аналитический метод устанавливает связи между независимыми переменными и выделяет в качестве независимых переменных параметры расщепления. При этом число независимых переменных снижается. Например, с 14 до 3 рис. 5 или с 24 до 3 рис. 4, где вектор расхо-

дов является функцией двух параметров расщепления. При этом снижается время счета и улучшается процесс сходимости при решении задачи на компьютере.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исторически работы, проводившиеся в 60-е годы прошлого века, по теории гидравлических цепей под руководством В.Я. Хасилева были направлены на решение задач потокораспределения с помощью ЭВМ. Нелинейность уравнений гидродинамики не позволяла в полной мере использовать опыт, накопленный в теории электрических цепей. В работе [18] предложенный метод расщепления графа дал возможность свести задачу потокораспределения к задаче малой размерности и получить ее аналитическое решение в [19]. В данной работе определен некоторый минимальный элемент тепловой се-



ти, который работает независимо от прилегающих трубопроводных систем. В результате появилась возможность собирать схему тепловой сети из минимальных элементов. Однако в данном случае размерность задачи возрастает и для решения этой проблемы предлагается использовать линеаризацию

уравнений (1)–(3) и находить недостающие параметры расщепления. Проведенные численные исследования показали, что погрешность расчетов потокораспределения в тепловой сети не превышает допустимых величин погрешности для инженерных расчетов.

Список литературы

1. Меренков А.П., Хасилев В.Я. Теория гидравлических цепей. М.: Изд-во «Наука», 1985. 278 с.
2. Сеннова Е.В., Сидлер В.Г. Математическое моделирование и оптимизация развивающихся теплоснабжающих систем. Новосибирск: Изд-во «Наука», 1987. 222 с.
3. Новицкий Н.Н., Аверьянов В.К., Сеннова Е.В., Карсевич А.М., Стенников В.А., Еделева О.А. [и др.]. Развитие методов теории гидравлических цепей для анализа и синтеза свойств трубопроводных систем как объектов управления // Трубопроводные системы энергетики: математическое моделирование и оптимизация. Новосибирск: Наука, 2010. С. 58–73.
4. Токарев В.В., Шалагинова З.И. Методика многоуровневого наладочного расчета теплогидравлического режима крупных систем теплоснабжения с промежуточными ступенями управления // Теплоэнергетика. 2016. № 1. С. 71–80.
<https://doi.org/10.1134/S0040363616010112>
5. Токарев В.В. Разработка методики секционирования кольцевых тепловых сетей закрытых систем теплоснабжения // Теплоэнергетика. 2018. № 6. С. 84–94.
<https://doi.org/10.1134/S0040363618060103>
6. Cross H. Analysis of flow in networks of conduits or conductors. Series/Report: University of Illinois. Engineering Experiment Station. Bulletin; no. 286. 1936. [Электронный ресурс]. URL: <http://hdl.handle.net/2142/4433> (25.05.2020).
7. LaViolette M. On the history, science, and technology included in the Moody diagram // Journal of Fluids Engineering. 2017. Vol. 139. Iss. 3.
<https://doi.org/10.1115/1.4035116>
8. Todini E., Pilati S. A gradient algorithm for the analysis of pipe networks // Computer applications in water supply / eds. B Coulbeck, Chun-Hou Orr. London: John Wiley & Sons Research Studies Press, 1988. [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/profile/Ezio_Todini/publication/221936261_A_gradient_method_for_the_analysis_of_pipe_networks/links/0046351c42430e1178000000.pdf (25.05.2020).
9. Brkić D., Čojbašić Ž. Evolutionary optimization of Colebrook's turbulent flow friction approximations // Fluids. 2017. Vol. 2. Iss. 2.
<https://doi.org/10.3390/fluids2020015>
10. Praks P., Brkić D. Choosing the Optimal Multi-Point Iterative Method for the Colebrook Flow Friction Equation // Processes. 2018. Vol. 6. Iss. 8.
<https://doi.org/10.3390/pr6080130>
11. Praks P., Brkić D. Advanced iterative procedures for solving the implicit Colebrook equation for fluid flow friction // Advances in Civil Engineering. 2018. Vol. 2018.
<https://doi.org/10.1155/2018/5451034>
12. Medhi Das B., Sarma B., Mohan Das M. Error Analysis of Friction Factor Formulae with Respect to Colebrook-White Equation // International Journals of Science and Research. 2017. Vol. 6. Iss. 3. P. 2105–2109.
13. Новицкий Н.Н., Токарев В.В. Релейная методика расчета потокораспределения в гидравлических цепях с регулируемыми параметрами // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2001. № 2. С. 88–98.
14. Баранчикова Н.И., Епифанов С.П., Зоркальцев В.И., Куртин А.В., Обуздин С.Ю. Потокораспределение в системах подачи и распределения воды с автоматическими регуляторами давления // Водоснабжение и санитарная техника. 2017. № 4. С. 55–62.
15. Корельштейн Л.Б. Существование, единственность и монотонность решения задачи потокораспределения в гидравлических цепях с зависящими от давления замыкающими соотношениями // Математические модели и методы анализа и оптимального синтеза развивающихся трубопроводных и гидравлических систем: тр. XVI Всерос. науч. семинара (г. Иркутск, 26 июня – 2 июля 2018 г.) Иркутск: Изд-во ИСЭМ СО РАН, 2018. С. 55–83.
16. Brkić D. Discussion of «Economics and Statistical Evaluations of Using Microsoft Excel Solver in Pipe Network Analysis» by I.A. Oke, A. Ismail, S. Lukman, S.O. Ojo, O.O. Adeosun, and M.O. Nwude // Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice. 2018. Vol. 9. Iss. 3.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000319](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000319)
17. Hoyo Arce I., Herrero Lopez S., Lopez Perez S., Rama M., Klobut K., Febres J.A. Models for fast modelling of district heating and cooling networks // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 82. Part 2. P. 1863–1873.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.109>
18. Якшин С.В. Метод расщепления графа и принцип аддитивности тепловой сети // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 4. С. 127–138.
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-4-127-138>
19. Якшин С.В. Применение метода расщепления графа при оптимизации параметров тепловой сети // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 10. С. 129–140.
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-10-129-140>

20. Каганович Б.М., Стенников В.А., Зароднюк М.С., Якшин С.В. Равновесное экологическое моделирование интегрированных энергетических систем // Математические модели и методы анализа и оптимального

синтеза развивающихся трубопроводных и гидравлических систем: тр. XVI Всерос. науч. семинара (г. Иркутск, 26 июня – 2 июля 2018 г.). Иркутск: Изд-во ИСЭМ СО РАН, 2018. С. 34–43.

References

1. Merenkov AP, Khasilev VYa. *The theory of hydraulic circuits*. Moscow: Nauka; 1985, 278 p. (In Russ.)
2. Sennova EV, Sidler VG. *Mathematical modeling and optimization of developing heat supply systems*. Novosibirsk: Nauka; 1987, 222 p. (In Russ.)
3. Novitsky NN, Aver'yanov VK, Sennova EV, Karasevich AM, Stennikov VA, Edeleva OA, et al. Development of methods of hydraulic circuits theory for analysis and synthesis of properties of pipeline systems as control objects. In: *Truboprovodnye sistemy energetiki: matematicheskoe i komp'yuternoe modelirovanie* = Energy Pipeline Systems: Mathematical and Computer Modeling. Novosibirsk: Nauka; 2010, p. 58–73. (In Russ.)
4. Tokarev VV, Shalaginova ZI. Technique of multilevel adjustment calculation of the heat-hydraulic mode of the major heat supply systems with the intermediate control stages. *Teploenergetika* = *Thermal Engineering*. 2016;1:71-80. (In Russ.)
<https://doi.org/10.1134/S0040363616010112>
5. Tokarev VV. Developing a procedure for segmenting ring heat networks of closed heat supply systems. *Teploenergetika* = *Thermal Engineering*. 2018;6:84–94. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S0040363618060103>
6. Cross H. Analysis of flow in networks of conduits or conductors. Series/Report: University of Illinois. Engineering Experiment Station. Bulletin; no. 286. 1936. Available from: <http://hdl.handle.net/2142/4433> [Accessed 25th May 2020].
7. LaViolette M. On the history, science, and technology included in the Moody diagram. *Journal of Fluids Engineering*. 2017;139:3. <https://doi.org/10.1115/1.4035116>
8. Todini E, Pilati S. A gradient algorithm for the analysis of pipe networks. In: Coulbeck B, Orr Chun-Hou (eds.). *Computer applications in water supply*. London: John Wiley & Sons Research Studies Press; 1988. Available from: https://www.researchgate.net/profile/Ezio_Todini/publication/221936261_A_gradient_method_for_the_analysis_of_pipe_networks/links/0046351c42430e1178000000.pdf [Accessed 25th May 2020].
9. Brkić D, Čojbašić Ž. Evolutionary optimization of Colebrook's turbulent flow friction approximations. *Fluids*. 2017;2(2). <https://doi.org/10.3390/fluids2020015>
10. Praks P, Brkić D. Choosing the optimal multi-point iterative method for the Colebrook flow friction equation. *Processes*. 2018;6(8). <https://doi.org/10.3390/pr6080130>
11. Praks P, Brkić D. Advanced iterative procedures for solving the implicit Colebrook equation for fluid flow friction. *Advances in Civil Engineering*. 2018;2018. <https://doi.org/10.1155/2018/5451034>
12. Medhi Das B, Sarma B, Mohan Das M. Error analysis of friction factor formulae with respect to Colebrook-White equation. *International Journals of Science and Research*. 2017;6(3):2105–2109.
13. Novitsky NN, Tokarev VV. Relay method of calculation of flow distribution in hydraulic circuits with adjustable parameters. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Energetika*. 2001;2:88–98. (In Russ.)
14. Baranchikova NI, Epifanov SP, Zorkal'tsev VI, Kurtin AV, Obuzdin SYu. Flow distribution in water supply and distribution systems with automatic pressure regulators. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya texnika* = *Water supply and sanitary technique*. 2017;4:55–62. (In Russ.)
15. Korel'shtein LB. Existence, uniqueness and monotonicity of the solution of the flow distribution problem in hydraulic circuits with pressure-dependent closing relations. In: *Matematicheskie modeli i metody analiza i optimal'nogo sinteza razvivayushchihsy truboprovodnyh i gidravlicheskih sistem: trudy XVI Vserossijskogo nauchnogo seminar* = *Mathematical Models and Methods of Analysis and Optimal Synthesis of the Developing Pipeline and Hydraulic Systems: Proceedings of XVI All-Russian scientific seminar*. June 26 – July 2 2018, Irkutsk. Irkutsk: Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2018, p. 55–83. (In Russ.)
16. Brkić D. Discussion of «Economics and statistical evaluations of using Microsoft Excel solver in pipe network analysis» by I.A. Oke, A. Ismail, S. Lukman, S.O. Ojo, O.O. Ade-osun, and M.O. Nwude. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. 2018;9:3. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000319](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000319)
17. Hoyo Arce I, Herrero Lopez S, Lopez Perez S, Rama M, Klobut K, Febres JA. Models for fast modelling of district heating and cooling networks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018;82(2):1863–1873. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.109>
18. Yakshin SV. The method of graph splitting and the principle of heating network additivity. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2017;21(4):127–138. (In Russ.)
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-4-127-138>
19. Yakshin SV. Application of graph splittance method when optimizing heating network parameters. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(10):129–140. (In Russ.)
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-10-129-140>
20. Kaganovich BM, Stennikov VA, Zароднюк MS, Yakshin SV. Equilibrium ecological modeling of integrated energy systems. In: *Matematicheskie modeli i metody analiza i optimal'nogo sinteza razvivayushchihsy truboprovodnyh i gidravlicheskih sistem: trudy XVI Vserossijskogo nauchnogo seminar* = *Mathematical Models and Methods of Analysis and Optimal Synthesis of the*



Developing Pipelines and Hydraulic Systems: Proceedings of XVI All-Russian scientific seminar. June 26 – July 2 2018, Irkutsk. Irkutsk: Melentiev Energy Systems Insti-

tute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2018, p. 34–43. (In Russ.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Якшин Сергей Владимирович,
ведущий инженер,
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева
СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия;
✉ e-mail: s.yakshin@isem.irk.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Sergey V. Yakshin,
Leading Engineer,
Melentiev Energy Systems Institute
of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences,
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia;
✉ e-mail: s.yakshin@isem.irk.ru

Заявленный вклад автора

Автор выполнил исследовательскую работу, на основании полученных результатов провел обобщение, подготовил рукопись к печати.

Contribution of the author

The author performed the research, made a generalization based on the results obtained and prepared the copy-right for publication.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The author declares no conflict of interests.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 13.01.2021; одобрена после рецензирования 03.02.2020; принята к публикации 26.02.2021.

Information about the article

The article was submitted 13.01.2021; approved after reviewing 03.02.2020; accepted for publication 26.02.2021.

Анализ современного состояния способов переработки техногенного золотосодержащего сырья

© А.О. Василькова*, Н.В. Васильков**, О.Д. Хмельницкая*, Г.И. Войлошников*

*АО «Иргиредмет», г. Иркутск, Россия

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

Резюме: Цель – литературный обзор существующих способов переработки техногенного сырья (рудных отвалов прошлых лет, лежалых хвостов обогатительных фабрик, шлаков металлургического производства и т.п.), содержащих цветные и благородные металлы и накопленных практически во всех подотраслях цветной металлургии. Анализ существующих технологий переработки техногенного сырья (пиритные огарки и хвосты флотации обогатительных фабрик), которые включают в себя обогатительные, пиро- и гидрометаллургические и комбинированные способы извлечения ценных компонентов, проводился на основе обзора известных литературных и информационных источников. Показано, что обогатительные (грохочение, обесшламливание в гидроциклоне, обогащение на концентрационном столе, магнитно-жидкостная сепарация, флотация), пирометаллургические и комбинированные способы для извлечения драгоценных металлов из такого типа сырья являются нерентабельными. Наиболее удовлетворительные результаты были получены при использовании гидрометаллургических способов извлечения ценных компонентов из техногенного сырья. В качестве выщелачивающего агента были испытаны различные растворители, такие как цианид натрия, тиокарбамид, тиосульфат и сульфит натрия. Цианирование оказалось наиболее эффективным способом извлечения благородных металлов из техногенного сырья, но процесс характеризовался высоким расходом цианида натрия. Поэтому поиск способа извлечения ценных компонентов из таких проблемных продуктов необходим для того, чтобы сделать их переработку более рентабельной за счет уменьшения потребления цианида при сохранении показателя извлечения золота. В результате проведенного анализа сделан вывод о перспективности данного сырья для извлечения цветных и благородных металлов с применением гидрометаллургических технологий. Сделан вывод о целесообразности поиска рационального способа переработки техногенного золотосодержащего сырья для того, чтобы сделать технологию более рентабельной для извлечения ценных компонентов.

Ключевые слова: металлургия благородных металлов, техногенное сырье, пиритные огарки, хвосты флотации, цианирование

Для цитирования: Василькова А.О., Васильков Н.В., Хмельницкая О.Д., Войлошников Г.И. Анализ современного состояния способов переработки техногенного золотосодержащего сырья. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 1. С. 97–107. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-1-97-107>

Analysis of the current state of technologies in the field of recycling technogenic gold-containing raw materials

Anastasiya O. Vasilkova*, Nikolay V. Vasilkov**,
Olga D. Khmel'nitskaya*, Grigoriy I. Voyloshnikov*

*Irgiredmet JSC, Irkutsk, Russia

**Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: In this article, we review existing approaches to recycling technogenic raw materials (ore dumps, metallurgical production slag, mill tailings of ore-dressing plants, etc.), containing non-ferrous and noble metals, which are accumulated in almost non-ferrous metallurgy industries. An analysis of existing technologies for processing technogenic raw materials (pyrite cinders and flotation tailings of concentration plants), which include enrichment, pyro- and hydrometallurgical and combined ways of extracting valuable components, was conducted on the basis of a review of published sources. It was shown that enrichment (screening, desliming in a hydrocyclone, enrichment using a concentration table, magnetic-liquid separation, flotation), pyrometallurgical and combined ways for extracting noble metals from this type of raw materials are unprofitable. The most satisfactory results were obtained using hydrometallurgical methods to extract valuable components from technogenic raw materials. Various solvents, such as sodium cyanide, thiocarbamide, sodium thiosul-

phate and sodium sulphite were tested as leaching agents. Cyanation proved to be the most effective way to extract noble metals from technogenic raw materials; however, this process is characterised by a high consumption of sodium cyanide. Therefore, it is of importance to discover an approach to extracting valuable components from such problematic products in order to make their processing more cost-effective by reducing cyanide consumption while maintaining gold extraction. According to the obtained results, gold-containing raw materials are promising in terms of extraction of non-ferrous and noble metals using hydrometallurgical technologies. Future research should identify rational methods for processing technogenic gold-containing raw materials in order to make the technology more profitable for extracting valuable components.

Keywords: metallurgy of noble metals, technogenic raw materials, pyrite cinders, flotation tailings, cyanation

For citation: Vasilkova AO, Vasilkov NV, Khmel'nitskaya OD, Voyloshnikov GI. Analysis of the current state of technologies in the field of recycling technogenic gold-containing raw materials. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(1):97–107. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-1-97-107>

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время значительные объемы техногенных ресурсов (рудных отвалов прошлых лет, лежалых хвостов обогащенных фабрик, шлаков металлургического производства и т.п.) накоплены практически во всех подотраслях цветной металлургии и ресурсы их постоянно пополняются. Такие объекты являются перспективными для вовлечения их в разработку из-за высокого содержания черных, цветных, редких и благородных металлов. Поэтому подбор технологии для переработки такого типа сырья является актуальной задачей на сегодняшний день.

В России суммарная доля отходов от добычи полезных ископаемых составляет 92% (около 4,6 млрд т), из них 15% (около 740 млн т) приходится на цветную металлургию и является уникальным источником цветных, редких и благородных металлов. Ценность техногенных отходов как сырья увеличивается еще и потому, что они не требуют затрат на добычу, доля которой в себестоимости получения металлов обычно весьма значительна. Эксплуатация такого вида сырья позволит поддерживать требуемый уровень производства металлов даже при значительном снижении объемов добычи металлических руд [1–13].

С учетом вышесказанного для извлечения ценных компонентов из указанного сырья разработаны различные варианты технологических схем, которые основаны на применении методов обогащения, пирометаллургических процессов, а также на их сочетании. Целью данной статьи явился обзор существующих технологий извлечения цен-

ных компонентов из таких техногенных отходов как огарки сернокислотного производства, получаемые на предприятиях химической промышленности, а также хвосты флотации медно-цинкового производства [14].

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПЕРЕРАБОТКИ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

Переработка пиритных огарков. В настоящее время в России накоплено более 30 млн т пиритных огарков. С одной стороны, пиритные огарки создают угрозу загрязнения водной и воздушной среды, с другой стороны являются ценным источником получения черных, цветных, благородных и редких металлов.

Получаемые пиритные огарки представляют собой комплексное сырье, в котором могут находиться Fe – 40–50%, Zn – 0,7–1%, Cu – 0,3–0,5%, Au – 1,1–2,1 г/т, Ag – 20–30 г/т [15].

Значительный объем исследований посвящен гравитационному обогащению пиритных огарков [16, 17]. Однако ввиду сложного минерального и химического составов, их тонкодисперсного состояния применение механических способов обогащения не позволило получить положительных результатов по извлечению железа и благородных металлов в обогащенные продукты. Подтверждением тому явились исследования, выполненные в Иркутском научно-исследовательском институте благородных и редких металлов и алмазов (АО «Иргиредмет»). Извлечение золота в концентрат составило 6,4%, серы – 7,2%, железа – 4,7%. Выход продукта находился на уровне 4,9%.

Сотрудниками Института проблем ком-

плексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук были проведены исследования по флотационному обогащению пиритных огарков [18, 19]. В концентрат удалось извлечь 65% золота, 30% серебра и 20% железа, что свидетельствует о невысокой степени концентрирования ценных компонентов в обогащенном продукте и, как следствие, получении неотвальных по содержанию металлов хвостов флотации.

Существует комбинированный метод переработки, который включает в себя предварительную сульфоагломерацию огарков с последующей флотацией полученного агломерата [20]. В результате получают медный концентрат с извлечением Cu – 75,4%, Au – 65,0% и Ag – 68,3% и пиритный концентрат с извлечением Fe – 59% и S – 48%. Предложенный вариант обогащения представляет интерес, но требует проверки в полупромышленном масштабе и проведения технико-экономических расчетов.

Итальянской фирмой «Montecatini» разработан способ переработки пиритных огарков, включающий магнетизирующий обжиг огарка и магнитную сепарацию его продуктов. Извлечение Fe в железный концентрат составляет 93,2%, который после окомкования и обжига направляют в доменный передел. Однако этот способ пригоден для пиритных огарков, не содержащих цветные и благородные металлы [21, 22].

Наиболее известным из пирометаллургических методов переработки пиритных огарков является низкотемпературный хлорирующий обжиг, с успехом применяемый в зарубежной практике [23]. Хлорирующий обжиг используется в том случае, если содержание меди превышает 0,5%. Данный метод позволяет извлечь 85–90% меди, значительную долю благородных металлов, а также обеспечивает практически полное обессеривание огарка, который может быть использован для производства чугуна.

Другим методом является высокотемпературная хлоридовозгонка цветных и благородных металлов из окатышей окислительно-го обжига. Товарной продукцией заводов, использующих данную технологию (г. Агамаса-

ки, Япония), являются медь, цинк, свинец, благородные металлы, строительный гипс и железорудные окатыши [24].

Имеется информация о проведении сульфатизирующего обжига пиритных концентратов. В сравнении с хлорирующим обжигом данный способ не обеспечивает извлечения свинца и благородных металлов [25].

В патенте [26] предложен способ переработки пиритных огарков, измельченных до крупности не более 55 мкм путем солянокислотного выщелачивания железа и цветных металлов и последующим сорбционным цианированием. Извлечение золота составило 70% [27].

Несмотря на эффективность применения пирометаллургических методов для извлечения ценных компонентов из пиритных огарков, в отечественной практике указанные технологии не используются.

