

ISSN 2782-4004 (print) ISSN 2782-6341 (online)

iPolytech Journal

Tom **26**, № **4**. 2022 / Vol. **26**, № **4**. 2022

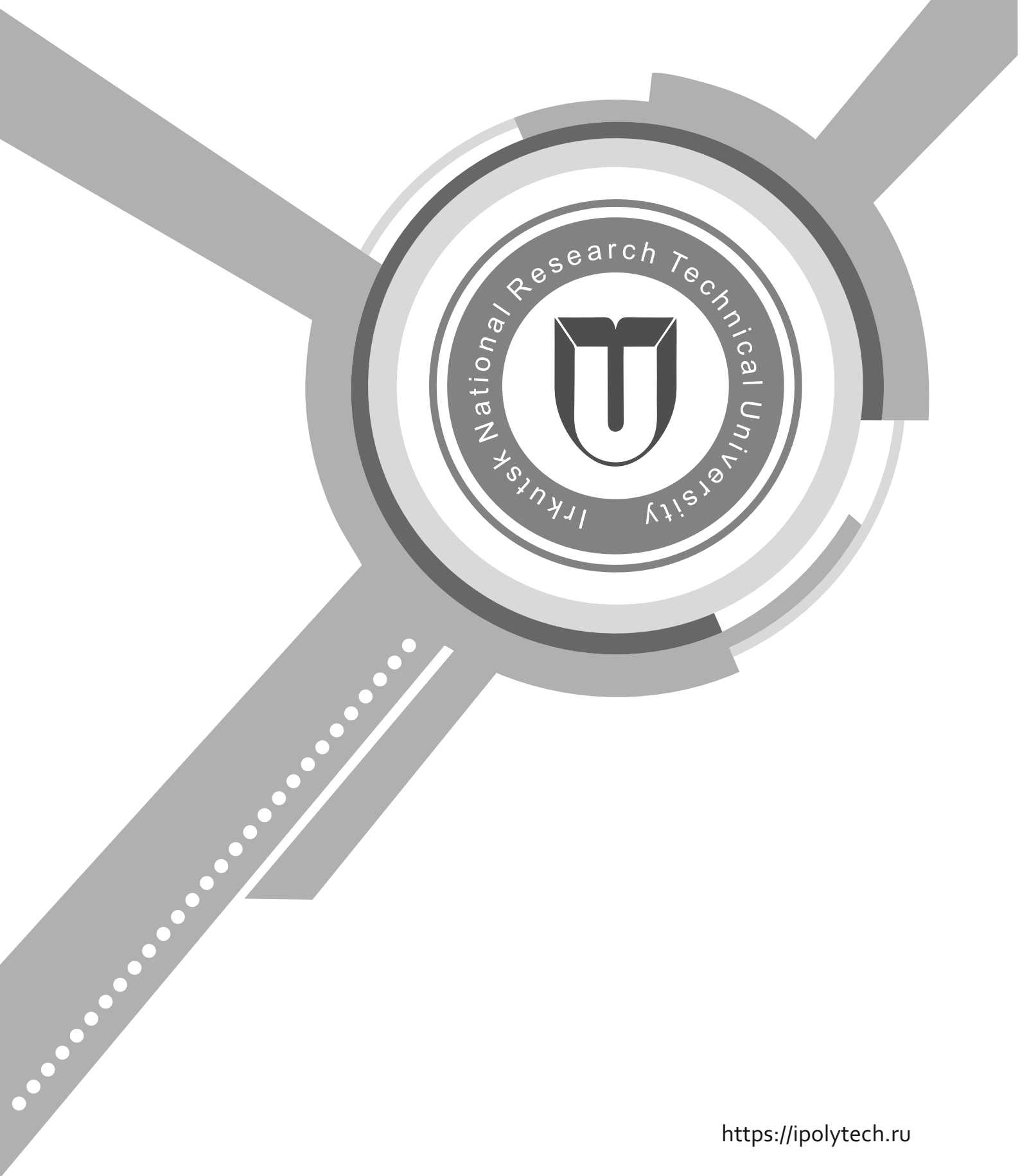


<https://ipolytech.ru>

ISSN 2782-4004 (print) ISSN 2782-6341 (online)

iPolytech Journal

Tom 26, № 4. 2022 / Vol. 26, № 4. 2022



<https://ipolytech.ru>

ISSN 2782-4004 (print) ISSN 2782-6341 (online)

iPolytech Journal

Том 26, № 4. 2022 / Vol. 26, № 4. 2022



НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Издательство

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Иркутский национальный исследовательский технический университет»

Периодичность издания – 4 раза в год

Учредитель:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Иркутский национальный исследовательский технический университет»

Подписной индекс в ООО «Урал-Пресс» - 41476

Адрес ООО «Урал-Пресс»:

620026, Свердловская область, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, д. 130

Адрес учредителя, издателя:

664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Адрес редакции:

664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
e-mail: pgp@istu.edu

ISSN 2782-4004 (print) ISSN 2782-6341 (online)

iPolytech Journal

Tom 26, № 4. 2022 / Vol. 26, № 4. 2022

SCIENTIFIC JOURNAL

Publishers

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education
“Irkutsk National Research Technical University”

Frequency of publication – 4 times a year

Founder:

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education
“Irkutsk National Research Technical University”

The subscription code in Ural-Press LLC: 41476

The postal address of Ural-Press LLC:

130 Mamin-Sibiryak st.,
Yekaterinburg, 620026, Russia

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



Редакционная коллегия

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

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

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

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

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

БАЖИН В.Ю., д.т.н., заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов и производств Санкт-Петербургского горного университета (г. Санкт - Петербург, Россия)

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

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

БОРОВИКОВ Ю.С., д.т.н., ректор Новгородского государственного университета имени Ярослава Мудрого (г. Великий Новгород, Россия)

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

ИЛЮШИН П.В., д.т.н., главный научный сотрудник ФГБУН "Институт энергетических исследований Российской академии наук", Руководитель Центра интеллектуальных электроэнергетических систем и распределенной энергетики

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)

ЛИХИ Пол, профессор кафедры ветроэнергетики, Университетский колледж Корка, исследователь, Центр морских, климатических и энергетических исследований Ирландского научного фонда MAREI (г. Корк, Ирландия)

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

МАРЧУКИ И.В., д.ф.-м. н., профессор РАН, декан Механико- математического факультета Новосибирского государственного университета (г. Новосибирск, Россия)

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

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

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

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

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

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

РАШИДИ Мохаммад Мехди, доктор, профессор Университета Тунцзи (Шанхай, Китай)

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)

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

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

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

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

Editorial board

- Denis N. SIDOROV**, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Advanced Professor, Professor of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher, Melentiev Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)
- Mikhail V. KORNIakov**, Dr. Sci. (Eng.), Rector, Irkutsk National Research Technical University, chairman of the editorial board (Irkutsk, Russia)
- Semen A. ZAIDES**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Head of the Department of Machine Building Technologies and Materials, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)
- Nina V. NEMCHINOVA**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Head of the Department of Metallurgy of Nonferrous Metals, Irkutsk National Research Technical University, Deputy Editor-in-Chief (Irkutsk, Russia)
- Konstantin V. SUSLOV**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Irkutsk National Research Technical University, Deputy editor-in-chief in Power Engineering (Irkutsk, Russia)
- Vladimir Yu. BAZHIN**, Dr. Sci. (Eng.), Dean of the Mineral Resources Processing Faculty, Saint Petersburg Mining University (Saint Petersburg, Russia)
- Valery Yu. BLUMENSTEIN**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Kuzbass State Technical University (Kemerovo, Russia)
- Aleksander I. BOLDYREV**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia)
- Yury S. BOROVNIKOV**, Dr. Sci. (Eng.), Rector, Novgorod State University n.a. Yaroslav-the-Wise (Veliky Novgorod, Russia)
- Josef GAVLIK**, Advanced Professor, Department of Production Technology and Automation, Krakow University of Technology (Krakow, Poland)
- PAVEL V. ILYUSHIN**, Doctor of Sciences (Engineering), Chief Researcher, Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Head of the Center for Intelligent Electric Power Systems and Distributed Energy
- Evgeniy I. KARPENKO**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Head of the Department of the Laboratory of Plasma Energy Processes and Technologies, Institute of Physical Materials Science, SB RAS (Ulan-Ude, Russia)
- Aleksander M. KLER**, Dr. Sci. (Eng.), Chief researcher, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)
- Irina N. KOLOSOK**, Dr. Sci. (Eng.), Leading researcher, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)
- Andrey V. KRYUKOV**, Dr. Sci. (Eng.), Academician of the Russian Academy of Transport, Corresponding member of the Academy of Sciences, Higher School of the Russian Federation and the Russian Academy of Engineering, Honored Power Engineer of the Republic of Buryatia, Advanced Professor, Department of Transport Electric Power Industry, Irkutsk State Railway University (Irkutsk, Russia)
- Viktor G. KURBATSKY**, Dr. Sci. (Eng.), Leading researcher, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)
- Paul LEAHY**, Professor at University College Cork (Department of Wind Power); Funded Investigator in the Science Foundation Ireland MAREI Centre for Marine, Climate and Energy research (Cork, Ireland)
- Sergey V. MAMYACHENKOV**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Head of the Department of Nonferrous Metallurgy, Ural Federal University n.a. the First President of Russia B.N. Yeltsin (Yekaterinburg, Russia)
- Igor V. MARCHUK**, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Director of the Mechanics and Mathematics Department, Novosibirsk State University (Russia)
- Mikhail M. MATLIN**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Head of the Department of Machine Parts and Hoisting-and-Transport Devices, Volgograd State Technical University (Volgograd, Russia)
- Vsevolod A. MYMRIN**, Dr. Sci. (Geology), Professor, Federal University of Parana (Curitiba, Brazil)
- Nikolay N. NOVITSKY**, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)
- Pyotr M. OGAR**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Bratsk State University (Bratsk, Russia)
- Andrey V. PAZDERIN**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Automated Electric Systems, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (Ekaterinburg, Russia)
- Vasily I. PANTELEEV**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Head of the Department of Electrical Systems, Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia)
- Mohammad Mehdi RASHIDI**, Professor Tongji University, (China)
- Sergey M. SENDEROV**, Dr. Sci. (Eng.), Deputy Director, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)
- Valery A. STENNIKOV**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Director, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)
- Zbigniew A. STYCZYNSKI**, Professor, Otto-von-Guericke University (Magdeburg, Germany)
- Liu FANG**, Professor, Central Southern University (Changsha, Hunan Province, China)
- Mikhail L. KHEIFETS**, Dr. Sci. (Eng.), Director, Institute of Applied Physics, National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)
- Aleksander G. FISHOV**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Novosibirsk State Technical University (Novosibirsk, Russia)
- Berholt SCHOLTES**, Director, Institute of Metal Science, University of Kassel (Kassel, Germany)



Содержание

576

Машиностроение

- Зайдес С. А., Нгуен Хыу Хай.** Интенсификация напряженного состояния в очаге деформации при локальном воздействии деформирующего инструмента..... 580
- Матлин М. М., Казанкин В. А., Казанкина Е. Н.** Диагностика прочности деталей машин, нагруженных сдвигающими нагрузками..... 593
- Хамханова Д. Н., Хадыков М. Т., Мосоров В. И., Бахрунов К. К.** Оценивание неопределенности измерения при испытаниях на растяжение высокопрочных болтов..... 601

Энергетика

- Баряхтенко Е. А., Майоров Г. С.** Влияние распределенной генерации энергии на процесс энергоснабжения потребителей в интегрированной энергетической системе..... 612
- Донской И. Г.** Стационарное уравнение теплового взрыва в среде с распределенной энергией активации: численное решение и приближения..... 626
- Илюшин П. В.** Обеспечение надежного электроснабжения электроприемников потребителей от собственной распределенной генерации: проблемные вопросы и способы их решения..... 640
- Павлов Н. В., Такайшвили Л. Н., Иванова А. Е.** Уголь в топливно-энергетическом балансе Республики Саха (Якутия)..... 657

Металлургия

- Алкацев В. М., Рутковский А. Л., Макоева А. К.** Исследование процесса обжига цинковых концентратов в кипящем слое методом математического моделирования..... 669
- Васильев Р. Е., Бодуэн А. Я., Васильева А. А.** Гидрометаллургические технологии переработки мышьяковистого сырья..... 677
- Лобанов В. Г., Хабибулина Р. Э., Колмачихина О. Б., Маковская О. Ю.** Выбор выщелачивающей системы для извлечения золота из руды месторождения «Быньговская»..... 688
- Петровский А. А., Немчинова Н. В., Тютрин А. А., Корепина Н. А.** Использование кека выщелачивания от переработки огнеупорной футеровки демонтированных электролизеров в производстве цемента..... 697

Краткие сообщения

- Яковлева А. А., Садловский С. В., Вострикова Н. И., Халбаев В. В.** Особенности латексных покрытий для защиты стали от коррозии..... 709

Content 577**Mechanical engineering**

Zaides S. A., Nguyen Huu Hai. Intensification of stress state at deformation site under local action of a deformation tool.....	580
Matlin M. M., Kazankin V. A., Kazankina E. N. Shear strength diagnostics of machine parts.....	593
Khamkhanova D. N., Khadykov M. T., Mosorov V. I., Bakhrunov K. K. Evaluation of the measurement uncertainty during the tensile tests of high-strength bolts.....	601

Power engineering

Barakhtenko E. A., Mayorov G. S. Impact of distributed energy generation on energy supply to consumers in an integrated energy system.....	612
Donskoy I. G. Steady-state equation of thermal explosion in a distributed activation energy medium: numerical solution and approximations.....	626
Ilyushin P. V. Reliable power supply to power consuming units via isolated distributed generation: problematic issues and approaches to their solution.....	640
Pavlov N. V., Takaishvili L. N., Ivanova A. E. Coal in energy balance of the Republic of Sakha (Yakutia).....	657

Metallurgy

Alkatsev V. M., Rutkovsky A. L., Makoeva A. K. Mathematical modeling of zinc concentrate roasting in a fluidized bed.....	669
Vasiliev R. E., Boduen A. Ya., Vasilieva A. A. Hydrometallurgical technologies of processing arsenic raw materials.....	677
Lobanov V. G., Khabibulina R. E., Kolmachikhina O. B., Makovskaia O. Yu. Selection of a leaching system for the extraction of gold from the ore of the Byn'govskoye deposit.....	688
Petrovskiy A. A., Nemchinova N. V., Tyutrin A. A., Korepina N. A. Use of leaching cake from refractory lining of dismantled electrolyzers in cement production.....	697

Brief communication

Yakovleva A. A., Sadlovsky S. V., Vostrikova N. I., Khalbaev V. V. Characteristics of latex coatings for steel protection against corrosion.....	709
---	-----



Уважаемые читатели!

Предлагаем вашему вниманию выпуск научного журнала «iPolytech Journal».

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 Министерства науки и высшего образования РФ.

«iPolytech Journal» 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.

«iPolytech Journal» реферируется и рецензируется.

Приглашаем вас к активному творческому сотрудничеству по научным направлениям:

- Машиностроение
- Энергетика
- Металлургия

Редколлегия

Dear Readers!

We would like to bring to your attention the issue of the scientific journal "iPolytech Journal".

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.

"iPolytech Journal" 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 "iPolytech Journal" is abstracted and reviewed.

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

- Mechanical Engineering
- Power Engineering
- Metallurgy

Editorial Board



Научная статья

УДК 621.787.4

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-580-592>

Интенсификация напряженного состояния в очаге деформации при локальном воздействии деформирующего инструмента

Семен Азикович Зайдес^{1✉}, Хай Нгуен Хыу²^{1,2}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia¹zsahaus@mail.ru, orcid.org/0000-0001-9416-7749²nquan6799@gmail.com, orcid.org/0000-0001-7909-385X

Резюме. Целью данной работы является разработка новой схемы отделочно-упрочняющей обработки за счет изменения кинематики деформирующего инструмента с двухрадиусной формой профиля рабочей поверхности и определение напряженно-деформированного состояния в очаге упругопластической деформации и остаточных напряжений в упрочненной зоне поверхностного слоя. Для достижения поставленной цели использовано программное обеспечение для 3D-проектирования SOLIDWORKS 2018 и метод конечных элементов на основе компьютерной программы ANSYS Workbench 19.1 для построения математической модели локального нагружения. Определены временные и остаточные напряжения, деформированное состояние в зоне нагружения, глубина пластического слоя и максимальная величина относительной пластической деформации при разных схемах нагружения рабочим инструментом. В работе установлено, что при реверсивном вращении двухрадиусного ролика значения временных напряжений более чем на 15% выше по сравнению со значением временных напряжений при статическом упрочнении, а остаточные напряжения – больше на 5,7%. При реверсивном вращении двухрадиусного ролика значение максимальной интенсивности деформации выше в 2,11 раза по сравнению со значением максимальной интенсивности деформации при статическом упрочнении. Интенсивность максимальных остаточных напряжений при реверсивном вращении двухрадиусного ролика возникает не на поверхности образца, а в некоторой глубине, которая в 3 раза превышает величину внедрения двухрадиусного ролика. Полученные результаты компьютерного моделирования и численные расчеты свидетельствуют о том, что наибольшее влияние на интенсивность напряженного состояния в очаге деформации оказывает схема реверсивного вращения двухрадиусного торoidalного ролика, а наименьшее – схема статического упрочнения однорадиусным роликом. Результаты исследования дают основание полагать, что предложенный технологический процесс поверхностного пластического деформирования на основе реверсивного вращения рабочего инструмента даст возможность снизить величину радиального натяга при сохранении высокого качества поверхностного слоя деталей машин.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, кинематика инструмента, остаточное напряжение, конечно-элементное моделирование, двухрадиусный ролик, процесс нагружения

Для цитирования: Зайдес С. А., Нгуен Хыу Хай. Интенсификация напряженного состояния в очаге деформации при локальном воздействии деформирующего инструмента // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 4. С. 580–592. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-580-592>.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Intensification of stress state at deformation site under local action of a deformation tool

Semen A. Zaides^{1✉}, Hai Nguyen Huu²^{1,2}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia¹zsahaus@mail.ru, orcid.org/0000-0001-9416-7749²nquan6799@gmail.com, orcid.org/0000-0001-7909-385X

Abstract. This paper discusses the development of a new procedure for finishing and hardening treatment by changing the kinematics of a deformation tool having a double-radius shape of the profile of the working surface, along with the determination of the stress-strain state in the site of elastic-plastic deformation and residual stresses in the hardened zone of the surface layer. The SOLIDWORKS 2018 software for 3D design and the ANSYS Work-bench 19.1 software using the finite element method were used to build a mathematical model of local loading. The temporary and residual stresses, the strain state in the loading zone, the depth of the plastic layer and the maximum value of the relative plastic deformation under various loading procedures of the working tool were determined. It was established that, at the reversible rotation of a double-radius roller, the values of temporary stresses are over 15% higher compared to those during static hardening, while the residual stresses are 5.7% higher. With the reversible rotation of the double-radius roller, the value of the maximum strain intensity becomes 2.11 times higher than that during static hardening. The intensity of the maximum residual stresses during the reverse rotation of the double-radius roller occurs at a depth 3 times greater than the indentation of the double-radius roller, rather than on the surface of the sample. The results of computer modeling and numerical calculations indicate that the procedure of reversible rotation of a toroidal double-radius roller has the greatest influence on the intensity of the stress state in the deformation site, while the procedure of static hardening by a single-radius roller has the least impact. The obtained results suggest that the proposed technological process of surface plastic deformation based on the reversible rotation of the working tool will allow the radial tension to be reduced while maintaining the high quality of the surface layer of machine parts.

Keywords: stress-strain state, tool kinematics, residual stress, finite element modeling, double radius roller, loading

For citation: Zaides S. A., Nguyen Huu Hai. Intensification of stress state at deformation site under local action of a deformation tool. *iPolytech Journal*. 2022;26(4):580-592. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-580-592>.

ВВЕДЕНИЕ

Детали машин, к которым предъявляют повышенные эксплуатационные требования, обычно подвергаются отделочно-упрочняющей обработке. В металлообрабатывающей промышленности все шире применяется безрежущий способ механической обработки, основанный на принципе пластической деформации поверхности металла в холодном состоянии – способ поверхностного пластического деформирования (ППД), имеющий целый ряд преимуществ перед способом обработки резанием. С помощью режущей обработки нельзя достичь таких показателей качества, как повышение твердости и износостойкости поверхностного слоя, повышенного предела текучести и особенно предела усталостной прочности материала и ряд других эксплуатационных свойств деталей машин³ [1–4]. Эти и другие эксплуатационные свойства деталей можно получить, используя отделочно-упрочняющую обработку поверхностным пластическим деформированием, обеспечивающим в итоге высокую экономическую эффективность за счет повышения долговечности машиностроительных конструкций.

Детали типа валов и осей малой жесткости являются наиболее часто используемыми

деталью в машиностроении. Такие детали работают в условиях высоких скоростей относительного перемещения и больших давлений, вызывающих усталостные разрушения деталей, контактные повреждения и схватывание металла. Малая изгибная жесткость стержневых деталей типа валов и осей сказывается отрицательно не только при эксплуатации техники, но и при механической обработке. Центробежные силы, возникающие при вращении заготовки, и радиальные силы в зоне контакта деформирующего инструмента вызывают ее искривление, которое не позволяет не только сохранить ее геометрию, но и получить стабильные механические свойства по длине детали. Повысить качество обработки можно за счет снижения частоты вращения заготовки или уменьшения величины натяга рабочего инструмента, но эти действия отрицательным образом сказываются на производительности механического процесса обработки.

Для решения указанных технологических проблем предлагается подход, основанный на усилении напряженного состояния в зоне контакта рабочего инструмента с поверхностью детали. Временные напряжения, формирующиеся в очаге деформации, оказывают непосредственное влияние не только на фи-

³Одинцов Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник. М.: Изд-во «Машиностроение», 1987. 328 с.

зико-механические характеристики поверхностного слоя, но и на остаточные напряжения, а в конечном итоге и на эксплуатационные свойства деталей машин [5].

В связи с изложенным, целью данной работы является разработка новой схемы отделочно-упрочняющей обработки за счет изменения кинематики деформирующего инструмента с тороидальной формой профиля рабочей поверхности, определение напряженно-деформированного состояния в очаге упругопластической деформации и остаточных напряжений в упрочненной зоне поверхностного слоя.

АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ИЗВЕСТНЫХ СХЕМ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Наиболее эффективное деформационное упрочнение деталей может быть реализовано путем целенаправленных технологических воздействий на структуру металла для увеличения плотности дислокаций и создания дислокационной субструктуры, увеличивающей сопротивление сдвигу [6, 7].

Теория, подтвержденная практикой, показывает, что прочностные свойства металлов можно значительно повысить, если использовать основные принципы дислокационной теории упрочнения. Один из подходов решения этой задачи связан с деформационным искажением микроструктуры материала. В этой связи необходимо разработать такой технологический процесс отделочно-упрочняющей обработки, который бы усиливал деформационное искажение поверхностного слоя.

В практике поверхностного пластического деформирования известны и широко используются две схемы упрочняющей обработки: упрочнение по схеме качения рабочего инструмента и упрочнение по схеме скольжения [1]. К недостаткам, которые касаются поставленной задачи, традиционного способа обработки можно отнести повышение напряженного состояния в контактной зоне за счет уменьшения диаметра рабочего инструмента или за счет повышения величины натяга. Однако при обработке нежестких деталей эти приемы не решают проблемы.

В Иркутском национальном исследовательском техническом университете вопросы интенсификации напряженного состояния в очаге деформации решаются за счет применения более сложной кинематики рабочего инструмента [8]. В работе [9] предложено вращать тороидальный ролик не относительно традиционной оси вращения, а оси, перпендикулярной к ней, которая проходит через соединяющую два деформирующих ролика плоскость.

Предложенная кинематика движения деформирующего инструмента усиливает искажение зеренной структуры материала, способствует усилению дислокационных процессов и несколько повышает степень наклепа поверхностного слоя.

Однако недостатком указанной схемы обработки является снижение качества поверхности заготовки из-за проскальзывания ролика в тот момент, когда ось его вращения совпадает с направлением оси детали. Вращение рабочего инструмента в одном направлении производит слабое искажение зеренной структуры материала, что снижает степень и глубину упрочненного слоя.

В работе поставлена задача по повышению напряженного состояния в очаге деформации при локальном воздействии деформирующего инструмента, позволяющего получить повышенную степень упрочнения в поверхностных слоях деталей машин.

КИНЕМАТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ТОРОИДАЛЬНЫХ РОЛИКОВ

Рассмотрим несколько схем локального контакта рабочего инструмента с плоской поверхностью детали.

Рабочий ролик на рис. 1 а под действием силы P воздействует на поверхность детали статически. Ролики на схемах b и c (см. рис. 1) совершают реверсивное движение относительно вертикальной оси с амплитудой угла α ($-180^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$) и реверсивной частотой вращения $n_{\text{инстр}}$. Разница между последними двумя схемами заключается в том, что в схеме b деформирующий элемент представляет собой тороидальный ролик с профильным радиусом r , а в схеме c – двухрадиусный ролик с профильным радиусом $r/2$.

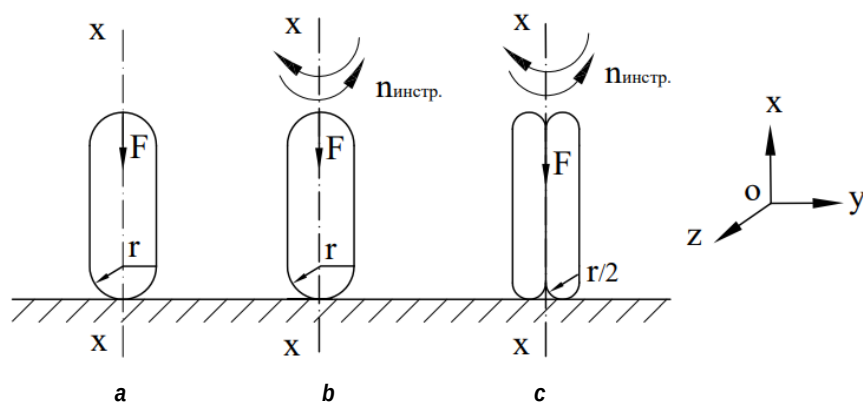


Рис. 1. Кинематические схемы воздействия тороидального ролика с обрабатываемой поверхностью:
 а – статическое упрочнение; б – ролик с реверсивным вращением относительно $x-x$ с амплитудой угла α ;
 с – двухрадиусный ролик с реверсивным вращением относительно $x-x$ с амплитудой угла α
 Fig. 1. Kinematic diagrams of the toroidal roller impacting the machined surface: a – static hardening;
 b – roller with reverse rotation relative to $x-x$ with α angle amplitude;
 c – two-radius roller with reverse rotation relative to $x-x$ with α angle amplitude

Новая кинематика рабочего инструмента со специальной формой деформирующего элемента, выполненного в виде двух деформирующих роликов, на наш взгляд, должна более эффективно искажать структуру материала, а, следовательно, повышать напряженное состояние в поверхностном слое упрочненной детали [10].

которое представляет собой метод получения данных о процессах, происходящих в моделируемой системе. При этом системы координат, время и его деление, способ построения сетевых моделей и их параметры являются основными факторами для получения более надежных характеристик моделируемой системы [12].

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ НАГРУЖЕНИЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Для определения напряжений и деформаций в зоне рабочего контакта, остаточных напряжений при обработке ППД широко используют метод конечных элементов, который является эффективным инструментом для решения задач во многих областях механики. В настоящее время существует большое количество компьютерных программ для конечно-элементного анализа, средних них широко и эффективно используется программное обеспечение ANSYS⁴ [11], которое и было использовано в данной работе.

Так как деформирующий инструмент, являющийся тороидальным роликом, совершает сложные кинематические движения, было применено динамическое моделирование,

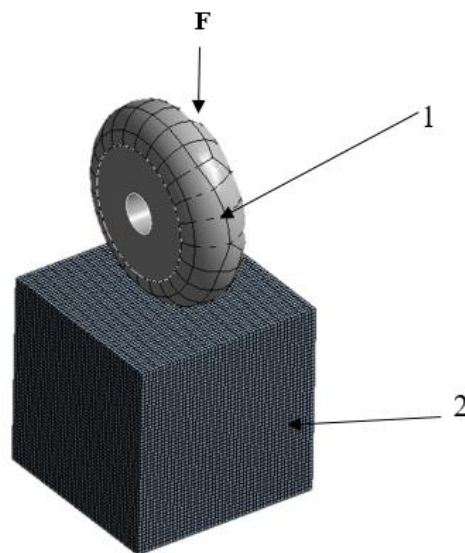


Рис. 2. Конечно-элементная модель при нагружении образца тороидальным роликом
 (1 – жесткий ролик; 2 – образец)
 Fig. 2. Finite element model under sample loading by a toroidal roller (1 – hard roller; 2 – sample)

⁴Баков К. А. ANSYS: справочник пользователя. М.: ДМК Пресс, 2005. 640 с.

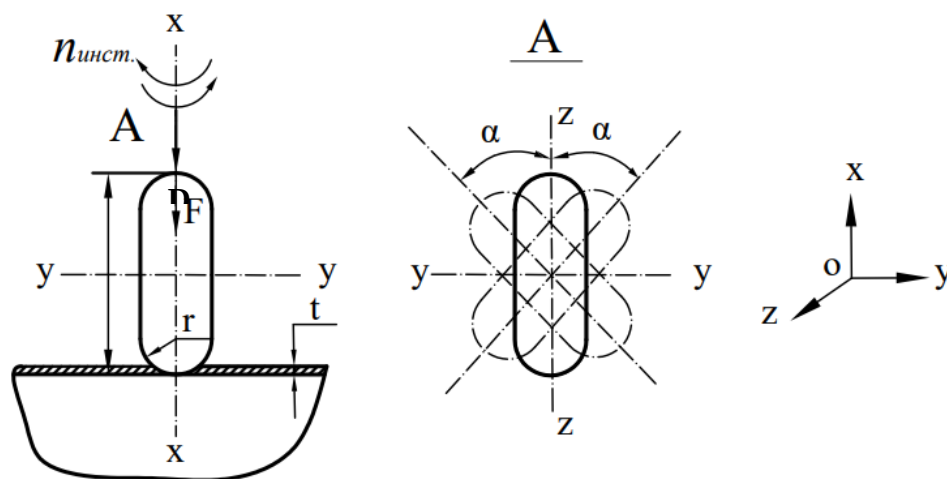


Рис. 3. Схема реверсивного вращения рабочего инструмента
Fig. 3. Diagram of working tool reverse rotation

Для проведения расчетов по определению напряжено-деформированного состояния процессов нагружения приняты следующие параметры и режимы обработки: тип индентора – ролик, абсолютно жесткое тело диаметром $D = 30$ мм с приведенным радиусом $r = 5$ мм; величина натяга $t = 0,1$ мм; частота реверсивного вращения рабочего инструмента $n = 300$ дв. ход/мин⁻¹; коэффициент трения $f = 0,1$; амплитуда угла реверса $\alpha = 15^\circ$.