Известны гидрометаллургические методы извлечения ценных компонентов из пиритных огарков.

В ЮАР для извлечения золота из пиритных огарков используют цианирование с предварительной известковой обработкой. Золото из цианистых растворов осаждают цинковой пылью. Показатели извлечения золота авторы не приводят [28, 29].

Разработана технологическая схема, включающая струйное измельчение с горячим воздухом, сернокислотное выщелачивание активированного продукта и сорбционное цианирование полученного кека. Данная технология обеспечивает извлечение золота и серебра на 80 и 89%, соответственно. Однако данная технология рентабельна для огарков при содержании в исходном продукте 3,4 г/т золота и 95 г/т серебра.

Предложен способ переработки пиритных огарков, включающий доизмельчение до крупности 95% класса минус 0,071 мм, известковую обработку с подачей воздуха, последующее двухстадийное цианирование и цементацию благородных металлов из растворов [30]. По данному методу извлечение золота составляет 61,5%, серебра – 40,5% при расходе цианистого натрия – 2,5 кг/т.

Более высокие технологические показа-

тели извлечения ценных компонентов из огарка сернокислотного производства обеспечиваются при реализации следующей технологической схемы: кислотная обработка огарка, фильтрация с отмывкой растворенных цветных металлов и последующим их осаждением, измельчение отмытого кека до крупности 95% класса минус 0,071 мм в известковой среде, аэрирование пульпы, цианирование в присутствии сорбента и обезвреживание сбросной пульпы [31]. Извлечение золота и серебра достигает 82,1 и 69,0% соответственно. Расход цианистого натрия – 1,4 кг/т. Однако предложенная технология представляется довольно сложной и требует значительных капитальных и эксплуатационных затрат.

В ЮАР на перерабатывающем отходы сернокислотного завода компании «Anglo American» предприятии используется вариант с измельчением огарков в цианистой среде [32]. Извлечение золота в данной работе не приведено.

В Греции испытана тиокарбамидная технология для извлечения золота и серебра из пиритных огарков¹. Предварительно огарок измельчали и обрабатывали серной кислотой, затем подвергали тиокарбамидному выщелачиванию. Извлечение золота и серебра достигало 95 и 94%. Расход тиокарбамида составил 6,6 кг/т огарка.

В «Universitas Barcinonensis» (г. Барселона, Испания) разработан способ переработки пиритных огарков, основанный на применении газообразного хлора при обычных температуре и давлении [33]. Извлечение золота и серебра 80–90%, меди и цинка – 80%, мышьяка – 50%.

Фирмой ООО «Экомет» (г. Москва, Россия) была предложена технология переработки пиритных огарков, которая состояла в автоклавном выщелачивании ценных компонентов, последовательном извлечении железа и товарных цветных, благородных и редких металлов по сорбционно-электролизной технологии. Разработанная схема обеспечи-

вает извлечение, %: Cu – 90; Zn – 75; Fe – 98; Pb – 75; Se – 75; Te – 50; Ag – 75; Au – 90 [34].

Альтернативным вариантом предлагаемого метода извлечения ценных компонентов из пиритных огарков является технология, разработанная в Московском государственном геологоразведочном университете, основанная на использовании в качестве растворителя аммиачно-тиосульфатных растворов, обеспечивающих приемлемые уровни извлечения золота, серебра и сопутствующих меди и цинка.

Имеются данные о выщелачивании золота сернистокислыми растворами из продуктов бактериального и автоклавного выщелачивания упорных сульфидных концентратов, а также из пиритных огарков [35]. При концентрации Na_2SO_3 – 40 г/дм³ извлечение золота в раствор составляет 86,0%.

В институте АО «Иргиредмет» были проведены исследования с целью разработки рациональной технологии комплексного извлечения ценных компонентов из пиритных огарков с содержанием Au – 2,3 г/т, Ag – 40,9 г/т, Cu – 0,4%, Zn – 0,65%, крупность 82-88% класса минус 0,074 мм [36].

Первоначально были рассмотрены различные варианты подготовки данных продуктов к последующему цианированию: водная, известковая, щелочная обработки, а также их сочетание: водная и известковая, водная и щелочная обработки. Экспериментально установлено, что проведение предварительной обработки пиритных огарков растворами гидроксида натрия обеспечивает в цикле последующего цианирования извлечение золота на 73,9–80,7%. Однако в этом случае процесс характеризуется высоким расходом NaOH – 59,6 кг/т, что свидетельствует о нецелесообразности применения данного процесса для переработки пиритных огарков ввиду высокой стоимости реагента и низкого содержания золота в исследуемом продукте (2,3 г/т).

¹Котляр Ю.А., Меретуков М.А., Стрижко Л.С. Металлургия благородных металлов (в 2-х т.): учеб. пособ. Т. 1. М.: ИД «Руда и минералы», 2005. 432 с.

На основании результатов проведенных исследований была рекомендована агитационно-цианистая технология переработки пиритных огарков, включающая в себя водную отмывку от цветных металлов с последующим извлечением меди цементацией металлическим железом и цинка путем введения в раствор соды (Na_2CO_3). Благородные металлы из цианистых растворов извлекают с помощью операции цинкового осаждения. Данная технология обеспечивает извлечение Cu – 22,5%, Zn – 62,0%, Au – 52,0% и Ag – 22,0%. Расход цианида натрия составил 1,4 кг/т.

Переработка хвостов флотации полиметаллических руд. В настоящее время в хвостохранилищах обогатительных фабрик России накоплено более 250 млн. т хвостов флотации, содержащих 170,8 тыс. т меди (0,28%), 159,5 тыс. т цинка (0,26%), 45,94 т золота (0,75 г/т) и 485,5 т серебра (7,92 г/т).

В 2012–2013 гг. был проведен комплекс исследований по выявлению возможности и эффективности переработки хвостов, получаемых при обогащении полиметаллических руд на одном из предприятий Российской Федерации, обогатительными и современными гидрометаллургическими методами.

Проведенными исследованиями установлено, что гравитационное обогащение лежащих хвостов возможно. Однако недостаточно полное извлечение золота (40% при выходе концентрата 20%) и низкое содержание ценного компонента в концентратах ограничивают перспективы применения гравитационных процессов.

Флотационное обогащение лежащих хвостов с целью получения отвалного по ценным компонентам продукта нецелесообразно, так как в хвостах обогащения концентрируется золото, благоприятное для гидрометаллургической переработки [37–39].

По результатам исследований перспективной признана технологическая схема, включающая цианидное выщелачивание лежащих хвостов в следующем режиме: крупность 80% класса минус 0,071 мм, концентрация NaCN – 0,03%, продолжительность цианирования – 24 ч. Извлечение золота, серебра и меди в раствор при этом составляет, соответственно, 58,43%, 32,57% и 24,65%.

Процесс цианирования хвостов сопровождается умеренным расходом цианида натрия (1,33 кг/т). При использовании операции регенерации цианида из растворов выщелачивания расход данного реагента может быть снижен до 0,78 кг/т.

В АО «Иргиредмет» были проведены исследования технологии извлечения золота из хвостов флотации полиметаллических руд с содержанием золота – 1,35 г/т, включающей прямое цианирование, гравитационное обогащение с использованием центробежных концентраторов «Knelson» и «Истомак», винтовых сепараторов, отсадочных машин и концентрационных столов. Вариант «отсадки-стол» обеспечил извлечение металла 70,8%. По результатам экспериментов предложена схема гравитационного обогащения с последующим цианированием гравитоконцентрата, обеспечивающая извлечение золота на уровне 63,4%.

Также в АО «Иргиредмет» были проведены исследования по разработке рентабельных способов извлечения цветных и благородных металлов из хвостов обогащения полиметаллической руды, полученных на еще одном предприятии Российской Федерации с содержанием компонентов: Au и Ag ~ 1,3 и 16 г/т, Cu и Zn ~ 0,13 и 0,23% [40].

Испытана возможность гравитационного и флотационного обогащения вышеуказанных хвостов флотации. Полученные данные свидетельствуют, что испытанные обогатительные методы не обеспечивают приемлемой степени концентрирования и извлечения ценных компонентов из исследуемого продукта.

Проведены опыты по окислительному обжигу и бескислородному обжигу и спеканию хвостов флотации с различными реагентами (Na_2CO_3 , CaO , NaCl , NaNO_3 и H_2SO_4) при различных температурах (200–600°C). Огарок (спек) подвергали водной отмывке и цианированию.

В бескислородном режиме извлечение цветных и благородных металлов практически не повысилось по сравнению с вариантом без пирометаллургической обработки.

При окислительном обжиге максимальное извлечение меди и цинка составило 27,2 и

24,8% соответственно, извлечение Au – 67,1%, Ag – 72,2%.

Таким образом, комбинированные пиро-, гидрометаллургические способы позволяют добиться повышения извлечения цветных и благородных металлов, но данная технология потребует больших капитальных затрат [41–43].

Также была исследована возможность прямой гидрометаллургической переработки хвостов.

Проведены опыты по извлечению цветных металлов с помощью водной отмывки, а также сернокислотному выщелачиванию измельченных хвостов и хвостов исходной крупности. Согласно полученным данным, для извлечения цветных металлов была рекомендована прямая водная отмывка, которая позволила извлечь 17,2% меди и 43,0% цинка. Доизмельчение и сернокислотное выщелачивание являются нецелесообразными, т.к. количество дополнительно извлекаемых цветных металлов весьма мало.

Для выщелачивания золота и серебра были испытаны тиокарбамидные, тиосульфатные и цианидные растворы.

Тиокарбамидное выщелачивание не обеспечило максимального извлечения золота и серебра, которое составило 10,7 и 23,7%, соответственно.

Тиосульфатное выщелачивание также оказалось неэффективным. Извлечение золота составило 10,7%, серебра – 23,7%.

Цианирование оказалось наиболее эффективным способом извлечения благородных металлов из хвостов обогащения. При умеренном расходе NaCN 1,0 кг/т и минимальном среди испытанных методов отношении Ж:Т=1:1 было получено извлечение золота 32,0%, серебра – 34,2%.

Были проведены исследования по оптимизации процесса цианирования, которые включали в себя подбор режима предварительного защелачивания отмытых хвостов и цианирования защелоченной пульпы.

На основании проведенных опытов было рекомендовано проводить защелачивание при минимальных затратах (малая продолжительность, без продувки воздуха и кислорода), т.к. продолжительность обработки и

продувка воздухом или кислородом практически не влияют на показатели извлечения золота (30,3–34,4%) и химический расход NaCN.

Цианирование хвостов характеризуется относительно большим расходом NaCN (3,4–4,1 кг/т). Отмывка исходных хвостов от водорастворимых примесей позволяет снизить расход NaCN до 2,1–2,2 кг/т. Извлечение благородных металлов практически не зависит от предварительной отмывки: в обоих случаях оно составило для золота 29,5–36,1%, для серебра – 32,2–42,8%.

Измельчение продукта до крупности 98% класса минус 0,071 мм (91% минус 30 мкм) позволило повысить извлечение золота до 41,8%, серебра – до 45,1%. Следовательно, раскрытие зерен полезных минералов с освобождением упорного золота (и серебра) начинается при шаровом измельчении хвостов флотации условно тоньше 30 мкм. Эта крупность шарового помола была принята оптимальной.

Бисерный помол хвостов до крупности более 90% класса минус 40 мкм обеспечил извлечение золота на уровне 43,4%, серебра – 57,2%; помол до 20 мкм – извлечение 49,2 и 60,5%, помол до 15 мкм – извлечение 50,0 и 61,8%, помол до 10 мкм – извлечение 53,3 и 62,5%, помол до 5 мкм – извлечение 52,2 и 62,3%. Помол до 20 мкм обеспечивает заметный прирост извлечения золота (на 15–20%) и серебра (на 20–30%). Дальнейшее измельчение до 15; 10 и 5 мкм практически не повлияло на извлечение полезных компонентов и является нецелесообразным.

Проведенные исследования показали, что данный объект является перспективным для проведения дальнейших исследований по определению возможности проведения цианирования в области ультранизких концентраций цианида натрия и разработки рациональной технологии извлечения цветных и благородных металлов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ литературных источников показал, что существуют различные технологии переработки техногенного сырья, которые включают в себя обогащательные, гидро- и пиро-

металлургические переделы, а также комбинированные способы извлечения ценных компонентов, но все они являются нерентабельными ввиду низкого извлечения благородного металла, высокого расхода реагентов, сложной технологической схемы или ап-

паратурного оформления. Поэтому поиск рационального способа переработки таких продуктов необходим для того, чтобы сделать технологию более рентабельной для извлечения ценных компонентов.

Список литературы

1. Дюбанов В.Г., Леонтьев Л.И. Техногенные отходы черной и цветной металлургии и проблемы окружающей среды // *Экология и промышленность России*. 2011. № 4. С. 32–35.
2. Бурдонов А.Е., Зелинская Е.В., Гавриленко Л.В., Гавриленко А.А. Изучение вещественного состава глиноземсодержащего материала алюминиевых электролизеров для использования в технологии первичного алюминия // *Цветные металлы*. 2018. № 3. С. 32–38. <https://doi.org/10.17580/tsm.2018.03.05>
3. Немчинова Н.В., Тютрин А.А., Бараускас А.Э. Анализ химического состава техногенных материалов производства первичного алюминия для поиска рациональных методов их переработки // *Цветные металлы*. 2019. № 12. С. 22–29. <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.12.03>
4. Bazhin V.Yu., Brichtkin V.N., Sizyakov V.M., Cherkasova M.V. Pyrometallurgical treatment of a nepheline charge using additives of natural and technogenic origin // *Metallurgist*. 2017. Vol. 61. No. 1-2. P. 147–154. <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0468-y>
5. Nemchinova N.V., Yakushevich P.A., Yakovleva A.A., Gavrilenko L.V. Experiment for use of Bratsk aluminium plant technogenic waste as a reducing agent during cast iron smelting // *Metallurgist*. 2018. Vol. 62. Iss. 1-2. P. 150–155. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0637-7>
6. Шепелев И.И., Головных Н.В., Сахачев А.Ю., Жижавев А.М., Котлягин А.Г. Улучшение качества спека известняково-нефелиновой шихты путем ввода в нее гипсоангидритового техногенного сырья // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018. Т. 22. № 5. С. 225–239. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-5-225-239>
7. Mann V., Pingin V., Zherdev A., Bogdanov Y., Pavlov S., Somov V. SPL recycling and re-processing // *Light Metals The Minerals, Metals & Materials Series* / eds. A. Ratvik. Cham: Springer, 2017. P. 571–578. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51541-0_71
8. Nemchinova N.V., Chernykh V.E., Tyutrin A.A., Patrushov A.E. Extraction of zinc and iron from electrosmelting dust // *Steel in Translation*. 2016. Vol. 46. No. 5. P. 368–372. <https://doi.org/10.3103/S0967091216050090>
9. Шумилова Л.В. Экспериментальные исследования в перколяторах по извлечению золота из забалансовых руд и техногенных отходов // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2007. № 4. С. 232–242.
10. Волюнкина Е.П. Анализ состояния и проблем переработки техногенных отходов в России // *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2017. № 2. С. 43–49.
11. Чантурия В.А., Макаров В.Н., Макаров Д.В. Экологические и технологические проблемы переработки техногенного сульфидсодержащего сырья: монография. Апатиты: Кольский научный центр РАН, 2005. 218 с.
12. Сидоренко Г.Г., Никитина Ж.С. Методы исследования технологии комплексной переработки руд. М.: Изд-во ИПКОН РАН, 1991. 98 с.
13. Gorlova O.E., Zhilina V.A. Development of deep and comprehensive processing processes of technogenic mineral raw materials in a view of sustainable development strategy // *XXIX International Mineral Processing Congress 2018 (Moscow, 17–21 September 2018)*. Moscow, 2018. P. 3279–3287.
14. Брагина В.И., Коннова Н.И. О комплексности переработки золотосодержащих руд // *Современные технологии освоения минеральных ресурсов: сб. науч. тр. IX Междунар. науч.-техн. конф. (г. Красноярск, 16 сентября 2011 г.)*. Красноярск, 2011. С. 43–46.
15. Фоменко А.И. Технологии переработки техногенного сырья: монография. М.: «Инфа-Инженерия», 2018. 137 с.
16. Пат. № 2483807, Российская Федерация, В03В 9/00. Способ извлечения золота и устройство для обогащения золотосодержащего сырья / К.П. Курганов; заявитель и патентообладатель К.П. Курганов. Заявл. 02.08.2011; опубл. 10.06.2013. Бюл. № 16.
17. Курганов К.П. Гравитационная технология для оценки и комплексной разработки техногенных образований благородных металлов // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2016. № 1. С. 49–56.
18. Гуляева Р.И., Шин С.Н., Чумарев В.М., Селиванов Е.Н. Технология комплексной переработки пиритных огарков // *Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований (Техноген – 2017): труды Конгресса с международным участием и Конференции молодых ученых V форума (г. Екатеринбург, 5–9 июня 2017 г.)*. Екатеринбург, 2017. С. 272–274.
19. Борисков Ф.Ф., Филиппова Н.А., Макаранец Л.О. Перспективы переработки пиритных хвостов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2003. № 9. С. 190–195.
20. Пат. № 2149706, Российская Федерация, В03Д 1/00. Способ обогащения минерального сырья / А.А. Быков, Г.И. Аржанников; заявитель и патентообла-

тель: А.А. Быков, Г.И. Аржанников. Заявл. 01.12.1998; опубл. 27.05.2000. Бюл. № 15.

21. Прохоров К.В., Александрова Т.Н. Исследование переработки техногенного тонкодисперсного сырья с использованием магнитного обогащения // Современные методы технологической минералогии в процессах комплексной и глубокой переработки минерального сырья (Плаксинские чтения – 2012): матер. междунар. совещания (г. Петрозаводск, 10–14 сентября 2012 г.). Петрозаводск, 2012. С. 346–348.

22. Фазылов Р.Р., Лебедев Б.Н. Применение электрической сепарации при комплексной переработке пиритных огарков // *Металлургия, обогащение и металловедение*. 1975. № 5. С. 32–36.

23. Бочаров В.А., Игнаткина В.А., Чантурия Е.Л., Юшина Т.И., Хачатрян Л.С., Дунаева В.Н. О выборе возможных способов комплексного использования техногенных пиритных хвостов в связи с их переработкой // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2015. № 10. С. 92–99.

24. Добросельская Н.П., Новикова Е.А., Певзнер Г.Р. Комплексная переработка пиритных огарков на новых японских заводах «Осаяма» и «Амагасаки» // *Цветная металлургия*. 1972. № 22. С. 34–37.

25. Пат. № 2659505, Российская Федерация, С22В 1/06. Способ переработки пиритных огарков / В.К. Ларин, Л.Ш. Бикбаев, Е.Г. Бибик; заявитель и патентообладатель В.К. Ларин, Л.Ш. Бикбаев, Е.Г. Бибик. Заявл. 06.09.2017; опубл. 02.07.2018. Бюл. № 19.

26. Пат. № 2716440, Российская Федерация, С22В 3/10. Способ переработки пиритных огарков / К.Е. Галеру, А.В. Алексеев, С.Н. Першин, Г.Е. Курдюмов, А.В. Граховский, В.Е. Тюренкова, Е.Г. Поездник; заявитель и патентообладатель Публичное акционерное общество «Северсталь» (ПАО «Северсталь»). Заявл. 31.10.2019; опубл. 12.03.2020. Бюл. № 8.

27. Пат. № 2623948, Российская Федерация, С22В 11/00. Способ комплексной переработки пиритных огарков / М.А. Щелконогов, Л.Г. Литвиненко, В.Г. Литвиненко, А.А. Морозов; заявитель и патентообладатель Публичное акционерное общество «Приаргунское производственное горно-химическое объединение» (ПАО «ППГХО»). Заявл. 06.04.2016; опубл. 29.06.2017. Бюл. № 19.

28. Горлова О.Е., Шадрюнова И.В., Жилина В.А., Чекушина Т.В. Повышение полноты извлечения золота из лежалых отходов переработки золотосодержащих руд // *Известия Тульского государственного университета*. 2020. Вып. 1. С. 193–210. <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2020-1-1-193-210>

29. Dementiev V., Khmel'nitskaya O., Mullov V., Komlev M., Lanchakova O. The development plant testing of valuable metals recovery technology from pyrite cinders // XXVI International mineral processing congress, International Mineral Processing Congress 2012: Innovative Processing for sustainable growth (New Deli, 24–28 September 2012). New Deli, 2012. P. 2412–2420.

30. Василькова Н.А., Жучков И.А., Игнатьева К.Д., Лодейщиков В.В., Панченко А.Ф., Стахеев И.С. [и др.]. Техника и технология извлечения золота из руд за

рубежом. М.: Металлургия, 1973. 288 с.

31. Пат. № 2034062, Российская Федерация, С22В 11/00. Способ извлечения благородных металлов из пиритных огарков / И.П. Смирнов, А.В. Водолазов, Г.Ф. Иванов, Г.И. Москвичева, Ю.А. Меньшиков, М.А. Жиличев [и др.]; заявитель и патентообладатель Всероссийский научно-исследовательский институт химической технологии. Заявл. 29.04.1992; опубл. 30.04.1995. Бюл. № 11.

32. Лодейщиков В.В. Золотоизвлекающие фабрики мира. Аналитический обзор. Т. 2. Иркутск: АО «Иргиредмет», 2005. 447 с.

33. Меретуков М.А., Орлов А.М. Металлургия благородных металлов. Зарубежный опыт. М.: Металлургия, 1991. 416 с.

34. Зубков А.А., Шуленина З.М. Переработка пиритных огарков // Конгресс обогатителей стран СНГ: материалы конгресса (г. Москва, 19–21 марта 2003 г.). Москва, 2003. Т. 1. С. 95–97.

35. Чугаев Л.В., Корженевская М.М. О выщелачивании золота сернокислотными растворами // *Известия вузов. Цветная металлургия*. 1972. № 5. С. 57–61.

36. Khmel'nitskaya O.D., Komlev M.Yu., Mullov V.M., Lanchakova O.V., Anayko A.I. A complex technology of pyrite cinder processing // XXIV International mineral processing congress (Beijing, 24–28 September). 2008. Vol. 3. P. 3984–3991.

37. Galtseva O., Bordunov S., Zhiganov A., Plotnikova I. Technology of gold-containing technogenic raw materials processing using the electric explosion method // *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 942. P. 30–39. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.942.30>

38. Nam Kwang Soo, Jung Byoung Hi, An Jeon Woong, Ha Tae Jun, Tran Tam, Kim Myong Jun. Use of chloridehypochlorite leachants to recover gold from tailings // *International Journal of Mineral Processing*. 2008. Vol. 86. Iss. 1-4. P. 131–140.

<https://doi.org/10.1016/j.minpro.2007.12.003>

39. Дементьев В.Е., Войлошников Г.И., Федоров Ю.О. Разработки АО «Иргиредмет» по извлечению ценных компонентов из техногенного сырья // *Известия Тульского государственного университета*. 2020. № 4. С. 418–427.

40. Бывальцев А.В., Шарипов Р.Х., Васильев Е.А., Рудой Г.Н. Разработка рациональной технологии извлечения золота из хвостов Учалинской обогатительной фабрики // *Обогащение руд*. 2019. № 5. С. 46–51. <https://doi.org/10.17580/or2019.05.09>

41. Karagodin S.S., Karagodin V.S., Morozov Yu. P., Zaulzolkov I.V. To the question about prospects (upcycle) of abandoned copper-sulphide pits in the Urals // *Известия Уральского государственного горного университета*. 2018. № 4. С. 114–121. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2018-4-114-121>

42. Shadrinova I.V., Gorlova O.E., Orekhova N.N., Zilina V.A. Forming conditions of technogenic gold-bearing objects and technological properties of gold from gold extraction plant tailings // *International journal of Applied Engineering Research*. 2018. Vol. 13. No. 8. P. 6340–6347. [Электронный ресурс]. URL:

43. https://www.ripublication.com/ijaer18/ijaerv13n8_99.pdf (22.05.2020).
44. Myagkaya I.N., Lazareva E.V., Gustaytis M.A., Zhmodik S.M. Gold and silver in a system of sulfide tail-

ings. Part 2: Reprecipitation on natural peat // Journal of Geochemical Exploration. 2016. Vol. 165. P. 8–22. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.01.016>

References

1. Dyubanov VG, Leontyev LI. Technogenic waste products of ferrous and nonferrous metallurgy, and environmental issues. *Ekologiya i promyshlennost Rossii = Ecology and Industry of Russia*. 2011;4:32–35. (In Russ.)
2. Burdonov AE, Zelinskaya EV, Gavrilenko LV, Gavrilenko AA. Investigation of substantial composition of alumina-bearing material of aluminium electrolyzers for usage in primary aluminium technology. *Tsvetnye Metally*. 2018;3:32–38. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/tsm.2018.03.05>
3. Nemchinova NV, Tyutrin AA, Barauskas AE. Analysing the chemical composition of man-made materials resultant from the production of primary aluminium in order to find cost-effective recycling techniques. *Tsvetnye Metally*. 2019;12:22–29. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.12.03>
4. Bazhin VY, Brichkin VN, Sizyakov VM, Cherkasova MV. Pyrometallurgical treatment of a nepheline charge using additives of natural and technogenic origin. *Metallurgist*. 2017;61(1-2):147–154. <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0468-y>
5. Nemchinova NV, Yakushevich PA, Yakovleva AA, Gavrilenko LV. Experiment for use of Bratsk aluminium plant technogenic waste as a reducing agent during cast iron smelting // *Metallurgist*. 2018;62(1-2):150–155. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0637-7>
6. Shepelev II, Golovnykh NV, Sakhachev AY, Zhyzhaev AM, Kotlyagin AG. Improving limestone-nepheline charge sinter quality by gypsum anhydrate technogenic raw material introduction. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(5):225–239. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-5-225-239>
7. Mann V, Pingin V, Zherdev A, Bogdanov Y, Pavlov S, Somov V. SPL recycling and re-processing. In: Ratvik A (eds.). *Light Metals. The Minerals, Metals & Materials Series*. Cham: Springer; 2017, p. 571–578. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51541-0_71
8. Nemchinova NV, Chernykh VE, Tyutrin AA, Patrushov AE. Extraction of zinc and iron from electrosmelting dust. *Steel in Translation*. 2016;46(5):368–372. <https://doi.org/10.3103/S0967091216050090>
9. Shuliova LV. Experimental studies in percolators on gold extraction from off-balance ores and industrial waste. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2007;4:232–242. (In Russ.)
10. Volynkina EP. Analysis of the state and problems of processing industrial waste in Russia. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta*. 2017;2:43–49. (In Russ.)
11. Chanturia VA, Makarov VN, Makarov DV. *Ecological and technological challenges in processing of technogenic sulphide-bearing raw materials*. Apatity: Kola Scientific Centre RAS; 2005, 218 p. (In Russ.)
12. Sidorenko GG, Nikitina JS. *Research methods of comprehensive ore processing technology*. Moscow: Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources (IPKON); 1991, 98 p. (In Russ.)
13. Gorlova OE, Shadrinova IV, Zhilina VA. Development of deep and comprehensive processing processes of technogenic mineral raw materials in a view of sustainable development strategy. In: *XXIX International Mineral Processing Congress*. 17–21 September 2018, Moscow. Moscow; 2018, p. 3279–3287.
14. Bragina VI, Konnova NI. On integrated processing of gold-bearing ores. In: *Sovremennyye tekhnologii osvoeniya mineral'nykh resursov: sbornik nauchnykh trudov IX mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii = Modern technologies of mineral resources development: collected scientific articles of IX International scientific and technical conference* 16 September 2011, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk; 2011, p. 43–46. (In Russ.)
15. Fomenko AI. *Recycling technologies for technogenic raw materials*. Moscow: Infa-Inzheneriya; 2018, 137 p. (In Russ.)
16. Kurganov KP. *Gold extraction method and a device for gold-bearing raw materials concentration*. Patent RF, no. 2483807; 2013. (In Russ.)
17. Kurganov KP. Gravitational technology for the assessment and complex development of technogenic formations of precious metals. *Vestnik Rossiiskogo Universiteta Druzhby Narodov. Seriya: Inzhenernyye issledovaniya = RUDN Journal of Engineering Researches*. 2016;1:49–56.
18. Gulyaeva RI, Shin SN, Chumarev VM, Selivanov EN. Integrated technology for pyrite cinder processing. In: *Fundamental'nyye issledovaniya i prikladnyye razrabotki protsessov pererabotki i utilizatsii tekhnogennykh obrabotannykh: trudy Kongressa s mezhdunarodnym uchastiyem i konferentsii molodykh uchenykh V foruma = Fundamental research and applied development of the processes of technogenic formation recycling and disposal: Proceedings of the Congress with International Participation and the Conference of Young Scientists of V Forum*. 5–9 June 2017, Ekaterinburg. Ekaterinburg; 2017, p. 272–274. (In Russ.)
19. Boriskov FF, Filippova NA, Makaranets LO. Development prospects of pyrite tailings. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2003;9:190–195. (In Russ.)
20. Bykov AA, Arzhannikov GI. *Method of mineral raw materials concentration*. Patent Russian Federation, no. 2149706; 2000. (In Russ.)
21. Prochorov KV, Alexandrova TN. Research of technogenic fine-dispersed raw material processing using magnetic concentration. In: *Sovremennyye metody tekhnolog-*

- icheskoj mineralogii v processah kompleksnoj i glubokoj pererabotki mineral'nogo syr'ya (Plaksinskie chteniya – 2012): materialy mezhdunarodnogo soveshchaniya = Modern methods of technological mineralogy in the processes of complex and deep processing of mineral raw materials (Plaksinskie readings - 2012): Materials of the international meeting. 10–14 September 2012, Petrozavodsk. Petrozavodsk; 2012, p. 346–348. (In Russ.)
22. Fazylov RR, Lebedev BN. Using electrical separation in integrated processing of pyrite cinders. *Metallurgiya, obogashcheniye i metallovedeniye*. 1975;5:32–36.
23. Bocharov VA, Ignatkina VA, Chanturiya EL, Yushina TI, Khachatryan LS, Dunaeva VN. On selection of possible methods for integrated use of pyrite tailings after processing. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2015;10:92–99. (In Russ.)
24. Dobroselskaya NP, Novikova EA, Pevzner GR. Pyrite cinder complex processing at new Japanese factories Osayama and Amagasaki. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya = Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya = Universities' Proceedings Non-Ferrous Metallurgy*. 1972;22:34–37. (In Russ.)
25. Larin VK, Bikbaev LSh, Bibik EG. *Processing method of pyrite cinders*. Patent Russian Federation, no 2659505; 2018. (In Russ.)
26. Galery KE, Alekseev AV, Pershin SN, Kurdyumov GE, Grakhovskiy AV, Tyurenkova VE, Poyezdnik GE. *Method for processing pyrite cinders*. Patent Russian Federation, no 2716440; 2020. (In Russ.)
27. Shchelkonogov MA, Litvinenko LG. *Integrated processing method for pyrite cinders*. Patent Russian Federation, no 2623948; 2017. (In Russ.)
28. Gorlova OE, Shadunova IV, Zhilina VA, Chekushina TV. Increasing the ratio of gold recovery from aged tailings of gold-bearing ore processing. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta*. 2020;1:193–210. <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2020-1-1-193-210> (In Russ.)
29. Dementiev V, Khmel'nitskaya O, Mullov V, Komlev M, Lanchakova O. The development plant testing of valuable metals recovery technology from pyrite cinders. In: *XXVI International Mineral Processing Congress, International Mineral Processing Congress 2012: Innovative processing for sustainable growth*. 24–28 September 2012, New Delhi. New Delhi; 2012, p. 2412–2420.
30. Vasilkova NA, Zhuchkov IA, Ignat'eva KD, Lodejshchikov VV, Panchenko AF, Staheev IS, et al. *Methods and technology of gold extraction from ores abroad*. Moscow: Metallurgiya; 1973, 288 p. (In Russ.)
31. Smirnov IP, Vodolazov AV, Ivanov GF, Moskvicheva GI, Men'shikov YuA, Zhilichev MA, et al. *Extraction method of precious metals from pyrite cinders*. Patent Russian Federation, no. 2034062; 1995. (In Russ.)
32. Lodejshchikov VV. *Gold recovery factories of the world. Analytical review*. Vol. 2. Irkutsk: OAO "Irgiredmet"; 2005, 447 p. (In Russ.)
33. Meretukov MA, Orlov AM. *Metallurgy of precious metals. Foreign experience*. Moscow: Metallurgy; 1991, 416 p. (In Russ.)
34. Zubkov AA, Shulenina ZM. Processing of pyrite cinders. In: *Congress obogatiteley stran SNG: Materialy congressa = CIS Congress of the Mineral Processing Engineers: Congress Proceedings*. 19–21 March 2003, Moscow. Moscow; 2003, p. 95–97. (In Russ.)
35. Chugaev LV, Korzhenevskaya MM. Leaching of gold with sulfuric acid solutions. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya = Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya = Universities' Proceedings Non-Ferrous*. 1972;5:57–61. (In Russ.)
36. Khmel'nitskaya OD, Komlev MYu, Mullov VM, Lanchakova OV, Anayko AI. A complex technology of pyrite cinder processing. In: *XXIV International Mineral Processing Congress*. 24–28 September 2008, Beijing. Beijing; 2008, vol. 3, p. 3984–3991.
37. Galtseva O, Bordunov S, Zhiganov A, Plotnikova I. Technology of gold-containing technogenic raw materials processing using the electric explosion method // *Materials Science Forum*. 2019;942:30–39. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.942.30>
38. Nam Kwang Soo, Jung Byoung Hi, An Jeon Woong, Ha Tae Jun, Tran Tam, Kim Myong Jun. Use of chloridehypochlorite leachants to recover gold from tailings. *International Journal of Mineral Processing*. 2008;86(1-4):131–140. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2007.12.003>
39. Dementiev VE, Voiloshnikov GI, Fedorov YuO. JSC Irgiredmet developments on valuable constituents recovery from technogenic raw materials. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta = Izvestiya Tula State University*. 2020;4:418–427. (In Russ.)
40. Byval'tsev AV, Sharipov RKh, Vasiliev EA, Rudoy GN. Development of a rational technology for gold extraction from Uchalinskaya concentration plant tailings. *Obogashcheniye rud = Materials Chemistry*. 2019;5:46–51. (In Russ.)
41. Karagodin SS, Karagodin VS, Morozov Yu P, Zauzol'kov IV. To the question about prospects (upcycle) of abandoned copper-sulphide pits in the Urals. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta = News of the Ural State Mining University*. 2018;4:114–121. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2018-4-114-121>
42. Shadrunkova IV, Gorlova OE, Orekhova NN, Zilina VA. Forming conditions of technogenic gold-bearing objects and technological properties of gold from gold extraction plant tailings. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2018;13(8):6340–6347. Available from: https://www.ripublication.com/ijaer18/ijaerv13n8_99.pdf [Accessed 12nd May 2020].
43. Myagkaya IN, Lazareva EV, Gustaytis MA, Zhmodik SM. Gold and silver in a system of sulfide tailings. Part 2: Reprecipitation on natural peat. *Journal of Geochemical Exploration*. 2016;165:8–22. <https://doi.org/10.1016/j.gexpro.2016.01.016>



СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Василькова Анастасия Олеговна,
аспирант,
младший научный сотрудник Лаборатории
гидрометаллургии,
АО «Иргиредмет»,
664011, г. Иркутск, б-р Гагарина, 38, Россия;
✉ e-mail: anastasiya.perepelkina.94@mail.ru

Васильков Николай Владимирович,
магистрант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: nik.vasilkov.94@bk.ru

Хмельницкая Ольга Давыдовна,
кандидат технических наук,
заведующая Лабораторией гидрометаллургии,
АО «Иргиредмет»,
664011, г. Иркутск, б-р Гагарина, 38, Россия;
e-mail: lab15@irgiredmet.ru

Войлошников Григорий Иванович,
доктор технических наук, профессор,
заместитель генерального директора
по научной работе и инновациям,
АО «Иргиредмет»,
664011, г. Иркутск, б-р Гагарина, 38, Россия;
e-mail: greg@irgiredmet.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 11.09.2020; одобрена после рецензирования 01.12.2020; принята к публикации 26.02.2021.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anastasiya O. Vasilkova,
Postgraduate Student,
Junior Researcher of the Hydrometallurgy Laboratory,
Irgiredmet JSC,
38, Gagarin Boulevard, Irkutsk 664011, Russia;
✉ e-mail: anastasiya.perepelkina.94@mail.ru

Nikolay V. Vasilkov,
Master's Degree Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: nik.vasilkov.94@bk.ru

Olga D. Khmelnitskaya,
Cand. Sci. (Eng.),
Head of the Hydrometallurgy Laboratory,
Irgiredmet JSC,
38, Gagarin Boulevard, Irkutsk 664011, Russia;
e-mail: lab15@irgiredmet.ru

Grigoriy I. Voyloshnikov,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Deputy General Director for Research and Innovation,
Irgiredmet JSC,
38, Gagarin Boulevard, Irkutsk 664011, Russia;
e-mail: greg@irgiredmet.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 11.09.2020; approved after reviewing 01.12.2020; accepted for publication 26.02.2021.

On the question of using solid electrodes in the electrolysis of cryolite-alumina melts. Part 2. The mechanism of passivation and conditions of stable electrolysis

Evgeniy S. Gorlanov

«EXPERT-AL» LLC, St. Petersburg, Russia

Abstract: The aim was to investigate the mechanism of passivation of polycrystalline cathodes and to justify experimentally the possibility of stable electrolysis when using solid electrodes. Under laboratory conditions, the mechanism of electrode passivation and the conditions for stable electrolysis were experimentally studied. To this end, the methods of X-ray phase analysis and electron-microscopic examination of the spent electrodes were employed. A study of the electrolysis of cryolite-alumina melts showed that, in the presence of surface micro- and microdefects on a solid cathode, a precipitate consisting of impurities and electrolyte components was gradually formed. Under the selected experimental conditions, the surface of carbon cathodes was passivated with a dense double-layer precipitate of CaB_6 and electrolyte components. Using the example of a carbon cathode containing both metallic titanium and titanium oxides, a method for eliminating surface microdefects is presented. This method consists in electrochemical borating of a carbon-titanium cathode. The conducted spectral electron microscopic and energy-dispersive analysis found that, during a 45-hour laboratory experiment at 980 °C and under a current density of 0.7 A/cm², the inhomogeneous surface of the cathode was homogenized with a titanium diboride layer. At stable electrolysis parameters, an aluminum layer is electrodeposited on the cathode. A complex analysis of the electrolysis conditions, the appearance of the initial and spent carbon cathodes, and the data of analytical studies confirmed that micro- and macrodefects of the electrode cause the formation of a dense layer of deposits on the cathode. The established mechanism of passivation of a carbon cathode as a polycrystalline product can be applied to all composite electrodes, including those based on titanium diboride. A logical condition for the practical application of solid cathodes is the development of an electrolysis process with continuous surface reconditioning to decrease the chemical inhomogeneity and microdefects of the surface across the entire technological sequence.

Keywords: electrolysis, solid electrodes, physical microdefects, chemical inhomogeneity, cathode passivation, inert anodes, wettable cathodes

For citation: Gorlanov ES. On the question of using solid electrodes in the electrolysis of cryolite-alumina melts. Part 2. The mechanism of passivation and conditions of stable electrolysis. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(1):108–121. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-1-108-121>

УДК 620.181.4, 666.3-135

К вопросу о применении твердых электродов для электролиза криолитоглиноземных расплавов. Часть 2. Механизм пассивации и условия стабильного электролиза

© Е.С. Горланов

ООО «ЭКСПЕРТ-АЛ», г. Санкт-Петербург, Россия

Резюме: Цель – исследование механизма пассивации поликристаллических катодов и экспериментальное подтверждение способа стабильного электролиза с применением твердых электродов. В лабораторных условиях экспериментально исследуется механизм пассивирования катодов и условия стабильного ведения процесса электролиза с привлечением рентгенофазового анализа и электронно-микроскопических исследований использованных электродов. В процессе электролиза криолитоглиноземных расплавов установлено, что при наличии поверхностной микро- и макродефектности на твердом катоде последовательно формируется осадок из примесей и составляющих электролита. В созданных условиях эксперимента поверхность углеродного катода пассивировалась плотным двуслойным осадком из CaB_6 и составляющих электролита. На примере углеродного катода, содержащего титан в металлическом виде и в виде его оксидов, представлен способ устранения поверхностной микродефектности электродов, заключающийся в электрохимическом борировании углеродтитанового катода.

Спектральным электронно-микроскопическим и энергодисперсионным методами анализов установлено, что в течение 45-часового лабораторного эксперимента при 980°C и плотности тока 0,7 А/см² неоднородная поверхность катода гомогенизирована диборид-титановым слоем. При стабильных параметрах электролиза криолито-глиноземного расплава на катоде электроосажден слой алюминия. Комплексный анализ условий электролиза, внешнего вида исходных и использованных углеродных катодов, данных аналитических исследований дают основания утверждать, что формирование на катоде плотного слоя осадков провоцирует поверхностная микро- и макродефектность электрода. Установленный механизм пассивирования углеродного катода как поликристаллического изделия распространяется на любые композитные электроды, в том числе на основе диборида титана. Логичным условием применения твердых катодов является организация процессов электролиза с непрерывным восстановлением поверхности, уменьшением ее химической неоднородности и микродефектности в течение всего технологического периода.

Ключевые слова: электролиз, твердые электроды, физическая микродефектность, химическая неоднородность, пассивация катода, инертные аноды, смачиваемые катоды

Для цитирования: Горланов Е.С. К вопросу о применении твердых электродов для электролиза криолито-глиноземных расплавов. Часть 2. Механизм пассивации и условия стабильного электролиза. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 1. С. 108–121. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-1-108-121>

INTRODUCTION

The first part of this paper presented an extensive review of the research and inventions related to the electrolysis of cryolite-alumina melts using solid electrolytes. Among them were Hall's and Heroult's patents (1886–1892) [1–3], which described the method of electrolytic production of aluminum. Unfortunately, this method never found practical application. In 1988, the efforts of the Pittsburgh Reduction Company to implement Hall's ideas in practice led to the construction of electrolytic cells with liquid aluminum, whose surface acted as a cathode. Along with the continuous development of this technology [4–10], there were attempts to develop a technology of electrolysis of molten salts on solid electrodes, which was expected to provide decreased energy consumption, reduced environmental burden and increased specific output. Under laboratory and semi-industrial conditions, the possibility of using various types of oxygen-evolving anodes and aluminum-wetted cathodes [11–17] was studied. Along with the confirmed possibility of their use in principle, such challenges as the increased consumption of dissolving anodes, passivation of cathodes and other electrolytic process dysfunctions were noted. The proposed recommendations to increase the working temperature and

correct the compositions of the electrolyte and electrode have not so far provided conditions for implementing this technology on a commercial basis.

According to numerical studies and experimental data¹, the reason for the abovementioned problems and limitations consists in the chemical and physical inhomogeneity of the surface structure of electrodes. The concentration of current on the micro-areas of surface defects causes an increase in the rate of electrode processes with the development of concentration polarization and an uncontrolled increase in voltage up to the formation of critical electrode potentials for the present simple and complex ions. At the positive electrode, this will lead in varying degrees to the release of gaseous fluorocarbons at the carbon anode and fluorine at the inert anode, with corresponding adverse consequences. At the cathode, a discharge of electronegative impurities and decomposition of electrolyte components develop, followed by surface passivation and electrolysis destabilization. These undesirable processes are highly likely when using polycrystalline or cast anodes and cathodes, thus requiring theoretical study and practical research. In this part of the paper, the consequences of electrolysis of cryolite-alumina melts at a carbon cathode, in which the

¹Gorlanov E.S. Doping of cathodes used in aluminium electrolytic cells by a low-temperature synthesis of titanium diboride: Dissertation for the Degree of Dr. Sci. in Engineering: 05.16.02. Saint Petersburg, 2020. 391 p. / Горланов Е.С. Легирование катодов алюминиевых электролизеров методом низкотемпературного синтеза диборида титана: дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.02. СПб., 2020. 391 с.

current process is complicated by the complex composition of the electrolyte, are studied by standard physicochemical methods. This exaggerated variant of cathode passivation in laboratory conditions is interesting for the following reasons: first, by modelling the electrolysis conditions of industrial electrolytes of complex composition; second, there is a possibility of instrumental analysis of the details and mechanism of cathode passivation, and third, such studies make it possible to elaborate and assay the approaches to overcome the existing limitations in using solid electrodes for electrolytic production of aluminum. In this regard, one of the possible ways of reducing the surface heterogeneity at the micro- and macrolevel is presented, i.e., the method of borating a metal-containing cathode in trace amounts.