Характеристики заготовки: в качестве заготовки был использован кубический образец с размерами ребра 30 мм; материал – сталь

45 – упругопластический, упрочняющийся; модуль упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$; предел текучести $\sigma_T = 360$ МПа, модуль упрочнения $E_T = 1,45 \cdot 10^3$ МПа.

Для оценки напряженного состояния в разных точках образца с учетом главных компонент тензора напряжений была определена интенсивность временных и остаточных напряжений по осям O_z , O_x , O_y . Интенсивность остаточных напряжений по Мизесу σ_i^{ocm} вычисляется как⁵ [13–15]

$$\sqrt{\frac{1}{2} \cdot \left[(\sigma_z^{ocm} - \sigma_x^{ocm})^2 + (\sigma_x^{ocm} - \sigma_y^{ocm})^2 + (\sigma_y^{ocm} - \sigma_z^{ocm})^2 \right]} = \sigma_i^{ocm}, \quad (1)$$

где σ_x^{ocm} , σ_y^{ocm} , σ_z^{ocm} – компоненты остаточных напряжений, действующих по осям O_x , O_y , O_z . По аналогичной формуле определяется интенсивность временных напряжений ($\sigma_i^{вр}$).

РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для оценки напряженного состояния материалов обычно используют два параметра: временное и остаточное напряжения. Временные напряжения возникают в очаге де-

формации при действии внешних сил, а остаточные напряжения остаются в деталях после завершения обработки [16]. Остаточные напряжения оказывают большое влияние на усталостную прочность, коррозионную стойкость деталей и другие свойства изделий, которые необходимы при эксплуатации деталей [17–19].

Примеры распределения интенсивности остаточных напряжений в поперечном сечении образца при разных схемах нагружения представлены на рис. 4.

⁵Бруйка В. А., Фокин В. Г., Кураева Я. В. Инженерный анализ в ANSYS Workbench: учеб. пособ. Самара: Изд-во Самар. гос. техн. ун-та, 2013. 109 с.

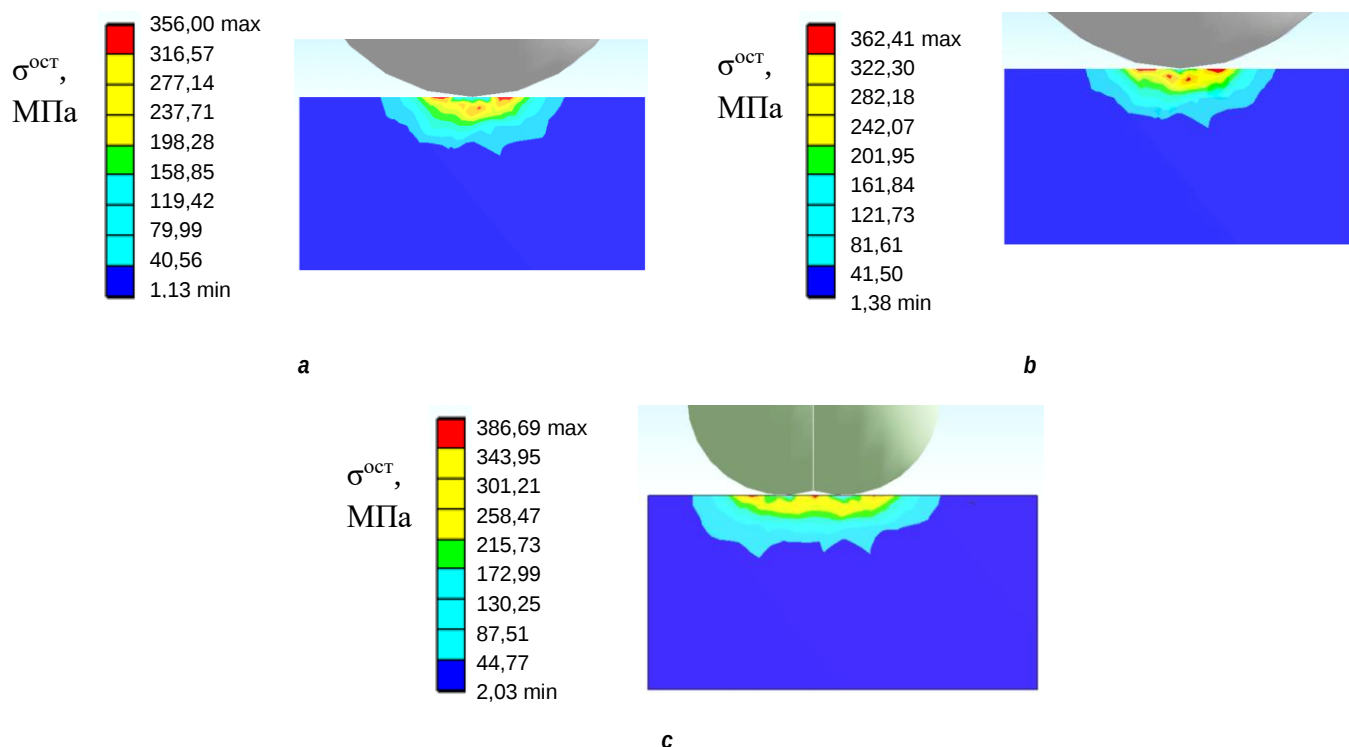


Рис. 4. Распределение полей интенсивности остаточных напряжений в поперечном сечении образца при разных схемах нагружения (см. рис. 1)
Fig. 4. Distribution of residual stress intensity fields in the sample cross section under different loading schemes (see fig. 1)

Анализ изополюс напряжений в зоне рабочего контакта показывает, что при использовании реверсивного вращения тороидального двухрадиусного ролика (см. рис. 1 с) возникает наибольшая интенсивность максимальных остаточных напряжений, а при статическом – наименьшая интенсивность максимальных остаточных напряжений (см. рис. 1 а). Установлено, что интенсивность

остаточных напряжений сжатия возрастает за счет применения более сложной кинематики деформирующего инструмента с двухрадиусной формой профиля рабочей поверхности.

Интенсивность максимальных временных и остаточных напряжений в зависимости от принятых схем нагружения представлена на рис. 5.

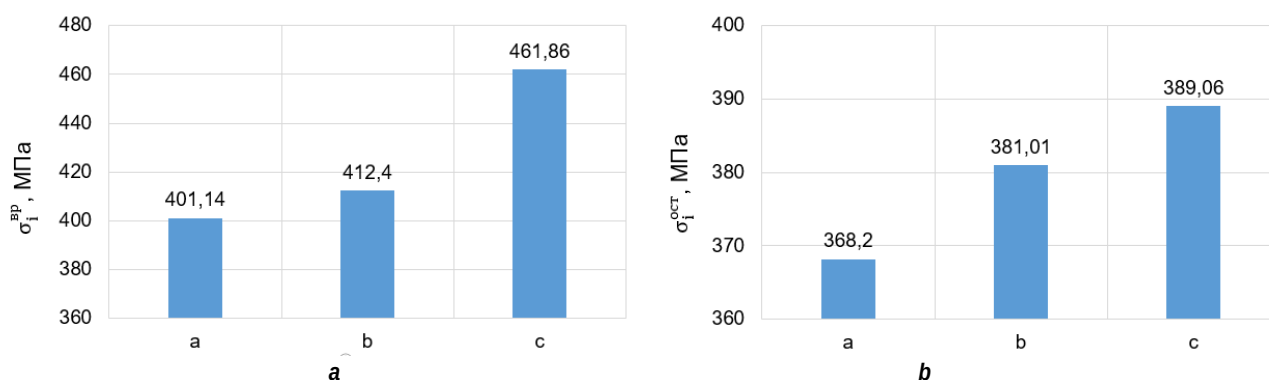


Рис. 5. Зависимость интенсивности максимальных временных (а) и остаточных (б) напряжений $\sigma_i^{вп}$, $\sigma_i^{ост}$ от кинематики тороидального ролика (см. рис. 1)

Fig. 5. Dependence of the intensity of maximum temporary (a) and residual (b) stresses $\sigma_i^{вп}$, $\sigma_i^{ост}$ on toroidal roller kinematics (see fig. 1)

Как видно из рис. 5, новая кинематика деформирующего инструмента с двухрадиусной формой профиля рабочей поверхности оказывает существенное влияние на повышение интенсивности максимальных временных и остаточных напряжений. Напряженное состояние в поверхностном слое возрастает в следующей последовательности: статическое воздействие однорадиусного ролика, однорадиусный ролик с реверсивным вращением, двухрадиусный ролик с реверсивным вращением (см. рис. 1). В работе установлено, что при реверсивном вращении двухрадиусного ролика значения временных напряжений больше на 15%, а остаточных напряжений больше на 5,7% по сравнению со значением временных напряжений при статическом воздействии однорадиусного ролика.

Значения компонент максимальных временных напряжений в зоне деформации при разных схемах нагружения представлены в таблице.

Изменение во времени интенсивности и компонент тензора временных напряжений σ_i^{BP} , σ_y^{BP} , σ_x^{BP} , σ_z^{BP} при разных схемах нагружения представлено на рис. 6.

Анализ компонент тензора временных напряжений в зоне рабочего контакта (см. рис. 6) показывает, что при реверсивном вращении рабочего инструмента кривая пластического деформирования имеет пульсирующий характер, а при статическом воздействии рабочего инструмента эти зависимости представляют собой плавные кривые. Реверсивное вращение двухрадиусного ролика (см. рис. 1 с) характеризуется более пульсирующей кривой интенсивности напряжений. Это объясняется тем, что пластические отпечат-

ки на поверхности детали от воздействия тороидального ролика имеют форму эллипса, который, поворачиваясь циклически, изменяет направление главных осей.

При реверсивном вращении тороидального ролика происходит искажение кристаллической структуры материала за счет сдвига зерен в разных направлениях, что способствует росту дислокаций и повышению прочности поверхностного слоя. В результате применения новой кинематики деформирующего инструмента с двухрадиусной формой деформирующей зоны происходит искажение и дробление зеренной структуры материала поверхностного слоя за счет сложных процессов пластического деформирования с накоплением линейных дефектов в виде дислокаций.

Интенсивность максимальных временных и остаточных напряжений по глубине образца представлена на рис. 7.

Из рис. 7 видно, что интенсивность максимальных остаточных напряжений при реверсивном вращении двухрадиусного ролика возникает не на поверхности образца, а в некоторой глубине, что согласуется с результатами работы [20]. Для принятых режимов деформационного воздействия эта глубина в 3 раза превышает величину внедрения двухрадиусного ролика. Такой характер изменения напряжений, на наш взгляд, оказывает положительное влияние на дислокационные процессы, которые развиваются внутри поверхностного слоя, что способствует вовлечению в деформационный процесс большего объема материала.

На рис. 8 показано распределение компонент временных и остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя (см. рис. 1 с).

Значения компонент максимальных временных напряжений в зоне деформации при разных схемах нагружения тороидального ролика
Values of the components of maximum temporary stresses in the deformation zone under different loading schemes of the toroidal roller

Схема нагружения (см. рис. 1)	σ_y^{BP}	σ_x^{BP}	σ_z^{BP}
а	-946,86	-1264,6	-903,99
б	-1054,1	-1327,6	-1053,2
в	-1069,4	-1360,2	-1060,25

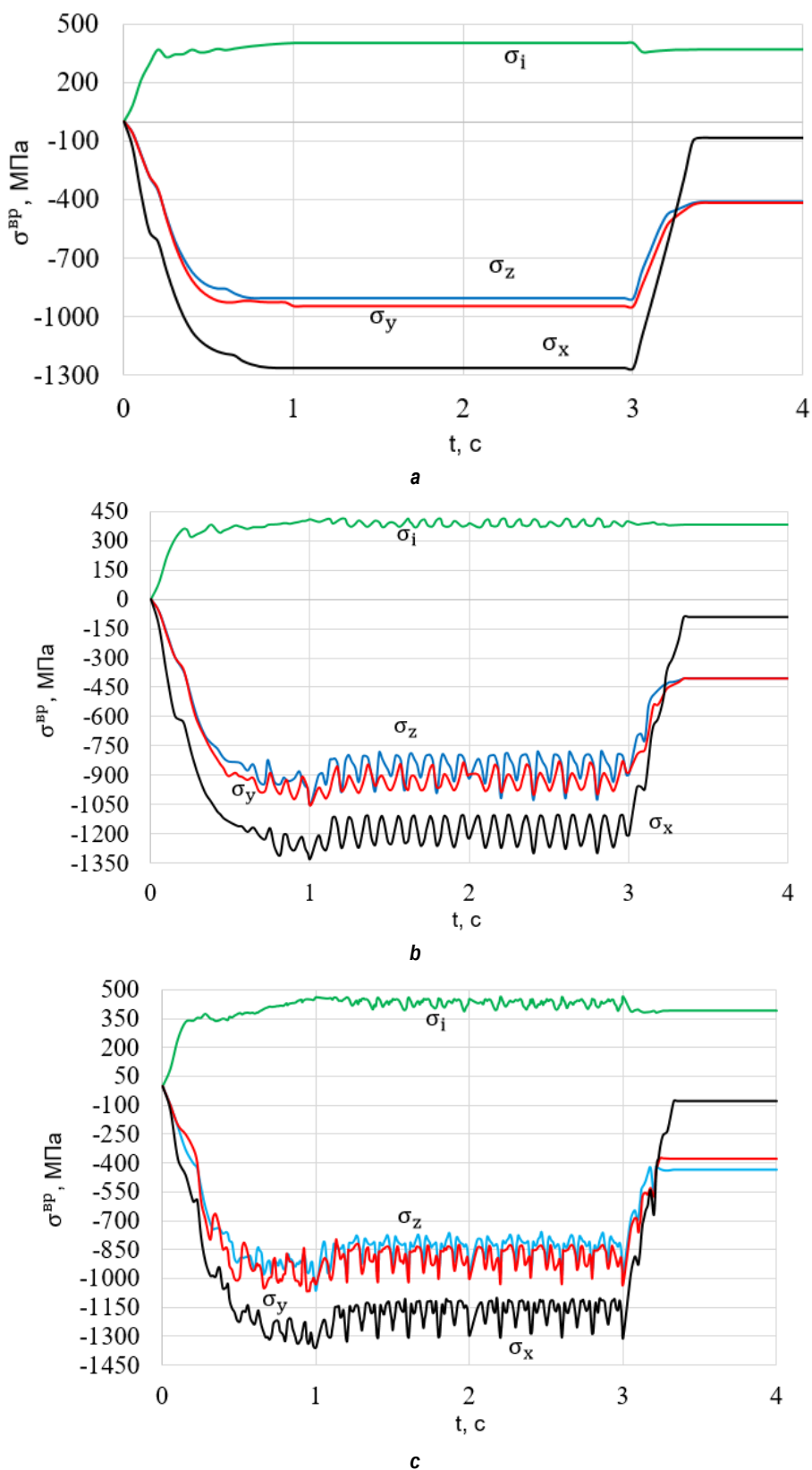


Рис. 6. Изменение во времени интенсивности и компонент тензора временных напряжений

$\sigma_i^{вр}, \sigma_y^{вр}, \sigma_x^{вр}, \sigma_z^{вр}$ при разных схемах нагружения (см. рис. 1)

Fig. 6. Time variation of intensity and components of the tensor of time stresses

$\sigma_i^{вр}, \sigma_y^{вр}, \sigma_x^{вр}, \sigma_z^{вр}$ for different loading schemes (see fig. 1)

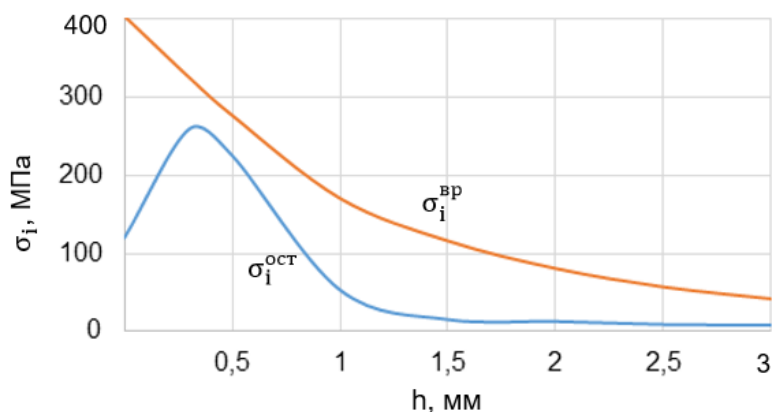


Рис. 7. Распределение интенсивности максимальных временных и остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя (h) при реверсивном воздействии двухрадиусного ролика (см. рис. 1 с)
Fig. 7. Surface layer depth distribution of maximum temporary and residual stress intensity (h) under two-radius roller reverse action (see fig. 1 c)

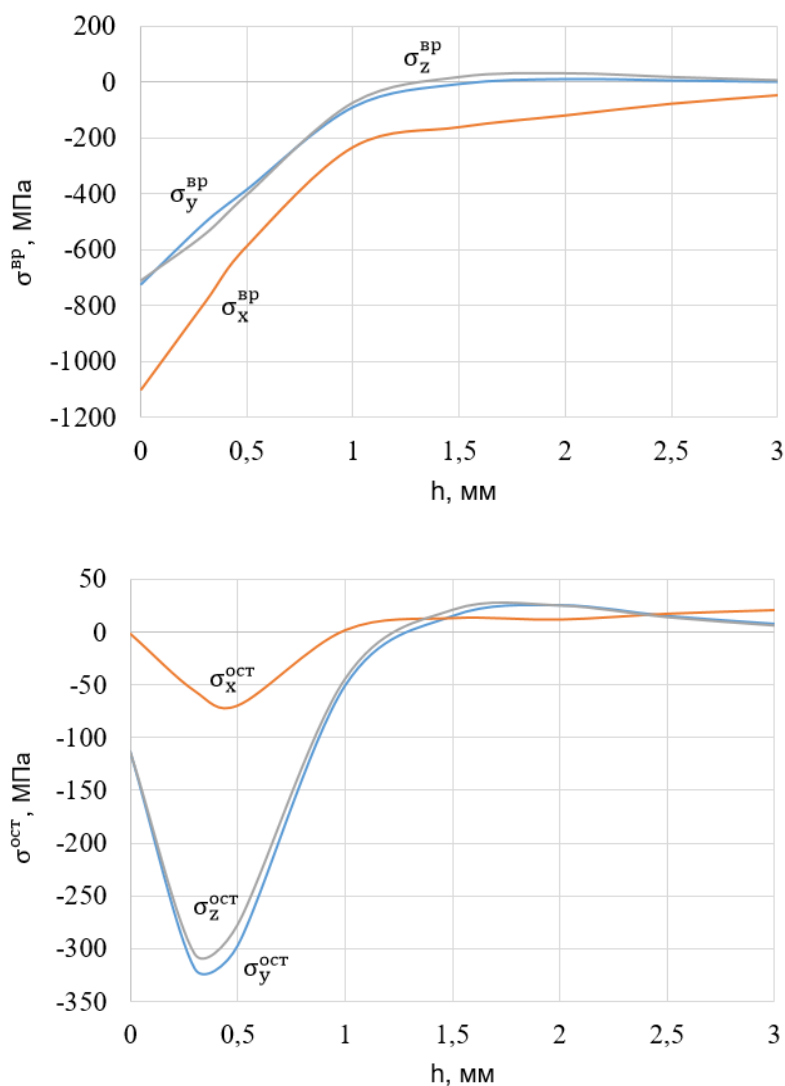


Рис. 8. Распределение компонент тензора временных и остаточных напряжений $\sigma_y^{\text{ост}}$, $\sigma_x^{\text{ост}}$, $\sigma_z^{\text{ост}}$ по глубине образца при нагружении двухрадиусным роликом (см. рис. 1 с)

Fig. 8. Sample depth distribution of the tensor components of temporary and residual stresses $\sigma_y^{\text{ост}}$, $\sigma_x^{\text{ост}}$, $\sigma_z^{\text{ост}}$ when loaded by a two-radius roller (see fig. 1 c)

Анализируя полученные на основе конечно-элементного моделирования результаты, можно отметить, что при реверсивном вращении двухрадиусного ролика в поверхностном слое возникают сжимающие временные и остаточные напряжения, а в центральной зоне формируются остаточные напряжения растяжения. Сжимающие максимальные остаточные напряжения $\sigma_y^{\text{ост}}$ и $\sigma_z^{\text{ост}}$ формируются на поверхности деталей, а остаточные напряжения $\sigma_x^{\text{ост}}$ на поверхности детали равны нулю. Зона действия максимальных остаточных напряжений сжатия почти в 5 раз превышает величину натяга при воздействии двухрадиусного ролика.

Максимальные временные напряжения сжатия $\sigma_x^{\text{вр}}$ при реверсивном вращении двухрадиусного ролика немного меньше по сравнению с полученными при действии статического (без вращения) ролика напряжениями. Это подтверждает идею об использовании реверсивного движения инструмента для интенсификации дислокационных процессов. При статическом действии ролика в основном происходит смятие (сжатие) кристаллов, поэтому сжимающие напряжения достаточно высокие. А при реверсивном движении инструмента зерна «раздвигаются» и для перемещения рабочего инструмента требуются меньшие усилия (напряжения).

ДЕФОРМАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПРИ НАГРУЖЕНИИ ТОРОИДАЛЬНЫМ РОЛИКОМ

При нагружении поверхностного слоя образца тороидальным роликом формируется пластический слой, который изменяет строение и физико-механические свойства металла [21].

На рис. 9 показано распределение максимальной интенсивности деформации по глубине поверхностного слоя при разных условиях нагружения (см. рис. 1).

Из рис. 9 видно, что при разных условиях нагружения (см. рис. 1) максимальная интенсивность деформации достигает своего значения в зоне контакта и убывает в направлении к центру образца; при реверсивном вращении двухрадиусного ролика имеет наибольшую величину, а наименьшую – при статическом упрочнении роликом. Следует отметить, что при реверсивном вращении двухрадиусного ролика значение максимальной интенсивности деформации выше в 2,11 раза по сравнению со значением максимальной интенсивности деформации при статическом упрочнении.

Полученные результаты исследования доказывают эффективность предлагаемого способа отделочно-упрочняющей обработки на основе поверхностного пластического

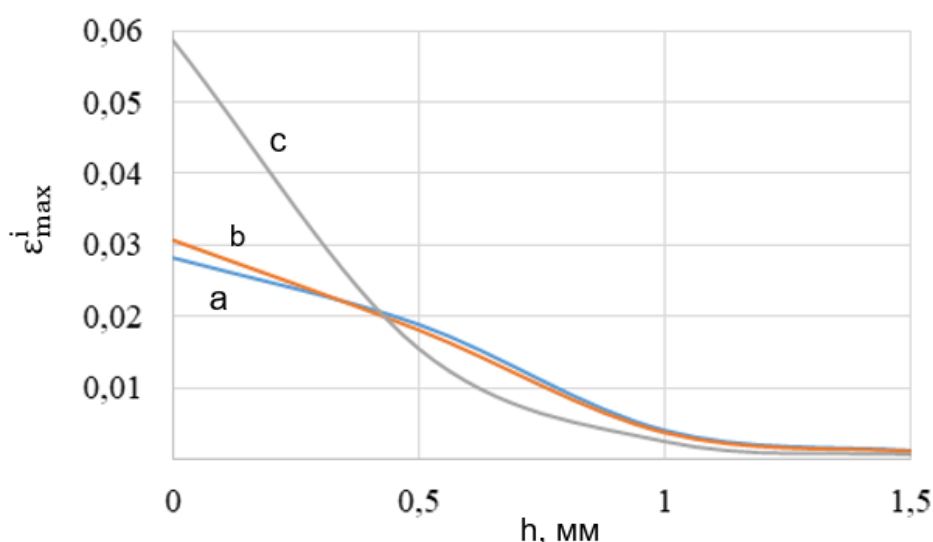


Рис. 9. Распределение максимальной интенсивности деформации по глубине поверхностного слоя при разных схемах нагружения (см. рис. 1)

Fig. 9. Surface layer depth distribution of the maximum strain intensity under different loading schemes (see fig. 1)

деформирования с использованием реверсивного движения тороидального рабочего инструмента. С использованием конечно-элементного моделирования установлено, что предлагаемая геометрия рабочего инструмента обеспечивает не только повышение напряжений в зоне деформации, но и повышение остаточных напряжений в упрочненном слое.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для усиления напряженного состояния в очаге упругопластической деформации при поверхностном пластическом деформировании предложен новый способ упрочнения, основанный на реверсивном круговом движении тороидального ролика. Для оценки эффективности предлагаемого процесса разработана динамическая конечно-

элементная модель процесса, позволяющая определить временные напряжения в очаге деформации и остаточные напряжения в упрочненных деталях.

2. Рассмотрено влияние разной формы рабочего инструмента и его кинематика на величину временных и остаточных напряжений. В работе установлено, что при реверсивном вращении двухрадиусного ролика значения временных напряжений более чем на 15% выше по сравнению со значениями временных напряжений при статическом упрочнении, а остаточные напряжения больше на 5,7%. При реверсивном вращении двухрадиусного ролика значение максимальной интенсивности деформации выше в 2,11 раза по сравнению со значением максимальной интенсивности деформации при статическом упрочнении.

Список источников

1. Отений Я. Н. Технологическое обеспечение качества деталей машин поверхностным пластическим деформированием: монография. Волгоград: Изд-во «Политехник», 2005. 224 с.
2. Смелянский В. М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Изд-во «Машиностроение», 2002. 300 с.
3. Асланян И. Р. Повышение ресурса подшипников скольжения поверхностным пластическим деформированием. Гл. 7. Обработка деталей поверхностным пластическим деформированием: монография. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2014. С. 348–383.
4. Зайдес С. А., Емельянов В. Н., Попов М. Е. Деформирующая обработка валов. Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2013. 452 с.
5. Зайдес С. А., Забродин В. А., Мураткин В. Г. Поверхностное пластическое деформирование. Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2002. 304 с.
6. Приходько В. М., Петрова Л. Г., Чудина О. В. Металлофизические основы разработки упрочняющих технологий. М.: Изд-во «Машиностроение», 2003. 384 с.
7. Полухин П. И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. М.: Изд-во «Металлургия», 1983. 352 с.
8. Зайдес С. А. Новые способы поверхностного пластического деформирования при изготовлении деталей машин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2018. Т. 16. № 3. С. 129–139. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-129-139>.
9. Пат. № 2666205, Российская Федерация, С1, В24В 39/04. Способ поверхностного пластического деформирования / Е. А. Гусева, С. А. Зайдес, Нго Као Кыонг; заявитель и правообладатель Иркутский национальный исследовательский технический университет. Заявл. 19.12.2017; опубл. 06.09.2018.
10. Пат. № 2758713, Российская Федерация, С1, В24В 39/04. Способ поверхностного пластического деформирования наружных поверхностей тел вращения / С. А. Зайдес, Хыу Хай Нгуен; заявитель и правообладатель Иркутский национальный исследовательский технический университет. Заявл. 14.01.2021; опубл. 01.11.2021.
11. Дальский А. М., Базаров Б. М., Васильев А. С. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве. М.: Изд-во МАИ, 2003. 364 с.
12. Букатый А. С. Повышение точности изготовления ответственных деталей двигателей средствами статического и динамического моделирования // Известия Самарского научного центра Российской Академии наук. 2014. Т. 16. № 6. С. 374–377.
13. Блюменштейн В. Ю., Смелянский В. М. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин. М.: Изд-во «Машиностроение», 2007. 399 с.
14. Peng Jian, Zhou Peishuang, Wang Ying, Dai Qiao, Knowles D., Mostafavi M. Stress triaxiality and lode angle parameter characterization of flat metal specimen with inclined notch // Metals. 2021. Vol. 11. Iss. 10. P. 1627. <https://doi.org/10.3390/met11101627>.
15. Bi Yueqi, Yuan Xiaoming, Lv Jishuang, Bashir Rehmat, Wang Shuai, Xue He. Effect of yield strength distribution welded joint on crack propagation path and crack mechanical tip field // Materials. 2021. Vol. 14. Iss. 17. P. 4947. <https://doi.org/10.3390/ma14174947>.
16. Liu Haijun, Yang Tao, Han Jiang, Tian Xiaoqing, Chen Shan, Lu Lei. Obtainment of residual stress distribution from surface deformation under continuity constraints for

thinned silicon wafers // *Machines*. 2021. Vol. 9. Iss. 11. P. 284. <https://doi.org/10.3390/machines9110284>.
17. Зайдес С. А. Остаточные напряжения и качество калиброванного металла. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1992. 198 с.
18. Baumann M., Selbmann R., Milbrandt M., Kräusel V., Bergmann M. Adjusting the residual stress state in wire drawing products via in-process modification of tool geometries // *Materials*. 2021. Vol. 14. Iss. 9. P. 2157. <https://doi.org/10.3390/ma14092157>.
19. Безъязычный В. Ф., Голованов Д. С. Расчетное определение остаточных напряжений в поверхностном слое обрабатываемой детали при дорновании // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2012. № 10. С. 15–20.

20. Зайдес С. А., Нго К. К. Поверхностное деформирование в стесненных условиях: монография. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2018. 234 с.
21. Xu Yilun, Balint D. S., Dini D. On the origin of plastic deformation and surface evolution in nano-fretting: a discrete dislocation plasticity analysis // *Materials*. 2021. Vol. 14. Iss. 21. P. 6511. <https://doi.org/10.3390/ma14216511>.
22. Пат. № 2530600, Российская Федерация, С1, В24В 39/04. Ролик обкатной двухрадиусный / В. Ю. Блюменштейн, А. А. Кречетов, М. С. Махалов, О. А. Останин; заявитель и правообладатель Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева. № 2013135794/02. Заявл. 30.07.2013; опубл. 10.10.2014. Бюл. № 28 (II ч.). 7 с.

References

- Otenij Ya. N. *Technological assurance of machine part quality by surface plastic deformation*. Volgograd: Politekhnik; 2005, 224 p. (In Russ.).
- Smelyansky V. M. *Mechanics of part hardening by surface plastic deformation*. Moscow: Mashinostroenie; 2002, 300 p. (In Russ.).
- Aslanyan I. R. *Improving sliding bearing life by surface plastic deformation*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2014, p. 348-383. (In Russ.).
- Zaides S. A., Emel'yanov V. N., Popov M. E. *Deforming processing of shafts*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2013, 452 p. (In Russ.).
- Zaides S. A., Zabrodin V. A., Muratkin V. G. *Surface plastic deformation*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2002, 304 p. (In Russ.).
- Prihod'ko V. M., Petrova L. G., Chudina O. V. *Metal physical basis for hardening technology development*. Moscow: Mashinostroenie; 2003, 384 p. (In Russ.).
- Polukhin P. I. *Resistance to plastic deformation of metals and alloys*. Moscow: Metallurgiya; 1983, 352 p. (In Russ.).
- Zaydes S. A. New surface plastic deformation techniques in the manufacture of machine parts. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G. I. Nosova = Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2018;16(3):129-139. (In Russ.). <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-129-139>.
- Guseva E. A., Zaides S. A., Kyong Ngo Kao. *The method of surface plastic deformation*. Patent RF, no. 2666205; 2018. (In Russ.).
- Zaides S. A., Nguen Hyu Haj. *The method of surface plastic deformation of the outer surfaces of solids of revolution*. Patent RF, no. 2758713; 2021. (In Russ.).
- Dalsky A. M., Bazarov B. M., Vasiliev A. S. *Technological heredity in machine-building production*. Moscow: Moscow Aviation Institute; 2003, 364 p. (In Russ.).
- Bukatiy A. S. Improving the accuracy of manufacturing the engines critical parts by means of static and dynamic modeling. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2014;16(6):374-377. (In Russ.).
- Blumenstein V. Yu., Smelyansky V. M. *Mechanics of technological heredity at the stages of machine part processing and operation*. Moscow: Mashinostroenie; 2007, 399 p. (In Russ.).
- Peng Jian, Zhou Peishuang, Wang Ying, Dai Qiao, Knowles D., Mostafavi M. Stress triaxiality and lode angle parameter characterization of flat metal specimen with inclined notch. *Metals*. 2021;11(10):1627. <https://doi.org/10.3390/met11101627>.
- Bi Yueqi, Yuan Xiaoming, Lv Jishuang, Bashir Rehmat, Wang Shuai, Xue He. Effect of yield strength distribution welded joint on crack propagation path and crack mechanical tip field. *Materials*. 2021;14(17):4947. <https://doi.org/10.3390/ma14174947>.
- Liu Haijun, Yang Tao, Han Jiang, Tian Xiaoqing, Chen Shan, Lu Lei. Obtainment of residual stress distribution from surface deformation under continuity constraints for thinned silicon wafers. *Machines*. 2021;9(11):284. <https://doi.org/10.3390/machines9110284>.
- Zaides S. A. *Residual stresses and calibrated metal quality*. Irkutsk: Irkutsk State University; 1992, 198 p. (In Russ.).
- Baumann M., Selbmann R., Milbrandt M., Kräusel V., Bergmann M. Adjusting the residual stress state in wire drawing products via in-process modification of tool geometries. *Materials*. 2021;14(9):2157. <https://doi.org/10.3390/ma14092157>.
- Bezyazychnyi V. F., Golovanov D. S. Calculation of residual stresses of component surface layer when burnishing. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Strengthening Technologies and Coatings*. 2012;10:15-20. (In Russ.).
- Zaides S. A., Ngo K. K. *Surface deformation in constrained conditions*. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2018, 234 p. (In Russ.).
- Xu Yilun, Balint D. S., Dini D. On the origin of plastic deformation and surface evolution in nano-fretting: a discrete dislocation plasticity analysis. *Materials*. 2021;14(21):6511. <https://doi.org/10.3390/ma14216511>.
- Blyumenshtein V. Yu., Krechetov A. A., Makhalov M. S., Ostanin O. A. *Double radius roller*. Patent RF, no. 2530600; 2014. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Зайдес Семен Азикович,
доктор технических наук, профессор,
кафедра материаловедения, сварочных и
аддитивных технологий,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

Нгуен Хыу Хай,
аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

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 19.04.2022; одобрена после рецензирования 15.09.2022; принята к публикации 06.12.2022.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Semen A. Zaides,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Department of Materials Science, Welding
and Additive Technologies,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Hai Nguyen Huu,
Postgraduate Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the preparation of the 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 19.04.2022; approved after reviewing 15.09.2022; accepted for publication 06.12.2022.



Научная статья

УДК 620.17

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-593-600>

Диагностика прочности деталей машин, нагруженных сдвигающими нагрузками

Михаил Маркович Матлин^{1✉}, Владимир Андреевич Казанкин²,
Елена Николаевна Казанкина³

¹⁻³Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия

¹matlin@vstu.ru

²kazankin_vmr@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7188-4219>

³kazankina_elena@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9669-4315>

Резюме. Цель – разработка оперативного неразрушающего метода определения предела прочности на срез деталей из конструкционных углеродистых и легированных сталей. Для определения предела прочности при срезе использован метод индентирования контролируемых деталей. При этом предложена новая характеристика материала – модуль упрочнения при срезе. Экспериментальное исследование выполнено с помощью программно-технического комплекса для испытания металлов ИР 5143-200 и приспособления для испытания образцов на двойной срез. Были исследованы стали марок: сталь 10, сталь 20, сталь 35, сталь 45, сталь 20Х, сталь 40Х, сталь 25ХГТ, сталь 30ХГСА. В качестве характеристики прочностных свойств образцов использовали число пластической твердости, которая обладает рядом преимуществ перед другими числами твердости. Проведенные авторами исследования показали значительное расхождение между справочными значениями временного сопротивления при срезе и экспериментальными, полученными авторами, которое может достигать 20%. Получены зависимости для определения предела прочности на срез для образцов из конструкционных углеродистых и легированных сталей; показана их достаточная точность для инженерных расчетов как по экспериментальным данным авторов, так и при сравнении с литературными источниками. Погрешность определения предела прочности при срезе не превышает, как правило, $\pm 5\%$. В работе приведены некоторые виды предохранительных деталей, разрушающихся при воздействии срезающих нагрузок. Показано, что заниженные значения временного сопротивления, приводимые в справочниках, могут приводить к повышенным нереализуемым запасам прочности и, как следствие, увеличению металлоемкости соединений. Предложенный метод неразрушающего определения предела прочности материала на срез обладает достаточной для инженерной практики точностью и может быть использован в условиях изготовления, эксплуатации и ремонта различных деталей и узлов машин.

Ключевые слова: срез, модуль упрочнения при срезе, индентор, пластическая твердость, предел прочности при срезе

Финансирование: Работа выполнена в рамках конкурса МК-2021 (грант Президента России № МК-84.2021.4).

Для цитирования: Матлин М. М., Казанкин В. А., Казанкина Е. Н. Диагностика прочности деталей машин, нагруженных сдвигающими нагрузками // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 4. С. 593–600. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-593-600>.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Shear strength diagnostics of machine parts

Mikhail M. Matlin^{1✉}, Vladimir A. Kazankin², Elena N. Kazankina³

¹⁻³Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

¹matlin@vstu.ru

²kazankin_vmr@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7188-4219>

³kazankina_elena@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9669-4315>

Abstract. This study presents an effective non-destructive method for determining the ultimate shear strength of parts made of structural carbon and alloy steels. The shear strength was determined using the method of controlled part indentation. In addition, a new material characteristic – a shear hardening modulus – is proposed. The experimental study was carried out using an IR 5143-200 software and hardware complex for metal testing and a double-shear testing device. Steel samples of the following grades were examined: steel 10, 20, 35, 45, 20Kh, 40Kh, 25KhGT and 30KhGSA. The value of plastic hardness was used as a strength characteristic due to its advantages over other hardness values. The conducted experiments found a significant discrepancy (up to 20%) between the reference and experimental values of shear strength. Dependencies for determining the shear strength of structural carbon and alloy steel samples were obtained. The accuracy of these dependencies was determined to be sufficient for engineering calculations both according to the obtained experimental results and literature sources. The error associated with shear strength determination does not exceed $\pm 5\%$. In addition, the paper provides some types of safety parts that can be destroyed by shear loads. The underestimated reference values of the ultimate strength can lead to increased unrealizable safety margins and, as a result, an increase in the specific metal amount of joints. The proposed non-destructive method for shear strength determination exhibits the accuracy sufficient for engineering practice and can be used when manufacturing, operating and repairing various machine parts and units.

Keywords: shear, shear hardening modulus, indenter, plastic hardness, shear strength

Funding: The work was carried out within the framework of the MK-2021 competition (grant of the President of Russia No. MK-84.2021.4).

For citation: Matlin M. M., Kazankin V. A., Kazankina E. N. Shear strength diagnostics of machine parts. *iPolytech Journal*. 2022;26(4):593-600. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-593-600>.

ВВЕДЕНИЕ

В машинах и механизмах многие детали в процессе работы находятся под действием сдвигающих (срезающих) нагрузок (заклепки, болты, угловые сварные швы, шпонки, штифты и др.).

Прочность указанных деталей определяется прочностью материала на срез, в связи с этим важно иметь данные о пределе прочности при срезе. Известные эмпирические формулы, определяющие предел прочности на срез, обладают низкой точностью, а прямые испытания образцов достаточно трудоемки, поскольку предусматривают изготовление таких образцов, в том числе вырезаемых из готовых деталей. Это исключает 100% контроль деталей.

В справочнике В. И. Анурьева⁴ приведена эмпирическая зависимость для определения предела прочности материала при срезе:

$$\tau_B = K \cdot \sigma_B, \quad (1)$$

где σ_B – предел прочности материала на растяжение, МПа; K – экспериментальный коэффициент, значение которого выбирается из справочной таблицы в зависимости от диаметра срезаемой детали и вязкости ее материала (для сталей средней вязкости – $K = 0,68 \dots 0,80$, для сталей большей вязкости – $K = 0,75 \dots 0,81$). Таким образом, для использования указанной зависимости требуется

определить (экспериментально согласно ГОСТу или из справочных данных) предел прочности материала на растяжение и вязкость материала. Кроме того, широкий диапазон значений коэффициента K приводит к погрешности определения предела прочности при срезе, достигающей 18%.

Также следует отметить, что результаты экспериментальных исследований, выполненных авторами, показывают значительно более высокие значения временного сопротивления срезу, чем данные справочников⁴. Так, например, для стали 10 экспериментальное значение составило $\tau_B = 304$ МПа, при этом значение из справочника⁴ $\tau_B = 250$ МПа. Таким образом, в детали может быть заложен нереализуемый повышенный запас прочности, который лишь увеличивает металлоемкость детали.

Очевидно, что более достоверные результаты можно получить путем непосредственного проведения испытаний образцов на срез, например, согласно стандарту ОСТ 190148-74 «Металлы. Метод испытания на срез»⁵. Однако при этом потребуется изготовить соответствующие образцы, вырезав их из материала готовой детали, что, очевидно, приводит к частичному или полному разрушению исследуемой детали; метод невозможно использовать при необходимости стопроцентного контроля деталей, а также при малых размерах контролируемых деталей.

Более рациональными являются неразрушающие методы контроля. Среди неразрушающих видов контроля согласно ГОСТ-Р 56542-2015⁶ можно выделить акустический, виброакустический, вихретоковый, магнитный, радиационный, радиоволновой, тепловой, электрический и др. В качестве примера можно привести метод [1, 2] ультразвуковой спектроскопии сдвиговых волн для оценки напряжений в стальных деталях. Следует подчеркнуть, что названные методы оценивают объемные свойства материала. Для определения прочностных свойств материала в конкретном месте детали целесообразно использовать неразрушающие методы определения, основанные на методе индентирования. Среди различных методов неразрушающего контроля физико-механических свойств материала методы индентирования занимают одно из ведущих мест, поскольку зависят от целого комплекса механических свойств материала. Основа таких методов была заложена в работах Н. Н. Давиденкова, С. Е. Беляева, М. П. Марковца. Дальнейшее развитие эти методы в последние годы получили в работах отечественных и зарубежных исследователей [3–8] и многих других ученых.

Методы неразрушающего контроля прочностных свойств материалов путем вдавливания индентора применяются также на микро- и наноуровнях. Так, например, в работе [9] приведена методика автоматического внедрения шарика для измерения текучести материала. Результаты исследований включают в себя зависимости нагрузки от вдавливания, определение предела текучести и предела прочности при растяжении.

В работе [10] описаны исследования по определению взаимосвязи прочности с твердостью с помощью испытаний на микрорастяжения и наноиндентирования.

Следует отметить, что индентирование шариком используется не только в машиностроении, но и в других отраслях. Так,

например, в работе [11] описана методика определения прочности на сдвиг для мерзлых грунтов, основанная на внедрении сферического индентора.

В работе [12] приведено сравнение методов определения остаточных напряжений путем инструментального внедрения и дифракции рентгеновских лучей. Авторы делают вывод о том, что методика инструментального вдавливания измеряет остаточное напряжение в более глубоких участках поверхности материала, чем глубина проникновения индентора.

Эти методы позволяют определять механические свойства конкретной детали, а при необходимости обеспечить и 100% контроль деталей. Целью данного исследования является разработка оперативного неразрушающего метода определения предела прочности на срез материала деталей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для выявления взаимосвязей предела прочности при срезе с параметрами индентирования было выполнено экспериментальное исследование. Образцы изготавливались из углеродистых и легированных конструкционных сталей различного уровня прочности и пластичности. Свойства их материалов приведены в таблице.

Механические свойства испытанных материалов
 Mechanical properties of tested materials

Номер образца	Марка стали, пластическая твердость НД, МПа	Предел прочности при срезе (по ОСТ 1 90148-74 ⁵) $\tau_{B, срез}$, МПа
1	Сталь 10, 1487	304
2	Сталь 20, 1570	325
3	Сталь 35, 2158	468
4	Сталь 45, 2590	523
5	Сталь 20Х, 5297	840
6	Сталь 40Х, 1089	712
7	Сталь 25ХГТ, 5433	835
8	Сталь 30ХГСА, 3950	629

⁴Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя. В 3 т. 8-е изд., перераб. и доп. / под ред. И. Н. Жестковой. М.: Изд-во «Машиностроение», 2006. Т. 1. 928 с., Т. 2. 960 с.

⁵ОСТ 190148-74. Металлы. Метод испытания на срез. Введ. 01.07.1975.

⁶ГОСТ-Р 56542-2015. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. Введ. 01.06.2016.

⁷ГОСТ 18835-73. Металлы. Метод измерения пластической твердости. Введ. с 01.01.1974 до 01.01.1979.

В качестве характеристики прочностных свойств образцов использовали число пластической твердости НД (НД – единицы измерения твердости, определяемой дюрометром – Durometer Hardness) относительно ГОСТ 18835-73 «Металлы. Метод определения пластической твердости»⁷. Как известно [3], значительным преимуществом пластической твердости является независимость ее величины от условий испытания (контактной нагрузки и диаметра сферического индентора) и, таким образом, пластическая твердость является константой для данного материала. Также пластическая твердость НД позволяет создать единую шкалу твердости для широкого ряда материалов – от мягких до самых твердых. При этом для определения твердости в последнем случае (при твердости большей НД 4500 МПа) следует использовать индентор из твердого сплава с твердостью не меньше HV 12000 МПа.

При измерении пластической твердости в качестве индентора использовали стальной закаленный шарик диаметром 5 мм, а для сталей с твердостью большей, чем 4500 МПа – сферический индентор из карбида титана. Для измерения твердости непосредственно на цилиндрической поверхности детали использовали цилиндрический индентор [3]. Отметим, что использование цилиндрического индентора позволяет измерять твердость материала на поверхности цилиндрических образцов или готовых цилиндрических деталей, в том числе малого диаметра, избегая необходимости точного центрирования, возникающей при внедрении сферического индентора. Для измерения твердости использовали пресс Бринелля. Предел прочности при срезе $\tau_{B,ocm}$ определяли по стандарту ОСТ 190148-74⁵ на цилиндрических образцах диаметром 5 мм при их двойном срезе; нагружение проводили с помощью программно-технического комплекса для испытания металлов ИР 5143-200 (электроомеханическая машина универсального назначения для испытания образцов материалов и изделий (например, труб) на растяжение, сжатие и изгиб). Для оценки предела прочности при срезе была предложена новая характеристика материала – модуль упрочнения материала при срезе, МПа [13],

который может быть определен по следующей зависимости:

$$M_{cp} = \frac{F}{d^2 \left(0,19 \frac{d}{D \cdot \varepsilon_p}\right)^{\varepsilon_p}}, \quad (2)$$

где ε_p – предельная равномерная деформация при статическом растяжении образца из испытуемого материала (безразмерная величина); F – контактная нагрузка на сферический индентор, Н; d – диаметр остаточного отпечатка, мм; D – диаметр сферического индентора, мм.

Предельную равномерную деформацию испытуемого материала можно вычислить по формуле:

$$\varepsilon_p = \frac{245}{HД}, \quad (3)$$

которая обладает достаточной для практики точностью [3].

Экспериментально установлено, что предел прочности испытуемого материала при срезе можно описать следующей зависимостью:

$$\tau_B = V \cdot M_{cp} - W, \quad (4)$$

где V и W – коэффициенты предела прочности при срезе, зависящие от химического состава испытуемого материала.

В результате проведенного авторами экспериментального исследования установлено, что формулу (4) можно представить в виде (для углеродистых и легированных сталей, соответственно)

$$\tau_B = 0,315 \cdot M_{cp} - 70, \quad (5)$$

$$\tau_B = 0,305 \cdot M_{cp} - 135. \quad (6)$$

В результате сравнительного анализа значений, полученных описанным методом и по стандарту ОСТ 190148-74⁵, установлено, что погрешность при использовании формул (5) и (6), определяющих предел прочности при срезе, не превышает, как правило, $\pm 5\%$. Удовлетворительные результаты получены при сопоставлении описанного метода с экспе-

риментальными данными работы [14], а также со справочными данными работы⁴ при коэффициенте $K = 0,68$.

Дополнительно отметим, что в некоторых случаях, когда являются известными другие числа твердости, величину пластической твердости НД можно определить с помощью эмпирических формул, связывающих ее с другими числами твердости, и приведенных в работе [3].

Полученные результаты предназначены в первую очередь для проектирования срезных штифтов или шпонок, которые являются предохранительными устройствами при механической перегрузке, позволяющими сохранить более дорогие или труднозаменяемые детали. Отметим, что указанные срезные детали имеют низкую стоимость, просты в изготовлении, не требуют технического обслуживания и постоянно эксплуатируются в течение многих лет. Естественно, что после срабатывания они требуют замены. Очевидно, что их вводят в конструкцию механизма в тех редких случаях, когда возникает перегрузка и является по существу аварийной ситуацией.

Предохранительные элементы, разрушающиеся от среза и защищающие механизм от разрушения, очень широко используются в современной технике. Так, например, в работе [15] описано устройство, защищающее шнековый конвейер срезанной шпонкой при заклинивании механизма. В работе [16] предложена предохранительная муфта с разрушающимися элементами в виде листового материала. В работе [17] представлен амортизатор, содержащий как минимум два предохранительных штифта. В работе [18] дана приводная муфта аварийного разъединения, которая содержит разрывной замок с вилкой с предохранительным штифтом. Патент [19] содержит описание устройства для крепления и отделения всплывающего буя на подводной

лодке, которое содержит предохранительный штифт, разрушающийся при необходимости пиропатроном. Согласно [20], головной обтекатель ракеты также сбрасывается путем разрушения предохранительного штифта при срабатывании пиропатрона. Патент РФ № 2644200 описывает конструкцию срезанного при перегрузке предохранительного штифта-шпонки для соединения гребного винта с гребным валом, которая используется в лодочных моторах. Срезаемые предохранительные штифты применяются в сельскохозяйственной технике (патент РФ № 2046579), в устройстве для измельчения материалов (патент РФ № 2435664), в муфте предельного момента листопрямильной машины (патент РФ № 73706), в устройстве для герметичного перекрытия ствола нефтяной скважины (пат. РФ № 2092675), в приводе колеса обозрения (пат. РФ № 2236885), для защиты привода шнековых конвейеров (пат. РФ № 2451239) и многих других устройствах.

Необходимо подчеркнуть, что при расчете прочности на срез деталей, разрушение которых недопустимо (штифты, шпонки, болты, заклепки и др.), следует использовать допускаемые напряжения $[\tau_{ср}]$. Однако для расчета предохранительных деталей, разрушение которых предотвращает разрушение механизмов и машин, следует использовать значения предела прочности при срезе τ_b . В противном случае предохранительные детали не будут выполнять свою функцию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, описанный метод неразрушающего определения предела прочности материала на срез обладает достаточной для инженерной практики точностью и может быть использован в условиях изготовления, эксплуатации и ремонта деталей и узлов машин.

Список источников

1. Матлин Ю. А., Казанкина Е. Н., Казанин В. А. Обзор методов неразрушающего контроля физико-механических свойств материалов деталей трибопроводов // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования. 2020. № 13. С. 64–69.

2. Liu Diankun, He Jingbo, Li Zuohua, Teng Jun. Non-destructive evaluation of absolute stress in steel members using shear-wave spectroscopy // Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. 2018. Vol. 35. Iss. 2. P. 236–243. <https://doi.org/10.16356/j.1005-1120.2018.02.236>.

3. Матлин М. М., Мозгунова А. И., Казанкина Е. Н., Казанкин В. А. Методы неразрушающего контроля прочностных свойств деталей машин: монография. М.: Изд-во «Инновационное машиностроение», 2019. 247 с.
4. Матюнин В. М. Индентирование в диагностике механических свойств материалов. М.: ИД МЭИ, 2015. 288 с.
5. Ghosh A., Arreguin-Zavala J., Aydin H., Goldbaum D., Chromik R., Brochu M. Investigating cube-corner indentation hardness and strength relationship under quasi-static and dynamic testing regimes // *Materials Science and Engineering A*. 2016. Vol. 677. P. 534–539. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.08.067>.
6. Qing-ya Ma, Zhang Ya. Study of the relation between tensile strength and hardness for low-carbon steel based on least squares support vector machine // *Journal University China National Science Education*. 2016. Iss. 3. P. 258–278. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-3193.2016.03.010>.
7. Tiryakioğlu M. On the relationship between Vickers hardness and yield stress in Al-Zn-Mg-Cu Alloys // *Materials Science and Engineering: A*. 2015. Vol. 633. P. 17–19. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.02.073>.
8. Kyung Woo Lee, Jae Choi Min, Young Kim Ju, Il Kwon Dong, Ho Kim Kwang. Instrumented indentation technique: new nondestructive measurement technique for flow stress-strain and residual stress of metallic materials // *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*. 2005. Vol. 26. Iss. 5. P. 306–314.
9. Ammar H. R., Haggag F. M., Alaboodi A. S., Al-Mufadi F. A. Nondestructive measurements of flow properties of nanocrystalline Al-Cu-Ti alloy using Automated Ball Indentation (ABI) technique // *Materials Science and Engineering: A*. 2018. Vol. 729. P. 477–486. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.05.089>.
10. Kwak K., Mine Y., Morito S., Ohmura T., Takashima K. Correlation between strength and hardness for substructures of lath martensite in low- and medium-carbon steels // *Materials Science and Engineering: A*. 2022. Vol. 856. P. 144007. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.144007>.
11. Qingfei Yun, Chunlei Xie, Ze Zhang, Youqian Liu, Jun-song Fu, Qi Liu. The solution of the double-sphere model and experimental research of the long-term shear strength of frozen sand based on spherical template indenter test // *Journal of Glaciology and Geocryology*. 2022. Iss. 2. P. 485–494. <https://doi.org/10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0053>.
12. Okano S., Kanamaru D., Ihara R., Mochizuki M. On the distinction between instrumented indentation technique and X-ray diffraction method in nondestructive or semi-nondestructive surface stress measurement // *Journal of the Society of Materials Science*. 2016. Vol. 65. Iss. 4. P. 319–324. <https://doi.org/10.2472/jsms.65.319>.
13. Пат. № 2740634, Российская Федерация, МПК G01N3/40. Способ определения предела прочности при срезе / М. М. Матлин, В. А. Казанкин, Е. Н. Казанкина; заявитель и патентообладатель Волгоградский государственный технический университет. Заявл. 15.06.2020; опубл. 18.01.2021. Бюл. № 2.
14. Густов Ю. И., Воронина И. В., Аллаттуф Х. Л. Взаимосвязь напряжений среза и предела выносливости металлических материалов // *Вестник Московского государственного строительного университета*. 2013. № 4. С. 32–37. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2013.4.31-37>.
15. Пат. № 204286, Российская Федерация, F22B 35/18. Устройство автоматического контроля и управления твердотопливным котлом / И. А. Подшивалов, А. Г. Ту-мания; заявитель и патентообладатель И. А. Подшивалов. Заявл. 22.01.2021; опубл. 18.05.2021. Бюл. № 14.
16. Пат. № 173549, Российская Федерация, F16D 9/06. Предохранительная муфта с разрушающимися элементами / М. Н. Казанцев, И. А. Флегентов, С. Н. Зо-зуля; заявитель и патентообладатель ПАО «Транс-нефть». Заявл. 01.03.2017; опубл. 30.08.2017. Бюл. № 25.
17. Пат. № 192168, Российская Федерация, A62B 1/10. Амортизатор на срезаемых штифтах для средств защиты втягивающего типа / С. Е. Курьез, А. П. Тюрин, С. С. Гаврюшин; заявитель и патентообладатель ООО «Сейф ТЕК». Заявл. 26.04.2019; опубл. 05.09.2019. Бюл. № 25.
18. Пат. № 2779806, Российская Федерация, F16L 29/00. Приводная муфта аварийного разъединения / В. В. Вакулов; заявитель и патентообладатель В. В. Вакулов. Заявл. 22.12.2021; опубл. 13.09.2022. Бюл. № 26.
19. Пат. № 2214340, Российская Федерация, B63B 22/08. Устройство крепления и отделения всплывающего буя на подводном техническом средстве / А. Г. Дун, М. В. Савенков; заявитель и патентообладатель ФГУП «Малахит». Заявл. 17.12.2001; опубл. 20.10.2003. Бюл. № 29.
20. Пат. № 2492413, Российская Федерация, F42B 10/46. Сбрасываемый головной обтекатель летательного аппарата / Н. А. Васильев, В. А. Ефремов, В. И. Злобин, А. А. Федоров; заявитель и патентообладатель ОАО «Корпорация тактическое ракетное вооружение». Заявл. 05.03.2012; опубл. 10.09.2013. Бюл. № 25.

References

1. Matlin M. M., Kazankina E. N., Kazankin V. A. Review of methods for nondestructive testing of physical and mechanical properties of tribopipe part materials. *Mehanika i fizika procesov na poverhnosti i v kontakte tverdyh tel, detaley tekhnologicheskogo i energeticheskogo oborudovaniya*. 2020. No. 13, pp. 64–69. (In Russ.).
2. Liu Diankun, He Jingbo, Li Zuohua, Teng Jun. Non-destructive evaluation of absolute stress in steel members using shear-wave spectroscopy. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*. 2018;35(2):236-243. <https://doi.org/10.16356/j.1005-1120.2018.02.236>.
3. Matlin M. M., Mozgunova A. I., Kazankina E. N., Kazankin V. A. *Methods of non-destructive testing of strength properties of machine parts*. Moscow: Innovacionnoe mashinostroenie; 2019, 247 p. (In Russ.).