EXPERIMENTS AND DISCUSSION

Experiments were carried out on a laboratory setup under galvanostatic conditions at a temperature of 980 °C and an interpolar distance of 30–34 mm. A cell was used, in which a graphite crucible served as an anode, and a carbon-graphite cylinder with a diameter of 30 mm and a height of 50 mm, immersed in the electrolyte, served as a cathode.

Study of the cathode passivation mechanism. In Experiment No. 1, an original composition of electrolyte based on technical cryolite

was corrected to a cryolite ratio (c.r.) 2.7, saturated with alumina (8.3 wt.% Al_2O_3) and calcium fluoride (4.6 wt.% CaF_2). Moreover, borax, in the amount of 12.7 wt.% $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, as a boron source was added to the electrolyte. During 24 h of the experiment, the current density was maintained at 0.4 A/cm², and the boron content was replenished every 1 h of the experiment. In the cell, the voltage, which varied during the experiment in the range of 2.450–2.510 V with a periodic short-term increase to 4–5 V, was monitored using a voltmeter.

Following the completion of Experiment No.1, a viscous dark precipitate was found at the bottom of the crucible, and a 3–5 mm thick dense layer of solidified electrolyte which could not be cleaned with a scraper (fig. 1) was found on the submerged part of the cathode. Note that a cross-section of the 5-mm thick precipitate layer differs in contrast and density. A sample of this layer for X-ray diffraction (XRD) analysis was cut with a diamond wheel. For the same purpose, a scrape-off was made from a surface layer of the carbon cathode. The analysis results indicate that a mixture of components of electrolyte and calcium hexaboride (tab. 1) is present on the cathode surface. Neither aluminum nor Al_2O_3 or B_2O_3 as independent phases were identified in the samples of the electrolyte; however, unidentified crystalline and amorphous phases were found in amounts of 10–20 wt.%.

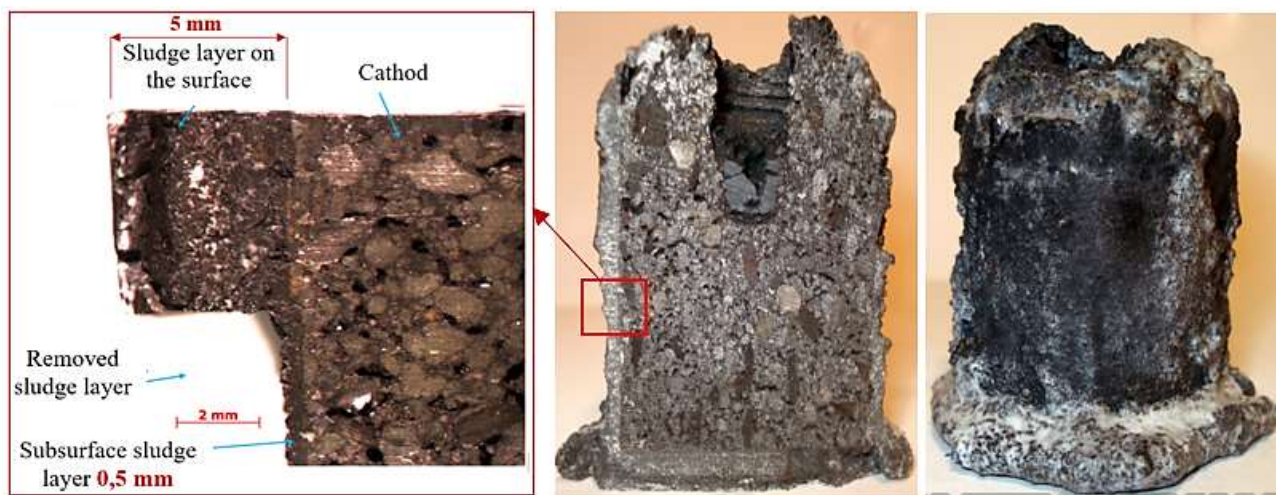


Fig. 1. The sample after removing from the cell
Рис. 1. Образец после извлечения из ячейки

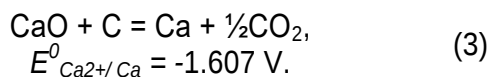
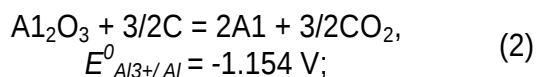
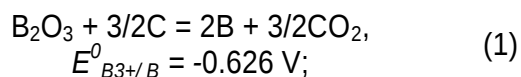
Table 1. The composition of the precipitate (XRD data)

Таблица 1. Состав осадка (данные рентгенофазового анализа)

Phase	Sampling point	Content, wt.%
CaB ₆	cathode surface	15.4
	precipitate	12.3
Na ₃ AlF ₆	cathode surface	23.3
	precipitate	75.3
NaF	cathode surface	0
	precipitate	8.8
Crystalline phase	cathode surface	20–25
	precipitate	0
Amorphous phase	cathode surface	10
	precipitate	15–20

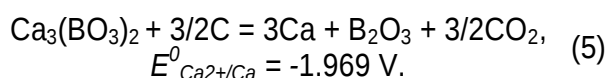
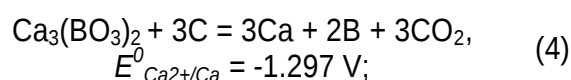
It is obvious that the compounds found, in particular, calcium hexaboride, can passivate the cathode surface and isolate access of electroactive components. In this regard, the authors undertook a study of the electrodeposition mechanism of CaB₆ which is a semiconductor having an order of magnitude higher electrical resistance (120–220 μOhm·cm) than that of titanium diboride (12–26 μOhm·cm) [18].

First, note that the decomposition of oxide and the discharge of aluminum ions on the cathode surface at 1000 °C, relative to calcium ions, has the following advantage:



These advantages of aluminum oxide remain

before the decomposition of calcium oxide/boron oxide complexes:



Nevertheless, there is no aluminum on the cathode surface, but the CaB₆ layer is formed. The standard reason for this phenomenon may be a deficiency of aluminum ions, but the content of aluminum oxide in the electrolyte, close to saturation, remained sufficient to ensure the process. Therefore, it was assumed that the mechanism of formation of calcium hexaboride could be related to the inhomogeneous surface of the composite carbon cathode having numerous micro- and macroroughnesses, cracks, and pores. fig. 2 shows the microstructures of different portions of the carbon cathode under magnification from ×55 to ×3050.

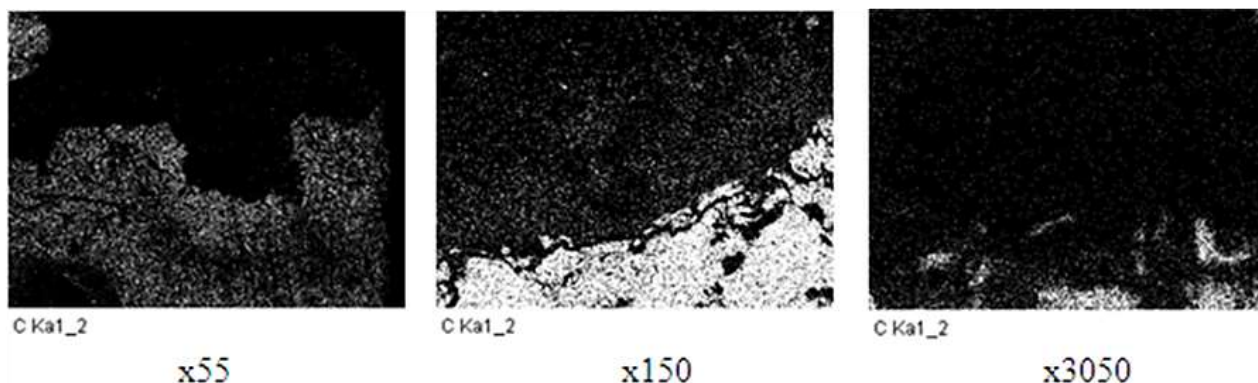


Fig. 2. Cathode surface condition
Рис. 2. Состояние поверхности катода

Given such a physical inhomogeneity, the current is concentrated on the faces and edges of the pores, point areas of microdefects. A high fluctuating current density is observed over the entire surface, approaching the limit values for boron and aluminum discharge. Accordingly, there is a high probability of the cathode potential shift to the electronegative side until the decomposition potential of calcium oxide and its complexes according to reactions (3)–(5). The effect is aggravated by an excessively high concentration of components in the electrolyte, which deteriorates the scattering properties of the melt and the microdistribution of current at microdefects [19].

Reduced adatoms of calcium and boron stabilize their state at the surface by interaction to form calcium hexaboride:



The proposed mechanism for the formation of such precipitates was revised according to the results of scanning electron microscopy and energy-dispersive spectroscopy (SEM-EDS) on the site on the lateral surface of the cathode, undertaken to determine the location (distribution) of CaB_6 in the near-surface zone. fig. 3 below shows the macro- and microstructure of the site, including the surface crust of the electrolyte and the lateral subsurface carbon layer of the cathode. As shown in fig. 3, not the entire 5-mm layer of the precipitate was subjected to electron microscopic study, but only a thin near-cathode layer of about 0.5 mm.

As follows from the data of energy dispersive analysis (fig. 4), in the presence of calcium melt on the surface of the carbon cathode, the precipitate is formed in 2 layers. The upper layer consists almost entirely of calcium boride CaB_6 . This layer extends along the scanning line up to

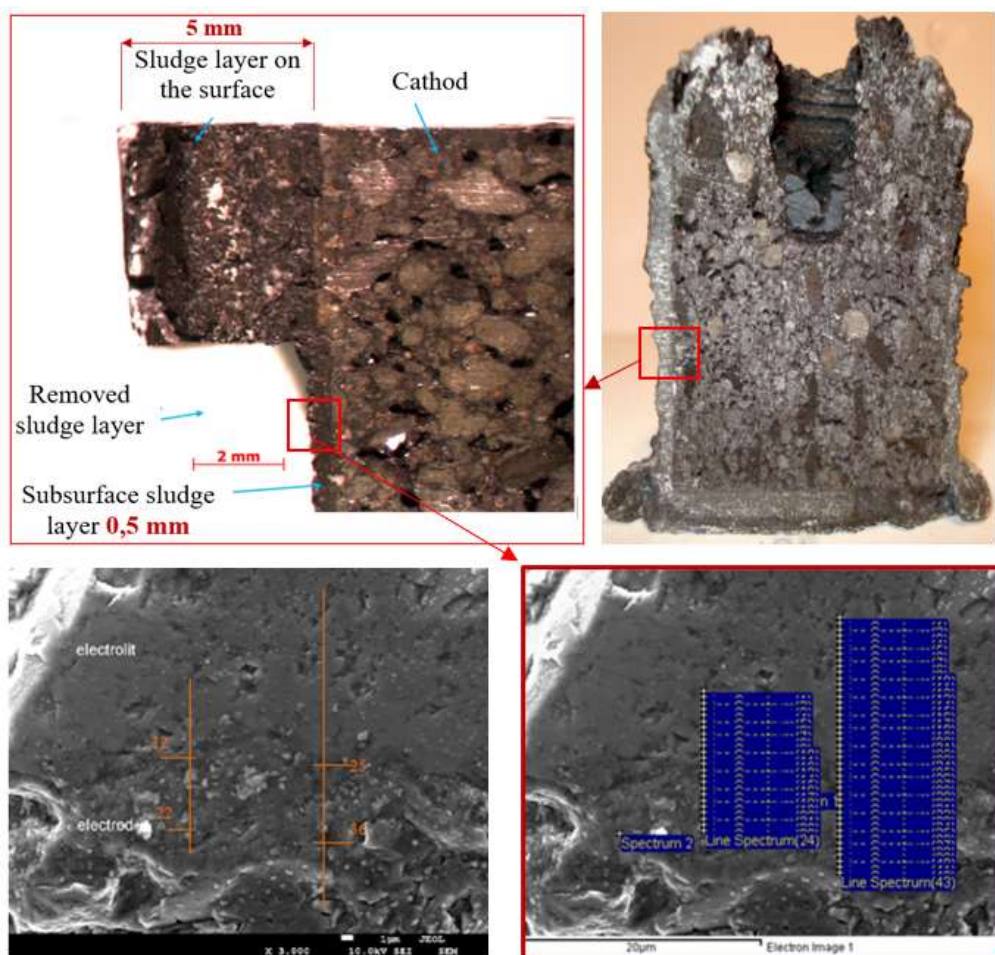


Fig. 3. Microstructure of the sample (x3000)
Рис. 3. Микроструктура образца (x3000)

point 25, after which the content of calcium (Ca) and boron (B) sharply decreases. On the contrary, the content of the electrolyte components Na, Al, F and O increases and spreads by 5–8 microns to point 36, after which the carbon content increases. In other words, a thin (about 5 μm) electrolyte layer is present between the calcium

hexaboride layer and the cathode surface.

EDS mapping of the site confirms the layered structure of the melt above the cathode surface. To determine the areas of distribution of elements, the lower limit of calcium (Ca) was copied to other maps.

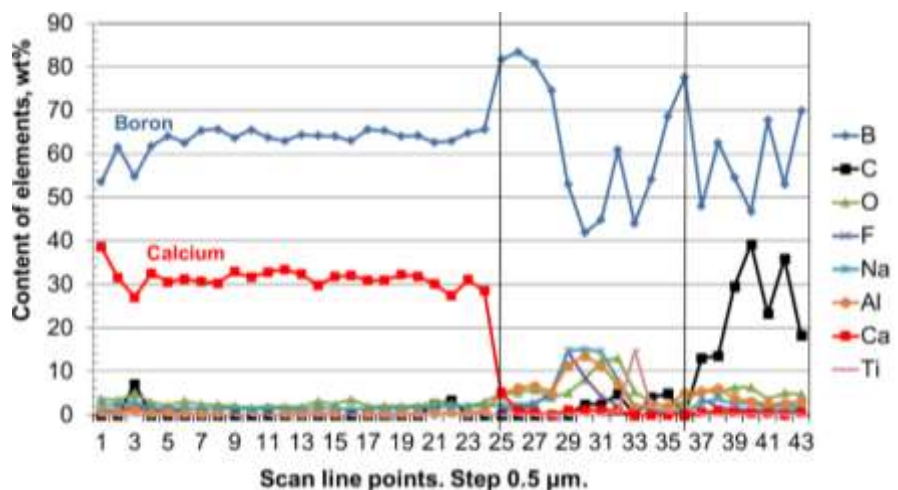


Fig. 4. EDS analysis along the line of point spectra (the first scanning line, see fig. 3)
Рис. 4. EDS-анализ по линии точечных спектров (правая линия сканирования, см. рис. 3)

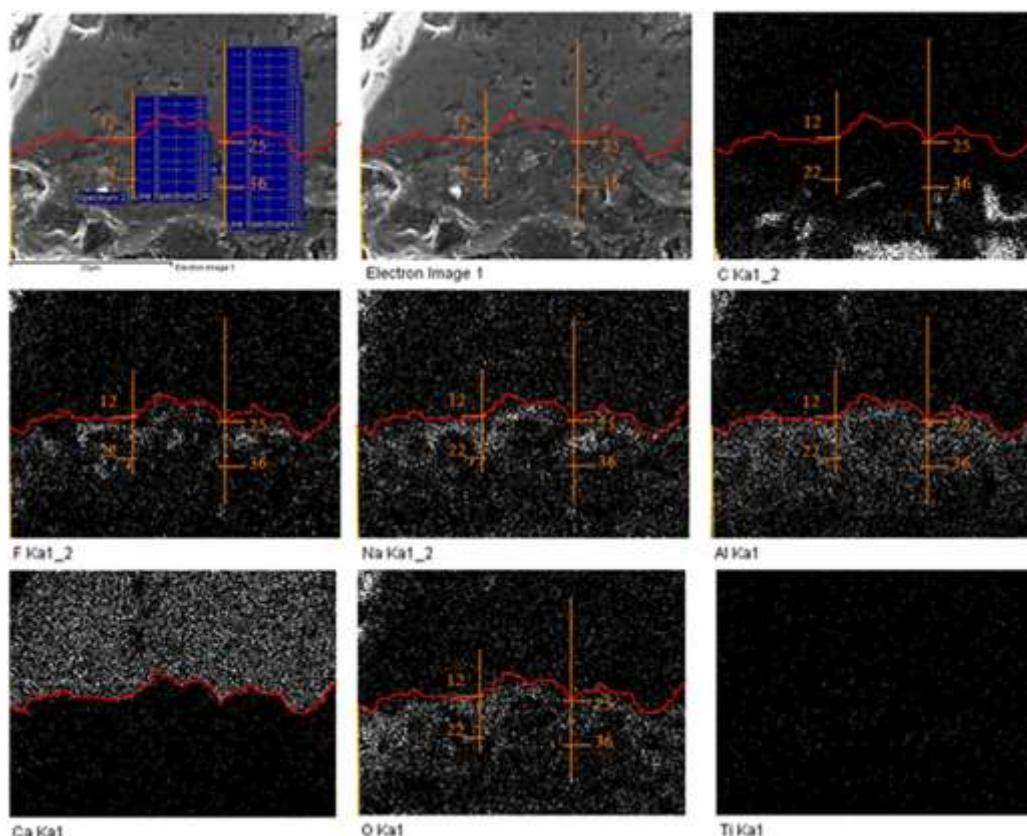


Fig. 5. EDS mapping of the site of a sample (×3000)
Рис. 5. EDS-картирование участка образца (×3000)

A sharp boundary of the calcium layer is clearly observed (there is no map for boron), adjoining the electrolyte layer, which gradually passes and is absorbed into the carbon surface. That is, there is an electrolyte interlayer between the CaB_6 layer and the carbon surface. It is obvious that this 8–10 μm layer corresponds to the diffusion layer of the cathode surface. This gives reason to believe that the discharge of boron and calcium ions from the complexes and the interaction between them occur in the thickness of the diffusion layer, i.e. in the near-cathode volume of the electrolyte, rather than on the cathode surface. It is known that bulk crystallization of compounds occurs at current densities higher than the limiting diffusion for the deposited components, or at least one of them [19]. The products of reduction and interaction are concentrated in the near-electrode electrolyte layer within the thickness of the diffusion layer from the cathode. These deposits are partially dispersed in the volume of the electrolyte and, due to the small thickness of this electrolyte layer, to the cathode surface. Thus, the electrode surface is passivated by a dense CaB_6 layer, which has more microdefects in comparison with the original carbon layer. With a deficiency or absence of electronegative impurities in the electrolyte, decomposition of the electrolyte components begins on this polarized surface of the cathode with a relatively high electrical resistance, with the formation of a layer of about 5 mm (see fig. 1). In this case, according to the XRD results (see tab. 1), crystalline and then amorphous phases are sequentially formed (probably $x\text{CaO} \cdot y\text{Al}_2\text{O}_3$ and $x\text{CaO} \cdot y\text{B}_2\text{O}_3$).

In the original electrolyte composition according to Experiments No. 2 and No. 3, CaF_2 additives were not used (tab. 2), which affected the composition of the passivating precipitates. Nevertheless, on the cathode surface and in the precipitates, a smaller but significant content of CaB_6 was found. This is explained by the presence of calcium in the form of its oxides or fluorides in technical cryolite with a c.r. = 1.78, which was used to prepare the original composition of the electrolyte. Thus, this effect emphasizes the significance and efficiency of physical microdefects on the cathode surface.

The given mechanism of passivation of poly-

crystalline cathodes is implemented to some extent when carrying out electrolysis using not only carbon electrodes but also any other polycrystalline products, including those based on titanium diboride [20]. The physical and chemical inhomogeneity of composite materials limits their use in the design of new generation electrolytic cells with drained cathodes and vertical inert electrodes. A logical way to overcome these limitations is to eliminate the surface inhomogeneity, original or obtained during the manufacture of electrodes and when installing them into a working environment of electrolytic cells. This direction was proposed in [21] and implies micro-borating of inert cathodes based on refractory metals such as carbides and borides of titanium, zirconium, etc. Here the authors will present the results of one of the experiments to eliminate microdefects of a carbon cathode by forming a wettable coating based on titanium diboride on its surface.

A method for eliminating micro- and macrodefects of the surface. The key point of the proposed method is electrochemical borating of a carbon-titanium cathode, i.e. micro-borating of the surface of a carbon cathode containing titanium in metallic form and in the form of its oxides. Carbon-titanium cathodes were preliminarily prepared in laboratory conditions by mixing an initial anthracite-graphite batch with titanium additions, pressing and firing for 4 days under a layer of petroleum coke. The electrolyte for the experiment was prepared on the basis of technical cryolite with adjusting of its c.r. up to 2.5 by addition of chemically pure NaF and AlF_3 . The amount of alumina and borax $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, in comparison with the previous experience, decreased to 4.0 and 3.0 wt.%, respectively. Any addition of calcium compounds was excluded. During 45 hours of the experiment, the current density was maintained at 0.7 A/cm^2 and every 3 hours, 0.4 wt% Al_2O_3 , 0.75 wt% $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ and 0.5 wt% AlF_3 were dosed. The analysis and identification of the processes occurring at the cathode were carried out in accordance with the known technique¹.

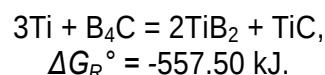
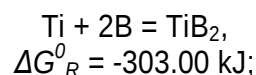
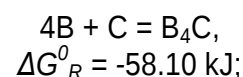
The dynamics of the voltage at the beginning of the experiment confirms an intensive formation of complexes that dissolve in the electrolyte as the melt is depleted in electroactive components (fig. 6).