4. Matyunin V. M. *Indentation in material mechanical properties diagnostics*. Moscow: Moscow Power Engineering Institute; 2015, 288 p. (In Russ.).
51. Ghosh A., Arreguin-Zavala J., Aydin H., Goldbaum D., Chromik R., Brochu M. Investigating cube-corner indentation hardness and strength relationship under quasi-static and dynamic testing regimes. *Materials Science and Engineering: A*. 2016;677:534-539. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.08.067>.
6. Qing-ya Ma, Zhang Ya. Study of the relation between tensile strength and hardness for low-carbon steel based on least squares support vector machine. *Journal University China National Science Education*. 2016;3:258-278. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-3193.2016.03.010>.
7. Tiryakioğlu M. On the relationship between Vickers hardness and yield stress in Al-Zn-Mg-Cu alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2015;633:17-19. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.02.073>.
8. Kyung Woo Lee, Jae Choi Min, Young Kim Ju, Il Kwon Dong, Ho Kim Kwang. Instrumented indentation technique: new nondestructive measurement technique for flow stress-strain and residual stress of metallic materials. *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*. 2005;26(5):306-314.
9. Ammar H. R., Haggag F. M., Alaboodi A. S., Al-Mufadi F. A. Nondestructive measurements of flow properties of nanocrystalline Al-Cu-Ti alloy using Automated Ball Indentation (ABI) technique. *Materials Science and Engineering: A*. 2018;729:477-486. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.05.089>.
10. Kwak K., Mine Y., Morito S., Ohmura T., Takashima K. Correlation between strength and hardness for substructures of lath martensite in low- and medium-carbon steels. *Materials Science and Engineering: A*. 2022;856:144007. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.144007>.
11. Qingfei Yun, Chunlei Xie, Ze Zhang, Youqian Liu, Jun-song Fu, Qi Liu. The solution of the double-sphere model and experimental research of the long-term shear strength of frozen sand based on spherical template indenter test. *Journal of Glaciology and Geocryology*. 2022;2:485-494. <https://doi.org/10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0053>.
12. Okano S., Kanamaru D., Ihara R., Mochizuki M. On the distinction between instrumented indentation technique and X-ray diffraction method in nondestructive or semi-non-destructive surface stress measurement. *Journal of the Society of Materials Science*. 2016;65(4):319-324. <https://doi.org/10.2472/jsms.65.319>.
13. Matlin M. M., Kazankin V. A., Kazankina E. N. *Determination method of the shear strength limit*. Patent RF, no. 2740634; 2021. (In Russ.).
14. Gustov Yu.I., Voronina I.V., Lattouf A.L. Relationship between shear stress and fatigue strength of metallic materials. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta. = Vestnik Monthly Journal on Construction and Architecture*. 2013;4:32-37. (In Russ.). <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2013.4.31-37>.
15. Podshivalov I. A., Tumanyan A. G. *Device for automatic control and monitoring of a solid fuel boiler*. Patent RF, no. 204286; 2021. (In Russ.).
16. Kazantsev M. N., Flegentov I. A., Zozulya S. N. *Overload release clutch with destructive elements*. Patent RF, no. 173549; 2017. (In Russ.).
17. Curiosity S. E., Tyurin A. P., Gavryushin S. S. *Shock-absorber on sheared pins for retractable type protection devices*. Patent RF, no. 192168; 2019. (In Russ.).
18. Vakulov V. V. *Emergency disconnect drive clutch*. Patent RF, no. 2779806; 2022. (In Russ.).
19. Dong A. G., Savenkov M. V. *A device for connecting and disconnecting a pop-up buoy on an underwater engineering facility*. Patent RF, no. 2214340; 2003. (In Russ.).
20. Vasiliev N. A., Efremov V. A., Zlobin V. I., Fedorov A. A. *Resettable fairing tip of an aircraft*. Patent RF, no. 2492413; 2013. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Матлин Михаил Маркович,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Динамика и прочность машин»,
Волгоградский государственный технический
университет,
400005, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28, Россия

Казанкин Владимир Андреевич,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Динамика и прочность машин»,
Волгоградский государственный технический
университет,
400005, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mikhail M. Matlin,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Machine Dynamics and
Strength,
Volgograd State Technical University,
28 Lenin Ave., Volgograd 400005, Russia

Vladimir A. Kazankin,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Machine
Dynamics and Strength,
Volgograd State Technical University,
28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russia

Казанкина Елена Николаевна,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Динамика и прочность машин»,
Волгоградский государственный технический
университет,
400005, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28, Россия

Elena N. Kazankina,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Machine
Dynamics and Strength,
Volgograd State Technical University,
28 Lenin Ave., Volgograd 400005, Russia

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 01.12.2022; одобрена после рецензирования 06.12.2022; принята к публикации 21.12.2022.

Information about the article

The article was submitted 01.12.2022; approved after reviewing 06.12.2022; accepted for publication 21.12.2022.



Научная статья

УДК 658.56:621

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-601-611>

Оценивание неопределенности измерения при испытаниях на растяжение высокопрочных болтов

Дарима Нимбуевна Хамханова^{1✉}, Михаил Томович Хадыков²,
Владимир Иванович Мосоров³, Константин Константинович Бахрунов⁴

¹⁻⁴Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, г. Улан-Удэ,
Россия

¹darima-1956@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2432-212X>

²khadykovmihail@yandex.ru

³vlmosorov@yandex.ru

⁴bkk1975@mail.ru

Резюме. Цель – разработка методики оценивания неопределенности измерения при испытаниях на растяжение металлов и сплавов. Для разработки данной методики проводились исследования источников неопределенности. Объектом исследований явились высокопрочные болты из стали марки 40Х «Селект», которые подвергали испытаниям на растяжение по методике согласно ГОСТ 1497-85 на универсальной разрывной машине УММ-100. Выявлены основные источники неопределенности измерения относительного удлинения и относительного сужения: повторные измерения относительного удлинения; погрешности измерения штангенциркулем конечной длины, нанесения начальной длины расчетного участка и силоизмерительного устройства машины. Также к ним относятся ошибка отсчета оператора, повторные измерения относительного сужения, погрешность измерения микрометром диаметра образца до начала и после испытаний. Показано, что при проведении измерений при температуре окружающей среды, отличной от значения нормальной температуры $((20 \pm 5)^\circ\text{C})$, появляется дополнительный источник неопределенности – отклонение температуры. Приписаны предполагаемые законы распределения входных величин. Показано, что при испытаниях на растяжение имеются две составляющие неопределенности, оцениваемые по типам А и В. Составлена математическая модель измерения относительного удлинения и относительного сужения при испытаниях на растяжение. Оценены стандартные неопределенности входных величин исходя из предполагаемых законов их распределения. Выявлено наличие корреляционной связи между конечной длиной расчетного участка, диаметром образца после испытания и прилагаемым усилием. Получены выражения для расчета коэффициентов чувствительности, характеризующие изменение выходной величины (относительного удлинения) от изменения входных величин. Оценены суммарная и расширенная неопределенности измерения. На основании проделанной работы прописана процедура оценивания неопределенности измерения при испытаниях высокопрочных болтов на растяжение. Показано, что оценивание неопределенности измерений при испытании продукции является достаточно трудоемкой работой, предлагается разработка методик оценивания неопределенности измерения при испытаниях и внесение их в нормативные документы на методы контроля.

Ключевые слова: измерение, испытание, метод, неопределенность измерения, стандартная неопределенность, растяжение

Для цитирования: Хамханова Д. Н., Хадыков М. Т., Мосоров В. И., Бахрунов К. К. Оценивание неопределенности измерения при испытаниях на растяжение высокопрочных болтов // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 4. С. 601–611. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-601-611>.

Evaluation of the measurement uncertainty during the tensile tests of high-strength bolts

Darima N. Khamkhanova^{1✉}, Mikhail T. Khadykov²,
Vladimir I. Mosorov³, Konstantin K. Bakhrunov⁴

¹⁻⁴East Siberia State University of Technology and Management, Ulan-Ude, Russia

¹darima-1956@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2432-212X>

²khadykovmihail@yandex.ru

³vlmosorov@yandex.ru

⁴bkk1975@mail.ru

Abstract. A developed methodology for evaluating measurement uncertainty during the tensile tests of metals and alloys is presented. In this connection, the various sources of uncertainty are considered. The object of studies included high-strength bolts made of 40Kh “Selekt” steel, which were subjected to tensile tests according to the GOST 1497-85 State Standard using a UMM-100 universal tensile testing machine. The basic sources of uncertainty in the measurement of relative elongation and reduction were shown to include repeated measurements of relative elongation; errors of measuring the finite length by a vernier calliper and marking the initial length of a calculated section, as well as the measurement error of the tensile testing machine. These also include operator reading error, repeated relative reduction measurements, as well as the error of measuring the sample diameter by a micrometer before and after the tests. During the measurements, temperature deviation was demonstrated to constitute an additional source of uncertainty when the ambient temperature is different from the standard temperature value $((20 \pm 5)^\circ\text{C})$. Assumptions underlying laws describing the distribution of input values were assigned. Tensile tests are shown to be characterised by two components of uncertainty evaluated as types A and B. A mathematical model constructed for measuring relative elongation and relative reduction during tensile tests is presented. The standard uncertainties of input values are evaluated based on the assumed laws of their distribution. A correlation between the final length of the calculated section, the diameter of the sample following the test, and the applied force, is revealed. Expressions for the calculation of sensitivity coefficients, which characterize variations in the output value (relative elongation) depending on variations of input values, were obtained. The total and extended measurement uncertainties were evaluated. Based on the performed studies, a procedure for evaluating measurement uncertainty when carrying out tensile tests of high-strength bolts was described. The evaluation of measurement uncertainty during the product testing was shown to be a rather labour-consuming work. In this regard, the authors propose the development of procedures for evaluating the measurement uncertainty during the tests with their inclusion into regulatory documents for control methods.

Keywords: measurement, test, method, measurement uncertainty, standard uncertainty, tensile stress

For citation: Khamkhanova D. N., Khadykov M. T., Mosorov V. I., Bakhrunov K. K. Evaluation of the measurement uncertainty during the tensile tests of high-strength bolts. *iPolytech Journal*. 2022;26(4):601-611. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-601-611>.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день выражение результатов измерений, контроля и испытаний в неопределенностях измерения стало нормой на международном уровне. Между тем у нас в стране не во всех нормативных документах на методы контроля и испытаний во многих областях промышленности, в том числе и в машиностроении, прописаны методики оценивания неопределенности измерения, хотя действует ГОСТ 34100.3-2017⁵. Обзор литературных источников, посвященных сравнительному

анализу, исследованиям и испытаниям высокопрочных болтов показывает, что не во всех публикациях указываются значения неопределенности механических характеристик болтов [1–12]. В основном работы по оцениванию неопределенности измерений, контроля и испытаний высокопрочных болтов проводятся за рубежом [13–20]. Большинство отечественных работ по оцениванию неопределенности измерения посвящено оцениванию неопределенности измерений при поверке и калибровке средств измерений [21–24].

⁵ГОСТ 34100.3-2017. Неопределенность измерения. Ч. 3. Руководство по выражению неопределенности измерения (ISO/IEC Guide 98-3:2008, ЮТ). М.: Изд-во «Стандартинформ», 2018.

Оценивание неопределенности измерения представляет собой довольно трудоемкий процесс, требует исследования и выявления всех источников неопределенности, составления уравнения измерения, выявления корреляционной связи между входными величинами, выявления законов распределения входных величин, вычисления стандартной, суммарной и расширенной неопределенности, что представляет трудности на практике. Поэтому возникает актуальная задача разработки методик оценивания неопределенности измерения для конкретных методов контроля.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью исследования является разработка методики оценивания неопределенности измерения при испытаниях на растяжение (определение относительного удлинения и относительного сужения) высокопрочных болтов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом контроля являлись высокопрочные болты М22х80 из конструкционной легированной стали марки 40 Х «Селект». Испытания проводились по ГОСТ 1497⁶ на универсальной разрывной машине УММ-100.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Описание порядка проведения испытания на определение относительного удлинения и оценивание неопределенности измерения. Температура окружающей среды – 23⁰С. Измерение диагоналей проводилось с помощью штангенциркуля типа ШЦТ-I-150 0,05. Нанесение рисок осуществлялось с использованием металлической линейки до 300 мм, с допускаемым отклонением $\pm 0,10$ мм. Результаты испытаний приведены в табл. 1.

При испытаниях на растяжение (относительного удлинения) имеем две составляющие неопределенности, определяемые по типу А (составляющие, оцениваемые путем обработки результатов многократных

измерений), т.к. проводятся многократные измерения относительного удлинения и по типу В (составляющие, оцениваемые другими способами: по характеристикам, взятым из паспорта на прибор, методикам выполнения измерений, из предыдущих экспериментов, из справочников и т.д.).

Для составления математической модели измерений исследованы источники неопределенности при испытаниях на растяжение, где относительное удлинение δ_p определяют по формуле: $\delta_p = \frac{(l_{кр} - l_{нр}) \cdot 100}{l_{нр}}$, где $l_{кр}$ – конечная длина расчетного участка, мм; $l_{нр}$ – начальная длина расчетного участка равная 50 мм.

Следовательно, основными источниками неопределенности являются повторные измерения относительного удлинения (δ_i), погрешность измерения штангенциркулем конечной длины ($l_{кр}$), погрешность нанесения начальной длины расчетного участка ($l_{нр}$).

Кроме того, источниками неопределенности являются погрешность силоизмерительного устройства машины (ΔP), ошибка отсчета оператора начальной и конечной длин расчетного участка – Δx .

При проведении измерений при температуре окружающей среды от нормальной может возникать дополнительный источник неопределенности как отклонение температуры от нормального (20 ± 5)⁰С – Δ_t .

В общем случае математическую модель измерения относительного удлинения при испытаниях на растяжение запишем следующим образом: $\delta_p = f(\Delta\delta_i, l_{кр}, l_{нр}, \Delta x, \Delta P, \Delta_t)$.

В нашем случае пренебрегаем дополнительным источником неопределенности, поскольку измерения проводились в нормальных условиях. В противном случае необходимо провести исследования по определению стандартных неопределенностей от изменения температуры.

Следовательно, уравнение измерения в нашем случае имеет вид (1):

$$\delta_p = f(\Delta\delta_i, l_{кр}, l_{нр}, \Delta P, \Delta x). \quad (1)$$

⁶ГОСТ 1497. Металлы. Методы испытаний на растяжение. Введ. 01.01.1986. М.: Изд-во «Стандартинформ», 1986.

Таблица 1. Результаты испытаний высокопрочных болтов на растяжение
Table 1. Results of tensile tests of high-strength bolts

Типоразмер болта	Номер образца	Диаметр, d_0 , мм	Диаметр, d_k , мм	Конечная длина, $l_{кр}$, мм	Относительное удлинение, δ_p , %	Относительное сужение, ψ , %
M22x80	1	10	6,6	56,6	13	57
–	2	10,2	6,4	56,9	14	61
–	3	9,9	6,1	57,7	15	63
–	4	10,1	6,8	56,8	13,5	55
–	5	10,2	6,2	56,8	13,5	63
Среднее значение		$\bar{d}_0 = 10,08$	$\bar{d}_k = 6,42$	$\bar{l}_{кр} = 56,96$	$\bar{\delta}_p = 13,8$	59,8
Среднее квадратическое отклонение (СКО)					2,2360	3,6331
Стандартное отклонение					0,3391	1,6248

Неопределенность измерений, обусловленную повторными измерениями относительного удлинения, оцениваем по типу А, его стандартная неопределенность определяется по известной формуле (2) и составляет $u_A = u(\Delta\delta_i) = 0,3391$.

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{(n-1)n} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}, \quad (2)$$

где в нашем случае $x_i = \delta_i$ – i -й результат измерения относительного удлинения; $\bar{x} = \bar{\delta}_i$ – среднее значение; n – число наблюдений.

Значение стандартного отклонения неопределенности измерения, обусловленной погрешностью измерения штангенциркулем конечной длины, $u(l_{кр})$, можно взять из протокола поверки. Необходимо иметь в виду, что в ГОСТ 8.113-85⁷ прописывается методика поверки штангенциркулей, однако в нем нет методики оценивания неопределенности измерения при его поверке/калибровке. На практике в свидетельстве о поверке указывается только признание о годности данного штангенциркуля к применению. В этом случае, если штангенциркуль признан годным к применению, полагая, что все его метрологические характеристики находятся в допустимых пределах, обусловленную погрешностью штангенциркуля неопределенность измерения можно определить по выражению (3), допуская, что она может быть описана прямоугольным распределением:

$$u(l_{кр}) = \frac{\Delta_{шт}}{\sqrt{3}}, \quad (3)$$

где $\Delta_{шт}$ – полуширина доверительного интервала равная значению абсолютной погрешности штангенциркуля – $\pm 0,05$ мм.

Следовательно, обусловленная погрешностью измерения штангенциркулем конечной длины стандартная неопределенность равна $u(l_{кр}) = \frac{0,05}{\sqrt{3}} = 0,0288$. Безразмерная величина.

Обусловленная погрешностью нанесения начальной длины расчетного участка стандартная неопределенность $l_{нр}$ зависит от погрешности линейки. Однако в методике поверки металлических линейек МИ 2024-89 не прописана методика определения неопределенности измерения при поверке и калибровке. Следовательно, при условии наличия свидетельства о поверке, где указана годность к применению данной линейки, полагаем, что все его метрологические характеристики находятся в допустимых пределах, а стандартную неопределенность измерения, обусловленную погрешностью линейки, определяем по выражению (4), допуская, что она может быть описана прямоугольным распределением:

$$u(l_{нр}) = \frac{\Delta_l}{\sqrt{3}}, \quad (4)$$

где Δ_l – полуширина доверительного

⁷ГОСТ 8.113-85. Государственная система обеспечения единства измерений. Штангенциркули. Методика поверки. Введ. 01.01.1987. М.: Изд-во «Стандартинформ», 1987.

интервала, равная значению допускаемого отклонения линейки – $\pm 0,10$ мм.

Следовательно, обусловленная погрешностью измерения штангенциркулем конечной длины стандартная неопределенность равна $u(l_{\text{нр}}) = \frac{0,10}{\sqrt{3}} = 0,0578$. Безразмерная величина.

Стандартную неопределенность, обусловленную погрешностью измерения разрывной машины, можно взять из протокола поверки УММ-100. Однако в методике поверки разрывных и универсальных машин для статистических испытаний РД 50-482-84⁸ не прописана процедура оценивания погрешности силоизмерительного устройства машины. Поэтому, поскольку УММ-100 признан годным к эксплуатации по результатам поверки, полагая, что все его метрологические характеристики находятся в допустимых пределах, обусловленную погрешностью силоизмерительного устройства машины неопределенность измерения можно определить по выражению (5), допуская, что она может быть описана прямоугольным распределением:

$$u(\Delta P) = \frac{\Delta P}{\sqrt{3}}, \quad (5)$$

где ΔP – полуширина доверительного интервала равная значению абсолютной погрешности нагружения.

Относительная погрешность измерения разрывной машины УММ-100 составляет 1% от создаваемой нагрузки. При нагрузке $P = 100$ кН максимальная абсолютная погрешность составляет 1 кН.

Следовательно, обусловленная погрешностью силоизмерительного устройства машины стандартная неопределенность $u(\Delta P) = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,578$. Безразмерная величина.

Стандартную неопределенность, обусловленную погрешностью отсчета оператора начальной и конечной длин расчетного участка можно определить исходя из того, что

оператор может ошибиться на одно деление нониуса штангенциркуля, и (по рекомендации Руководства) по выражению неопределенности измерения принимаем равной $u(\Delta x) = \frac{\text{цена деления шкалы нониуса}}{\sqrt{3}} = \frac{0,05}{\sqrt{3}} = 0,0288$. Безразмерная величина.

Для определения суммарной неопределенности выявляют наличие корреляционной связи между входными величинами. В нашем случае существует корреляционная связь между прилагаемой нагрузкой P и конечной длиной расчетного участка $l_{\text{кр}}$.

Учитывая, что две из входных величин коррелированы между собой, суммарная стандартная неопределенность определяется по выражению (6):

$$u_c^2(\delta_p) = c_1 u^2(\Delta \delta_i) + c_2 u^2(l_{\text{кр}}) + c_3 u^2(l_{\text{нр}}) + c_4 u^2(\Delta P) + c_5 u^2(\Delta x) + c_2 c_4 l_{\text{кр}} u(\Delta P) u(l_{\text{кр}}) r(\Delta P, l_{\text{кр}}), \quad (6)$$

где c_i – коэффициенты чувствительности; $r(\Delta P, l_{\text{кр}})$ – степень корреляции между ΔP и $l_{\text{кр}}$.

Коэффициенты чувствительности, определяемые как $c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}$, показывают, как изменяется выходная оценка y с изменением входных оценок $x_1, \dots, x_N$. Учитываем, что входные оценки $x_1, \dots, x_N$ в нашем случае обозначены через $\Delta \delta_i, l_{\text{кр}}, l_{\text{нр}}, \Delta x$.

Очевидно, что коэффициенты чувствительности, определяемые как первые производные от функции $f(\Delta \delta_i, l_{\text{кр}}, l_{\text{нр}}, \Delta P, \Delta x)$ (см. формулу (1)) по ее аргументам, будут равны:

$$c_1 = \frac{\partial f}{\partial \Delta \delta_i} = 1. \quad c_4 = \frac{\partial f}{\partial \Delta P} = 1. \quad c_5 = \frac{\partial f}{\partial \Delta x} = 1;$$

$$c_2 = \frac{\partial \delta_p}{\partial l_{\text{кр}}} = \frac{\partial \left[\frac{(l_{\text{кр}} - l_{\text{нр}}) \cdot 100}{l_{\text{нр}}} \right]}{\partial l_{\text{кр}}} = \frac{100}{l_{\text{нр}}} = 2;$$

⁸РД 50-482-84. Методические указания. Машины разрывные и универсальные для статических испытаний металлов и конструкционных пластмасс. Методика поверки. Введ. 01.01.1986.

$$c_3 = \frac{\partial \delta_p}{\partial l_{\text{нр}}} = \frac{\partial \left[\frac{(l_{\text{кр}} - l_{\text{нр}}) \cdot 100}{l_{\text{нр}}} \right]}{\partial l_{\text{нр}}} = \frac{100 \cdot (l_{\text{кр}} - l_{\text{нр}})}{l_{\text{нр}}^2} = 0,28.$$

Степень корреляции между ΔP и $l_{\text{кр}}$ характеризуется оценкой коэффициента корреляции, определяемой как (7)

$$r(\Delta P, l_{\text{кр}}) = \frac{u(l_{\text{кр}}, \Delta P)}{u(l_{\text{кр}})u(\Delta P)}. \quad (7)$$

Оценку ковариации двух коррелированных входных величин $l_{\text{кр}}$ и ΔP с оценками $\bar{l}_{\text{кр}}$ и $\bar{P}$, полученных при повторных наблюдениях, рассчитывают по формуле (8):

$$u(l_{\text{кр}}, \Delta P) = s(\bar{l}_{\text{кр}}, \bar{P}), \quad (8)$$

где $s(\bar{l}_{\text{кр}}, \bar{P})$ находят по выражению (9).

$$s(\bar{l}_{\text{кр}}, \bar{P}) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (l_{\text{кри}} - \bar{l}_{\text{кр}})(P_i - \bar{P}), \quad (9)$$

где $l_{\text{кри}}$ и P_i – результаты измерений величин $l_{\text{кр}}$ и P , соответственно, а $\bar{l}_{\text{кр}}$ и $\bar{P}$ – их средние значения.

Если значения $(l_{\text{кри}} - \bar{l}_{\text{кр}})$ можем найти по результатам измерения, то $(P_i - \bar{P})$ может принять любое значение в пределах допускаемой абсолютной погрешности от $\pm 1,0$ кН. Поэтому, применяя равномерный закон распределения вероятности погрешности нагружения, можно принять, что ее среднее значение равно нулю.

Следовательно, $u(l_{\text{кр}}, \Delta P) = s(\bar{l}_{\text{кр}}, \bar{P}) = 0$.

Тогда формула (4) примет такой вид:

$$u_c^2(\delta_p) = c_1 u^2(\Delta \delta_i) + c_2 u^2(l_{\text{кр}}) + c_3 u^2(l_{\text{нр}}) + c_4 u^2(\Delta P) + c_5 u^2(\Delta x).$$

Итак, суммарная стандартная неопределенность измерения при испытании на растяжение составляет:

$$\begin{aligned} u_c(\Delta \delta_i)^2 &= 0,3391^2 + 2 \cdot 0,0288^2 \\ &+ 0,28 \cdot 0,0578^2 \\ &+ 0,578^2 + 0,0288^2 = 0,4525. \\ u_c(\delta_p) &= 0,6226. \end{aligned}$$

Расширенная неопределенность измерения определяется по формуле (10):

$$U = k \cdot u_c, \quad (10)$$

где k – коэффициент охвата.

В руководстве по выражению неопределенности измерения рекомендуется в качестве коэффициента охвата при доверительной вероятности 0,95 принимать значения от 2 до 3. При $k = 2,5$ расширенная неопределенность, будет следующая:

$$U = k \cdot u_c = 2,5 \cdot 0,6226 = 1,6816 \approx 1,68.$$

Результат измерения будет равен $13,8 \pm 1,68$ при доверительной вероятности $P = 0,95$. То есть неопределенность измерения при испытании на растяжение составила 1,68 мм.

Описание порядка проведения испытания на определение относительного сужения и оценивание неопределенности измерения. Температура окружающей среды – 23°C . Измерение диаметра образца проводилось с помощью микрометра типа МК25-1, с пределом допускаемой погрешности ± 2 мкм, с ценой деления шкалы барабана 0,001 мм.

При испытаниях на растяжение (относительного сужения) также имеем две составляющие неопределенности, определяемые по типам А и В.

Для составления математической модели измерений исследованы источники неопределенности при испытаниях на растяжение (относительного сужения), где относительное сужение определяют по формуле: $\psi = \frac{(F_0 - F_k) \cdot 100}{F_k}$, где F_0 – площадь поперечного сечения конечного образца до начала испытаний равная $\pi \left(\frac{d_0}{2}\right)^2$; F_k – площадь поперечного сечения конечного образца после испытаний равная $\pi \left(\frac{d_k}{2}\right)^2$, см².

Рассуждая аналогичным образом, имеем следующие источники неопределенности и их стандартные неопределенности, приведенные в табл. 2.

Следовательно, уравнение измерения в нашем случае имеет такой вид:

$$\psi = f(\Delta\psi_i, d_0, d_k, \Delta P, \Delta x).$$

Входные величины также не коррелирова-

ны между собой, суммарная стандартная неопределенность определяется по следующему выражению:

$$u_c^2(\psi) = c_1 u^2(\Delta\psi_i) + c_2 u^2(d_0) + c_3 u^2(d_k) + c_4 u^2(\Delta P) + c_5 u^2(\Delta x).$$

Очевидно, что коэффициенты чувствительности следующие:

$$c_1 = \frac{\partial f}{\partial \Delta\psi_i} = 1;$$

$$c_2 = \frac{\partial \psi}{\partial d_0} = \frac{\partial \left[\frac{\left(\pi \cdot \left(\frac{d_0}{2} \right)^2 - \pi \cdot \left(\frac{d_k}{2} \right)^2 \right) \cdot 100}{\pi \cdot \left(\frac{d_k}{2} \right)^2} \right]}{\partial d_0} = \frac{\partial \left[\frac{(d_0^2 - d_k^2) \cdot 100}{d_k^2} \right]}{\partial d_0} = -\frac{200 \cdot d_0}{d_k^2};$$

$$c_3 = \frac{\partial \psi}{\partial d_k} = \frac{\partial \left[\frac{\left(\pi \cdot \left(\frac{d_0}{2} \right)^2 - \pi \cdot \left(\frac{d_k}{2} \right)^2 \right) \cdot 100}{\pi \cdot \left(\frac{d_k}{2} \right)^2} \right]}{\partial d_k} = \frac{\partial \left[\frac{(d_0^2 - d_k^2) \cdot 100}{d_k^2} \right]}{\partial d_k} = \frac{200 \cdot d_0}{d_k^2};$$

$$c_4 = \frac{\partial f}{\partial \Delta P} = 1. \quad c_5 = \frac{\partial f}{\partial \Delta x} = 1.$$

Итак, $c_2 = \frac{\partial \psi}{\partial d_0} = 293,03;$ $c_3 = \frac{\partial \psi}{\partial d_k} = -293,03.$

Суммарная стандартная неопределен-

ность измерения при испытании на растяжение, в результате которого происходит сужение образца, составляет:

$$u_c(\delta_p) = \sqrt{1,6248^2 - 293,03 \cdot 1,1547^2 + 293,03 \cdot 1,1547^2 + 0,5774^2} = 1,72.$$

Таблица 2. Исходные данные для расчета неопределенности измерения относительного сужения при испытаниях высокопрочных болтов

Table 2. Initial data for calculating measurement uncertainty of the relative contraction when testing high-strength bolts

Источник неопределенности	Значение	Стандартная неопределенность
Среднее значение измерения относительного сужения, %	59,8	0,3391
Повторные измерения относительного сужения – $\Delta\psi_i$, %	13; 14; 15; 13,5; 13,5	1,6248
Погрешность измерения микрометром диаметра образца до начала испытаний – d_0 , мкм	∓ 2	1,1547
Погрешность измерения микрометром диаметра образца после испытаний – d_k , мкм	∓ 2	1,1547
Погрешность силоизмерительного устройства машины – ΔP , кН	$\mp 1,0$	0
Ошибка отсчета оператора – Δx , мкм, принятая равной 1 делению шкалы барабана мкм	1	0,5774

Расширенная неопределенность измерения равна:

$$U = 2,5 \cdot 1,72 = 4,3.$$

Следовательно, результат измерения будет $59,8 \pm 4,3$ при доверительной вероятности $P = 0,95$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проделанной работы прописана процедура оценивания неопределенности измерения при испытаниях высокопрочных болтов на растяжение. Вышепроедленное оценивание неопределенности измерения

при испытании высокопрочных болтов на растяжение показывает, что оценивание неопределенности измерений при испытании продукции является достаточно трудоемкой работой, предполагает выявление источников неопределенности, наличие корреляционной зависимости между входными величинами, определение законов распределения входных величин, коэффициентов чувствительности, стандартной, суммарной и расширенной неопределенностей и требует разработки методики оценивания неопределенности измерения при испытаниях и описания их в нормативных документах на методы контроля.

Список источников

1. Парышев Д. Н., Герасимов В. Я. Влияние длины болтов на прочность при растяжении // Транспортное строительство. 2009. № 6. С. 14–15.
2. Шаповалов В. В. Анализ применения болтов различного класса прочности в стальных каркасах промышленных зданий // Дни науки студентов Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых: матер. науч.-практ. конф. (г. Владимир, 22 марта – 9 апреля 2021). Владимир: Изд-во ВлГУ, 2021. С. 594–602.
3. Гуль Ю. П., Ивченко А. В., Кондратенко П. В., Перчун Г. И. Сравнительный анализ комплекса механических свойств, полученных при испытаниях готовых болтов и обточенных образцов // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. 2015. № 4. С. 132–141. <https://doi.org/10.15802/STP2015/50121>.
4. Гладштейн Л. И., Бабушкин В. М. Высокопрочные болты класса прочности 12.9 в монтажных соединениях строительных металлоконструкции // Промышленное и гражданское строительство. 2011. № 6. С. 37–39.
5. Кутяйкин В. Г., Горбачев П. А. Оценивание неопределенности при определении прочностных характеристик материалов // Компетентность. 2021. № 7. С. 16–20. <https://doi.org/10.24412/1993-8780-2021-7-16-20>.
6. Одесский П. Д. Перспективные требования к высокопрочным болтам для монтажных соединений металлических конструкции в северном исполнении // Вестник НИЦ «Строительство». 2017. № 3. С. 155–162.
7. Горицкий В. М., Гусева И. А., Сотсков Н. И., Гук В. О. Сравнение качества высокопрочных болтов класса прочности 12,9, изготовленных различными производителями // Крепеж, клеи, инструмент и... 2013. № 2. С. 26–29.
8. Kodur V. R., Khaliq W., Kand S. Effect of temperature on thermal and mechanical properties of steel bolts // Journal of Materials in Civil Engineering. 2012. Vol. 24. No. 6. P. 765–774. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000445](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000445).
9. Sun Xiao-ming, Zhang Yong, Wang Dong, Yang Jun, Xu Hui-chen, He Man-chao. Mechanical properties and supporting effect of CRLD bolts under static pull test conditions // International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials. 2017. Vol. 24. 1–9. <https://doi.org/10.1007/s12613-017-1372-y>.
10. Li Guangde, Zhang Changrui, Hu Haifeng, Zhang Yudi. Preparation and mechanical properties of C/SiC nuts and bolts // Materials Science and Engineering: A. 2012. Vol. 547. P. 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.03.045>.
11. Yahyai M., Kodur V. R., Residual mechanical properties of high-strength steel bolts after exposure to elevated temperature // Journal of Materials in Civil Engineering. 2018. Vol. 30. Iss. 10. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002416](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002416).
12. Daryan A. S., Ketabdari H. Mechanical properties of steel bolts with different diameters after exposure to high temperatures // Journal of Materials in Civil Engineering. 2019. Vol. 31. Iss. 10. P. 04019221. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002865](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002865).
13. Ibrahim R. A., Pettit C. L. Uncertainties and dynamic problems of bolted joints and other fasteners // Journal of Sound and Vibration. 2005. Vol. 279. Iss. 3-5. P. 857–936. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2003.11.064>.
14. Imamovic N., Hanafi M. Assessment of uncertainty quantification of bolted joint performance // Model Validation and Uncertainty Quantification: Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series / eds. R. Barthorpe, R. Platz, I. Lopez, B. Moaveni, C. Papadimitriou. Cham: Springer, 2017. Vol. 3. P. 145–157. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54858-6_15.
15. Shah V. N. Uncertainty of preloads in closure bolts for transportation casks for hazardous and radioactive materials // ASME 2008 Pressure Vessels and Piping Conference (Chicago, Illinois, 27–31 July 2008). Chicago, Illinois, 2008. Vol. 7. P. 215–223. <https://doi.org/10.1115/PVP2008-61360>.
16. Lin Qingyuan, Zhao Yong, Sun Qingchao, Chen Kun-yong. Reliability evaluation method of anti-loosening

performance of bolted joints // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2022. Vol. 162. P. 108067. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108067>.

17. Zhao Yongsheng, Fu Huirong, Wang Lixia, Wu Hongchao, Li Shunlei. Research on design method of time-varying uncertainty of bolted connections // *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2019. Vol. 612. Iss. 3. P. 032077. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/612/3/032077>.

18. Zhang Lin, Wang Meng, Zhao Hongbo, Chang Xu. Uncertainty quantification for the mechanical behavior of fully grouted rockbolts subjected to pull-out tests // *Computers and Geotechnics*. 2022. Vol. 145. P. 104665. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2022.104665>.

19. Ruan M. The variability of strains in bolts and the effect on preload in jointed structure. Houston, Texas, 2019.

20. Benmokrane B., Xu Haixue, Bellavance E. Bond strength of cement grouted glass fibre reinforced plastic (GFRP) anchor bolts // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1996. Vol. 33. Iss. 5. P. 455–465. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(96\)00006-X](https://doi.org/10.1016/0148-9062(96)00006-X).

21. Петров В. А., Хамханова Д. Н. Оценивание неопределенности измерений при поверке вольтметра Э8030-

М1 // *Образование и наука. Секция: Обеспечение и контроль качества продукции и услуг: матер. Национальной науч.-практ. конф. (г. Улан-Удэ, 15 апреля 2021 г.)*. Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2021. С. 33–38.

22. Петров В. А., Хамханова Д. Н. Оценивание неопределенности измерений при поверке вольтметра Д5081 // *Образование и наука. Секция: Обеспечение и контроль качества продукции и услуг: матер. Национальной науч.-практ. конф. (г. Улан-Удэ, 15 апреля 2021 г.)*. Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2021. С. 4–10.

23. Хамханова Д. Н., Сундарон Э. М. Источники неопределенности при поверке мерной стеклянной колбы // *Advances in Science and Technology: сб. ст. XXVI Междунар. науч.-практ. конф. (г. Москва, 31 января 2020 г.)*. Москва: ООО «Актуальность.РФ», 2020. Т. I. С. 157–159.

24. Зандраев А. Б., Хамханова Д. Н. Оценивание неопределенности измерений при поверке весов электронных ЕТ-1200-Е // *Качество как условие повышения конкурентоспособности и путь к устойчивому развитию: материалы Региональной науч.-практ. конф. (г. Улан-Удэ, 26–28 ноября 2018 г.)*. Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2018. С. 68–74.

References

1. Paryshev D. N., Gerasimov V. Ja. Influence of length of bolts on durability at a stretching. *Transportnoe stroitel'stvo*. 2009;6:14-15. (In Russ.).

2. Shapovalov V. V. Analysis of the use of bolts of various strength classes in industrial building steel frames. *Dni nauki studentov Vladimirovskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Aleksandra Grigor'evicha i Nikolaya Grigor'evicha Stoletovyh: materialy nauchno-prakticheskikh konferencij = Days of science of students of Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs*. 22 March – 9 April 2021, Vladimir. Vladimir: Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs; 2021, p. 594-602. (In Russ.).

3. Gul Yu. P., Ivchenko A. V., Kondratenko P. V., Perchun G. I. Comparative analysis of complex mechanical properties obtained in tests on finished bolts and turned samples. *Nauka ta progres transportu. Visnik Dnipropetrovs'kogo nacional'nogo universitetu zaliznichnogo transportu*. 2015;4:132-141. <https://doi.org/10.15802/STP2015/50121>.

4. Gladshteyn L. I., Babushkin V. M. High-strength bolts of 12.9 strength class in assembly joints of building metal structures. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo = Industrial and Civil Engineering*. 2011;6:37-39. (In Russ.).

5. Kutyaykin V. G., Gorbachev P. A. Estimation of uncertainty in determining the strength of materials' characteristics. *Kompetentnost' = Competency*. 2021;7:16-20. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/1993-8780-2021-7-16-20>.

6. Odesskij P. D. Advanced requirements for the northern version of high-strength bolts for assembly joints of metal structures. *Vestnik NIC "Stroitel'stvo" = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2017;3:155-162. (In Russ.).

7. Gorickij V. M., Guseva I. A., Sotskov N. I., Guk V. O.

Quality comparison of high-strength bolts of 12.9 strength class produced by various manufacturers. *Krepezh, klei, instrument i... = Fasteners, Adhesives, Tools and...* 2013;2:26-29. (In Russ.).

8. Kodur V. R., Khaliq W., Kand S. Effect of temperature on thermal and mechanical properties of steel bolts. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2012;24(6):765-774. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000445](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000445).

9. Sun Xiao-ming, Zhang Yong, Wang Dong, Yang Jun, Xu Hui-chen, He Man-chao. Mechanical properties and supporting effect of CRLD bolts under static pull test conditions. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. 2017;24:1-9. <https://doi.org/10.1007/s12613-017-1372-y>.

10. Li Guangde, Zhang Changrui, Hu Haifeng, Zhang Yudi. Preparation and mechanical properties of C/SiC nuts and bolts. *Materials Science and Engineering: A*. 2012;547:1-5. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.03.045>.

11. Yahyai M., Kodur V. R., Residual mechanical properties of high-strength steel bolts after exposure to elevated temperature. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2018;30(10). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002416](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002416).

12. Daryan A. S., Ketabdari H. Mechanical properties of steel bolts with different diameters after exposure to high temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2019;31(10):04019221. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002865](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002865).

13. Ibrahim R. A., Pettit C. L. Uncertainties and dynamic problems of bolted joints and other fasteners. *Journal of Sound and Vibration*. 2005;279(3-5):857-936. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2003.11.064>.

14. Imamovic N., Hanafi M. Assessment of uncertainty

quantification of bolted joint performance. In: Barthorpe R., Platz R., Lopez I., Moaveni B., Papadimitriou C. (eds.). *Model Validation and Uncertainty Quantification: Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*. Cham: Springer; 2017, vol. 3, p. 145-157. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54858-6_15.

15. Shah V. N. Uncertainty of preloads in closure bolts for transportation casks for hazardous and radio-active materials. In: *ASME 2008 Pressure Vessels and Piping Conference*. 27–31 July 2008, Chicago, Illinois. Chicago, Illinois; 2008, vol. 7, p. 215-223. <https://doi.org/10.1115/PVP2008-61360>.

16. Lin Qingyuan, Zhao Yong, Sun Qingchao, Chen Kunyong. Reliability evaluation method of anti-loosening performance of bolted joints. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2022;162:108067. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108067>.

17. Zhao Yongsheng, Fu Huirong, Wang Lixia, Wu Hongchao, Li Shunlei. Research on design method of time-varying uncertainty of bolted connections. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2019;612(3):032077. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/612/3/032077>.

18. Zhang Lin, Wang Meng, Zhao Hongbo, Chang Xu. Uncertainty quantification for the mechanical behavior of fully grouted rockbolts subjected to pull-out tests. *Computers and Geotechnics*. 2022;145:104665. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2022.104665>.

19. Ruan M. *The variability of strains in bolts and the effect on preload in jointed structure*. Houston, Texas; 2019.

20. Benmokrane B., Xu Haixue, Bellavance E. Bond strength of cement grouted glass fibre reinforced plastic (GFRP) anchor bolts. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1996;33(5):455-465. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(96\)00006-X](https://doi.org/10.1016/0148-9062(96)00006-X).

21. Petrov V. A., Khamkhanova D. N. Estimation of

measurement uncertainty when checking the E8030-M1 voltmeter. In: *Obrazovanie i nauka. Sekciya: Obespechenie i kontrol' kachestva produktsii i uslug: materialy Nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii = Education and Science. Section: Quality management of products and services: materials of the National scientific and practical conference*. 15 April 2021, Ulan-Ude. Ulan-Ude: Siberia State University of Technology and Management; 2021, p. 33-38. (In Russ.).

22. Petrov V. A., Khamkhanova D. N. Estimation of measurement uncertainty when checking the D5081 voltmeter. In: *Obrazovanie i nauka. Sekciya: Obespechenie i kontrol' kachestva produktsii i uslug: materialy Nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii = Education and Science. Section: Quality management of products and services: materials of the National scientific and practical conference*. 15 April 2021, Ulan-Ude. Ulan-Ude: Siberia State University of Technology and Management; 2021, p. 4-10. (In Russ.).

23. Khamkhanova D. N., Sundaron E. M. Sources of uncertainty when verifying a volumetric glass bulb. In: *Advances in Science and Technology: sbornik statej XXVI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Collected articles of the 26th International scientific and practical conference*. 31 January 2020, Moscow. Moscow: OOO "Aktual'nost'. RF"; 2020, vol. 1, p. 157-159. (In Russ.).

24. Zandraev A. B., Khamkhanova D. N. Estimation of measurement uncertainty when verifying ET-1200-E electronic scales. In: *Kachestvo kak uslovie povysheniya konkurentosposobnosti i put' k ustojchivomu razvitiyu: materialy Regional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii = Quality as a condition for increasing competitiveness and the path to sustainable development: materials of the regional scientific and practical conference*. 26–28 November 2021, Ulan-Ude. Ulan-Ude: Siberia State University of Technology and Management; 2018, p. 68-74. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Хамханова Дарима Нимбуевна,

доктор технических наук, доцент,
доцент кафедры «Стандартизация, метрология и
управление качеством»,
Восточно-Сибирский государственный университет
технологий и управления,
670033, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40В, стр. 1,
Россия

Хадыков Михаил Томович,

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Стандартизация, метрология и
управление качеством»,
Восточно-Сибирский государственный университет
технологий и управления,
670033, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40В, стр. 1,
Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Darima N. Khamkhanova,

Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of
Standardization, Metrology and Quality Management,
East Siberia State University of Technology and
Management,
40B, Klyuchevskaya St., bldg.1, Ulan-Ude 670033,
Russia

Mikhail T. Khadykov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of
Standardization, Metrology and Quality Management,
East Siberia State University of Technology and
Management,
40B, Klyuchevskaya St., bldg.1, Ulan-Ude 670033,
Russia

Мосоров Владимир Иванович,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Металловедение и технологии
обработки материалов»,
Восточно-Сибирский государственный университет
технологий и управления,
670033, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40В, стр. 1,
Россия

Vladimir I. Mosorov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Metallurgical
Science and Material Processing Technologies,
East Siberia State University of Technology and
Management,
40B, Klyuchevskaya St., bldg.1, Ulan-Ude 670033,
Russia

Бахрунов Константин Константинович,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Металловедение и технологии
обработки материалов»,
Восточно-Сибирский государственный университет
технологий и управления,
670033, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40В, стр. 1,
Россия

Konstantin K. Bakhrunov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Metallurgical
Science and Material Processing Technologies,
East Siberia State University of Technology and
Management,
40B, Klyuchevskaya St., bldg.1, Ulan-Ude 670033,
Russia

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the preparation of the article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 07.11.2022; одобрена после рецензирования 30.11.2022; принята к публикации 21.11.2022.

Information about the article

The article was submitted 07.11.2022; approved after reviewing 30.11.2022; accepted for publication 21.11.2022.



Научная статья

УДК 621.311.001.57

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-612-625>

Влияние распределенной генерации энергии на процесс энергоснабжения потребителей в интегрированной энергетической системе

Евгений Алексеевич Барахтенко^{1✉}, Глеб Сергеевич Майоров²^{1,2}Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск, Россия¹barakhtenko@isem.irk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6934-0025>²mayorovgs@isem.irk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7405-1965>

Резюме. Цель работы – разработка подхода для учета и регулирования доли распределенной генерации в интегрированной энергетической системе. Для моделирования интегрированной энергетической системы используется мультиагентный подход, позволяющий представить такую технологически сложную систему в виде совокупности агентов, которые обладают своим индивидуальным поведением. Суть применения мультиагентного подхода для решения задач исследования состоит в следующем: интегрированная энергетическая система представляется в виде совокупности компонентов, которые моделируются своими агентами с индивидуальным алгоритмом поведения; каждый элемент интегрированной энергетической системы участвует в формировании решения и отстаивает свои интересы, исходя из условий эффективного энергоснабжения. Реализация этого подхода осуществлялась в специализированной программной среде AnyLogic, которая включает в себя базовые компоненты агентного и имитационного моделирования и позволяет создавать любые мультиагентные системы в зависимости от решаемых задач. Разработана оригинальная структура мультиагентной системы для интегрированных энергетических систем, учитывающая особенности ее функционирования и взаимодействия объектов, определены основной состав и типы агентов мультиагентной системы. Выделены следующие типы агентов: агент-потребитель, агент активного потребителя, сетевой агент, агент-менеджер активного потребителя, агент централизованного источника энергии, агент сети, совещательный агент. Разработана мультиагентная модель реальной системы энергоснабжения жилого района г. Иркутск с централизованными и распределенными источниками энергии. Предложены принципы по регулированию доли распределенной генерации в системе, учитывающие эффективный режим работы централизованных источников энергии и позволяющие снизить суммарные затраты на энергоснабжение потребителей путем перераспределения мощности между источниками централизованной и распределенной генерации. Проведенные с использованием разработанной мультиагентной модели исследования интегрированной энергетической системы позволили сформулировать принципы по взаимодействию источников централизованной и распределенной генерации энергии. Благодаря указанным принципам удалось снизить суммарные затраты на 4,22% для теплоснабжения и на 9,94% для электроснабжения потребителей путем перераспределения мощности между этими источниками энергии.

Ключевые слова: интегрированные энергетические системы, мультиагентный подход, централизованная генерация, распределенная генерация, активные потребители

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 20-38-90266.

Для цитирования: Барахтенко Е. А., Майоров Г. С. Влияние распределенной генерации энергии на процесс энергоснабжения потребителей в интегрированной энергетической системе // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 4. С. 612–625. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-612-625>.

Impact of distributed energy generation on energy supply to consumers in an integrated energy system

Evgeny A. Barakhtenko^{1✉}, Gleb S. Mayorov²

^{1,2}Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia

¹barakhtenko@isem.irk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6934-0025>

²mayorovgs@isem.irk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7405-1965>

Abstract. In this work, an approach for accounting and regulating the share of distributed generation in an integrated energy system is developed. In order to model an integrated energy system, a multi-agent approach was used, which presents a technologically complex system as a combination of agents, each having individual behaviour. The essence of a multi-agent approach is as follows: an integrated energy system is represented as a combination of components modelled by their agents having an individual behaviour algorithm; each element of an integrated energy system is involved in the generation of a solution and protects its interests on the basis of efficient energy supply. The implementation of this approach was carried out using the AnyLogic software environment, which includes the basic components of agent and simulation modelling, allowing any multi-agent systems to be developed depending on the application. The custom structure of the multi-agent system for integrated energy systems was developed, factoring in its performance features and interaction of objects, the main composition and types of agents of the multi-agent system being determined. The following types of agents were distinguished: consumer agent, dynamic consumer agent, network agent, manager agent of dynamic consumer, agent of centralised energy source, network agent and advisory agent. A multi-agent model of a real power supply system of a residential area in Irkutsk, having centralised and distributed energy sources, was developed. Taking into account the efficient operation of centralised energy sources, the principles for regulating the share of distributed generation in the system were proposed, allowing the total costs of energy supply to consumers to be reduced by rearranging power between centralised and distributed generation sources. The results obtained using the developed multi-agent model were used to formulate the principles of interactions of centralised and distributed energy generation sources. The redistribution of power between these energy sources on the basis of the above principles reduced the total costs by 4.22% for heat supply and 9.94% for electricity supply to consumers.

Keywords: integrated energy systems, multi-agent approach, centralized generation, distributed generation, active consumers

Funding: The study was funded by the Russian Foundation of Basic Research, project no. 20-38-90266.

For citation: Barakhtenko E. A., Mayorov G. S. Impact of distributed energy generation on energy supply to consumers in an integrated energy system. *iPolytech Journal*. 2022;26(4):612-625. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-612-625>.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие новых технологий и внедрение инновационного энергетического оборудования оказывает значительное влияние на функционирование энергетических инфраструктур, включающих системы топливо-снабжения, электроснабжения, теплоснабжения, хладоснабжения. Усиливается интеграция энергетических систем, как на технологическом уровне, так и в организационном отношении [1, 2]. Возможность преобразования одного вида энергии в другой в нормальных и аварийных режимах работы энергосистем обеспечивает расширение их функций, повышение надежности и гибкости управления [3].

Создание интегрированных энергетиче-

ских систем (ИЭС) с активными потребителями и распределенными функциями управления, использующих совместно с централизованной генерацией распределенные источники энергии, является перспективной альтернативой существующим традиционным энергосистемам с иерархическим построением [4–6]. Объединение разрозненных систем различного типа в единый технологический комплекс может обеспечить реализацию новых функциональных возможностей, применение более совершенных технологий в эксплуатации и создание интегрированных централизованно-распределенных систем с координированным управлением их режимами и активным участием потребителей в процессе энергоснабжения [7].

Данные, приведенные в этой статье, расширяют текущее состояние в области знаний, связанных с управлением централизованной и распределенной генерациями, предлагая подход для учета и регулирования доли распределенной генерации в ИЭС, включающей объекты, которым энергия может поставляться только от централизованных источников, и объекты, которые имеют возможность выбора между централизованным и распределенным энергоснабжением с учетом зон эффективной работы генерирующего оборудования централизованных источников энергии. В результате задача учета и регулирования доли распределенной генерации в интегрированной энергетической системе является сложной, что связано со следующими положениями:

- существует множество центров принятия решения по снабжению энергией различного вида с возможностью преобразования из одного вида в другой;

- необходимо рассматривать большое количество элементов со сложным поведением.

Для решения этой задачи авторами предложено использовать мультиагентный подход, в котором решение формируется вследствие взаимодействия множества самостоятельных целенаправленно действующих агентов [8, 9].

С использованием разработанного подхода выполнены исследования реальной схемы энергоснабжения одного из городских районов г. Иркутск, представленной в виде ИЭС, состоящей из систем электро- и тепло-снабжения, и включающей обычных и активных потребителей с собственными источниками энергии. Проведенный комплекс исследований показал работоспособность и эффективность предложенных принципов регулирования, с помощью которых удалось снизить суммарные затраты на энергоснабжение потребителей путем перераспределения мощности между источниками централизованной и распределенной генераций.

СТРУКТУРА МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ

Мультиагентный подход, как уже было отмечено выше, представляет интерес для

моделирования и исследования взаимодействия централизованной и распределенной генераций энергии. Он позволяет адекватно и детально исследовать механизмы взаимодействия и координации элементов в интегрированной энергетической системе [10–12]. В основе мультиагентного подхода лежит понятие мобильного программного агента, который реализован и функционирует как самостоятельная специализированная компьютерная программа или как элемент искусственного интеллекта. В классических методах поиск наилучшего решения задачи осуществляется с помощью четко определенного алгоритма, все ресурсы заданы и не меняются в ходе ее решения, а размерность задачи ограничена во избежание замедления процесса решения. Мультиагентные технологии направлены на получение решения в результате взаимодействия множества самостоятельных целенаправленно действующих агентов, и в этом случае применяется распределенный подход к решению задачи, когда сложная задача разбивается на множество задач меньшей размерности, а затем путем самоорганизации определяется согласованное решение. При этом за счет множества взаимодействий между агентами в модели может быть получено решение для задачи практически любой размерности [13–15].

Укрупненная структура мультиагентной системы, разработанная для исследования взаимодействия централизованной и распределенной генераций в ИЭС, представлена на рис. 1. Каждый объект имеет своего агента, отражающего его поведение в системе, связи с другими агентами, характеристики, параметры и индивидуальные ограничения. Подробно взаимодействие агентов в мультиагентной системе показано на блок-схеме, представленной на рис. 2. Агенты потребителей и агенты активных потребителей формируют заявки на необходимое количество энергии и отправляют их, соответственно, сетевому агенту и агенту-менеджеру активных потребителей. Кроме того, они отправляют информацию по заявкам на энергию совещательному агенту (1). В свою очередь сетевой агент отправляет эти заявки

сначала агентам сетей (2), которые, получив их, производят проверку и отправляют ответ сетевому агенту о возможности участия в энергоснабжении (3). Затем сетевой агент отправляет заявки агентам централизованных источников энергии (4), которые при получении данных заявок производят опрос готовности участия сетей в энергоснабжении (5). После получения ответов от агентов сетей (6) осуществляется проверка, и отправляется ответ сетевому агенту о возможности участия в энергоснабжении (7). Получив данные от сетей и централизованных источников энергии, сетевой агент осуществляет проверку возможности энергоснабжения потребителей. Если энергоснабжение возможно, то производится расчет доли централизованных источников в системе, и на основании результатов расчета формируются ограничения на минимальное количество энергии, которую активные потребители должны взять

от централизованных источников, чтобы система находилась в эффективном режиме работы.

Затем сформированные ограничения на энергию и ограничения на пропускную способность сетей отправляются агенту-менеджеру активных потребителей (8), который в свою очередь после получения данных отправляет запрос о готовности к источникам распределенной генерации у активных потребителей (9). Получив ответ от распределенной генерации (10), агент-менеджер производит проверку возможности энергоснабжения активных потребителей. Если энергоснабжение возможно, то выполняется поиск оптимального решения по энергоснабжению активных потребителей на основе решения задачи смешанного целочисленного линейного программирования. После произведенного расчета отправляется уведомление о полученном решении сетевому агенту (11).

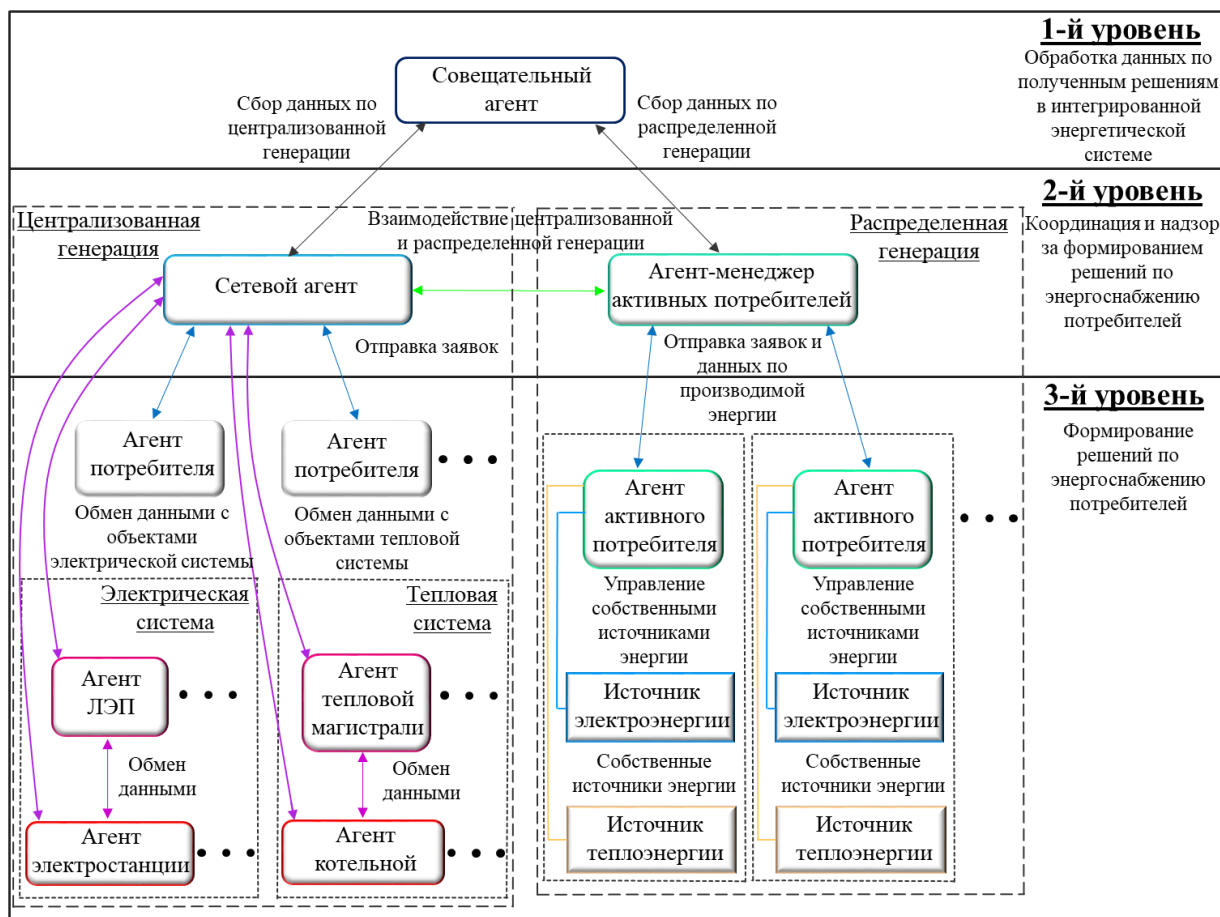


Рис. 1. Структура мультиагентной системы
Fig. 1. Structure of a multi-agent system

Сетевой агент также производит поиск решения по оптимальному энергоснабжению потребителей с использованием решателя смешанного целочисленного линейного программирования. Затем отправляется уведомление о полученном решении агенту-менеджеру активных потребителей (12). Агент-менеджер, получив уведомление, сначала отправляет данные о задействованной мощности распределенной генерации к активным потребителям (13), после этого отправляет данные с подробным расчетом сетевому агенту (14). Получив данные о расчете энергоснабжения активных потребителей, сетевой агент производит расчет затрат на энергоснабжение потребителей в зависимости от того, в какой зоне эффективности находятся централизованные источники энергии (деление осуществляется на четыре зоны, в зависимости от производимой мощности и окупаемости системы). Информация о затратах на энергоснабжение потребителей отправляется совещательному агенту (15). Равным образом данные по расчету энергоснабжения отправляются потребителям (16), у которых производится проверка правильности выполнения заявок.

Затем сетевой агент отправляет данные по задействованной мощности агентам централизованных источников (17) и, получив уведомление об успешной загрузке генерирующего и сетевого оборудования (18), информирует об этом агента-менеджера активных потребителей (19). В свою очередь агент-менеджер, имея все необходимые данные, производит расчет затрат на энергоснабжение активных потребителей и отправляет полученные результаты совещательному агенту (20) и агентам активных потребителей (21). Получив данные по затратам на энергоснабжение, агенты активных потребителей отправляют информацию совещательному агенту о задействованной мощности источников распределенной генерации в процессе энергоснабжения (22). Сетевой агент также информирует потребителей о полученных затратах на энергоснабжение (23). После этого агенты централизованных источников энергии рассылают данные по загрузке сетевого оборудования агентам се-

тей, связанных с ними (24), и совещательному агенту (26). Исходя из полученной информации, агенты-сетей производят расчет суммарных потерь энергии в элементах сети и полученные результаты отправляют совещательному агенту (25). В конце алгоритма совещательный агент обрабатывает данные полученных решений и выводит результаты в виде графиков и диаграмм.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ В ИНТЕГРИРОВАННОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Математическая постановка задачи оптимизации энергоснабжения потребителей заключается в минимизации затрат на энергоснабжение потребителей с учетом выполнения технологических ограничений и условий. Она включает распределение нагрузки между источниками и поиск оптимальных путей снабжения потребителей энергией от этих источников. Заданными являются электрическая и тепловая сеть, состоящие из множества участков: $J \supset J_e \cup J_h$, где $J_e \supset J_{ce} \cup J_{de}$ – это участки электрической сети, включающие кабельные линии, задействованные в централизованной J_{ce} и распределенной J_{de} сети, а $J_h \supset J_{ch} \cup J_{dh}$ – это участки тепловой сети, включающие тепловые магистрали, задействованные в централизованной J_{ch} и распределенной J_{dh} сети; временной период $\tau \in [0; \theta]$; источники энергии $I \supset I_{ce} \cup I_{de} \cup I_{ch} \cup I_{dh}$, включающие централизованные I_{ce} и распределенные I_{de} источники электроэнергии, и централизованные I_{ch} и распределенные I_{dh} источники тепловой энергии; потребители энергии $K \supset K_e \cup K_h$, включающие потребителей электрической K_e и тепловой K_h энергии, для каждого из которых задан объем спроса на энергию $P_c^{i,\tau}$.