Table 2. Experimental parameters and composition of precipitates of samples (XRD data)

Таблица 2. Параметры эксперимента и состав осадка образцов (данные рентгенофазового анализа)

Parameters and composition		No. of experiment		
		1	2	3
Original composition of electrolyte, wt.%	c.r.	2.7	2.7	2.5
	Al ₂ O ₃	8.3	5	5
	Na ₂ B ₄ O ₇	12.7	8.9	5
	CaF ₂	4.6	–	–
Time of experiment, h		24	22	24
Voltage, V		~ 2.48	~ 2.82	~ 3.0
Current density, A/cm ²		0.4	0.4	0.7
Phase name	Sampling point	Content, wt.%		
Al	cathode surface	0	0	10.0
Al ₄ C ₃	cathode surface	0	0	17.2
Al ₂ O ₃	cathode surface	–	0	5.03
	precipitate		4.71	3.3
CaB ₆	cathode surface	15.4	4.26	0.66
	precipitate	12.3	3.6	5.14
Na ₃ AlF ₆	cathode surface	23.3	27.7	34.6
	precipitate	75.3	58	67.3
Na ₅ Al ₃ F ₁₄	cathode surface	–	17.8	–
	precipitate	–	31.3	5.26
NaF	cathode surface	0	0	7.6
	precipitate	8.8	0	0.7
C (graphite)	cathode surface	33.1	34.6	23.7
	precipitate	1.7	0.52	0.71
Crystalline phase	cathode surface	20÷25	6.44	–
	precipitate	0	–	–
Amorphous phase	cathode surface	10	–	–
	precipitate	15÷20	–	–

For the first 9 h, boron was successively reduced from compounds with the lowest decomposition potentials. The initial voltage was stepped down to the sites at 2.600 and 2.450 V, where borax and boron oxide were reduced. After this period of limited dosage of aluminum and boron oxides in the electrolyte, electropositive ions in the melt were consumed, and the voltage rose sharply to discharge potentials Al₄B₂O₉ ~ 2.810 V (see fig. 6). In this mode of reduction of boron complex compounds on a carbon-titanium cathode, the process lasted 17 h accompanied by reactions of boron interaction with the components of the substrate:



These reactions give depolarizing effects into the general process, which are depicted on the graph in the form of voltage fluctuations around the level of 2.810 V. Moreover, since the electrolyte with boron oxide dissolved therein is

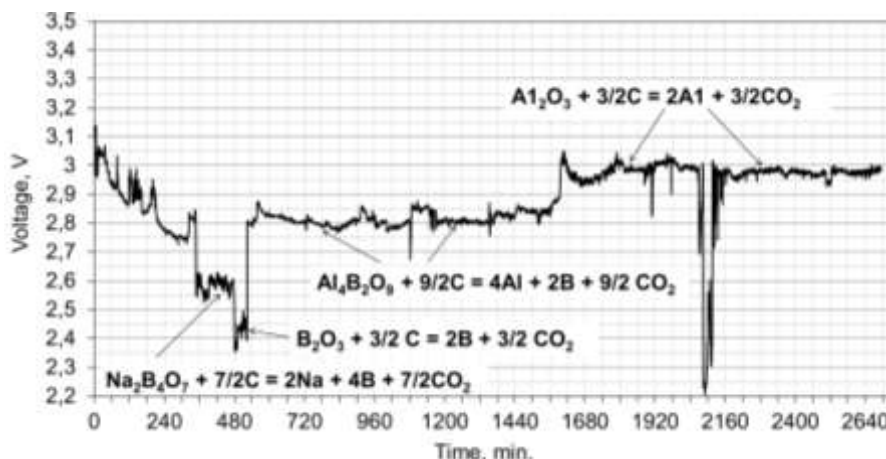
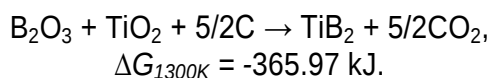
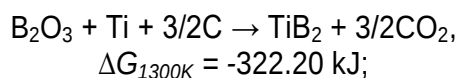


Fig. 6. Dynamics of voltage for the experiment
Рис. 6. Динамика напряжения эксперимента

freely accessible, the following reactions are quite likely:



After exhaustion of boron ions, electrolysis continued at a voltage of 2.980 V by the electroreduction of $\text{Al}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Al}$ to metallic aluminum. The wetting properties of the substrate ensured the presence of an aluminum layer on the cathode surface (fig. 7). Good adhesion of the metal to the cathode did not permit sampling the surface for XRD analysis.

Thus, at 980°C and 0.7 A/cm², conditions were created under which, during the first 26 h of the experiment, the borating of the carbon-

titanium surface occurred. The sources of boron in this case were successively the processes of electrochemical decomposition of B_2O_3 and its oxide complexes $\text{Al}_4\text{B}_2\text{O}_9$, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, $\text{Al}_4\text{B}_2\text{O}_9$. After the boron was consumed, the voltage of the electrolysis process increased until the alumina decomposed, and an aluminum layer appeared on the cathode surface with good adhesion to the surface.

When exposed to a damp atmosphere, the carbon sample was destroyed. Therefore, SEM-EDS analysis was carried out on the areas of the completely saved surface of the boundary between aluminum and carbon, from the back side, inaccessible before (fig. 8). Note that upon a closer view, destruction occurred along the sample body, but not along the aluminum-carbon boundary. This directly confirms the complete adhesion and wetting of aluminum on the cathode surface.

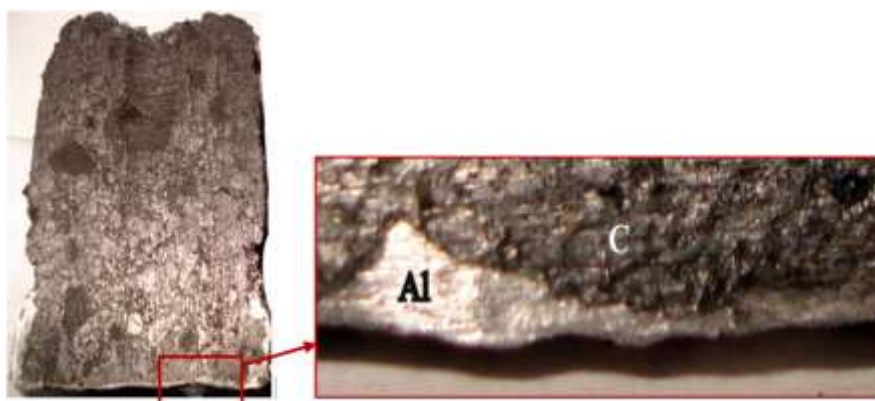


Fig. 7. Appearance of the cathode after the experiment
Рис. 7. Внешний вид катода после опыта



Fig. 8. Aluminum layer and its inner surface
Рис. 8. Слой алюминия и его внутренняя поверхность

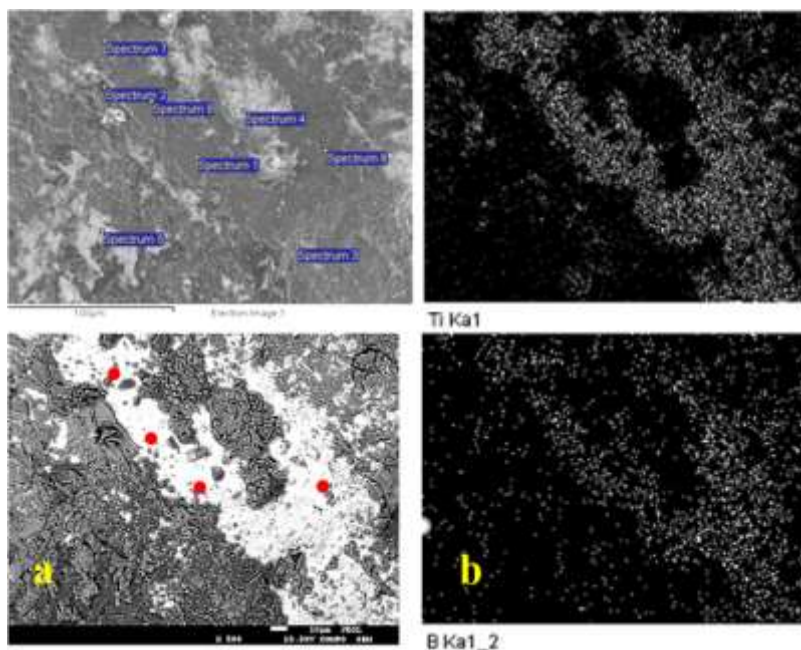


Fig. 9. The microstructure of the sample ($\times 500$): a – SEM analysis; b – EDS maps of Ti and B
Рис. 9. Микроструктура образца ($\times 500$): а – SEM-анализ; b – EDS-карты Ti и B

The back surface was cleaned according to a standard technique, mechanically and using diamond suspensions. However, complete cleaning of the cathode surface from carbon particles, without removing the layer under them, is impossible. Therefore, when viewing an image in compositional contrast, a dark-coloured field is a relief mixture of the remnant of carbon particles directly adjacent from above to the bright field (located below, between the aluminum layer and the carbon surface, see fig. 9 a).

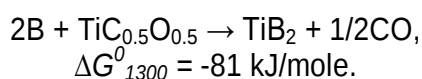
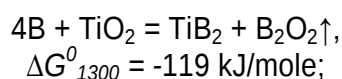
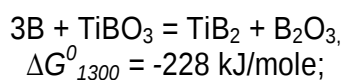
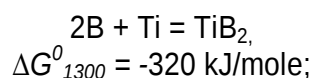
This bright field, as shown by the EDS analysis, is a layer of boride compounds created during a 45-hour experiment. When examining the data of energy-dispersive mapping of this area, the complete and concentrated coincidence of the boron and titanium fields is visually easily detected (fig. 9 b). The marked points 1 and 6–8 belong to the TiB_x layer adjacent directly to the aluminum (tab. 3). There are also minor electrolyte impurities.

Table 3. Results of energy-dispersive analysis

Таблица 3. Результаты энергодисперсионного анализа

Points in fig. 9 a	Linear spectra of the sample, at.%, ×500									Ti _x By
	B	Ti	C	O	F	Na	Al	Si	Ca	
1	62.28	32.09	–	–	4.21	0.39	1.03	–	–	TiB _{1.94}
6	74.42	23.26	–	–	1.54	0.31	0.46	–	–	TiB _{3.2}
7	59.87	31.44	–	–	4.48	0.89	1.92	1.40	–	TiB _{1.9}
8	66.22	28.68	–	–	2.38	0.57	2.15	–	–	TiB _{2.3}

Thus, one can state that the well-observed wetting of the cathode surface with aluminum is due to the TiB₂ layer, and this titanium diboride layer was formed on a polycrystalline carbon electrode, the initial surface of which had a high degree of micro- and macro-defects. It can be assumed that by a similar mechanism, the surface microdefects of inert electrodes will be eliminated by boron reduction in initial and obtained impurities in the form of oxides, oxycarbides, and borates of the main cathode material:



This process (micro-borating of the cathode surface) must be carried out continuously throughout the entire life of the cell, since the cathode surface is subject to constant oxidation by dissolved and gaseous anode gases.

CONCLUSION

On the basis of the conducted laboratory research into the passivation mechanism of polycrystalline cathodes, a method for carrying out stable electrolysis using solid electrodes is presented.

The performed complex analysis of electrolysis conditions, the appearance of the initial and spent carbon cathodes, as well as the data of XRD analysis and electron-microscopic studies showed that a dense layer of precipitates on the

cathode is formed due to micro- and macrodefects of the electrode surface.

Under the standard conditions of the diffusion control of the cathode process, a discharge of aluminum ions occurs on a homogenous surface of liquid aluminum. The concentration polarization of this process and an increase in current density to the limiting values take place only provided the deficiency of potential determining ions, associated with a decrease in the alumina concentration to critical values.

When using composite cathodes, which are inevitably characterized by micro- and macrodefects, the process leads – gradually or in an avalanche manner – to growing current concentrations and current densities on protrusions, ribs, pore edges, scratches, cold shuts and other defects. As the process accelerates, concentration polarization develops successively, with a deficiency in complex ions of aluminum, mixtures and electrolyte components. Under these conditions, an *n*-layered precipitate of impurities and electrolyte components is also gradually formed on the cathode. The results of these processes are obvious, i.e. the passivation of the cathode and an overall imbalance of the electrolysis.

The discussed mechanism of passivation of the carbon cathode as a polycrystalline product can be applied to all composite electrodes, including those based on titanium diboride.

A logical way to overcome these limitations is to eliminate the surface heterogeneity, either original or resulting from the processes of electrode manufacture and installation into the operating environment of electrolytic cells.

In this regard, a possible approach to reducing the surface heterogeneity at the micro- and macrolevel is micro-borating of the metal-containing cathode. The conducted SEM-EDS analysis revealed that, during a laboratory experiment at 980°C and under a current density

of 0.7 A/cm², the inhomogeneous cathode surface was homogenized with a titanium diboride layer. An aluminum layer was electrodeposited on the cathode at stable electrolysis parameters.

The presented results and analysis of the laboratory study of electrolysis using solid electrolytes, with a focus on the features of their polycrystalline structure and taking into account the chemical and physical inhomogeneity, are only the first steps in this direction.

Therefore, it is necessary to continue the re-

search using special techniques and specific conditions of electrolysis. At the same time, or rather in parallel with laboratory experiments, the development of theoretical grounds is required to elucidate and overcome the limitations of electrolysis using solid electrodes. The following part of the present paper will contribute to the theory and theoretical calculations of the electric field distribution on an inhomogeneous surface taking into account the edge effects of current concentrations on the electrodes.

References

1. Hérault PLT. *Procédé électrolytique pour la préparation de l'aluminium*. Patent FR, no. 175711; 1886.
2. Hall CM. *Process of Reducing Aluminum by Electrolysis*. Patent US, no. 400766; 1889.
3. Hall CM. *Process of electrolyzing fused salts of aluminum*. Patent US, no. 400667; 1889.
4. Haupin W, Frank W. Current and energy efficiency of Hall-Heroult cells - past, present and future. *Light Metal Age*. 2002;60(5-6):6–13.
5. Vanvoren C, Homsy P, Basquin JL, Beheregaray T. AP 50: The Pechiney 500 kA Cell. In: Bearne G, Dupuis M, Tarcy G (eds.). *Essential Readings in Light Metals*. Springer, Cham; 2016, p. 462–467. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48156-2_66
6. Dupuis M. Thermo-electric design of a 740 kA cell, is there a size limit? *Aluminium*. 2005;81(4):324–327. Available from: <http://www.genisim.qc.ca/download/740ka.pdf> [Accessed 16th August 2020].
7. Tabereaux A. Super-high amperage prebake cell technologies in operation at worldwide aluminum smelters. *Light Metals Age*. 2017;75(1):26–29.
8. Bardai A, Aga BE, Berveling A, Droste C, Fechner M, Haugland E, et al. HAL4e – Hydro's new generation cell technology. *Light Metals*. 2009;2009:371–375.
9. Gao Bingliang, Wang Zhaowen, Shi Zhongning, Hu Xianwei. History and Recent Developments in Aluminum Smelting in China. In: *Proceedings of 35th International ICSOBA Conference*. 2–5 October 2017, Hamburg. Hamburg; 2019, p. 53–68. Available from: <https://vdocuments.mx/reader/full/history-and-recent-developments-in-aluminum-smelting-in-papers-history-and> [Accessed 16th August 2020].
10. Tyutrin AA, Nemchinova NV, Volodkina AA. Effects of electrolysis parameters on the technical and economic performance indicators of OA-300M baths. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(4):906–918. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-4-906-918>
11. Brown CW. The wettability of TiB₂-based cathodes in low-temperature slurry-electrolyte reduction cells. *JOM*. 1998;50(5):38–40.
12. Bradford DR. Inert Anode Metal Life in Low Temperature Reduction Process. Final Technical Report for September 17, 1998 through March 31, 2005. 101 p. *National Technical Reports Library*. Available from: <https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/DE2006841153.xhtml> [Accessed 9th August 2020].
13. Wang Jia-wei, Lai Yan-qing, Tian Zhong-liang, Liu Ye-xiang. Effect of electrolysis superheat degree on anticorrosion performance of 5Cu / (10NiO - NiFe₂O₄) cermet inert anode. *Journal of Central South University of Technology*. 2007;768. <http://doi.org/10.1007/s11771-007-0146-5>
14. Zaikov Yu, Khramov A, Kovrov V, Kryukovsky V, Apisarov A, Chemesov O, et al. Electrolysis of aluminum in the low melting electrolytes based on potassium cryolite. *Light metals*. 2008:505.
15. Hryn JN, Tkacheva OY, Spangenberg JS. UltraHigh-efficiency aluminum production cell. In: *Report of Energy Systems Division, Argonne National Laboratory*. Award Number: DE-AC02-06CH11357. April 2014. P. 86. Available from: <https://www.energy.gov/eere/amo/downloads/ultrahigh-efficiency-aluminum-production-cells> [Accessed 17th August 2020].
16. Bao Shengzhong, Chai Dengpeng, Shi Zhirong, Wang Junwei, Liang Guisheng, Zhang Guisheng. Effects of current density on current efficiency in low temperature electrolysis with vertical electrode structure. *Light Metals*. 2018:611–619. http://doi.org/10.1007/978-3-319-72284-9_79
17. Padamata SK, Yasinskiy AS, Polyakov PV. Progress of inert anodes in aluminium industry: review. *Journal of Siberian Federal University. Chemistry*. 2018;11(1):18–30. <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0055>
18. Samsonov GV, Serebryakova TI, Neronov VA. *Borides*. Moscow: Atomizdat; 1975, 376 p. (In Russ.)
19. Baraboshkin NA. *Electrocrystallization of metals from molten electrolytes*. Moscow: Nauka; 1976, 279 p. (In Russ.)
20. Gorlanov ES. On the question of using solid electrodes in the electrolysis of cryolite-alumina melts. Part 1. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(6):1324–1336.

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1324-1336>

21. Gorlanov E.S. Features of solid electrode application for cryolite-alumina melt electrolysis. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceed-*

ings of Irkutsk State Technical University. 2019;23(2):356–366. (In Russ.)

<http://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-2-356-366>

Список литературы

1. Patente no. 175711, France. Procédé électrolytique pour la préparation de l'aluminium / P. L-T. Héroult. Déposé 23.04.1886; publ. 01.09.1886.
2. Patent no. 400766, The United States of America. Process of Reducing Aluminum by Electrolysis / Ch. M. Hall; no. 207601. Filed 9.07.1886; publ. 2.04.1889.
3. Patent no. 400667, United States of America. Process of electrolyzing crude salts of aluminium / Ch. M. Hall; no. 286034. Filed 21.09.1888; publ. 2.04.1889.
4. Haupin W., Frank W. Current and energy efficiency of Hall-Héroult cells - past, present and future // *Light Metal Age*. 2002. Vol. 60. No. 5-6. P. 6–13.
5. Vanvoren C., Homsy P., Basquin J.L., Beheregaray T. AP 50: The Pechiney 500 kA Cell. // *Essential Readings in Light Metals* / eds. G. Bearne, M. Dupuis, G. Tarcy. Springer, Cham, 2016. P. 462–467.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-48156-2_66
6. Dupuis M. Thermo-electric design of a 740 kA cell, is there a size limit? // *Aluminium*. 2005. Vol. 81. No. 4. P. 324–327. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.genisim.qc.ca/download/740ka.pdf> (16.08.2020).
7. Tabereaux A. Super-high amperage prebake cell technologies in operation at worldwide aluminum smelters // *Light Metals Age*. 2017. Vol. 75. No. 1. P. 26–29.
8. Bardai A., Aga B.E., Berveling A., Droste C., Fechner M., Haugland E., et al. HAL4e – Hydro's new generation cell technology // *Light Metals*. 2009. Vol. 2009. P. 371–375.
9. Gao Bingliang, Wang Zhaowen, Shi Zhongning, Hu Xianwei. History and Recent Developments in Aluminum Smelting in China // *Proceedings of 35th International ICSOBA Conference (Hamburg, 2–5 October 2017)*. Hamburg, 2019. P. 53–68. [Электронный ресурс]. URL: <https://vdocuments.mx/reader/full/history-and-recent-developments-in-aluminum-smelting-in-papers-history-and> (16.08.2020).
10. Тютрин А.А., Немчинова Н.В., Володькина А.А. Изучение влияния параметров процесса электролиза на основные технико-экономические показатели работы ванн ОА-300М // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 4. С. 906–918.
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-4-906-918>
11. Brown C.W. The wettability of TiB₂-based cathodes in low-temperature slurry-electrolyte reduction cells // *JOM*. 1998. Vol. 50. Iss. 5. P. 38–40.
12. Bradford D.R. Inert Anode Metal Life in Low Temperature Reduction Process. Final Technical Report for September 17, 1998 through March 31, 2005. 101 p / National Technical Reports Library [Электронный ресурс]. URL: <https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/DE2006841153.xhtml> (09.08.2020).
13. Wang Jia-wei, Lai Yan-qing, Tian Zhong-liang, Liu Ye-xiang. Effect of electrolysis superheat degree on anticorrosion performance of 5Cu / (10NiO - NiFe₂O₄) cermet inert anode // *Journal of Central South University of Technology*. 2007. P. 768.
<http://doi.org/10.1007/s11771-007-0146-5>
14. Zaikov Yu., Khramov A., Kovrov V., Kryukovsky V., Apisarov A., Chemesov O., et al. Electrolysis of aluminum in the low melting electrolytes based on potassium cryolite // *Light metals*. 2008. P. 505.
15. Hryn J.N., Tkacheva O.Y., Spangenberg J.S. Ultra-High-efficiency aluminum production cell // Report of Energy Systems Division, Argonne National Laboratory. Award Number: DE-AC02-06CH11357. April 2014. P. 86. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.energy.gov/eere/amo/downloads/ultrahigh-efficiency-aluminum-production-cells> (17.08.2020).
16. Bao Shengzhong, Chai Dengpeng, Shi Zhirong, Wang Junwei, Liang Guisheng, Zhang Guisheng. Effects of Current Density on Current Efficiency in Low Temperature Electrolysis with Vertical Electrode Structure // *Light Metals*. 2018. P. 611–619. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-72284-9_79
17. Padamata S.K., Yasinskiy A.S., Polyakov P.V. Progress of inert anodes in aluminium industry: review // *Journal of Siberian Federal University. Chemistry*. 2018. Vol. 11. No. 1. P. 18–30. <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0055>
18. Самсонов Г.В., Серебрякова Т.И., Неронов В.А. Борицы. М.: Изд-во «Атомиздат», 1975. 376 с.
19. Барабошкин Н.А. Электрокристаллизация металлов из расплавленных электролитов. М.: Наука, 1976. 279 с.
20. Горланов Е.С. К вопросу о применении твердых электродов для электролиза криолитоглиноземных расплавов. Часть 1. // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 6. С. 1324–1336.
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1324-1336>
21. Горланов Е.С. Особенности применения твердых электродов для электролиза криолитоглиноземных расплавов // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т. 23. № 2. С. 356–366.
<http://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-2-356-366>

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Evgeniy S. Gorlanov,
Dr. Sci. (Eng.),
Deputy General Director of EXPERT-AL LLC,
86/A, Sredniy pr., V.O. Saint-Petersburg 199106, Russia;
✉ e-mail: gorlanove@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 15.11.2020; approved after reviewing 11.01.2020; accepted for publication 26.02.2021.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Горланов Евгений Сергеевич,
доктор технических наук,
заместитель генерального директора,
ООО «ЭКСПЕРТ-АЛ»,
199106, г. Санкт-Петербург,
Средний просп. В.О., 86/А, Россия;
✉ e-mail: gorlanove@yandex.ru

Заявленный вклад автора

Автор выполнил исследовательскую работу, на основании полученных результатов провел обобщение, подготовил рукопись к печати.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 15.11.2020; одобрена после рецензирования 11.01.2020; принята к публикации 26.02.2021.