Требуется минимизировать функцию суммарных затрат на энергоснабжение в интегрированной энергетической системе, имеющей следующий вид:

$$C_t = C_g + C_n, \quad (1)$$

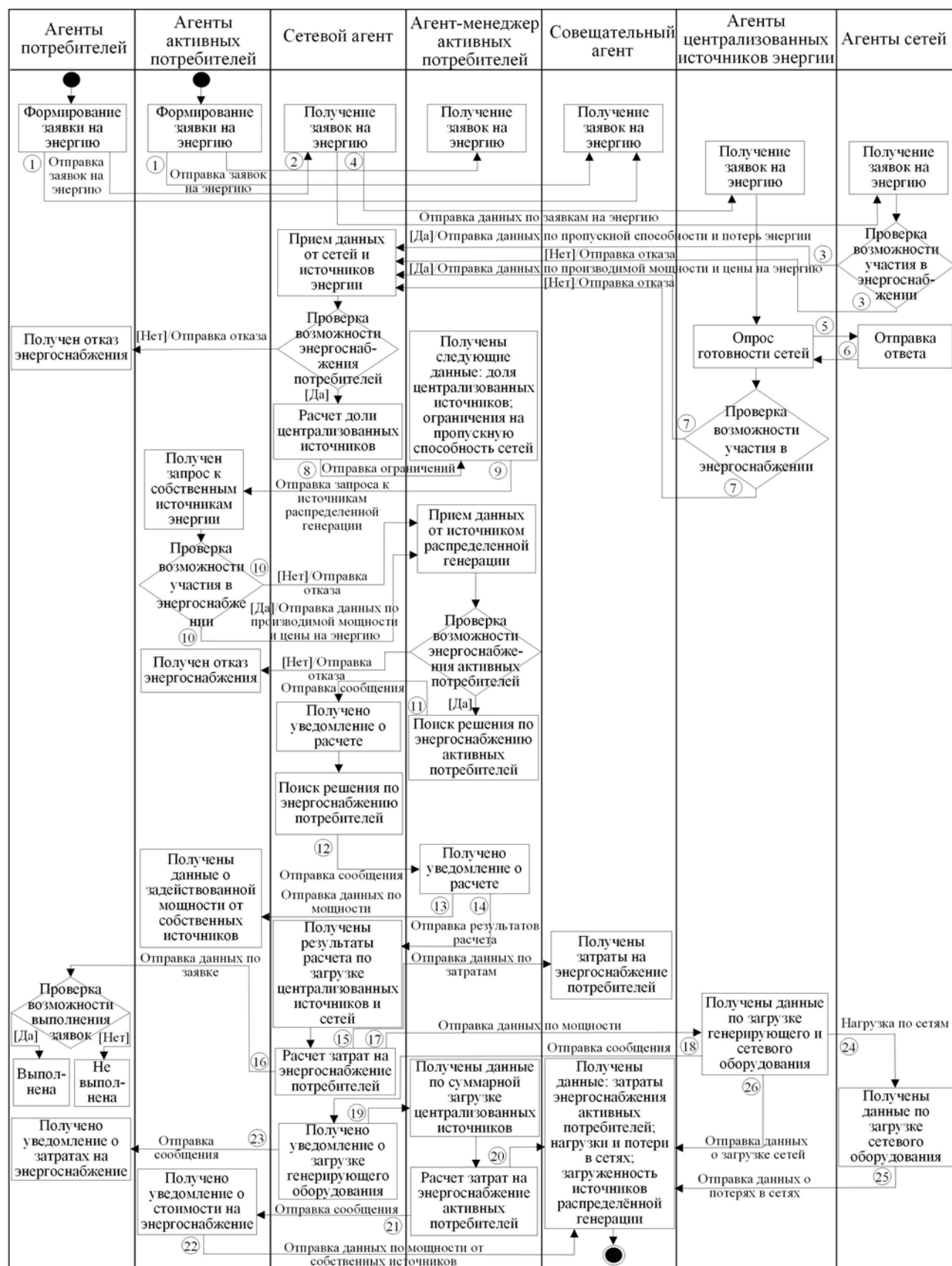


Рис. 2. Взаимодействие агентов при формировании решения
Fig. 2. Agent interaction when forming a solution

где C_g – суммарные затраты на выработку электрической и тепловой энергий; C_n – суммарные затраты на передачу электрической и тепловой энергий.

Суммарные затраты на выработку энер-

гии состоят из затрат на выработку электроэнергии на централизованных и распределенных источниках электроэнергии и из затрат на выработку тепловой энергии на централизованных и распределенных источниках тепловой энергии:

$$C_g = \sum_{\tau=0}^{\theta} \left[\left(\sum_{i \in I_{ce}} (1 + \rho(P^{i,\tau})) \cdot C_{ce} \cdot P^{i,\tau} + \sum_{i \in I_{de}} C_{de}^i \cdot P^{i,\tau} \right) + \left(\sum_{i \in I_{ch}} (1 + \rho(P^{i,\tau})) \cdot C_{ch} \cdot P^{i,\tau} + \sum_{i \in I_{dh}} C_{dh}^i \cdot P^{i,\tau} \right) \right], \quad (2)$$

где C_{ce} – затраты на выработку электроэнергии на централизованных источниках; C_{de}^i – затраты на выработку электроэнергии на распределенных источниках; C_{ch} – затраты на выработку тепловой энергии на централизованных источниках; C_{dh}^i – затраты на выработку тепловой энергии на распределенных источниках; $P^{i,\tau}$ – объем вырабатываемой, соответственно, тепловой и электрической энергий; ρ – коэффициент эффективности работы централизованных источников, который добавляет дополнительную стоимость на энергию от централизованных источников, если система ушла в неэффективный режим работы (0 – I зона «эффективный режим»; 0,1 – II зона «неэффективный режим»; 0,2 – III зона «неэффективный режим»; 0,35 – IV зона «неэффективный режим»).

Суммарные затраты на передачу энергии по сетям состоят из затрат на потери электроэнергии в кабельных линиях, постоянных эксплуатационных затрат в электрической сети, затрат энергии при перекачке теплоносителя, а также из затрат на потери тепловой энергии в тепловых магистралях и постоянных эксплуатационных затрат тепловых сетей:

$$C_n = \sum_{\tau=0}^{\theta} \left[\left(\sum_{j \in J_e} (C_{je} \cdot \Delta P_e^{j,\tau}) + C_{oe} \right) + \left(\sum_{j \in J_h} (C_{ce} \cdot P_p^{j,\tau} + C_{eh} \cdot \Delta P_h^{j,\tau}) + C_{oh} \right) \right], \quad (3)$$

где C_{je} – удельные затраты на потери электрической энергии в кабельных линиях; C_{eh} – удельные затраты на потери тепловой энергии в тепловых магистралях; C_{oe} – постоянные эксплуатационные затраты в электрической сети; C_{oh} – постоянные эксплуатационные затраты в тепловой сети; $\Delta P_e^{j,\tau}$ – потери электроэнергии в

кабельных линиях; $P_p^{j,\tau}$ – затраты энергии при перекачке теплоносителя; $\Delta P_h^{j,\tau}$ – потери тепловой энергии в тепловых магистралях.

При решении этой задачи должны выполняться следующие условия и ограничения:

– двусторонние ограничения на производство тепловой и электрической энергий:

$$\underline{P}^i \leq P^{i,\tau} \leq \overline{P}^i, \quad i \in I; \quad (4)$$

– ограничение пропускной способности кабельных линий и тепловых магистралей:

$$\underline{x}^j \leq x^{j,\tau} \leq \overline{x}^j, \quad j \in J; \quad (5)$$

– условие баланса вырабатываемой и потребляемой энергий:

$$\sum_{i \in I_{ce}} P^{i,\tau} + \sum_{i \in I_{de}} P^{i,\tau} = \sum_{i \in K_e} P_c^{i,\tau} + \sum_{j \in J_e} \Delta P_e^{j,\tau} + \sum_{j \in J_h} P_p^{j,\tau}; \quad (6)$$

$$\sum_{i \in I_{ch}} P^{i,\tau} + \sum_{i \in I_{dh}} P^{i,\tau} = \sum_{i \in K_h} P_c^{i,\tau} + \sum_{j \in J_h} \Delta P_h^{j,\tau}. \quad (7)$$

Решение поставленной задачи оптимизации энергоснабжения потребителей выполняется с помощью применения мультиагентного подхода. Для нахождения оптимального распределения нагрузки между источниками распределенной генерации активного потребителя используется смешанное целочисленное линейное программирование [16, 17].

РАЗРАБОТКА МУЛЬТИАГЕНТНОЙ МОДЕЛИ

На рис. 3 приведена схема ИЭС, включающая в себя 15 потребителей, 8 из них являются активными потребителями (имеют собственные источники тепловой и электрической энергии); 16 кабельных линий; 33 тепловые магистрали; по одному источнику централизованной электрической и тепловой энергии, каждый из которых имеет 4 зоны эффективной работы генерирующего оборудования. Представленная схема разработана на основе реальной схемы энергоснабжения одного из городских районов г. Иркутск, включающая обычных и активных потребителей с собственными источниками энергии. Эта схема позволяет наглядно представить поведение агентов и взаимодействие между ними при решении поставленных задач.

Для реализации мультиагентной модели ИЭС используется программная среда AnyLogic, которая включает в себя базовые компоненты агентного моделирования, концепции и средства из классических областей имитационного моделирования [18–19]. Согласно разработанной структуре мультиагентной ИЭС, создана ее модель в программной среде AnyLogic. Для реализации мультиагентной модели используется данная программная среда как наиболее подходящий инструмент, позволяющий моделировать ИЭС с множеством взаимодействующих элементов со сложным поведением. Благодаря предложенному подходу и разработанным авторами программных компонентов, значительно упрощается построение сложных моделей, например, для управления такими системами, как ИЭС.

Описание логики и поведения агентов в разработанной мультиагентной модели осуществляется через диаграммы состояний. Диаграммы состояний содержат информацию о различных состояниях, в которых может существовать объект, и о том, как он переходит из одного состояния в другое. Переходы из одного состояния в другое могут сработать в результате заданного в качестве условия появления события: истечение заданного времени, получение сообщения, выполнение заданного логического условия и

т.д. Главное назначение диаграмм состояний – описать возможные последовательности состояний и переходов, которые в совокупности характеризуют поведение моделируемой системы в течение всего ее жизненного цикла.

ПРАКТИЧЕСКАЯ АПРОБАЦИЯ МЕТОДИЧЕСКОГО И ПРОГРАММНОГО ИНСТРУМЕНТАРИЯ

Исследования выполнялись для представленной выше реальной системы электро-, теплоснабжения (рис. 3). Пример расчета этой схемы энергоснабжения представлен на рис. 4. Анализ данных показывает, что активные потребители весь свой спрос на энергию обеспечили от собственных источников. Это объясняется тем, что сложившаяся стоимость энергоснабжения от распределенных источников генерации энергии оказалась ниже, чем от централизованных источников энергии. Это привело к тому, что энергосистема была вынуждена работать в неэффективном режиме с повышенными экономическими затратами на генерацию энергии централизованными источниками. В результате потребители, не имеющие собственных источников энергии, получили энергию от централизованных источников с более высоким уровнем тарифа. Повышение тарифа происходит за счет увеличения эксплуатационных затрат и затрат на техническое обслуживание генерирующего оборудования. В рамках данного исследования была определена нижняя граница потребляемой мощности централизованных источников, обеспечивающая окупаемость системы. В соответствии с установленным тарифом, для электрической системы она определена на уровне 200 МВт, а для тепловой системы – 838 ГДж/ч, который формируется исходя из четырех зон эффективной работы централизованного генерирующего оборудования.

С помощью разработанного подхода были проведены многовариантные расчеты со смещением доли централизованной и распределенной генераций в энергосистеме путем перераспределения нагрузки между обычными и активными потребителями. Их результаты приведены на рис. 5 и 6. Они от-

ражают зависимости суммарных затрат на энергоснабжение потребителей в электро- и теплоэнергетических системах от доли энергии, получаемой из централизованной системы. На графике можно увидеть, что, переходя из одной зоны эффективности в другую, суммарные затраты на энергоснабжение потребителей уменьшаются за счет снижения стоимости энергии, производимой централизованными источниками. Но с увеличением доли централизованной энергии в рамках одной зоны стоимость энергоснабжения растет за счет того, что нагрузка распределенной генерации уменьшается, а она для заданных условий является менее дорогостоящей.

Распределенная генерация, использующая возобновляемые источники энергии, в

соответствии с заданными исходными данными является более экономичной по сравнению с традиционными централизованными источниками энергии. Однако заменить полностью централизованную генерацию энергии нет возможности, что обусловлено недостаточной развитостью технологического оснащения и отсутствия возможности установки распределенного генерирующего оборудования, необходимой мощности у потребителей вследствие технических и технологических факторов [20–22]. Поэтому возникает необходимость комбинирования централизованных и распределенных источников энергии при соблюдении баланса мощности, что и было показано в данном исследовании.

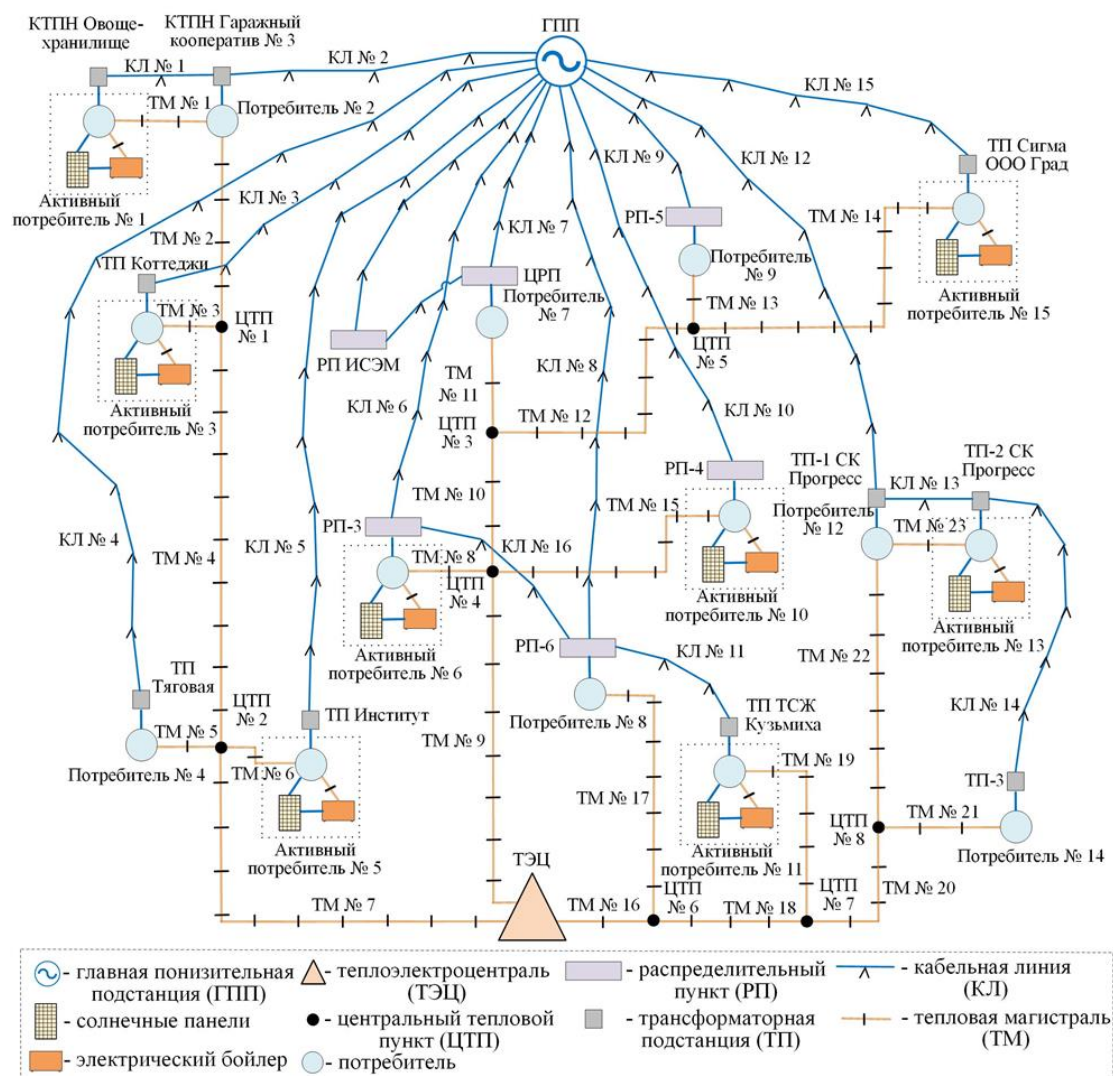


Рис. 3. Схема интегрированной энергетической системы
Fig. 3. Diagram of the integrated energy system

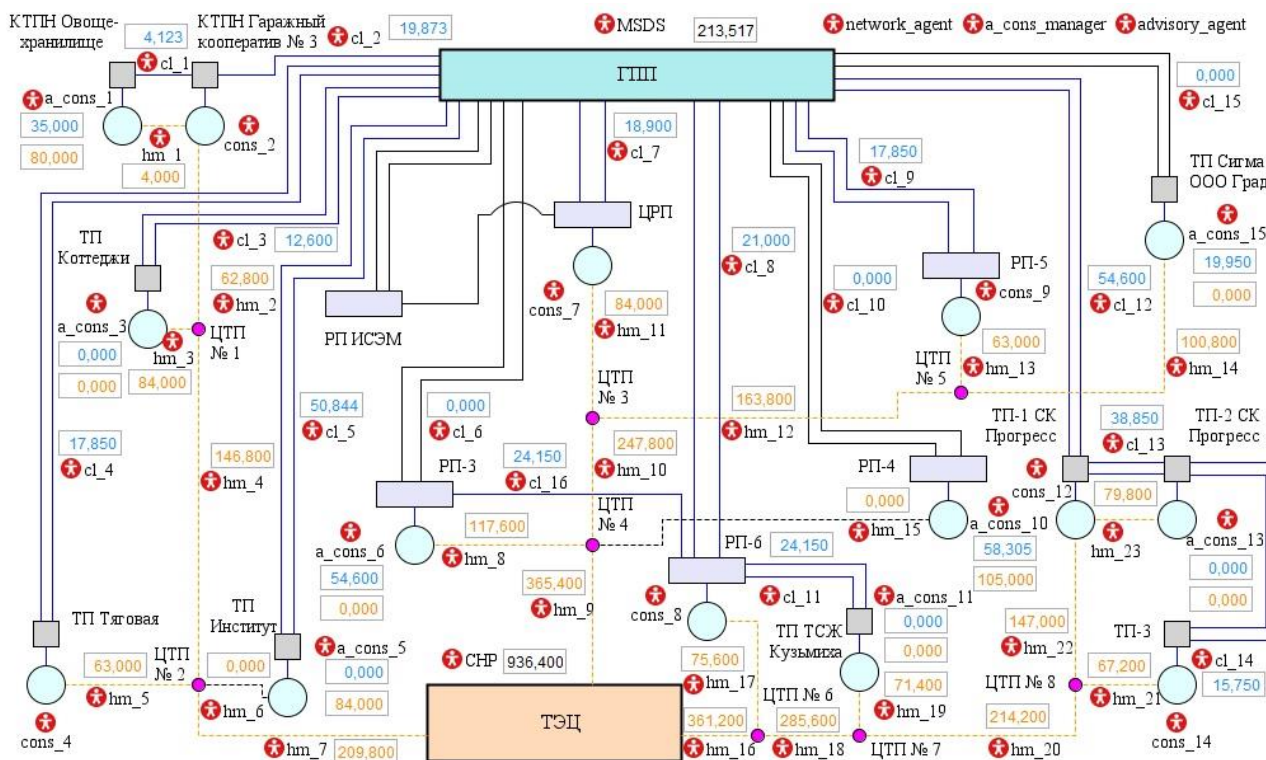


Рис. 4. Результаты расчета энергоснабжения потребителей
Fig. 4. Calculation results of consumer energy supply

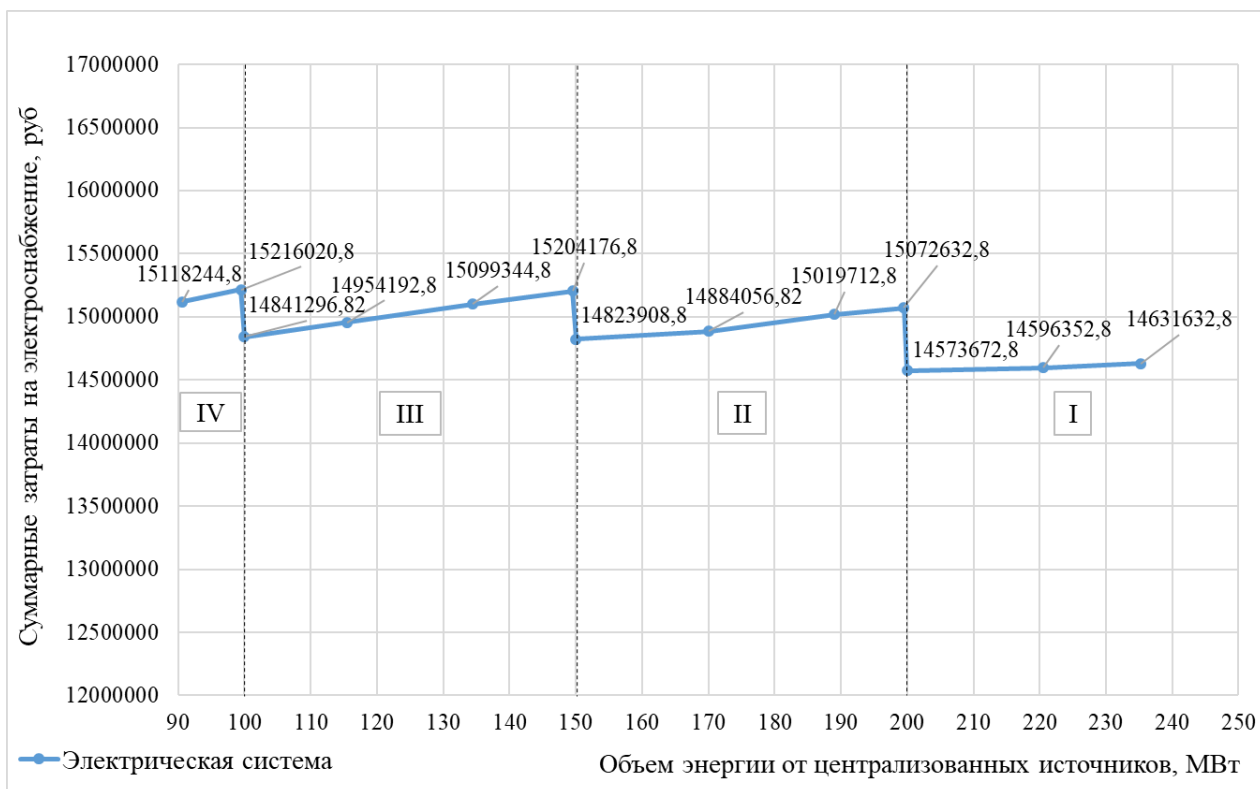


Рис. 5. Зависимость суммарных затрат на электроснабжение потребителей от доли централизованной генерации в энергосистеме
Fig. 5. Dependence of the total cost of consumer power supply on the share of centralized generation in the energy system

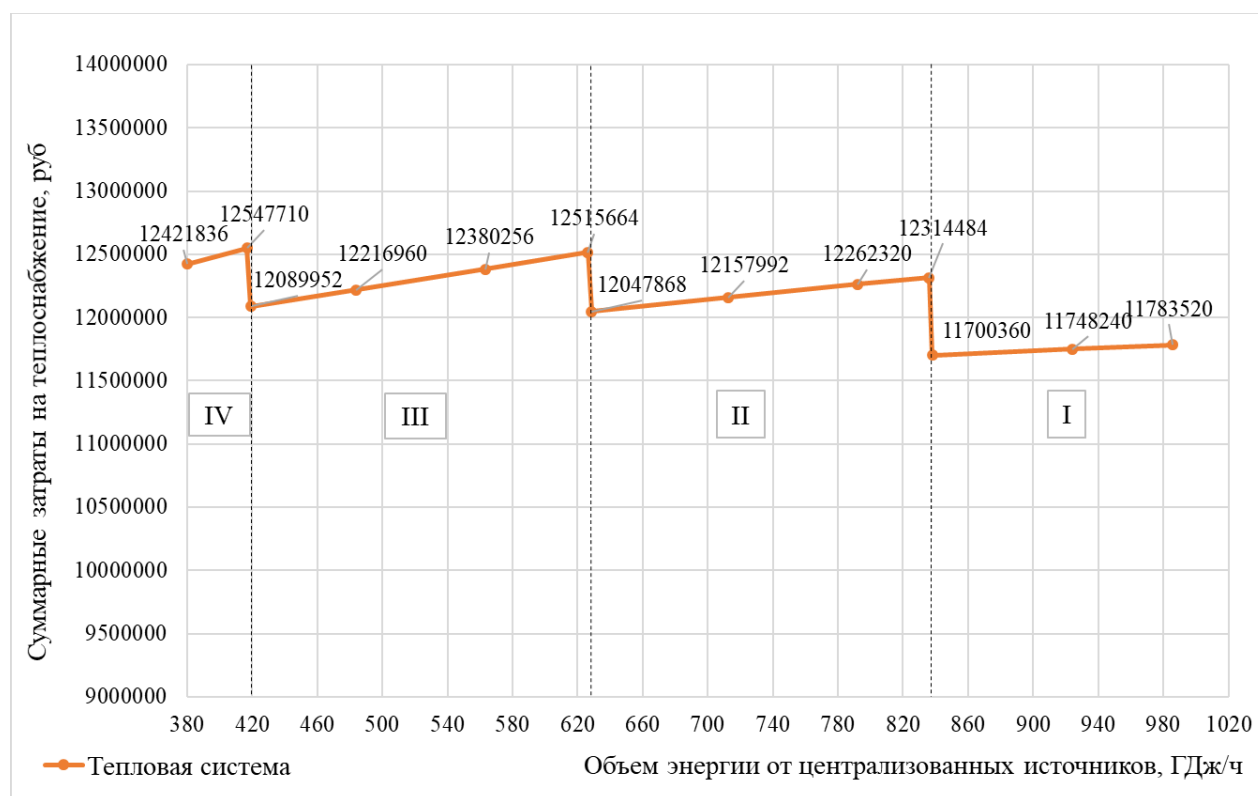


Рис. 6. Зависимость суммарных затрат на теплоснабжение потребителей от доли централизованной генерации в энергосистеме

Fig. 6. Dependence of the total costs for consumer heat supply on the share of centralized generation in the energy system

Результаты, полученные для экспериментов, соответствуют ситуации, происходящей в энергоснабжении рассматриваемого городского района. Применение предложенного подхода позволяет снизить суммарные затраты на энергоснабжение, при этом выполняются все технические и технологические ограничения в системе электро-, теплоснабжения этого городского района.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований разработана мультиагентная структура для взаимодействия энергетических объектов централизованной и распределенной генераций. Сформирована мультиагентная модель ИЭС, которая осуществляет учет и регулирование доли распределенной генерации энергии в процессе энергоснабжения потребителей в ИЭС. В соответствии с предложенной структурой мультиагентной системы определены основной состав и типы агентов,

а также разработаны алгоритмы работы каждого типа агента, сформированы диаграммы состояний, отражающие особенности поведения агентов и взаимодействия их между собой. В рамках предложенного подхода выполнена математическая постановка задачи оптимизации энергоснабжения в ИЭС с учетом распределенной генерации энергии.

С помощью мультиагентной модели интегрированной энергетической системы, основанной на реальной схеме энергоснабжения одного из городских районов г. Иркутск, включающая обычных и активных потребителей с собственными источниками энергии, выполнен комплекс исследований, показывающих работоспособность и эффективность предложенных принципов регулирования, с помощью которых удалось снизить суммарные затраты на энергоснабжение потребителей путем перераспределения мощности между источниками централизованной и распределенной генераций.

Список источников

1. Wang Minli, Zhang Tao, Wang Peihong, Chen Xiaolong. An improved harmony search algorithm for solving day-ahead dispatch optimization problems of integrated energy systems considering time-series constraints // *Energy & Buildings*. 2020. Vol. 229. P. 110477. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110477>.
2. Asl D. K., Seifi A. R., Rastegar M., Mohammadi M. Optimal energy flow in integrated energy distribution systems considering unbalanced operation of power distribution systems // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020. Vol. 121. P. 106132. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106132>.
3. Стенников В. А., Воропай Н. И., Барахтенко Е. А., Соколов Д. В. Цифровизация интегрированных энергетических систем // *Энергобезопасность и энергосбережение*. 2020. № 4. С. 5–10. <https://doi.org/10.18635/2071-2219-2020-4-5-10>.
4. Воропай Н. И., Стенников В. А. Интегрированные интеллектуальные энергетические системы // *Известия Российской Академии наук. Энергетика*. 2014. № 1. С. 64–73.
5. Chen Houhe, Zhang Yutong, Zhang Rufeng, Lin Chuqiao, Jiang Tao, Li Xue. Privacy-preserving distributed optimal scheduling of regional integrated energy system considering different heating modes of buildings // *Energy Conversion and Management*. 2021. Vol. 237. P. 114096. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114096>.
6. Liu Wen Hui, Ho Wai Shin, Lee Ming Yang, Hashim H., Lim Jeng Shiun, Klemes J.J., et al. Development and optimization of an integrated energy network with centralized and decentralized energy systems using mathematical modelling approach // *Energy*. 2019. Vol. 183. P. 617–629. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.158>.
7. Voropai N. I., Stennikov V. A., Barakhtenko E. A. Methodological principles of constructing the integrated energy supply systems and their technological architecture // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 1111. No. 1. P. 012001. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1111/1/012001>.
8. Wooldridge M., Jennings N. Intelligent agents: theory and practice // *The knowledge engineering review*. 1995. Vol. 10. Iss. 2. P. 115–152. <https://doi.org/10.1017/S0269888900008122>.
9. Fisher K., Müller J. P., Heimig I., Scheer A.-W. Intelligent agents in virtual enterprises // *The Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agent Technology: Proceedings of the First International Conference*. London, UK. 1996. P. 205–224.
10. Gomes L., Vale Z., Corchado J. M. Microgrid management system based on a multi-agent approach: an office building pilot // *Measurement*. 2020. Vol. 154. P. 107427. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107427>.
11. Anvari-Moghaddam A., Rahimi-Kian A., Mirian M. S., Guerrero J. M. A multi-agent based energy management solution for integrated buildings and microgrid system // *Applied Energy*. 2017. Vol. 203. P. 41–56. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.007>.
12. Wang Lingfeng, Wang Zhu, Yang Rui. Intelligent multiagent control system for energy and comfort management in smart and sustainable buildings // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2012. Vol. 3. Iss. 2. P. 605–617. <https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2178044>.
13. Ren Yi, Fan Dongming, Feng Qiang, Wang Zili, Sun Bo, Yang Dezhen. Agent-based restoration approach for reliability with load balancing on smart grids // *Applied Energy*. 2019. Vol. 249. P. 46–57. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.119>.
14. Khan M. W., Wang Jie, Xiong Linyun, Ma Meiling. Modelling and optimal management of distributed microgrid using multiagent systems // *Sustainable Cities and Society*. 2018. Vol. 41. P. 154–169. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.05.018>.
15. Kou Yu, Bie Zhaohong, Li Gengfeng, Liu Fan, Jiang Jiangfeng. Reliability evaluation of multi-agent integrated energy systems with fully distributed communication // *Energy*. 2021. Vol. 224. P. 120123. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120123>.
16. Najafi F., Fripp M. Stochastic optimization of comfort-centered model of electrical water heater using mixed integer linear programming // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2020. Vol. 42. P. 100834. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100834>.
17. Moazeni F., Khazaei J. Optimal operation of water-energy microgrids; a mixed integer linear programming formulation // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 275. P. 122776. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122776>.
18. Muravev D., Hu Hao, Rakhmangulov A., Mishkurov P. Multi-agent optimization of the intermodal terminal main parameters by using AnyLogic simulation platform: case study on the Ningbo-Zhoushan port // *International Journal of Information Management*. 2021. Vol. 57. P. 102133. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2020.102133>.
19. Мокшин В. В., Кирпичников А. П., Маряшина Д. Н., Стадник Н. А., Золотухин А. В. Сравнение систем структурного и имитационного моделирования Stratum 2000, Actor Pilgrim, AnyLogic // *Вестник технологического университета*. 2019. Т. 22. № 4. С. 144–148.
20. Ahmadi M., Adewuyi O. B., Danish M. S. S., Mandal P., Yona A., Senjyu T. Optimum coordination of centralized and distributed renewable power generation incorporating battery storage system into the electric distribution network // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2021. Vol. 125. P. 106458. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106458>.
21. Leithon J., Werner S., Koivunen V. Cost-aware renewable energy management: centralized vs. distributed generation. *Renewable Energy*. 2020. Vol. 147. P. 1164–1179. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.077>.
22. Stennikov V., Barakhtenko E., Mayorov G., Sokolov D., Zhou Bin. Coordinated management of centralized and distributed generation in an integrated energy system using a multi-agent approach // *Applied Energy*. 2022. Vol. 309. P. 118487. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118487>.

References

1. Wang Minli, Zhang Tao, Wang Peihong, Chen Xiaolong. An improved harmony search algorithm for solving day-ahead dispatch optimization problems of integrated energy systems considering time-series constraints. *Energy & Buildings*. 2020;229:110477. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110477>.
2. Asl D. K., Seifi A. R., Rastegar M., Mohammadi M. Optimal energy flow in integrated energy distribution systems considering unbalanced operation of power distribution systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020;121:106132. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106132>.
3. Stennikov V., Voropai N., Barakhtenko E., Sokolov D. Digitalization of integrated energy systems. *Energobezopasnost' i energosberezhenie = Energy Safety and Energy Economy*. 2020;4:5-10. (In Russ.). <https://doi.org/10.18635/2071-2219-2020-4-5-10>.
4. Voropai N. I., Stennikov V. A. Integrated smart energy systems. *Izvestiya Rossijskoj Akademii nauk. Energetika*. 2014;1:64-73. (In Russ.).
5. Chen Houhe, Zhang Yutong, Zhang Rufeng, Lin Chuqiao, Jiang Tao, Li Xue. Privacy-preserving distributed optimal scheduling of regional integrated energy system considering different heating modes of buildings. *Energy Conversion and Management*. 2021. Vol. 237. P. 114096. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114096>.
6. Liu Wen Hui, Ho Wai Shin, Lee Ming Yang, Hashim H., Lim Jeng Shiun, Klemes J.J., et al. Development and optimization of an integrated energy network with centralized and decentralized energy systems using mathematical modelling approach. *Energy*. 2019;183:617-629. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.158>.
7. Voropai N. I., Stennikov V. A., Barakhtenko E. A. Methodological principles of constructing the integrated energy supply systems and their technological architecture. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018;1111(1):012001. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1111/1/012001>.
8. Wooldridge M., Jennings N. Intelligent agents: theory and practice. *The Knowledge Engineering Review*. 1995;10(2):115-152. <https://doi.org/10.1017/S0269888900008122>.
9. Fisher K., Müller J. P., Heimig I., Scheer A.-W. Intelligent agents in virtual enterprises. In: *The Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agent Technology: Proceedings of the First International Conference*. London, UK; 1996, p. 205-224.
10. Gomes L., Vale Z., Corchado J. M. Microgrid management system based on a multi-agent approach: an office building pilot. *Measurement*. 2020;154:107427. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107427>.
11. Anvari-Moghaddam A., Rahimi-Kian A., Mirian M. S., Guerrero J. M. A multi-agent based energy management solution for integrated buildings and microgrid system. *Applied Energy*. 2017;203:41-56. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.007>.
12. Wang Lingfeng, Wang Zhu, Yang Rui. Intelligent multi-agent control system for energy and comfort management in smart and sustainable buildings. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2012;3(2):605-617. <https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2178044>.
13. Ren Yi, Fan Dongming, Feng Qiang, Wang Zili, Sun Bo, Yang Dezhen. Agent-based restoration approach for reliability with load balancing on smart grids. *Applied Energy*. 2019;249:46-57. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.119>.
14. Khan M. W., Wang Jie, Xiong Linyun, Ma Meiling. Modelling and optimal management of distributed microgrid using multiagent systems. *Sustainable Cities and Society*. 2018;41:154-169. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.05.018>.
15. Kou Yu, Bie Zhaohong, Li Gengfeng, Liu Fan, Jiang Jiangfeng. Reliability evaluation of multi-agent integrated energy systems with fully distributed communication. *Energy*. 2021;224:120123. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120123>.
16. Najafi F., Frupp M. Stochastic optimization of comfort-centered model of electrical water heater using mixed integer linear programming. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2020;42:100834. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100834>.
17. Moazeni F., Khazaei J. Optimal operation of water-energy microgrids; a mixed integer linear programming formulation. *Journal of Cleaner Production*. 2020;275:122776. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122776>.
18. Muravev D., Hu Hao, Rakhmangulov A., Mishkurov P. Multi-agent optimization of the intermodal terminal main parameters by using AnyLogic simulation platform: case study on the Ningbo-Zhoushan port. *International Journal of Information Management*. 2021;57:102133. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2020.102133>.
19. Mokshin V. V., Kirpichnikov A. P., Maryashina D. N., Stadnik N. A., Zolotuhin A. V. Comparison of Stratum 2000, Simulink, and AnyLogic structural and simulation modeling systems. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. 2019;22(4):144-148. (In Russ.).
20. Ahmadi M., Adewuyi O. B., Danish M. S. S., Mandal P., Yona A., Senjyu T. Optimum coordination of centralized and distributed renewable power generation incorporating battery storage system into the electric distribution network. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2021;125:106458. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106458>.
21. Leithon J., Werner S., Koivunen V. Cost-aware renewable energy management: centralized vs. distributed generation. *Renewable Energy*. 2020;147:1164-1179. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.077>.
22. Stennikov V., Barakhtenko E., Mayorov G., Sokolov D., Zhou Bin. Coordinated management of centralized and distributed generation in an integrated energy system using a multi-agent approach. *Applied Energy*. 2022;309:118487. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118487>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Барахтенко Евгений Алексеевич,
кандидат технических наук, доцент,
старший научный сотрудник,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия

Майоров Глеб Сергеевич,
аспирант,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия

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 21.07.2022; одобрена после рецензирования 19.09.2022; принята к публикации 05.12.2022.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Evgeny A. Barakhtenko,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Senior Researcher,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia

Gleb S. Mayorov,
Postgraduate Student,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia

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 21.07.2022; approved after reviewing 19.09.2022; accepted for publication 05.12.2022.



Original article

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-626-639>

Steady-state equation of thermal explosion in a distributed activation energy medium: numerical solution and approximations

Igor G. Donskoy^{1✉}¹Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia¹donskoy.chem@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2309-8461>

Abstract. This work presents a mathematical model of thermal explosion in a medium described by a Gaussian distribution of reactivity, along with the determination of critical values for model parameters and their dependence on the distribution dispersion. The numerical solution of boundary value problems for steady-state temperature distribution in a reaction medium (a sweep method along with the iterative refinement of a source function, a half-interval method to find the critical value of the Frank-Kamenetskii parameter) was used. The grid convergence was investigated for the used difference scheme; the first order of accuracy was observed as a result of numerical evaluation of the critical value of the Frank-Kamenetskii parameter. Calculations were carried out with accuracy to three decimal places. Numerical methods were implemented as programs in the MATLAB environment. Numerical approximations were obtained for solutions of the thermal explosion equation characterised by distributed activation energy in the quasi-steady-state approximation. It was shown that the critical value of the Frank-Kamenetskii parameter is associated with the dispersion of the distribution and the Arrhenius parameter by a simple approximate analytical formula, confirmed by comparing with numerical estimates. Since the dependence of the critical value of the Frank-Kamenetskii parameter on the dispersion is described by a Gaussian function, the reaction medium becomes thermally unstable even at small values of the distribution dispersion. Calculations showed that a significant dispersion of reactivity (on the order of tenths of the average) can be observed only for chemical reactions characterised by low sensitivity to temperature (i.e. a small heat effect or low activation energy). Approximate formulas for critical conditions were also obtained for asymmetrical distribution functions. The analysis allows the proposed mathematical model to be used for assessing the thermal stability of reactive media having distributed reactivity (for example, natural materials, polymers, heterogeneous catalytic systems, etc.).

Keywords: thermal explosion, distributed activation energy, critical conditions

Acknowledgements: The work was carried out at the Melentiev Energy Systems Institute SB RAS within the framework of the state assignment project FWEU-2021-0005 (registration no. AAAA-A21-121012190004-5).

For citation: Donskoy I. G. Steady-state equation of thermal explosion in a distributed activation energy medium: numerical solution and approximations. *iPolytech Journal*. 2022;26(4):626-639. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-626-639>.

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 662.611:544.454

Стационарное уравнение теплового взрыва в среде с распределенной энергией активации: численное решение и приближения

Игорь Геннадьевич Донской^{1✉}¹Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск, Россия¹donskoy.chem@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2309-8461>

Резюме. Цель работы – анализ математической модели теплового взрыва в среде с гауссовым распределением реакционной способности; определение критических значений параметров модели и их зависимости от дисперсии распределения. В работе использовалось численное решение краевых задач для стационарного распределения температуры в реакционной среде (метод прогонки с итерационным уточнением функции-источника,

метод половинного деления для нахождения критического значения параметра Франк-Каменецкого). Для использованной разностной схемы исследована сеточная сходимость, показан первый порядок точности при численной оценке критического значения параметра Франк-Каменецкого. Расчеты проводились с точностью до третьей значащей цифры. Численные методы реализованы в виде программ в среде MATLAB. Получены численные приближения для решений уравнения теплового взрыва с распределенной энергией активации в квазистационарном приближении. Показано, что критическое значение параметра Франк-Каменецкого связано с дисперсией распределения и параметром Аррениуса простой приближенной аналитической формулой, которая подтверждается путем сравнения с численными оценками. Зависимость критического значения параметра Франк-Каменецкого от дисперсии оказывается гауссовой, поэтому уже при малых значениях дисперсии распределения реакционная среда становится термически неустойчивой. Расчеты показали, что значительная дисперсия реакционной способности (порядка десятых долей от среднего) может наблюдаться только для химических реакций с низкой чувствительностью к температуре (т.е. с малым тепловым эффектом или с низкой энергией активации). Для несимметричных функций распределения также получены приближенные формулы для критических условий. Проведенный анализ позволяет применять предложенную математическую модель для реагирующих сред с распределенной реакционной способностью (например, природных материалов, полимеров, гетерогенных каталитических систем и т.д.) для оценки их тепловой устойчивости.

Ключевые слова: тепловой взрыв, распределенная энергия активации, критические условия

Благодарности: Работа выполнена в ИСЭМ СО РАН в рамках проекта государственного задания FWEU-2021 0005 (регистрационный номер АААА-А21-121012190004-5).

Для цитирования: Донской И. Г. Стационарное уравнение теплового взрыва в среде с распределенной энергией активации: численное решение и приближения // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 4. С. 626–639. (In Eng.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-626-639>.

INTRODUCTION

In the classical stationary theory of thermal explosion (see, for example, Ref. [1]), the following heat balance equation is considered for a quasi-stationary (slow) exothermic reaction in a plane-parallel reactor with a isothermal wall:

$$\lambda \frac{d^2 T}{dx^2} + Q\rho k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) = 0. \quad (1)$$

Here T is temperature, λ is thermal conductivity, x is spatial coordinate, Q is reaction heat, ρ is reagent density, k_0 is preexponential (frequency) factor, E is activation energy, R is universal gas constant. Boundary conditions for the symmetry axis and boundaries are written as follows:

$$\left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} = 0, \quad T(L) = T_0. \quad (2)$$

Here L is characteristic length (half-width). Using dimensionless variables, we obtain an equation with boundary conditions:

$$\frac{d^2 \theta}{d\xi^2} + Fk \exp\left(\frac{\theta}{1 + Ar\theta}\right) = 0, \quad (3)$$

$$\left. \frac{d\theta}{d\xi} \right|_{\xi=0} = 0, \quad \theta(1) = 0. \quad (4)$$

Here the dimensionless parameters are defined as follows:

$$\xi = \frac{x}{L}, \quad \theta = \frac{E}{RT_0^2}(T - T_0), \quad Ar = \frac{RT_0}{E},$$

$$Fk = \frac{Q\rho Ek_0}{\lambda LRT_0^2} \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right).$$

The parameter Ar is usually small; therefore, in most cases, it can be neglected.

The bounded solution to the differential equation exists under constraints on the value of Fk . For $Ar = 0$, the critical value of Fk^0 equal to 0.88 was obtained by Frank-Kamenetskii [1]. The thermal explosion equation is used to predict the conditions of ignition, for example, during storage of fuels and heat treatment of materials [2–5]. Modified problems, for example, taking into account burnout, sample geometry, special boundary conditions, thermal explosion in systems with parallel reactions, thermal explosion in medium with the thermal conductivity coefficient depending on temperature, were considered in [6–13]. Non-stationary equations of thermal explosion were numerically solved in [14–18], where the classification of solutions is

given and the problem parameters are estimated at which transitions between classes occur. Variational formulations for thermal explosion problems were considered in [7, 19, 20].

Equation (1) describes the temperature distribution during a chemical reaction with a given value of the activation energy. However, in some systems (for example, for reactions in the condensed phase or at the interface, catalytic processes, oxidation of polymers or natural materials), the activation energy depends on the local configuration in which the reaction center is located. Then the reactivity of the material is described by the distribution over these configurations. Experimental methods for determining the parameters of such a distribution were proposed in [21–26] for coals, biomass and artificial polymers.

For such systems, the heat balance can be described in the form of the following integro-differential equation:

$$\lambda \frac{d^2 T}{dx^2} + Q\rho k_0 \int \exp\left(-\frac{E+\varepsilon}{RT}\right) g(\varepsilon) d\varepsilon = 0. \quad (5)$$

Here ε is the deviation of the activation energy, and $g(\varepsilon)$ is the distribution function of this value (with a mean value equal to 0). Using dimensionless parameters and splitting exponent in integrand of equation (5), one can rewrite it the following form:

$$\frac{d^2 \theta}{d\xi^2} + Fk \exp\left(\frac{\theta}{1+Ar\theta}\right) \times \int \exp\left(-\frac{\varepsilon}{RT}\right) g(\varepsilon) d\varepsilon = 0. \quad (6)$$

Introducing the variable $s = \varepsilon/E$, we rewrite the equation as:

$$\frac{d^2 \theta}{d\xi^2} + Fk \exp\left(\frac{\theta}{1+Ar\theta}\right) \int \exp\left(-\frac{s}{Ar}\right) \exp\left(\frac{s\theta}{1+Ar\theta}\right) f(s) ds = 0. \quad (7)$$

One of the features of equation (7) is the impossibility of neglecting the parameter Ar : in the

integrand, Ar is in the denominator of the exponent. This factor takes into account the reaction rate at temperature T_0 .

It can be seen that for $f(s) = \delta(s)$ Eq. (7) turns into Eq. (3). In this paper, we will consider the Gaussian distribution function:

$$f(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{s^2}{2\sigma^2}\right). \quad (8)$$

Here σ is the variance. For a Gaussian distribution function, a shift in the mean value occurs:

$$\begin{aligned} \exp\left(-\frac{s}{Ar}\right) \exp\left(\frac{s\theta}{1+Ar\theta}\right) \exp\left(-\frac{s^2}{2\sigma^2}\right) = \\ = \exp\left[s\left(\frac{\theta}{1+Ar\theta} - \frac{1}{Ar}\right) - \frac{s^2}{2\sigma^2}\right]. \end{aligned} \quad (9)$$

Thus the product of two exponential functions gives a new Gaussian function, but with a different factor and mean value: the extremum will be observed at s about $-\sigma^2/Ar$ (since usually the critical value θ is of the order of unity, deviations from the maximum will be of the order of σ^2). The integral of this function can be found analytically. Equation (7) can then be rewritten as:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \theta}{d\xi^2} + Fk \exp\left[\frac{\theta}{1+Ar\theta}\right] \times \\ \times \exp\left[\frac{\sigma^2}{2} \left(\frac{\theta}{1+Ar\theta} - \frac{1}{Ar}\right)^2\right] = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

The boundary conditions remain the same as for the classical problem. It can be seen that, as σ tends to zero, Eq. (10) transforms into Eq. (3). Now we can formulate a question: how the parameters σ and Ar will affect the critical conditions of a thermal explosion, i.e. the existence of a bounded solution to equation (10)?

NUMERICAL METHOD

To solve stated problem, numerical calculations were carried out. The parameters σ and Ar are, generally speaking, independent. There-

fore, the calculations were carried out with the simultaneous variation of both parameters.

Equation (10) is nonlinear, and even if we use the usual approximation $Ar\theta \ll 1$, the result leads to cumbersome quadratures. Therefore, instead of an exact solution, we seek an approximate numerical solution using a grid. Let there be k -th approximation Y^k for the function θ . Then the next approximation can be estimated using the scheme with splitting into physical processes [27]. The source term is calculated using an explicit formula:

$$S_i = Fk \exp\left(\frac{Y_i^k}{1 + ArY_i^k}\right) \times \exp\left[\frac{\sigma^2}{2} \left(\frac{Y_i^k}{1 + ArY_i^k} - \frac{1}{Ar}\right)^2\right]. \quad (11)$$

Here i counts grid points. Then the problem of thermal conductivity is solved with a given distribution of heat sources:

$$Y_{i-1}^{k+1} + Y_{i+1}^{k+1} - 2Y_i^{k+1} = -h^2 S_i. \quad (12)$$

Here h is the spatial grid step ($h = 1/N$). Boundary conditions (4) in difference form are written as follows:

$$Y_1^{k+1} - Y_2^{k+1} = 0, \quad Y_N^{k+1} = 0. \quad (13)$$

The solution of a system of linear equations (12, 13) is found by the tridiagonal matrix algorithm. The resulting approximation is refined again until the differences between the approximations Y^k and Y^{k+1} become less than the specified error (10^{-3}). Since all the variables in the problem are dimensionless, the calculation accuracy will not depend on their absolute values. If the parameter Fk is higher than the critical one, then the solution blows up (the Y values become too large, the iterative process diverges). If the iterative process converges to a stationary solution Y , then the selected parameter Fk corresponds to the safe range.

The critical conditions for a thermal explosion are determined by the bisection method: calculations are carried out for a deliberately

large value of Fk_{max} and a deliberately small value of Fk_{min} (for the first iteration, they are equal to 10 and 0, respectively), then the new value is determined as $Fk_{i+1} = (Fk_{max} + Fk_{min})/2$. If the new value leads to the solution blow-up, it becomes the upper limit of the range; if at this value the numerical solution converges, then it becomes the lower boundary of the range. The general scheme of the algorithm is shown in fig. 1. Since calculations have shown that the critical value of Fk at small values of Ar and large values of σ can be much less than unity, the permissible error ΔFk depends on the current value of Fk_{k+1} , which ensures accuracy to the required number of significant digits. In calculations it is assumed $\Delta Fk = 10^{-4} \times Fk_k$, i.e. calculations are carried out up to the third significant digit.

The influence of the grid step was carried out using the example of solving problem (3), since its critical value Fk is known for $Ar = 0$. The dependence of the critical value Fk on the number of grid points is shown in fig. 2. Influence of the grid step on the calculation error shown in fig. 3: it can be seen that the numerical scheme has an order of accuracy close to one (in relation to critical value of Fk parameter). The calculation results become insensitive to the grid step already at the number of nodes equal to 1000. This value was used further in the numerical solution of equation (10).

Usually, the activation energy in oxidation reactions ranges from several tens to several hundred kJ/mol. Then the parameter Ar will have the order of 10^{-3} – 10^{-2} (at larger values, features of degeneration of the thermal explosion are observed [28]). The parameter σ , according to the literature data, can be up to several tenths of a unit (such large values, however, are usually obtained not for exothermic reactions). In our calculations, the upper limit on the value of σ is 0.3.

NUMERICAL RESULTS

The calculation results for the critical value of Fk are shown in fig. 4. It can be seen that with a decrease in Ar and with an increase in σ , the curves sharply fall down: the critical value of Fk decreases to negligible values, i.e., with other things being equal, an increase in the activation

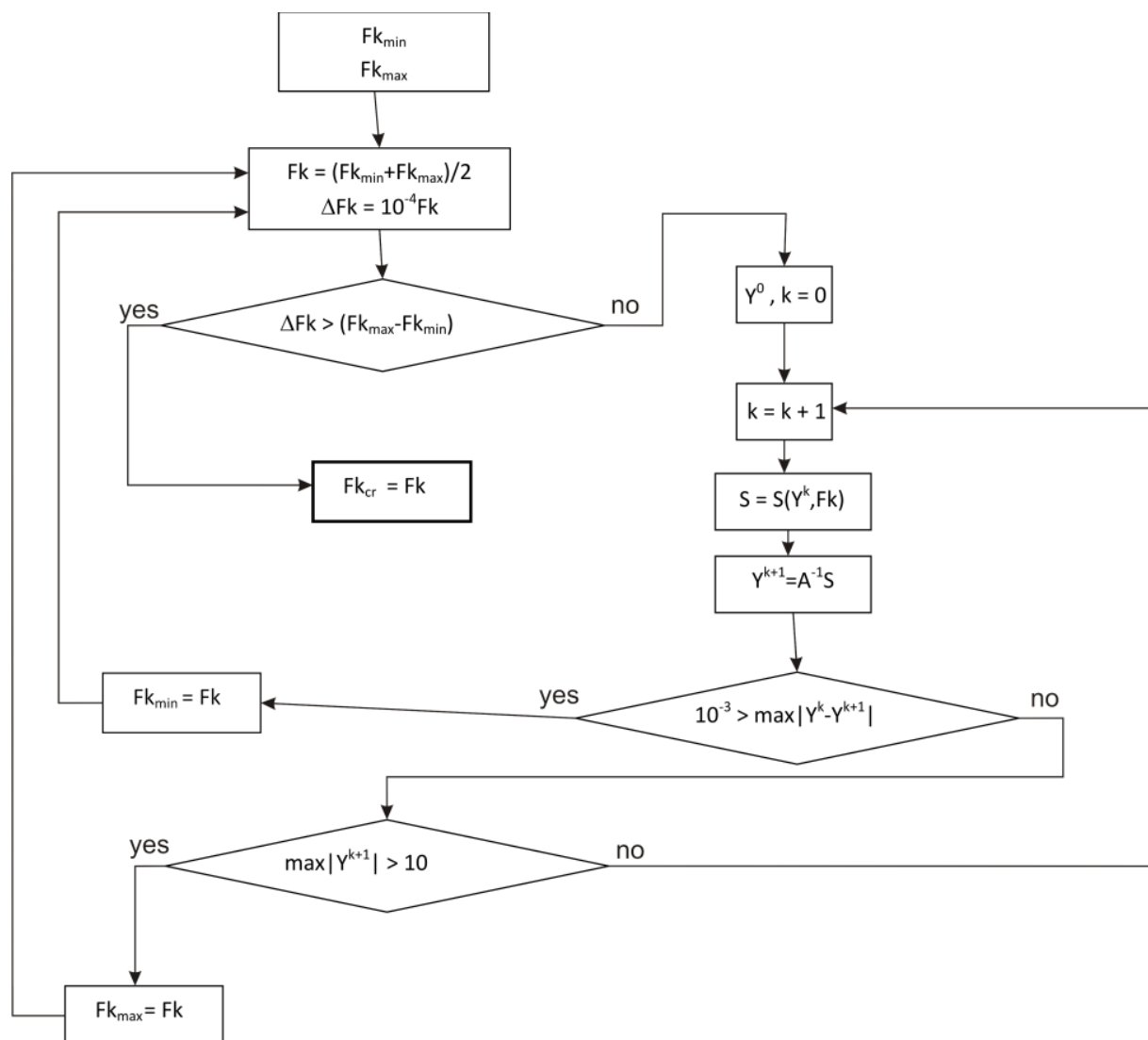


Fig. 1. Algorithm for determining the critical value of the parameter Fk for the given values of Ar and σ
 Рис. 1. Алгоритм определения критического значения параметра Fk для заданных значений Ar и σ

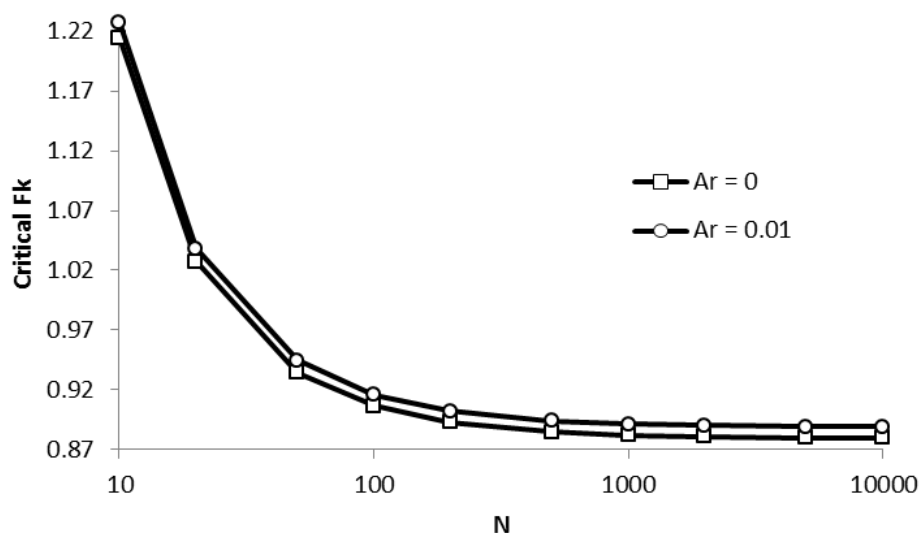


Fig. 2. Grid size influence on the critical value of the parameter Fk from the equation (3)
 Рис. 2. Влияние размера сетки на критическое значение параметра Fk из уравнения (3)

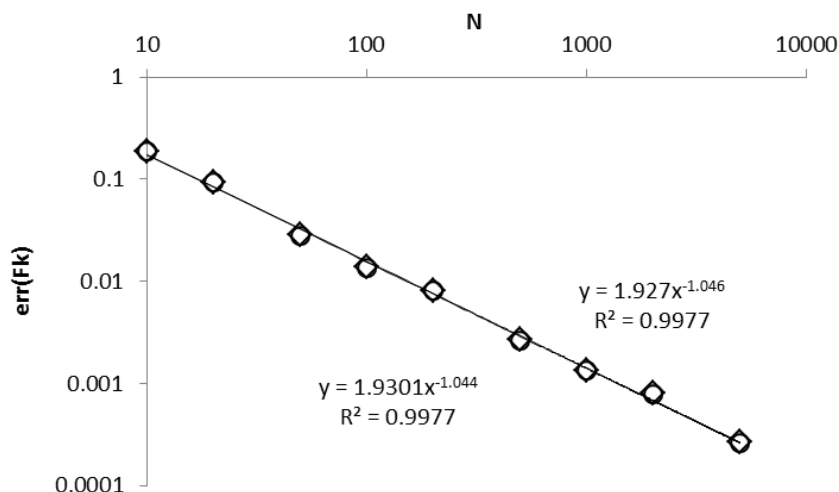


Fig. 3. Dependence of the calculation error of the calculated critical parameter Fk value on the grid size
Рис. 3. Зависимость погрешности вычисления расчетного значения критического параметра Fk от размера сетки

energy of the combustion reaction and an increase in the variance of the activation energy make the reaction system less stable. An increase in variance leads to an increase in the fraction of reaction centers that are involved in chemical reaction with a lower activation energy. The main contribution is concerned with the left side of the distribution, in which $(E + \varepsilon) < E$. A decrease in Ar , in turn, increases the sensitivity of the reaction rate to temperature, and therefore, even at small σ , the critical value of the parameter Fk becomes small. Note that the parameter Ar , generally speaking, is included in Fk ; therefore, for fixed properties of the reacting material, the parameter Fk is mainly determined by the size of the sample (or reaction vessel).