Нефтегазовая политика России в современных условиях и ее особенности в Российско-Китайском сотрудничестве в газовой сфере

© В.А. Стенников, В.О. Головщиков, Е.А. Романович

Институт систем энергетики им. Мелентьева СО РАН, Иркутск, Россия

Резюме: Цель – представить исследования в области формирования и реализации нефтегазовой политики России, имеющей определяющую роль для развития и функционирования энергетики страны, ее энергетической безопасности, а также для наполнения бюджета страны; дать оценку взаимоотношений субъектов на Европейском газовом рынке, который останется важнейшим для России в среднесрочной перспективе, несмотря на риски и угрозы экспортным поставкам газа на этот рынок; рассмотреть роль и место Российской Федерации в экспортных поставках газа в Китай как важных элементов «Восточной газовой политики» России и важной составляющей Доктрины энергетической безопасности Российской Федерации. На основе анализа и обобщения информации официальных источников, научно-прикладных работ и обзоров, публикуемых в средствах массовой информации, дается обоснование актуальности проблемы и направлений ее решения. Проведенные исследования показали, что нефтегазовый сектор России остается важнейшей составляющей топливно-энергетического комплекса страны и экономики в целом. Стабильные экспортные поставки нефти и газа являются ключевым направлением деятельности нефтегазовой отрасли и во многом способствуют поддержанию энергетической безопасности страны. Отмечается, что в среднесрочной перспективе Россия сохранит не менее 30% газового рынка Европы. Вместе с тем энергетическая политика Евросоюза, антироссийские санкции, превышение предложений газа над спросом вынуждают Россию существенно снижать стоимость экспортируемого газа, чтобы сохранить свой сегмент на газовом рынке Европы. Прогнозируемые риски и угрозы «западному вектору» газовой политики России определяют необходимость диверсифицировать рынки экспортных поставок газа. В связи с этим представляется обоснованной реализация «Восточной газовой политики» как элемента энергетической стратегии в восточных регионах, направленной на широкое использование природного газа для отечественных нужд и экспортных поставок. Формирующееся стратегическое партнерство с Китаем определяется не только энергетическим партнерством, которое приобретает новые инициативы, но и характеризуется более широкой сферой взаимоотношений, включая экономическое, политическое сотрудничество. При этом экономическое сотрудничество в газовой сфере направлено прежде всего на обеспечение возможности диверсификации поставок газа в регионы Китая, поскольку существует достаточно развитый рынок его предложений. В сложившихся условиях финансово-экономической ситуации энергетического рынка на западном направлении Россия нередко вынуждена принимать условия Китая. Результаты проведенных исследований показывают, что нефтегазовый комплекс России сохраняет ключевые позиции в энергетике и экономике страны. В настоящее время наблюдается процесс активного пространственного развития топливно-энергетического комплекса на Востоке страны, при этом в перспективе сохраняются как «западный», так и «восточный» векторы газовой политики России. Усиливающееся торгово-экономическое и политическое сотрудничество России и Китая в среднесрочной и долгосрочной перспективе приведет к существенному наращиванию энергетического сотрудничества на взаимовыгодных условиях.

Ключевые слова: энергетика, энергетическая безопасность, природный газ, сжиженный природный газ, санкции, стратегия

Благодарности: Работа выполнена в рамках научного проекта Сибирского отделения РАН, № AAAA-A17-117030310449-7 (программа фундаментальных исследований III.17.4.4) при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 019-010-00183.

Для цитирования: Стенников В.А., Головщиков В.О., Романович Е.А. Нефтегазовая политика России в современных условиях и ее особенности в Российско-Китайском сотрудничестве в газовой сфере. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 1. С. 122–137. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-1-122-137>

Modern Russian oil and gas policy and its features in the Russian-Chinese cooperation in the gas sector

Valery A. Stennikov, Vladimir O. Golovshchikov, Ekaterina A. Romanovich

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract: This article presents a research study in the field of formation and implementation of Russian oil and gas policy, which has a decisive role in the development and functioning of the country's energy sector, its energy security, as well as for increasing revenues. The current relations between actors in the European gas market, which is expected to remain an important sector in Russian economy in the medium term, are assessed in the contexts of the risks and threats experienced by gas exporters. The role and place of the Russian Federation in gas export to China as an important element of the Russian Eastern Gas Policy and Energy Security Doctrine is discussed. Following an analysis of information from official sources, research publications and reports presented in the mass media, a substantiation of the urgency of the problem and the directions of its solution is given. The conducted study revealed that the oil and gas sector in Russia remains the most important component of the country's fuel and energy complex. Stable export of oil and gas is key for the oil and gas industry, contributing to the country's energy security. It is noted that, in the medium term, Russia will preserve at least 30% of the European gas market. At the same time, the energy policy of the European Union, anti-Russian economic sanctions and the excess of gas supply over demand are forcing Russia to significantly reduce the cost of exported gas in order to maintain its segment in the European gas market. The forecasted risks and threats to the "western vector" of the Russian gas policy determine the necessity to diversify gas export markets. In this regard, it seems reasonable to implement of the "Eastern Gas Policy" as an element of the energy strategy in the eastern regions, aimed at the widespread use of natural gas for domestic needs and export supplies. The emerging strategic partnership with China is determined not only by the energy partnership, which is acquiring new initiatives, but is also characterised by a wider sphere of relations, including economic and political cooperation. At the same time, economic cooperation in the gas sector is aimed primarily at ensuring the possibility of diversifying gas supplies to Chinese regions having a developed demand. In the current financial and economic situation in the energy market in the western direction, Russia is often forced to accept China's conditions. The research results demonstrate that the Russian oil and gas complex retains key positions in the country's energy sector and economy. Currently, the process of active spatial development of the fuel and energy complex in the East of the country is observed, while in the long run both the "western" and "eastern" vectors of Russia's gas policy remain. Strengthening trade, economic and political cooperation between Russia and China in the medium and long term will lead to a significant increase in energy cooperation on mutually beneficial conditions.

Keywords: energy sector, energy security, natural gas, liquefied natural gas, sanctions, strategy

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the scientific project of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, no. AAAAA 17-117030310449-7 (Basic Research program III. 17.4.4) with the partial support of the Russian Foundation for Basic Research, grant no. 019-010-00183.

For citation: Stennikov VA, Golovshchikov VO, Romanovich EA. Modern Russian oil and gas policy and its features in the Russian-Chinese cooperation in the gas sector. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(1):122–137. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-1-122-137>

ВВЕДЕНИЕ

Нефтегазовая отрасль в целом и газовая в частности, как важнейшая часть топливно-энергетического комплекса (ТЭК), занимает особое место в экономике России и всемерно поддерживается руководством страны. Она имеет существенное значение для внутреннего энергообеспечения: природный газ и уголь в качестве топлива для крупных электростанций, «солярка» для автономных дизельных электростанций, для всех отраслей экономики и социальной сферы. Большин-

ство электростанций Европейской части и Урала России работают на природном газе. ТЭК также обеспечивает наполнение бюджета РФ через экспортные поставки в зарубежные страны нефти и природного газа (трубопроводного и сжиженного – СПГ). В настоящее время наблюдается незначительный, но устойчивый рост энергетики России, определяемый ростом внутреннего спроса на энергию (например, по электроэнергии 1,5%). Уже в среднесрочной перспективе (3–5 лет) в энергетике будет расти потребление природ-

ного газа в связи с вводом перспективных крупных газотурбинных электростанций (блоков), а также с постепенным сокращением «угольной энергетики». Надо отметить, что рост доходов и поступления в бюджет от нефтегазовой отрасли постоянно возрастали со времен СССР, когда в эксплуатации находились месторождения Азербайджана, Северного Кавказа, Татарстана, Туркмении и др. Существенный рост экспортных поставок нефти произошел после открытия крупных месторождений в Западной Сибири и строительства магистральных трубопроводов к западным границам СССР. Значительный интерес с советской стороны проявился после очередного израильско-арабского конфликта на Ближнем Востоке, начиная с 1973–1974 гг., что было обусловлено массовым бойкотом большинства арабских государств (прежде всего нефтедобывающих), который они объявили европейским странам, поддерживающим Израиль. В мировом балансе углеводородного сырья природный газ занимал существенно меньшую часть, чем нефть и уголь¹ [1]. За последние сорок лет, включая поздний советский и наступивший постсоветский периоды, поступления в бюджет страны от нефтегазовой отрасли уменьшались по целому ряду причин:

1) снижение курса рубля по отношению к доллару (часто обвальное, например в 2007–2008, первый квартал 2020 г.);

2) глубокое падение экономики России в девяностых годах прошлого века в результате бессистемного перехода от социалистических принципов управления к рыночным механизмам.

Все это привело к резкому снижению добычи и переработки углеводородов, прекращению разработки новых методов разведки и добычи нефти и газа. Фактически была утеряна отечественная геологоразведка, сформированная в советский период. Последствия этого продолжают сказываться до настоящего времени.

В России, как и во многих других странах, учитываются суммарные поступления в бюджет от нефтегазовой отрасли, т.е. не выделяются отдельно поступления от нефти и природного газа. Стоимость одного барреля основных сортов (марок) нефти («Североморская», «легкая» и др.) ежедневно публикуется в средствах массовой информации, включая информационные телевизионные каналы и интернет (как результаты торгов, включая фьючерсы). Стоимость одной тысячи кубометров природного газа (трубопроводного и СПГ) не публикуется. Такая ситуация обусловлена несколькими причинами:

1) стоимость природного газа в контрактах (краткосрочных и долгосрочных) чаще всего привязана к стоимости нефти (в том числе к ее прогнозной стоимости);

2) стоимость газа определяется закрытыми условиями контрактов на поставку газа («коммерческая тайна»), а она зависит от многих факторов, включая геополитические, которые в последнее время проявляются все сильнее. Конечно, в закрытых источниках министерств и нефтегазовых компаний эта информация имеется.

Стоимость нефтегазовых ресурсов во многом определяет себестоимость производимой продукции в целом и тарифы на электрическую и тепловую энергию в частности, производимую тепловыми электростанциями. Чрезвычайная важность поступлений в бюджет России финансовых средств от продажи нефти и природного газа наглядно иллюстрируется официальной публикуемой информацией Министерства финансов России². Совокупные доходы бюджета Российской Федерации в 2018 г. были около 20 трлн руб., при этом около 46% из них (9 трлн руб.) приходилось на доходы нефтегазовой отрасли. В 2008 г., после окончания мирового финансово-экономического кризиса, оказавшего негативное влияние на экономику России, суммарные доходы бюджета страны составили около 9,3 трлн руб. Из этого объема на

¹Мировой рынок газа: иллюзия или реальность? Аналитический доклад. [Электронный ресурс]. URL: http://www.pro-gas.ru/images/data/gallery/0_6480_Mirovoy_rinok_gaza_itog.pdf (12.01.2020).

²Минфин подсчитал долю доходов бюджета РФ от нефти и газа в 2020–2022 годах. Россия сегодня // Прайм [Электронный ресурс]. URL: https://1prime.ru/state_regulation/20190919/830338839.html (15.01.2020).

долю нефтегазовой отрасли приходилось 4,4 трлн руб. (47%). Приведенные данные показывают, что за десятилетний период стабильности и определенного экономического роста в России (не более 2% в год) произошло увеличение доходов от нефтегазовой отрасли в два раза.

Конечно, за этот период необходимо учитывать изменения курса рубля по отношению к доллару и изменения стоимости барреля нефти (тенденция к росту).

В опубликованных Минфином РФ в сентябре 2019 г. прогнозах нефтегазовых доходов с 2020 до 2022 г. заявлено, что их доля в совокупном бюджете России сохранит тенденцию к снижению с 40,8% в 2019 г. и до 35% в 2020 г. В денежном выражении: 7,5 трлн руб. в 2020 г., 7,7 трлн руб. в 2021 г. и около 7,7 трлн руб. в 2022 г. По информации, полученной от Минфина РФ, подобная тенденция будет обусловлена снижением цен на нефтегазовые ресурсы на мировых рынках. Однако, по мнению многих научно-технических экспертов, специализирующихся в нефтегазовой сфере, эти прогнозы представляются необоснованно оптимистическими. Реальные события последних двух-трех лет, и особенно ситуация, сложившаяся в первом квартале 2020 г. (например, цена на нефть опустилась с 60 долл. за баррель до 30 долл. и ниже), показывают, что снижение нефтегазовых доходов может быть просто обвальным. Периодические соглашения между членами «ОПЕК+» и другими игроками нефтяного рынка по выработке единой ценовой политики и объемам добываемой нефти очень часто отдельными участниками соглашения не выполняются, поэтому договоренности, как правило, носят временный характер (например, от 14.04.2020 г.) и не могут устранить тенденции по снижению цен на нефть. Аналогичная ситуация наблюдается и на газовом рынке. Следует отметить, что если есть взаимосвязанные производители какого-либо товара (услуги), распределительные компании и потребители этих товаров (услуг), то эта система экономических отношений называется «рынком». При этом энергетика не является исключением. В настоящее время в России функционируют оптовый

рынок электроэнергии и мощности и розничный рынок электрической и тепловой энергии. Первый из упомянутых, согласно действующему законодательству, является конкурентным. Поэтому употребление в энергетике терминов «рынок», «рыночные отношения», «конкуренция» и т.д. в настоящее время является общепринятым, и эти термины широко применяются.

ГЕОПОЛИТИЧЕСКИЕ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ИНТЕРЕСЫ РОССИИ

Геополитические и экономические интересы России в различных регионах мира во многом связаны с реализуемой энергетической политикой³ [2, 3]. Многочисленные санкции, наложенные на Российскую Федерацию (на крупные компании и на некоторых должностных лиц) после известных событий 2014 г., затронули многие важнейшие направления хозяйственной деятельности РФ: производство и поставки крупных газовых турбин, современную электронику для энергетики, оборудование для добычи нефти и газа, современные методы геологоразведки и т.д. Эти санкции в значительной степени обусловлены постоянно усиливающимся давлением со стороны США под надуманным предлогом «обеспечение энергонеизависимости Европы от России». Это, безусловно, создало существенные проблемы для России на Европейских рынках многолетних экспортных поставок российских нефтегазовых ресурсов, и в первую очередь природного газа [4]. Такая ситуация заставила крупнейшие нефтегазовые компании России (практически под непосредственным «курированием» высшего руководства РФ) искать возможности по диверсификации рынков для экспортных поставок углеводородов. В связи с этим последние пять-шесть лет по инициативе руководства федеральных законодательных и исполнительных органов власти РФ геополитические и связанные с ними экономические интересы Российской Федерации смещаются в Азиатско-Тихоокеанский регион (АТР) и прежде всего в Северо-Восточную Азию, где лидирующую роль играют быстро развивающийся Китай, а также Республика Корея и Япония.

Быстро меняющаяся ситуация на миро-

вых рынках нефти и газа, а также неуклонно возрастающая важность нефтегазовой отрасли для экономики России активизировали интерес научно-технического сообщества и «общественности» к этой сфере. Появляется много научно-прикладных работ, рассматривающих особенности (проблемы) нефтегазовой политики РФ в целом и взаимоотношения России и Китая в газовой сфере в частности. Несомненный интерес представляют комплексные исследования Института систем энергетики им. Мелентьева СО РАН г. Иркутск [5, 6], Института энергетических исследований Российской академии наук г. Москва (ИНЭИ РАН)⁴ [7–9], работа [10], выполненная в Иркутском национальном исследовательском техническом университете в 2015 г., и многие др. Не стоят в стороне от обсуждения этих проблем в средствах массовой информации многочисленные независимые эксперты и аналитики.

Изменившаяся за последние два-три года геополитическая ситуация значительно повлияла на мировые рынки нефти и газа, выявила ряд важных факторов, которые необходимо учитывать при формировании нефтегазовой политики России, и особенно во взаимоотношениях с Китаем.

Выделим некоторые из таких факторов:

1. Неопределенность ситуации на газовом рынке в АТР по ценам и объемам купли-продажи природного газа в среднесрочной (3–5 лет) и долгосрочной перспективе (10–20 лет).

2. Все увеличивающаяся вероятность обострения торговых отношений (возможно, и в других сферах) между КНР и США. Такое развитие событий (а оно уже проявляется после вспышки «коронавируса» в конце 2019 – начале 2020 г.) может негативно повлиять на экономический рост Китая и заставить КНР активизировать поиск новых партнеров по поставкам технологий и всевозможных природных ресурсов, прежде всего нефти и газа.

3. В долгосрочной перспективе возможна

нормализация торговых отношений КНР и США, что будет способствовать экономическому росту КНР и повлечет за собой увеличение потребления нефтегазовых ресурсов. Одновременно может увеличиться импорт из США сжиженного природного газа по выгодным для Китая ценам, так как уже в настоящее время у США существуют громадные проблемы со сбытом СПГ (многие компании на грани банкротства). Под нажимом США и для ослабления напряженности между двумя странами Китай был вынужден подписать соглашение с США о закупках значительных объемов СПГ.

4. Велика непредсказуемость, даже в среднесрочной перспективе, развития ситуации на газовом рынке Европы из-за напряженных отношений между некоторыми странами Европы, в том числе и США, и Россией в нефтегазовой сфере (например, по проблемам, связанным со строительством газопровода «Северный поток – 2»).

5. Постоянные проблемы во взаимоотношениях РФ и Украины (финансовые претензии, связанные с объемами газа и его цены), обеспечивающей транзит российского природного газа в Европу.

6. Напряженная ситуация, включая региональные военные конфликты, в основных районах добычи нефти и газа (Ливия, Сирия, Ирак, Иран, Венесуэла, Нигерия и др.).

7. Новые формы глобальных вызовов в виде вспышки коронавируса (в Китае с ноября 2019 г.), которые уже привели к существенному снижению деловой активности во многих странах, падению цен и объемов потребления нефти и газа. Длительность и глубину влияния этих факторов на мировую экономику спрогнозировать практически невозможно.

8. Введение американских санкций для некоторых стран производителей (и поставщиков) энергоресурсов позволит увеличить объемы поставок нефтегазовых ресурсов из России. Например, санкции, наложенные на Иран и Венесуэлу, уже привели к росту по-

⁴Прогноз развития энергетики мира и России до 2040 года [Электронный ресурс]. URL: <https://ac.gov.ru/files/publication/a/789.pdf> (20.03.2020).

ставок российской нефти в 2019 г. почти на 4%, в том числе и в США.

Вышеперечисленные влияющие факторы, которых значительно больше, в конечном итоге сказываются как на объемах поставки российского газа (трубопроводного и СПГ), так и на его цене. При этом Российско-Китайское сотрудничество в нефтегазовой сфере рассматривается Российской стороной (на официальном уровне) как одно из важнейших составляющих этой политики.

Вопросы нефтегазовой политики России, включая ее проблемы и перспективы, следует рассматривать в рамках двух взаимосвязанных аспектов: «географического» (западное и восточное направление) и временного (среднесрочная и долгосрочная перспектива).

Имеющаяся официальная информация по экспорту российского трубопроводного газа и СПГ в «западном направлении» весьма ограничена. Источниками такой информации, как правило, служат аналитические обзоры⁵ [11, 12]. По развернутым данным, представленным в [11] (которые близки к данным других источников информации), российский экспорт природного газа в «западном направлении» за последние несколько лет существенно изменялся. В 2013 г. было экспортировано около 188 млрд м³, к 2018 г. экспорт достиг около 206 млрд м³, что составило 80% от общих экспортных поставок РФ. В 2019 г. началось снижение экспорта газа на «европейский газовый рынок», который составил около 200 млрд м³ [11]. Но и в этой ситуации доля российского газа на рынке Европы в 2019 г., по утверждению Министра энергетики РФ, составила 45%. Такая доля российского природного газа на европейском рынке гарантировала России роль ключевого «игрока» на этом рынке в среднесрочной перспективе (3–5 лет). В то же время независимые аналитики и даже некоторые представители «Газпрома» признают, что, начиная с 2020 г., ситуация с экспортом российского газа в Европу будет постепенно ухудшаться.

Этому способствует несколько причин:

1) продолжающиеся теплые зимы в течение последних нескольких лет в Европе;

2) полное заполнение подземных хранилищ газа в Европейских странах (вызванное ожиданием холодных зим, а главное – опасениями резкого сокращения транзита российского газа через Украину из-за межгосударственных конфликтов РФ и Украины);

3) газовая политика некоторых стран, направленная на снижение закупок в России по различным причинам (политические, диверсификация источников поставки и т.д.). Наглядным примером в этом отношении является поведение Польши, стран Балтики, которые выступили против строительства газопровода «Северный поток 2». Польша, несмотря на действующий контракт с Россией на поставку 9 млрд м³ газа, уже формирует новые планы по импорту газа из Катара, Норвегии, США и даже Турции, начиная с 2023 г., по ценам, превышающим российские. Для импорта СПГ она создает необходимую инфраструктуру (терминалы). По имеющейся информации, в этом направлении намереваются пойти Румыния, Болгария и даже Венгрия, внешняя политика которой лояльна по отношению к России, диверсифицируя источники импорта природного газа¹ [1, 11]. Все это в совокупности ведет к серьезным проблемам экспорта российских нефтегазовых ресурсов в европейские страны и, следовательно, наполнения бюджета. Бюджет России был сформирован, исходя из прогноза, что в 2020 г. цена на природный газ будет около 200 долл. за тысячу кубометров газа, но уже в феврале 2020 г. цена на газ снизилась от 148 до 100 долл. за тысячу кубометров, при этом «Газпром», как прогнозируют некоторые аналитики, не получит 100 млрд руб.⁶ После визита Министра энергетики Болгарии в США в январе 2020 г. официальные власти Болгарии заявили, что уже к началу 2021 г. страна сократит импорт российского газа на 50%, заменив эти объемы

⁵ Энергетический бюллетень. Позиции природного газа в энергобалансе [Электронный ресурс]. URL: <https://ac.gov.ru/files/publication/a/6397.pdf> (20.03.2020).

⁶ «Газпром» может недосчитаться 100 млрд рублей из-за падения цен на газ в Европе // Ведомости. 12.02.2020 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2020/02/12/822837-gazprom> (13.02.2020).

на СПГ из США и на трубопроводный газ из Азербайджана»⁶ [11]. Возникает вопрос об исполнении обязательств Болгарии по строительству ветки транзитного газопровода для экспорта российского газа в Сербию. Можно также предположить, что в случае сооружения и ввода его в эксплуатацию у России в будущем могут возникнуть препятствия, аналогичные «транзитным проблемам» с Украиной.

Необходимо выделить «особенности взаимоотношений» РФ и Турции как составляющей «западного направления нефтегазовой политики» России. Согласно информации агентства «Интерфакс» от 05.02.2020 г., экспорт природного газа в Турцию в 2019 г. снизился до 14,5 млрд м³ (т.е. снижение на 8 млрд м³), но в то же время импорт из Азербайджана возрос на 1,9 млрд м³ и имеет тенденцию к увеличению. Диверсифицируя источники импорта газа, Турция также наращивает закупки СПГ из других стран. Все это привело к тому, что трубопровод «Турецкий поток» оказался недогруженным⁷: в 2019 г. (при пропускной способности около 16 млрд м³ в год) по нему было прокачено около 10 млрд м³. Если учесть внешнюю политику, которую проводит Турция в последнее время в разных направлениях внешнеэкономической деятельности, представляется сомнительным рассматривать Турцию надежным партнером, в том числе и в газовой сфере.

В последнее время на западном направлении нефтегазовой политики России добавилось «недопонимание» во взаимоотношениях между Белоруссией и РФ в нефтегазовой сфере. По информации белорусской стороны, разногласия возникают по объемам поставок газа и по его цене⁸. Позиция России в данном конфликте совершенно понятная – необходимо переходить на экономически обоснованные отношения (по объемам и ценам энергоресурсов), но вместе с тем это не согласуется с многократными заявлениями о принципах «Союзного государства».

Анализ позиции европейских стран относительно формирования нефтегазового западного рынка и участия в этом России позволяет говорить о новых реалиях, требующих учета при формировании энергетической политики возобновляемой энергетики и минимизации угольной энергетики:

1. Надежным партнером России в среднесрочной перспективе (3–5 лет) пока останется Германия («важнейший игрок» на западноевропейском рынке), мощной экономике которой необходим природный газ, в том числе для электроэнергетической отрасли в связи с отказом от атомной энергетики и минимизацией угольной энергетики.

2. Строительство газопровода «Северный поток-2», чрезвычайно важного для России, и в который вложены огромные ресурсы (к началу 2020 г. работы выполнены почти на 90%), будет завершено, несмотря на прекращающиеся проблемы с его строительством. В частности, страны Евросоюза требуют устранить абсолютный монополизм «Газпрома» по поставкам газа в Европу (требования энергопакета Евросоюза). США в конце апреля 2020 г. усилили давление на Данию с требованием аннулировать свое разрешение на строительство газопровода в своих территориальных водах. Новые сроки окончания строительства (в 2021 г.) с большой вероятностью будут перенесены. Следует особенно отметить, что в середине мая 2020 г. Правительство Германии было вынуждено поддержать требование ЕС в отношении «Газпрома».

3. Снижение объемов экспорта российского трубопроводного газа на западноевропейский рынок, вероятно, будет неизбежным. Из-за снижения деловой активности в мире⁹, спровоцированной «коронавирусом», экспорт в январе-феврале 2020 г. составил на 25% меньше, чем в 2019 г. (на 5 млрд долл.). Немного лучше ситуация с экспортом российского СПГ: за тот же период он вырос на 50%, но только на сумму 1,34 млрд долл.

⁷ Турция сокращает поставки газа из России // Рамблер [Электронный ресурс]. URL: <https://finance.rambler.ru/business/43628898-turtsiya-sokraschaet> (10.03.2020).

⁸ Кремль не стал реагировать на угрозу Лукашенко // Рамблер [Электронный ресурс]. URL: <https://finance.rambler.ru/economics/43694941-kreml-ne-stal-reagirovati..> (22.04.2020).

Общие доходы от экспорта газа в январе-феврале 2020 г. составили 6,5 млрд долл., за тот же период в 2019 г. были 11,8 млрд долл. Снижение наблюдается почти в два раза.

4. Значительно упали мировые цены на газ из-за существенного превышения предложения над спросом. В середине апреля 2020 г. на европейской торговой площадке цена на газ была около 70 долл. за тысячу кубометров⁹. Россия вынуждена снижать цены, чтобы удержать покупателей и сохранить свою долю на газовом европейском рынке в объеме не менее 30%.

5. Удержанию российских позиций на европейском газовом рынке, даже в этих непростых условиях, будет способствовать более низкая цена российского газа по сравнению с ценами на американский СПГ. Стагнация (или даже рецессия) американской отрасли СПГ из-за низких цен на газ может способствовать в будущем и усилению позиций России и на газовых рынках Азиатского региона. Положительным фактором для «Газпрома» является также постепенное снижение поставок газа на европейский рынок из Норвегии и Нидерландов из-за истощения месторождений этих стран.

6. Ситуация на нефтяных рынках постоянно меняется и становится трудно предсказуемой. Например, санкции, наложенные на Иран и Венесуэлу, уже привели к росту экспорта российской нефти в 2019 г. почти на 4%, в том числе и в США. Однако резкое снижение цены на нефть на мировых нефтяных рынках из-за превышения предложения над спросом создает серьезные проблемы для российского экспорта нефти. Для стабилизации ситуации на рынках нефти в апреле 2020 г. в рамках «ОПЕК+» были достигнуты договоренности по снижению объемов добычи нефти. В апреле 2020 г. цена российской нефти марки Urals снижалась до 16,7 долл. за баррель на западноевропейском рынке, но уже в июле приблизилась к 40 долл. за баррель.

7. В среднесрочной перспективе (3–5 лет)

«европейский газовый рынок» остается важнейшим для России. Это, например, подтверждается тем, что экспорт российского газа в «западном направлении составляет около 200 млрд м³ в г., а планируемые ежегодные поставки по газопроводу «Сила Сибири» в восточном направлении России (при его полной загрузке) – около 30–38 млрд м³ в год.

8. В долгосрочной перспективе (10–15 лет) ситуацию на мировых нефтегазовых рынках спрогнозировать практически невозможно. Уже сегодня проявляются новые тренды, которые изменяют структуру потребления и генерации. Традиционные углеводороды вытесняются нетрадиционными возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ), этому будут способствовать активное энергосбережение и повышение энергоэффективности во всех сферах жизнедеятельности. В связи с этим нефтегазовый рынок будет сжиматься и потеряет, вероятно, приоритетное значение для России.

Как было показано выше, «западное направление» нефтегазовой политики России, с точки зрения важности этого направления для экономики страны, в среднесрочной перспективе останется приоритетным. В то же время множество новых вызовов, появившихся на этом направлении, приводит к необходимости диверсифицировать рынки (регионы) российского экспорта углеводородов. Это послужило основанием «поворота нефтегазовой политики» на Восток – в страны АТР. Этот «разворот» был в первую очередь ориентирован на Китай и закреплён Соглашением, которое в 2014 г. заключили РФ и КНР на поставки в Китай ежегодно 30–38 млрд м³ в течение 30 лет. Несмотря на то, что КНР располагает существенными запасами различных ресурсов (особенно угля) и активно наращивает их добычу, Китай не сможет обеспечить свою растущую экономику собственными энергетическими ресурсами в среднесрочной перспективе. Китай для обеспечения своей энергобезопасности, при постепенном снижении применения угля в

⁹Пандемия убытков: вслед за нефтью Россия теряет газовые доходы // Рамблер [Электронный ресурс]. <https://finance.rambler.ru/economics/44064714-pandemiya-ubytkov-vsled-za-neftyu-rossiya-teryet-gazovye-dohody/> (26.04.2020).

энергетике, вынужден существенно увеличивать импорт природного газа (трубопроводного и СПГ) и нефти, диверсифицируя источники поставки. Совокупность этих факторов, выгодное географическое расположение, общая граница длиной более четырех тысяч километров позволяет России стать одним из основных экспортеров углеводородов в КНР. Намечившееся стратегическое партнерство для Китая имеет важнейшее значение в современных условиях, так как все сильнее обостряются отношения Китая и США.

Принято считать, что официальный старт восточному направлению газовой политики России был дан принятием в 2007 г. «Программы создания в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке единой системы добычи, транспортировки газа и газоснабжения с учетом возможного экспорта газа на рынки Китая и других стран Азиатско-Тихоокеанского региона»¹⁰ [13, 14]. Особенностью этого документа является то, что при его создании использовался системный подход. Представляется необходимым указать наиболее важные цели и задачи этой Восточной программы, которая сохранила свое важнейшее значение и в настоящее время. Вот некоторые из них:

- удовлетворение спроса на природный газ российских потребителей Восточных регионов является первостепенным;
- формирование эффективного регионального рынка природного газа, основанного на балансе спроса и предложения на этот вид углеводородного сырья;
- образование оптимальных топливно-энергетических балансов на Востоке страны с учетом всех видов энергоресурсов;
- создание и поддержание оптимальных цен на экспортируемый природный газ в среднесрочной и долгосрочной перспективах.

При этом «Главной целью Восточной газовой программы является формирование в регионе эффективной газовой промышленности и создание на этой основе условий для динамичного социально-экономического развития Восточной Сибири и Дальнего Востока, качественного повышения уровня жизни населения региона»¹⁰ [13].

Следует особо отметить, что в Восточной

газовой программе не ставилась стратегическая цель поворота нефтегазовой политики России на Восток с целью усиления экспорта газа в Северо-Восточную Азию и в первую очередь в Китай, а также в будущем в весь АТР. Основной целью было именно социально-экономическое развитие Восточной Сибири и Дальнего Востока на основе всемерного использования природного газа во всех сферах деятельности – в экономике и социальной сфере. Однако к настоящему времени ситуация принципиально изменилась, и главной целью Восточной программы стали экспортные поставки углеводородного сырья в Северо-Восточную Азию, тем не менее никакие официальные изменения в Восточную газовую программу не вносились.

РЕСУРСНАЯ БАЗА ПРИРОДНОГО ГАЗА РОССИИ, ОПРЕДЕЛЯЮЩАЯ ЕЕ ВОСТОЧНУЮ ГАЗОВУЮ ПОЛИТИКУ

Представляется целесообразным сжато рассмотреть ресурсную базу России в Восточном регионе для реализации газовой политики в целом и экспортных поставок газа в Китай в частности, а также прогнозируемые потребности КНР в этом сырье.

Рассмотрим только основные месторождения (газовые ресурсы), на основании которых должна была реализовываться Восточная газовая программа¹⁰ [11, 13–15]. Часть из этих ресурсов уже вовлечена в хозяйственную деятельность (начались экспортные поставки), но большая доля будет осваиваться в среднесрочной и долгосрочной перспективе. К этим месторождениям следует отнести (приблизительные значения в млрд м³): Ковыктинское газоконденсатное месторождение (ГКМ) – 2000; Чаяндинское – 1240; Сахалин I-II (шельф) – 900; Юрубченко-Тохомское – 700; Собинско-Пайгинское – 170.

Эта информация была представлена еще в 2007 г. ИА Neftegaz.RU на момент принятия Восточной газовой программы и к настоящему времени принципиально не изменилась. В 2007 г. «Газпром» озвучил свои намерения довести ресурсную базу по природному газу в Восточных регионах страны до 7 трлн м³. Реализация этих планов требует увеличения «в разы» геологоразведочных работ с мно-

гомиллионными финансовыми затратами, включая как «доразведку» (уточнение ресурсной базы) уже открытых около двух десятков крупных, средних и мелких месторождений^{10–12} [11, 13–15], так и поиск новых месторождений. Без них невозможно обеспечить газификацию Восточной Сибири и Дальнего Востока и реализовать намерения существенного увеличения экспорта газа в Северо-восточную Азию (и в целом – в АТР)^{13,14} [9, 11, 16–21]. Потребуется также создание разветвленной инженерной инфраструктуры на огромной территории для вовлечения этих месторождений в хозяйственный оборот.

К числу стратегических месторождений относятся Ковыктинское ГКМ (КГКМ) и Чаяндинское. Первостепенную важность для успешной реализации Восточной газовой политики имеет Ковыктинское ГКМ (открытое в 1987 г. в Иркутской области), так как без полного освоения его ресурсов невозможно в среднесрочной перспективе обеспечить экспортные поставки газа в КНР в объемах, закрепленных в межгосударственном соглашении 2014 г. (около 38 млрд м³ в год). По имеющейся информации запасы месторождения категории C1+C2 приблизительно составляют 2,7 трлн м³ газа и 90,6 млн тонн газового конденсата («легкая нефть»). Однако до сих пор его полномасштабное освоение затягивается. Газ этого месторождения относится к «жирному газу», который содержит не только простейший метан, но и этан, пропан, бутан и инертный газ – гелий. Такой комплексный состав газа обуславливает необходимость глубокой переработки этого газа для эффективного использования в газохимическом производстве. По официальной информации «Газпрома», в середине 2019 г. на Ковыктинском ГКМ началось эксплуатационное бурение (7 скважин), а ввод месторождения в эксплуатацию планируется на 2022 г. Кроме того, «Газпром» в 2019 г. продолжил строительство трубопровода в сторону магистрального газопровода «Сила Сибири» и инфраструктуры в районе КГКМ.

Чтобы дать оценку перспективам сотрудничества РФ и КНР в газовой сфере как важной составляющей российской Восточной

газовой политики (которые в самом общем виде были показаны выше), необходимы хотя бы приблизительные прогнозы потребности КНР в природном газе. По прогнозам ИНЭИ РАН (г. Москва), сделанным в 2014–2015 г.⁴ [8, 9], Китай, по вероятному сценарию экономического развития страны, к 2020 г. должен был потреблять 320–325 млрд м³ газа. По факту в 2019 г. потребление составило 310 млрд м³ газа. Если рассмотреть оптимистический прогноз роста потребления газа 4,3% в год, то к 2040 г. потребление должно достичь 585–690 млрд м³ газа⁴ [8, 9]. В этот же период, по оценкам ИНЭИ, Китай доведет внутреннюю добычу газа до 376–386 млрд м³ газа, включая «сланцевый газ». Следовательно, Китай будет импортировать около 300 млрд м³ газа и прежде всего из газодобывающих стран, ранее входящих в состав СССР [20–22]. Такие прогнозируемые объемы китайского импорта газа могут дать России реальные возможности по экспорту этого сырья в Китай. В 2014–2015 г. было достаточно много оптимистичных прогнозов по поводу расширения поставок в КНР природного газа из России. Например, на конференции «Нефть и газ Сахалина» представители китайской компании CNPC заявляли, что планируют импортировать из РФ около 100 млрд м³ газа в год [20]. А это величина близка к половине общего экспорта российского газа в 2019 г. Но необходимо учитывать следующие важные факторы: в 2013 г. (за год до подписания Соглашения между КНР и РФ) Китай импортировал около 31 млрд м³ газа, из которых 17 млрд м³ СПГ и 14 млрд м³ составил трубопроводный газ. Из этого объема доля России была минимальная [21]. За последние 5–6 лет КНР активно наращивает импорт СПГ, развивая соответствующую инфраструктуру (терминалы и установки по регазификации) [22]. Этому способствовало снижение стоимости СПГ из-за избытка предложений. Этот процесс продолжается и в настоящее время. СПГ в КНР в основном используется в южных и центральных районах Китая, где и создана соответствующая инфраструктура, а портовые сооружения этих районов принимают СПГ из Катар и Австралии. Для Северо-Восточных экономически

развитых районов Китая, а также удаленных Северо-Западных районов становится перспективным трубопроводный газ. В настоящее время импорт трубопроводного газа осуществляется из Туркменистана и из Мьянмы (бывшая Бирма) от регазифицированного терминала.

Особо надо выделить активизацию процесса добычи и использования сланцевого газа в КНР, несмотря на то, что себестоимость его добычи (в зависимости от условий добычи и инфраструктуры) в настоящее время в 2–5 раз выше, чем добыча традиционно-го газа. Но в среднесрочной перспективе этот газовый ресурс для Китая может приобрести существенное значение⁴ [8, 9, 22].

Изменяющиеся политические и внешние экономические условия, а также снижение темпов экономического роста КНР внесли корректировки в вышеприведенные прогнозы по китайскому импорту газа.

ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМООТНОШЕНИЙ РОССИИ И КИТАЯ В ГАЗОВОЙ СФЕРЕ

Постепенная переориентация нефтегазовой политики РФ на Восточное направление и изменение приоритетов Восточной газовой программы в последние годы иллюстрируют активизацию России в восточных регионах страны и намерения усилить свои позиции на нефтегазовом рынке Северо-Восточной Азии. В достаточно короткие сроки был построен и функционирует нефтепровод «Восточная Сибирь – Тихий океан» (ВСТО); в декабре 2019 г. запущен в эксплуатацию (первый этап) газопровод «Сила Сибири», являющийся основой по реализации Соглашения между КНР и РФ, подписанного в 2014 г. На официальном уровне Россия демонстрировала изменение своего вектора газовой политики – с западного на восточное направление. Но выше было показано, что в среднесрочной перспективе (3–5 лет) газовые рынки Европы сохраняют свою финансово-экономическую значимость. В связи с этим необходимо проанализировать, какое значение отводится «восточному вектору газовой политики» в среднесрочной и долгосрочной перспективах.

Когда формировалась Восточная газовая

программа России (к 2007 г.) и готовилось подписание «стратегического соглашения» с КНР (к 2014 г.), многие эксперты и официальные лица предполагали, что конструктивное сотрудничество двух стран даст определенные преимущества каждой из сторон [10, 11, 20, 22]. Россия должна была получить: интенсивное экономическое и социальное развитие Восточной Сибири и Дальнего Востока на основе нефте- и газохимии; выход на громадный китайский рынок газа для экспорта своего сырья; взаимно приемлемые цены на экспортируемый газ по долгосрочным контрактам; возможность (при необходимости) приобретать китайские инвестиции (не только в нефтегазовую сферу). Китай должен был получить: гарантированные прямые поставки газа из восточных регионов России по стабильным ценам (как правило, ниже мировых) по безопасному маршруту; возможность (в перспективе) доступа китайских финансовых ресурсов в добывающие отрасли России. Китай был заинтересован в поставках газа из России, прежде всего в развивающийся Северо-Восток Китая [10, 22, 23].

Какова ситуация с Восточной газовой политикой России в настоящее время?

1. Как указывалось выше, приоритетом этой политики стали экспортные поставки природного газа в Китай, а в будущем – в АТР в целом. Все крупные стройки Восточной газовой политики России направлены на обеспечение экспортных поставок газа: трубопровод «Сила Сибири», строительство Амурского ГПЗ и терминалов для СПГ и т.д.

2. Социально-экономическое развитие Восточных регионов, предусмотренное Программой, реализуется в минимальном объеме. Например, много раз обещанная в течение почти двадцати лет сплошная газификация Иркутской области (ИО), которая имеет крупнейшее Ковыктинское ГКМ, не реализована. До сих пор нет даже конкретных утвержденных планов по газификации ИО. Выполняются отдельные газовые проекты, но на основе местных локальных месторождений [24], тем не менее имеются обоснованные предложения по замене в ИО «угольной генерации» на газ (на ТЭЦ и крупных котель-

ных), что существенно улучшило бы экологическую обстановку в зоне оз. Байкал.

3. Первая очередь магистрального трубопровода «Сила Сибири» запущена 2 декабря 2019 г. (необходимо строительство еще 800 км от Ковыктинского ГКМ), природный газ с Чаяндинского месторождения (Якутия) начали экспортировать в КНР. Суммарная стоимость этого проекта около 55 млрд долл.

4. Экономический эффект от экспорта газа в Китай не известен, так как отсутствует даже приблизительная информация о стоимости этого сырья. В 2014 г., когда подписывалось Соглашение, «Газпром» ориентировался на цену европейского газового рынка – около 200 долл. за 1000 м³. Однако, как показано выше, с конца 2019 г. стоимость газа на этом рынке опускалась до 100–130 долл. за 1000 м³, поэтому маловероятно, что Китай стал покупать газ по более высоким ценам.

5. В 2017 г. Министр энергетики РФ А.В. Новак (в настоящее время – заместитель Премьер-министра РФ), выступая в Госдуме на слушаниях, заявил, что «Сила Сибири» – это не коммерческий проект. Официальные Российские лица, заявляя об экономическом эффекте от «Силы Сибири», подразумевают только эффект, который получили трубопрокатные заводы, поставщики и строители газопровода, но не доходы от экспорта газа. С такой трактовкой «экономического эффекта» «Сила Сибири» является действительно «уникальным» проектом, которому нет аналогов в мире. По мнению многих экспертов, этот проект не окупится даже в долгосрочной перспективе¹⁵, но с учетом заявления А.В. Новака, от «Силы Сибири» этого и не требовалось.

6. Поскольку Соглашение 2014 г. с КНР готовилось более пяти лет, то для Китая острой необходимости по поставкам газа по трубопроводу «Сила Сибири» нет. С большой вероятностью можно утверждать, что «Сила Сибири» для КНР в настоящее время является резервным вариантом по газоснабжению.

7. Из-за неготовности в полном объеме Амурского ГПЗ (только к 2022 г.) к моменту запуска в эксплуатацию «Силы Сибири» России пришлось начать поставки в КНР так называемого «жирного газа» с Чаяндинского месторождения по цене метана. Этот газ, кроме метана, содержит более сложные компоненты (этан, бутан, пропан). Китай получил малозатратную возможность получать ценное сырье для своей газохимической промышленности.

8. На Чаяндинском месторождении, кроме газа, имеются большие объемы нефти, которую по известному мировому опыту требуется извлекать перед добычей газа, чтобы не потерять давление в пластах. Начавшаяся добыча газа на данном месторождении может привести к безвозвратным потерям этой нефти⁶ или к огромным затратам в будущем по разработке и внедрению методов извлечения нефти с Чаяндинского месторождения.

9. Нет оптимального организационного и технического решения для ближайшей перспективы (1-2 года), связанного с извлечением важного компонента природного газа Ковыктинского ГКМ гелия, содержание которого почти в шесть раз выше, чем среднемировые оценки, при которых извлечение гелия экономически целесообразно. В Ковыктинском газе содержание гелия составляет до 0,28%¹⁵.

10. КНР диверсифицирует источники импорта нефти и газа с целью защиты своих экономических и политических интересов и усиления влияния в мире. В настоящее время отсутствует информация о намерениях Китая сократить импорт нефтегазовых ресурсов из Туркмении, Ближнего и Среднего Востока и других стран даже в среднесрочной перспективе (3-5 лет). Такая ситуация создает неопределенность экспортных поставок энергоресурсов России в Китай.

11. Проблемы во взаимоотношениях КНР и РФ в нефтегазовой сфере усугубились из-за принятия Китаем ряда решений, негативно влияющих на Восточную политику России по

¹⁵Поставки газа в Китай могут стать проблемой // ГАЗЕТА.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gazeta.ru/business/2019/07/04/12476485.shtml> (16.01.2020).

экспорту углеводородного сырья. Китай изменил ранее существовавший механизм формирования цены на импортируемый газ. Теперь цена определяется не на входе магистрального газопровода (это относится и к «Сила Сибири»), а зависит от спроса и предложения на китайском газовом рынке, что неизбежно приведет к снижению стоимости импортируемого из России газа¹⁶ [17, 20, 22]. В среднесрочной и долгосрочной перспективах роль и место РФ на нефтегазовом рынке Китая может быть также существенно ограничена из-за принятого КНР решения предоставить с 01.05.2020 г. право зарубежным компаниям вести разведку и добычу нефти и газа на территории Китая без участия китайских компаний¹⁷. Надо признать, что у крупнейших российских компаний («Роснефть», «Газпром», «НОВАТЭК») практически нет конкурентных преимуществ, чтобы занять значимое место в этой сфере деятельности.

12. Возможное расширение Восточной газовой политики России на другие страны Северо-Восточной Азии и в целом на АТР требует дополнительного рассмотрения и обоснования с учетом новых вызовов и угроз, которые появились за последние два года [22, 23].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщая вышесказанное, можно сделать следующие выводы:

1. Несмотря на увеличивающиеся проблемы с реализацией нефтегазовой политики России в Западном направлении, в среднесрочной перспективе РФ сохранит свои позиции ключевого игрока на западном газовом рынке (около 30%), который обеспечивает почти половину наполнения бюджета страны.

2. Для сохранения своих позиций на Западном рынке, который остается приоритетным, Россия вынуждена существенно снижать цену на экспортируемый газ.

3. В долгосрочной перспективе позиции

России на Западном газовом рынке будут существенно сокращаться из-за развития ВИЭ, усиления энергосбережения и энергоэффективности во всех сферах деятельности, а также из-за большой вероятности продолжения санкционной политики по отношению к России. Ситуация может измениться только при появлении факторов, которые невозможно спрогнозировать в настоящее время.

4. Выполнение Восточной газовой программы, в части газификации Восточной Сибири и Дальнего Востока и развития региональной газохимии, происходит в вялотекущем режиме. Можно надеяться, что принятая в июне 2020 г. Энергетическая стратегия России до 2035 г. активизирует этот процесс.

5. С большой вероятностью можно утверждать, что декларируемый на официальном уровне «разворот газовой политики России на Восток» содержит внешнеполитический аспект – укрепление роли РФ в политической и военной областях.

6. В настоящее время полноценным «стратегическим партнером» России Китай не является, так как все принятые между странами финансово-экономические решения предоставляют преференции именно КНР. Достаточно напомнить, что в разгар строительства «Силы Сибири» Китай отказался финансировать этот проект на условиях России, и «Газпром» достраивал газопровод из общегосударственных средств, а ранее был отказ финансировать ответвление от ВСТО. Китай всегда жестко отстаивает свои экономические интересы, ставя Россию в неравные условия.

7. Китай нуждается в «стратегическом партнерстве» с Россией в военно-политической сфере, являющимся важным фактором в обостряющихся отношениях с США и, возможно, с другими странами.

8. При изменении мировых внешнеполитических и экономических условий между РФ и КНР в перспективе возможно полноценное

¹⁶ Китай подставил Россию с газопроводом «Сила Сибири»: в последний момент произошло неожиданное // Диалог UA [Электронный ресурс]. URL: https://www.dialog.ua/russia/195863_1575302567 (20.02.2020).

¹⁷ Китай откроет нефтегазовую отрасль зарубежным компаниям [Электронный ресурс]. URL: <http://oilreview.kiev.ua/2020/01/17/kitaj-otkroet-neftegazovuyu-otrasl-zarubezhnym-kompaniyam/> (20.02.2020).

равноправное сотрудничество в энергетической сфере в целом и в нефтегазовой в частности, которое обеспечит эффективное раз-

витие энергетики и энергетическую безопасность обеих стран.

Список литературы

1. Global and Russian Energy Outlook 2016 / edited by A.A. Makarov, L.M. Grigoriev, T.A. Mitrova. Moscow, 2016. 198 p. [Электронный ресурс]. URL: https://www.eriras.ru/files/forecast_2016_rus.pdf (20.03.2020).
2. Филимонова И.В., Немов В.Ю., Проворная И.В., Мишенин М.В., Комарова А.В., Шумилова С.И. [и др.]. Нефтегазовый комплекс России – 2018: в 4 ч. Ч. 2. Газовая промышленность – 2018: долгосрочные тенденции и современное состояние. Новосибирск: Изд-во ИНГГ СО РАН, 2019. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ipgg.sbras.ru/ru/files/publications/ibc/book-2019-filimonova2.pdf?action=download> (20.03.2020).
3. Макаров А.А., Митрова Т.А. Стратегические перспективы развития энергетического комплекса России // Проблемы прогнозирования. 2018. № 5. С. 81–96. [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/strategicheskie-perspektivy-razvitiya-energeticheskogo-kompleksa-rossii> (20.03.2020).
4. Горбунова О.А. Воздействие санкций на функционирование российских компаний нефтегазового сектора на мировом рынке нефти и газа // Вестник евразийской науки. 2018. Т. 10. № 2. [Электронный ресурс]. URL: <https://esj.today/PDF/07ECVN218.pdf> (20.03.2020).
5. Илькевич Н.И., Дзюбина Т.В., Калинина Ж.В. Многоуровневое моделирование развития систем газоснабжения: монография. Новосибирск: Изд-во «Наука», 2014. 217 с.
6. Saneev B.G. Regional priorities of the Eastern energy policy of Russia // Regional Energy Policy of Asian Russia 2018: E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 77. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20197701006>
7. Прогноз развития энергетики мира и России 2019 / под ред. А.А. Макарова, Т.А. Митровой, В.А. Кулагина. М.: ИНЭИ РАН – Московская школа управления СКОЛКОВО, 2019. 210 с.
8. Прогноз развития энергетики мира и России до 2040 года / А.А. Макаров, Т.А. Митрова, Л.М. Григорьев, С.П. Филиппов. М.: Изд-во ИНЭИ РАН – АЦ при Правительстве Российской Федерации, 2013. 110 с.
9. Перспективы развития мировой энергетики с учетом влияния технологического прогресса / под ред. В.А. Кулагина. М.: ИНЭИ РАН, 2020. 320 с.
10. Гедич Т.Г. Анализ сценариев обеспечения потребности КНР в первичных энергоресурсах и их влияние на развитие газодобычи в Иркутской области // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 10. С. 228–233.
11. Филимонова И.В., Немов В.Ю., Проворная И.В., Мишенин М.В., Комарова А.В., Шумилова С.И. [и др.]. Нефтегазовый комплекс России – 2018: в 4 ч. Ч. 2. Газовая промышленность – 2018: долгосрочные тенденции и современное состояние. Новосибирск: Изд-во ИНГГ СО РАН, 2019. 63 с.
12. Гимади В., Кудрин А., Колобов О., Поминова И., Амираган А., Мартынюк А. [и др.]. Позиции природного газа в энергобалансе // Энергетический бюллетень / рук. Л. Григорьев. Вып. № 28. М.: АЦ при Правительстве РФ, 2015. 30 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://ac.gov.ru/files/publication/a/6397.pdf> (20.03.2020).
13. Казаненков В.А., Филимонова И.В., Немов В.Ю. Главные направления и задачи поисков нефти и газа в Западной Сибири на ближайшие десятилетия // Бурение и нефть. 2019. № 10. С. 9–18.
14. Восток России: проблемы освоения – преодоления пространства / под ред. В.А. Крюкова, В.В. Кулешова. Новосибирск: Изд-во ИЭОПП СО РАН, 2017. 484 с.
15. Россия: восточный вектор. Предложения к стратегии развития Сибири и Дальнего Востока. Аналитический доклад / под ред. В.С. Ефимова, В.А. Крюкова. Красноярск: Сиб. федерал. ун-т, 2014. 92 с. [Электронный ресурс]. URL: http://test3.mfk.msu.ru/uploads/attachments/attachment_1757_1584548378.pdf (20.03.2020).
16. Лузянин С.Г., Кортуннов А.В., Карнеев А.Н., Чжао Хуашэн, Лю Хуацзинь, Ши Цзэ [и др.]. Российско-китайский диалог: модель 2020: доклад № 58/2020; Российский совет по международным делам (РСМД). М.: НП РСМД, 2020. 254 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://russiancouncil.ru/papers/Russia-China-2020-Report58.pdf> (20.03.2020).
17. Пляскина Н.И., Харитонова В.Н., Вижина И.А. Сила Сибири – драйвер или угроза газохимическим кластерам Востока России? // ЭКО. 2015. № 4. С. 54–71.
18. Ершова Е.В. Природный газ в энергопотреблении Китая: основные тенденции развития // Известия Иркутской государственной экономической академии. 2016. Т. 26. № 1. С. 80–89. [https://doi.org/10.17150/1993-3541.2016.26\(1\).80-89](https://doi.org/10.17150/1993-3541.2016.26(1).80-89)
19. Лагерева А.В., Ханаева В.Н. Развитие газового рынка восточных регионов России // Пространственная Экономика. 2019. Т. 15. № 3. С. 46–58. <https://doi.org/10.14530/se.2019.3.046-058>
20. Герасимчук О.А., Осадчук Е.О. Восточное направление российской энергетической политики: смена экспортного вектора или диверсификация поставок? // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Международные отношения. 2015. Т. 15. № 3. С. 167–176.
21. Белова М., Колбикова Е., Тимонин И. Место России на мировой СПГ-карте // Oil & Gas Journal Russia. 2019. № 4. С. 74–81. [Электронный ресурс]. URL: https://vygon.consulting/upload/iblock/3c6/OGJR_2019_04_small.pdf (20.03.2020).
22. Popov S. Analysis of the energy policy establishment:

the case of East Asia // Regional Energy Policy of Asian Russia: E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 77. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20197701003>

23. Korneev A., Korneev K. Institutions of international energy cooperation in North-East Asia region // Regional Energy Policy of Asian Russia: E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 77.

<https://doi.org/10.1051/e3sconf/20197701004>

24. Golovshchikov V. Some energy problems of the Irkutsk region and ways of solving them // Regional Energy Policy of Asian Russia: E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 77.

<https://doi.org/10.1051/e3sconf/20197703006>

References

1. Global and Russian energy outlook 2016 / edited by AA Makarov, LM Grigoriev, TA Mitrova. Moscow; 2016, 198 p. Available from:

https://www.eriras.ru/files/forecast_2016_rus.pdf [Accessed 20th March 2020].

2. Filimonova IV, Nemov VYu, Provornaya IV, Mishenin MV, Komarova AV, Shumilova SI, et al. *Oil and Gas Complex of Russia - 2018: in 4 parts. Part 2. Gas Industry - 2018: Long-Term Trends and Current State*. Novosibirsk: The Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2019. Available from:

<http://www.ipgg.sbras.ru/ru/files/publications/ibc/book-2019-filimonova2.pdf?action=download> [Accessed 20th March 2020]. (In Russ.)

3. Makarov AA, Mitrova TA. Strategic prospects of Russian energy complex development. *Problemy prognozirovaniya = Studies on Russian Economic Development*. 2018;5:81–96. Available from:

<https://cyberleninka.ru/article/n/strategicheskie-perspektivy-razvitiya-energeticheskogo-kompleksa-rossii> [Accessed 20th March 2020]. (In Russ.)

4. Gorbunova OA. Impact of sanctions on the functioning of Russian companies in the oil and gas sector on the world oil and gas market. *Vestnik Evrazijskoj nauki = The Eurasian Scientific Journal*. 2018;10(2). Available from: <https://esj.today/PDF/07ECVN218.pdf> [Accessed 20th March 2020]. (In Russ.)

5. Il'kevich NI, Dzjubina TV, Kalinina ZhV. Multilevel modeling of gas supply system development: monograph. Novosibirsk: Nauka; 2014, 217 p. (In Russ.)

6. Saneev BG. Regional priorities of the Eastern energy policy of Russia. In: *Regional Energy Policy of Asian Russia 2018: E3S Web of Conferences*. 2019;77. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20197701006>

7. Forecast for the development of energy sector in the world and in Russia 2019 / eds AA Makarov, TA Mitrova, VA Kulagin. Moscow: The Energy Research Institute RAS – Moscow School of Management SKOLKOVO; 2019, 210 p. (In Russ.)

8. Forecast of energy sector development in the world and in Russia for the period until 2040 / ed AA Makarov, TA Mitrova, LM Grigoriev, SP Filippov. Moscow: Publishing house of the Energy Research Institute RAS – Analytical Center under the Government of the Russian Federation; 2013, 110 p. (In Russ.)

9. Development prospects of the world energy sector taking into account the impact of technological progress / ed VA Kulagin. Moscow: The Energy Research Institute RAS; 2020, 320 p. (In Russ.)

10. Gedich TG. Analysis of scenarios of meeting China needs in primary energy resources and their effect on gas production development in the Irkutsk region. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2015;10:228–233. (In Russ.)

11. Filimonova IV, Nemov VYu, Provornaya IV, Mishenin MV, Komarova AV, Shumilova SI, et al. *Oil and gas complex of Russia – 2018: in 4 parts. Part 2. Gas industry - 2018: long-term trends and current state*. Novosibirsk: Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2019, 63 p. (In Russ.)

12. Gimadi V, Kudrin A, Kolobov O, Pominova I, Amiragyan A, Martynyuk A, et al. Positions of natural gas in the energy balance // *Energy bulletin / Supervisor Grigoriev L*. Iss. no. 28. Moscow: Analytical Center under the Government of the Russian Federation; 2015, 30 p. Available from: <https://ac.gov.ru/files/publication/a/6397.pdf> [Accessed 20th March 2020]. (In Russ.)

13. Kazanenko VA, Filimonova IV, Nemov VYu. The main directions and goals of oil and gas exploration in Western Siberia for the nearest decades. *Burenie i nef't*. 2019;10:9–18. (In Russ.)

14. East of Russia: development problems – winning through the space / eds VA Kryukov, VV Kuleshov. Novosibirsk: Institute of Economics and Industrial Engineering SB RAS; 2017, 484 p. (In Russ.)

15. Russia: eastern vector. Proposals for the development strategy of Siberia and the Far East. Analytical report / under edition of VS Efimov, VA Kryukov. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; 2014, 92 s. Available from: http://test3.mfk.msu.ru/uploads/attachments/attachment_1757_1584548378.pdf [Accessed 20th March 2020]. (In Russ.)

16. Luzyanin SG, Kortunov AV, Karneev AN, Chzhao Huashen, Lyu Huacin', Shi Cze, et al. Russian-Chinese Dialogue: Model 2020: Report No. 58/2020; Russian International Affairs Council (RIAC). Moscow: Russian International Affairs Council; 2020, 254 p. Available from: <https://russiancouncil.ru/papers/Russia-China-2020-Report58.pdf> [Accessed 20th March 2020]. (In Russ.)

17. Plyaskina NI, Haritonova VN, Vizhina IA. Is the power of Siberia – a driver or a threat to gas chemical clusters in the East of Russia? *EKO*. 2015;4:54–71. (In Russ.)

18. Ershova EV. Natural gas in China's energy consumption: major development trends. *Izvestiya Irkutskoj gosudarstvennoj ekonomicheskoy akademii = Izvestiya of Irkutsk State Economics Academy*. 2016;26(1):80–89. (In Russ.)

[https://doi.org/10.17150/1993-3541.2016.26\(1\).80-89](https://doi.org/10.17150/1993-3541.2016.26(1).80-89)
19. Lagerev AV, Khanaeva VN. Development of the gas market of the eastern regions of Russia. *Prostranstvennaya Ekonomika = Spatial Economics*. 2019;15(3):46–58. (In Russ.)
<https://doi.org/10.14530/se.2019.3.046-058>
20. Gerasimchuk OA, Osadchuk EO. Russian energy policy looks increasingly eastward: changing an export vector or diversifying of supply? *Vestnik Rossiiskogo universiteta družby narodov. Seriya: Mezhdunarodnye otnosheniya = Vestnik RUDN. International relations*. 2015;15(3):167–176. (In Russ.)
21. Belova M, Kolbikova E, Timonin I. Russia's place on the global LNG map. *Oil & Gas Journal Russia*. 2019;4:74–81. Available from:

https://vygon.consulting/upload/iblock/3c6/OGJR_2019_04_small.pdf [Accessed 20th March 2020]. (In Russ.)
22. Popov S. Analysis of the energy policy establishment: the case of East Asia. In: *Regional Energy Policy of Asian Russia: E3S Web of Conferences*. 2019;77. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20197701003>
23. Korneev A, Korneev K. Institutions of international energy cooperation in North-East Asia region. In: *Regional Energy Policy of Asian Russia: E3S Web of Conferences*. 2019;77. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20197701004>
24. Golovshchikov V. Some energy problems of the Irkutsk region and ways of solving them. In: *Regional Energy Policy of Asian Russia: E3S Web of Conferences*. 2019;77. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20197703006>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Стенников Валерий Алексеевич,
член-корреспондент РАН, директор,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия;
e-mail: sva@isem.irk.ru

Головщиков Владимир Олегович,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник, главный специалист,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия;
✉ e-mail: vladgo@isem.irk.ru

Романович Екатерина Алексеевна,
эксперт,
АО «Газстройпром»,
196084, г. Санкт-Петербург, ул. Ташкентская, 3/3Б,
Россия;
e-mail: katsha.romanovich@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 22.06.2020; одобрена после рецензирования 21.09.2020; принята к публикации 26.02.2021.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Valery A. Stennikov,
Corresponding Member RAS, Director,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia;
e-mail: sva@isem.irk.ru

Vladimir O. Golovshchikov,
Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher, Chief Specialist,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia;
✉ e-mail: vladgo@isem.irk.ru

Ekaterina A. Romanovich,
Expert,
JSC Gazstroyprom,
3/3B Tashkentskaya St., St. Petersburg 196084, Russia;
e-mail: katsha.romanovich@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 22.06.2020; approved after reviewing 21.09.2020; accepted for publication 26.02.2021.

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: pgp@istu.edu **в виде файла с расширением *.DOC** – документа, построенного средствами Microsoft Word 97 или последующих версий.

При наборе статьи в Microsoft Word рекомендуются следующие установки:

- 1) параметры **страницы** и абзаца: отступы сверху и снизу – **2 см**; слева и справа – **2 см**; **табуляция – 2 см**; ориентация – книжная;
- 2) шрифт – **Times New Roman**, размер – **12**, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;
- 3) при вставке формул использовать **Microsoft Equation 3** при установках: элементы формулы выполняются **курсивом**; для греческих букв и символов назначать шрифт **Symbol**, для остальных элементов – **Times New Roman**. Размер символов: обычный – 12 пт, крупный индекс – 7 пт, мелкий индекс – 5 пт, крупный символ – 18 пт, мелкий символ – 12 пт. Все экспликации элементов формул необходимо также выполнять в виде формул;
- 4) **рисунки**, вставленные в текст, должны быть выполнены с разрешением 300 dpi, B&W – для черно-белых иллюстраций, Grayscale – для полутонов, максимальный размер рисунка с надписью: ширина 150 мм, высота 245 мм и представлены в виде файла с расширением *.BMP, *.TIFF, *.JPG, должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. **Схемы, графики** выполняются во встроенной программе **MS Word** или в **MS Excel**, с **приложением файлов (представляемые иллюстрации должны быть четкими и ясными во всех элементах)**;
- 5) библиографические ссылки должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ Р 7.05 2008.

Внимание! Публикация статьи является бесплатной.

«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: pgp@istu.edu

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Научный журнал
№ 1 (156) 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 26.02.2021 г. Формат 60х90/8.
Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 18.
Тираж 500 экз. Заказ 34. 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