The calculated critical values of the parameter Fk turn out to be so small that their determination leads to computational difficulties associated with the multiplication of very small and very large numbers: such numerical procedures are known to be a source of errors. Therefore, the calculations were carried out not for the entire range of σ , but only up to those values at which the critical value of Fk is of the order of 10^{-12} . Obviously, such small values no longer correspond to any physical picture of the phenomenon: from a practical point of view, in such systems it is impossible to choose suitable parameters for the quasi-steady reaction (in our calculations, deviations from the mean of other quantities affecting the

reactivity, such as the preexponential factor and the concentration of the reagent, was not considered at all).

Let us interpret the small critical values of the parameter Fk in terms of changes in the effective activation energy. To this end, consider the ratio of the parameters Fk for two reacting systems, in one of which the reaction proceeds with lower activation energy (for example, due to the presence of a catalyst):

$$\frac{Fk_1}{Fk_2} = \frac{(Q\rho E_2 k_0) / (\lambda L R T_0^2) \exp[-E_2 / (R T_0)]}{(Q\rho E_1 k_0) / (\lambda L R T_0^2) \exp[-E_1 / (R T_0)]} = (14)$$

$$= \frac{E_2}{E_1} \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{R T_0}\right).$$

If we use modified activation energy $E_2 = E_1 + \Delta\varepsilon$, and variable $\Delta s = \Delta\varepsilon/E_1$, then we can write:

$$\frac{Fk_1}{Fk_2} = \frac{E_1 + \Delta\varepsilon}{E_1} \exp\left(-\frac{\Delta\varepsilon}{R T_0}\right) = (15)$$

$$= (1 + \Delta s) \exp\left(-\frac{\Delta s}{Ar}\right).$$

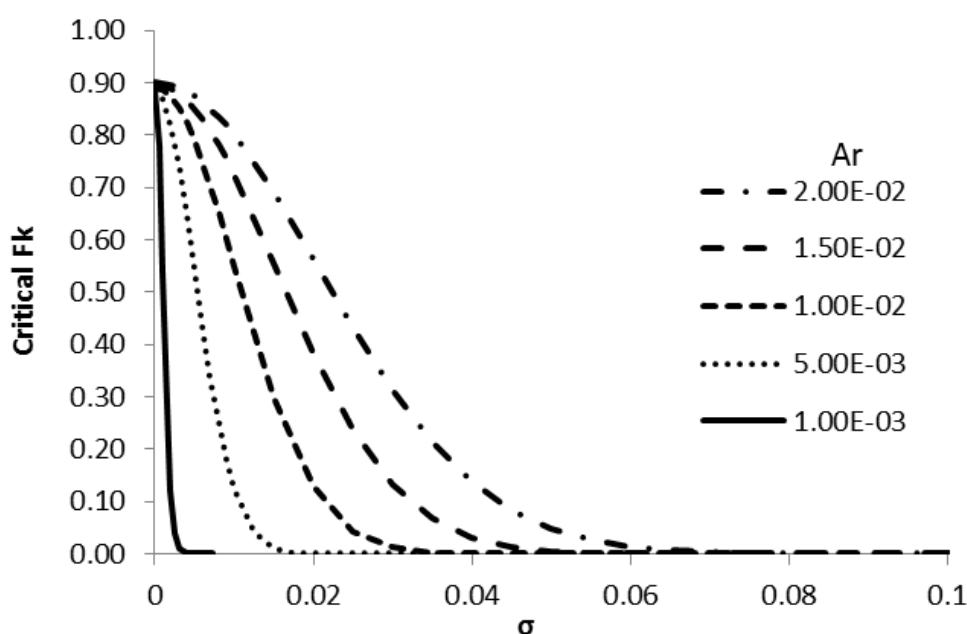


Fig. 4. Calculated dependence of the critical value of the parameter Fk on the parameters σ and Ar
Рис. 4. Расчетная зависимость критического значения параметра Fk от параметров σ и Ar

With small values Δs , the main contribution to the decrease in the ratio Fk_2/Fk_1 will come from the second factor, therefore Δs can be neglected in the first factor, and then we obtain the final formula:

$$\Delta s \approx Ar \ln \left(\frac{Fk_2}{Fk_1} \right). \quad (16)$$

This formula gives the relative change in the average activation energy of the combustion reaction, i.e. the deviation for which the critical value of Fk will agree with the classical theory. The dependence of Δs on the parameters Ar and σ is shown in fig. 5: this curve is everywhere non-positive, i.e. the effective activation energy of the combustion reaction decreases in all cases. This decrease, however, is much more sensitive to Ar than to σ . Note that at $\sigma = 0$ the sensitivity of the critical value of Fk with respect to Ar is small, and a sharp dependence appears only for the distributed reactivity.

APPROXIMATE ANALYTICAL SOLUTION

As mentioned above, equation (10) contains exponential factors, in the exponents of which there are significantly different terms. For exam-

ple, using estimate $Ar\theta \ll 1$, equation (11) can be simplified as follows:

$$\frac{d^2\theta}{d\xi^2} + Fk \exp \left(\frac{\sigma^2}{2Ar^2} \right) \exp(\theta) = 0. \quad (17)$$

That is, in a fairly good approximation, the critical value of Fk in equation (17) differs from the value of Fk for the classical problem (3) by a single factor. Therefore, the curves in fig. 4 look like the shoulders of Gaussian curves with variance equal to Ar , and the curves in fig. 5 look as branches of a parabola. Indeed, a comparison of the calculated critical values of Fk with the factor in the second term in (17) shows good agreement (fig. 7). The deviations grow with increasing Ar . This may be one of the marks of the thermal explosion degeneration. Then the expression for the effective activation energy (16) can be rewritten as follows:

$$\Delta s = \frac{\sigma^2}{2Ar}. \quad (18)$$

The results obtained can be used to predict the conditions of thermal explosion in reaction systems, in which the reaction rate has more

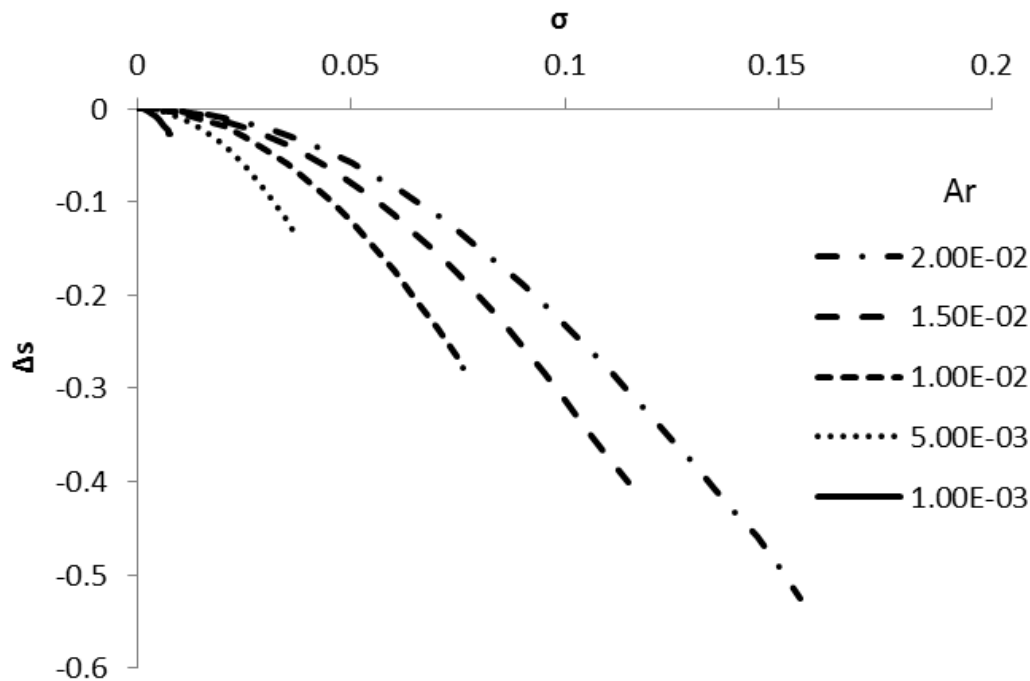


Fig. 5. Relative deviation of the activation energy from the average value for the critical conditions of a thermal explosion
Рис. 5. Относительное отклонение энергии активации от среднего значения для критических условий теплового взрыва

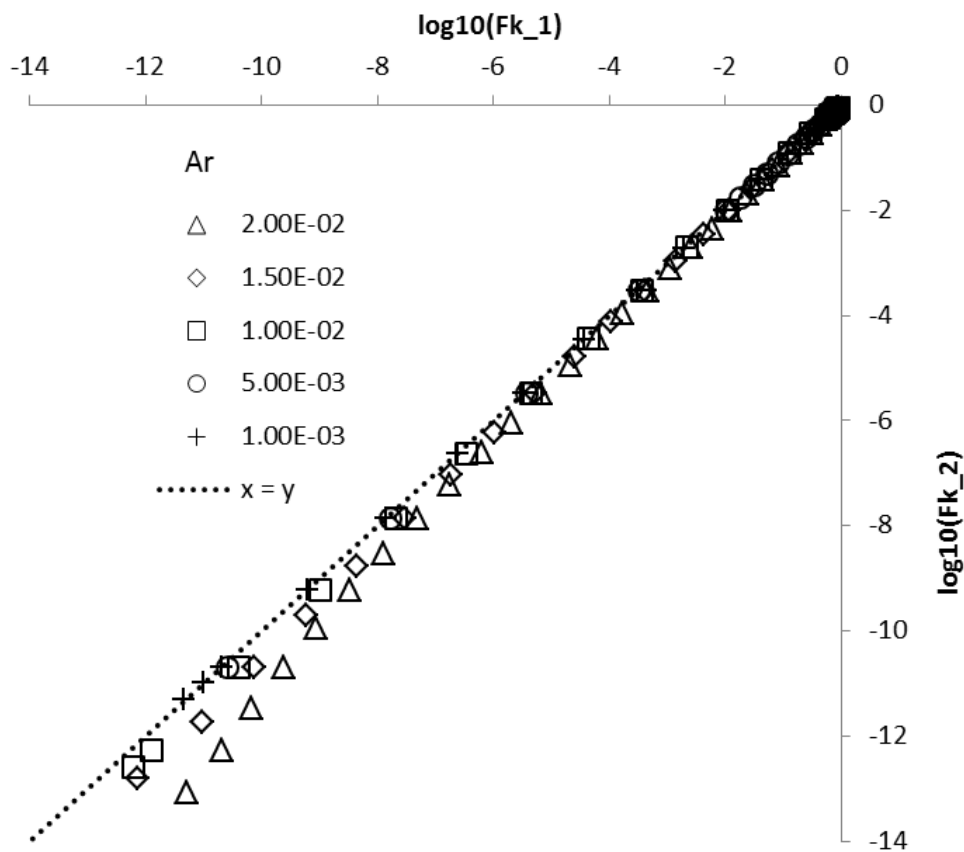


Fig. 6. Comparison of the critical values F_k calculated for the exact problem (F_{k1}) and for the approximate problem (F_{k2})
Рис. 6. Сравнение критических значений F_k , рассчитанных для точной задачи (F_{k1}) и для приближенной задачи (F_{k2})

complex temperature dependence than the traditional Arrhenius formula. This primarily concerns heterogeneous catalytic reactions and low-temperature oxidation of solid fuels such as coal or biomass. For example, if the variance of the activation energy is known from kinetic measurements, it is possible to estimate the critical conditions of a thermal explosion; when carrying out an exothermic reaction with different heating temperatures, the variance of the activation energy can be estimated.

APPROXIMATE SOLUTIONS FOR THE ASYMMETRIC DISTRIBUTION FUNCTION

In the general case, to solve the problem of a thermal explosion in a medium with distributed activation, it is necessary to solve the problem of the heat conduction equation and the equation of chemical kinetics, supplemented by the Fokker-Planck equation (to describe the transition between energy states). The above results refer to the case when the relaxation time to the stationary Gaussian distribution (8) is sufficiently small. However, such relaxation can be rather slow. In the limiting case of large time relaxations, the highly reactive part of the distribution quickly burns out, after which the distribution function becomes asymmetric. Depending on the reaction history, the function may take different forms for which results from a previous section are inapplicable.

Consider a piecewise Gaussian distribution function equal to zero for argument values less than zero:

$$f(s) = \begin{cases} 0, & s < 0 \\ C \exp\left(-\frac{s^2}{2\sigma^2}\right), & s \geq 0 \end{cases} \quad (19)$$

Substituting it into the thermal explosion equation, we obtain:

$$\frac{d^2\theta}{d\xi^2} + Fk \exp\left(\frac{\theta}{1+Ar\theta}\right) C \int_0^\infty \exp\left(-\frac{s}{Ar} + \frac{s\theta}{1+Ar\theta} - \frac{s^2}{2\sigma^2}\right) ds = 0. \quad (20)$$

After transformations, we arrive at the expression:

$$\frac{d^2\theta}{d\xi^2} + Fk \exp\left(\frac{\theta}{1+Ar\theta}\right) \exp\left[\frac{\sigma^2}{2}\left(\frac{\theta}{1+Ar\theta} - \frac{1}{Ar}\right)^2\right] \left\{1 - \operatorname{erf}\left[\frac{\sigma}{\sqrt{2}}\left(\frac{\theta}{1+Ar\theta} - \frac{1}{Ar}\right)\right]\right\} = 0. \quad (21)$$

Using the normalization condition and the approximation $Ar\theta \ll 1$, we obtain:

$$\frac{d^2\theta}{d\xi^2} + Fk \exp(\theta) \exp\left(\frac{\sigma^2}{2Ar^2}\right) \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{\sigma}{Ar\sqrt{2}}\right)\right] = 0. \quad (22)$$

We assume that the critical value Fk is related to Fk^0 by the relation:

$$Fk_{cr}^0 = Fk_{cr} \exp\left(\frac{\sigma^2}{2Ar^2}\right) \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{\sigma}{Ar\sqrt{2}}\right)\right]. \quad (23)$$

The right-hand side of this equation gradually decreases with increasing σ , therefore, to maintain the critical value, Fk_{cr} must grow. That is, the reactive medium becomes more inert, as expected: the proportion of the most reactive part of the distribution decreases with increasing variance.

Another option (although less realistic) is a piecewise Gaussian distribution function equal to zero when the argument is greater than zero:

$$f(s) = \begin{cases} 0, & s > 0 \\ C \exp\left(-\frac{s^2}{2\sigma^2}\right), & s \leq 0 \end{cases}. \quad (24)$$

The thermal explosion equation for such a distribution function will be similar to the previous case, but with different integration limits. Therefore, the changes will affect only the multiplier containing the error function. Again using the normalization condition and the high activation energy approximation, we obtain the relation for the critical value of Fk :

$$Fk_{cr}^0 = Fk_{cr} \exp\left(\frac{\sigma^2}{2Ar^2}\right) \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\sigma}{Ar\sqrt{2}}\right)\right]. \quad (25)$$

The right side of the equation is now a growing function of σ . Accordingly, the critical value Fk_{cr} decreases, and the reactive medium is less stable with respect to thermal perturbations.

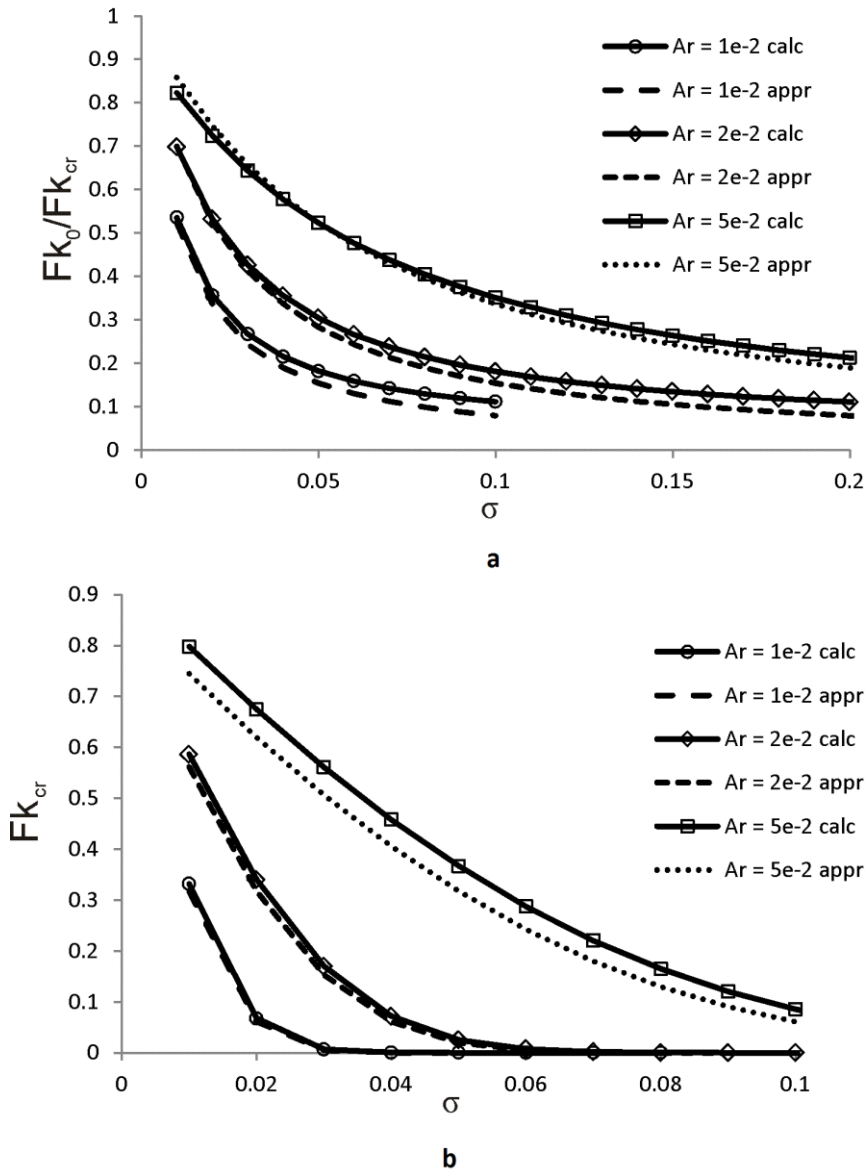


Fig. 7. Comparison of the critical values Fk calculated for the exact problem and for the approximate problem with asymmetric distribution of activation energy: a – equation (19); b – equation (24)
Рис. 7. Сравнение критических значений Fk , рассчитанных для точной задачи и для приближенной задачи с асимметричным распределением энергии активации: а – уравнение (19); б – уравнение (24)

Comparison of critical values of Fk calculated using numerical procedure and analytical approximations is presented in fig. 7. It can be seen that analytical estimates are fairly good for small values of σ .

Finally, the problem with a continuous different-arm distribution is of additional interest:

$$f(s) = \begin{cases} C \exp\left(-\frac{s^2}{2\sigma_1^2}\right), & s \leq 0 \\ C \exp\left(-\frac{s^2}{2\sigma_2^2}\right), & s > 0 \end{cases} \quad (26)$$

Combining the previous results, we get:

$$Fk_{cr}^0 = Fk_{cr} C \frac{\sqrt{\pi}}{2} \left\{ \sigma_1 \exp\left(\frac{\sigma_1^2}{2Ar^2}\right) \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\sigma_1}{\sqrt{2}Ar}\right) \right] + \sigma_2 \exp\left(\frac{\sigma_2^2}{2Ar^2}\right) \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{\sigma_2}{\sqrt{2}Ar}\right) \right] \right\}. \quad (27)$$

Here, the constant C depends on the ratio of the variances of different distribution arms. During reaction, the left side of the distribution is depleted faster, that is, we can consider the situation $\sigma_1 < \sigma_2$ (and in the limit $\sigma_1 = 0$) to account for burnout.

Finally, if the symmetry of the distribution is preserved, but there is a shift in the distribution, i.e. the average value of the activation energy is S_μ , then the formula for the critical value of the number Fk can be written as:

$$Fk_{cr}^0 = Fk_{cr} \exp\left(\frac{\sigma^2}{2Ar^2}\right) \exp\left(-\frac{S_\mu}{Ar}\right). \quad (28)$$

As can be seen from this formula, when the average deviation is shifted by $\sigma^2/2Ar$, the critical value of Fk does not differ from the standard value (which is similar to Eq. (19)).

CONCLUSIONS

The critical conditions of thermal explosion in a reaction system, the reactivity of which is given by the Gaussian distribution of the activation en-

ergy, are investigated. Using numerical methods, the critical values of the parameter Fk are obtained for different values of the variance of the activation energy and the parameter $Ar = RT_0/E$. It is shown that the problem of a thermal explosion with a distributed reactivity can be reduced (using realistic approximations) to the classical formulation with an additional factor that takes into account the variance of the distribution and the associated sensitivity of the reaction rate to temperature. Analysis of the approximate equation shows the relationship between the critical value of the parameter Fk and the variance of the distribution. The cases of asymmetric distribution function are considered. The results obtained can be applied to study the processes of ignition of materials with distributed reactivity.

Abbreviations:

Ar – Arrhenius parameter
 E – average activation energy, J/mol
 Fk – Frank-Kamenetskii parameter
 f – distribution function of relative activation energy deviation from average value
 g – distribution function of activation energy deviation from average value
 h – grid step
 k_0 – preexponential factor, 1/s
 L – characteristic size of reactor (sample), m
 N – number of grid points
 Q – thermal effect of chemical reaction, J/kg
 R – gas constant, 8.314 J/mol/K

S_i – source term of i -th grid point
 s – relative activation energy deviation from average value
 T – temperature, K
 x – spatial coordinate, m
 Y_i – approximate value of dimensionless temperature in i -th grid point
 ε – activation energy deviation from average value
 θ – dimensionless temperature
 λ – thermal conductivity, W/m/K
 ξ – dimensionless spatial coordinate
 ρ – reagent mass fraction, kg/m³
 σ – variance of value s

References

1. Frank-Kamenetskii D. A. *Diffusion and heat exchange in chemical kinetics*. Vol. 2171. Princeton University Press; 1955, 384 p. <https://doi.org/10.1515/9781400877195>.
2. Restuccia F., Fernandez-Anez N., Rein G. Experimental measurement of particle size effects on the self-heating ignition of biomass piles: Homogeneous samples of dust and pellets. *Fuel*. 2019;256:115838. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115838>.
3. Pomerantsev V. V., Shagalova S. L., Reznik V. A., Kushnarenko V. V. *Spontaneous combustion and dust explosions of natural fuels*. Leningrad: Ehnergiya; 1975, 144 p. (In Russ.).
4. Sun Qia, Jiang Lin, Li Mi, Sun Jinhua. Assessment on thermal hazards of reactive chemicals in industry: state of the art and perspectives. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2020;78:100832. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2020.100832>.
5. Lin Qi, Wang Shugang, Liang Yuntao, Song Shuanglin, Ren Tingxiang. Analytical prediction of coal spontaneous combustion tendency: velocity range with high possibility of self-ignition. *Fuel Processing Technology*. 2017;159:38-47. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.09.027>.
6. Boddington T., Gray P., Harvey D. I. Thermal theory of spontaneous ignition: criticality in bodies of arbitrary shape. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 1971;270(1207):467-506. <https://doi.org/10.1098/rsta.1971.0087>.
7. Graham-Eagle J. G., Wake G. C. Theory of thermal explosions with simultaneous parallel reactions. II. The two- and three-dimensional cases and the variational method. *Proceedings of the Royal Society A. Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 1985;401:195-202. <https://doi.org/10.1098/rspa.1985.0094>.
8. Li Shuicai, Liao Shi-Jun. An analytic approach to solve multiple solutions of a strongly nonlinear problem. *Applied Mathematics and Computation*. 2005;169(2):854-865. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2004.09.066>.
9. Dik I. G., Zurer A. B. Calculation of critical conditions of a thermal explosion in an inhomogeneous medium by the

method of integral relations. *Engineering and Physics Journal*. 1980;38(1):95-98. (In Russ.).

10. Gontkovskaya V. T., Gordopolova I. S., Peregodov A. N. On critical conditions of a thermal explosion in distributed systems with chain reactions. *Fizika Goreniya i Vzryva*. 1987;4:64-68. (In Russ.).

11. Novozhilov V. Critical conditions for conjugate thermal explosion. *Combustion Theory and Modelling*. 2008;12(3): 433-449. <https://doi.org/10.1080/13647830701750939>.

12. Novozhilov V. Thermal explosion in oscillating ambient conditions. *Scientific Reports*. 2016;6:29730. <https://doi.org/10.1038/srep29730>.

13. Merzhanov A. G., Averson A. E. The present state of the thermal ignition theory: an invited review. *Combustion and Flame*. 1971;16(1):89-124. [https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(71\)80015-9](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(71)80015-9).

14. Merzhanov A. G., Barzykin V. V., Shteinberg A. S., Gontkovskaya V. T. Methodological principles in studying chemical reaction kinetics under conditions of programmed heating. *Thermochimica Acta*. 1977;21(3):301-322. [https://doi.org/10.1016/0040-6031\(77\)85001-6](https://doi.org/10.1016/0040-6031(77)85001-6).

15. Merzhanov A. G., Ozerkovskaya N. I., Shkadinskii K. G. Thermal explosion dynamics in the post-induction period. *Fizika goreniya i vzryva*. 1999;35(6):65-70. (In Russ.).

16. Balakrishnan E., Swift A., Wake G. C. Critical values for some non-class A geometries in thermal ignition theory. *Mathematical and Computer Modelling*. 1996;24(8):1-10. [https://doi.org/10.1016/0895-7177\(96\)00133-1](https://doi.org/10.1016/0895-7177(96)00133-1).

17. Sanchez-Rodriguez D., Farjas J., Roura P. The critical conditions for thermal explosion in a system heated at a constant rate. *Combustion and Flame*. 2017;186:211-219. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2017.08.008>.

18. Melguizo-Gavilanes J., Boettcher P. A., Mevel R., Shepherd J. E. Numerical study of the transition between slow reaction and ignition in a cylindrical vessel. *Combustion and Flame*. 2019;204:116-136. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2018.12.036>.

19. Zarubin V. S., Kuvyrkin G. N., Savelyeva I. Y. Variational estimates of the parameters of a thermal explosion of a stationary medium in an arbitrary domain. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019;135:614-619. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.02.009>.

09.

20. Attetkov A. V., Zarubin V. S., Kuvyrkin G. N. Dual variational form of the model of thermal explosion in a quiescent medium with temperature-dependent thermal conductivity. *Russian Journal of Physical Chemistry B*. 2018. Vol. 12. No. 1. P. 91-97. <https://doi.org/10.1134/S1990793118010037>.

21. Miura K., Maki T. A Simple method for estimating $f(E)$ and $k_0(E)$ in the distributed activation energy model. *Energy Fuels*. 1998;12(5):864-869. <https://doi.org/10.1021/ef970212q>.

22. Czajka K., Kisiela A., Moron W., Ferens W., Rybak W. Pyrolysis of solid fuels: thermochemical behaviour, kinetics and compensation effect. *Fuel Processing Technology*. 2016;142:42-53. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.09.027>.

23. Li Mi, Jiang Lin, He Jia-Jia, Sun Jin-Hua. Kinetic triplet determination and modified mechanism function construction for thermo-oxidative degradation of waste polyurethane foam using conventional methods and distributed activation energy model method. *Energy*. 2019;175:1-13. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.032>.

24. Ma Junfang, Liu Jiaxun, Jiang Xiumin, Shen Jun. An improved parallel reaction model applied to coal pyrolysis. *Fuel Processing Technology*. 2021;211:106608. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106608>.

25. Varhegyi G., Bobály B., Jakab E., Chen Honggang. Thermogravimetric study of biomass pyrolysis kinetics. A distributed activation energy model with prediction tests. *Energy Fuels*. 2011;25(1):24-32. <https://doi.org/10.1021/ef101079r>.

26. Wagh A. Modelling and simulation of biomass fast pyrolysis process: kinetics, reactor, and condenser systems. *Western Australia School of Mines: Minerals, Energy and Chemical Engineering*. 2019. <http://hdl.handle.net/20.500.11937/82905>.

27. Wichman I. S. On the use of operator-splitting methods for the equations of combustion. *Combustion and Flame*. 1991;83(3-4):240-252. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(91\)90072-J](https://doi.org/10.1016/0010-2180(91)90072-J).

28. Merzhanov A. G., Zelikman E. G., Abramov V. G. Degenerated modes of a thermal explosion. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1968;180(3):639-642. (In Russ.).

Список источников

1. Frank-Kamenetskii D. A. Diffusion and heat exchange in chemical kinetics. Vol. 2171. Princeton University Press, 1955. 384 p. <https://doi.org/10.1515/9781400877195>.

2. Restuccia F., Fernandez-Anez N., Rein G. Experimental measurement of particle size effects on the self-heating ignition of biomass piles: homogeneous samples of dust and pellets // *Fuel*. 2019. Vol. 256. P. 115838. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115838>.

3. Померанцев В. В., Шагалова С. Л., Резник В. А., Кушнарченко В. В. Самовозгорание и взрывы пыли натуральных топлив. Л.: Изд-во «Энергия», 1975. 144 с.

4. Sun Qia, Jiang Lin, Li Mi, Sun Jinhua. Assessment on thermal hazards of reactive chemicals in industry: state of the art and perspectives // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2020. Vol. 78. P. 100832. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2020.100832>.

5. Lin Qi, Wang Shugang, Liang Yuntao, Song Shuanglin, Ren Tingxiang. Analytical prediction of coal spontaneous combustion tendency: velocity range with high possibility of self-ignition // *Fuel Processing Technology*. 2017. Vol. 159. P. 38-47. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.09.027>.

6. Boddington T., Gray P., Harvey D. I. Thermal theory of spontaneous ignition: criticality in bodies of

- arbitrary shape // *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 1971. Vol. 270. No. 1207. P. 467–506. <https://doi.org/10.1098/rsta.1971.0087>.
7. Graham-Eagle J. G., Wake G. C. Theory of thermal explosions with simultaneous parallel reactions. II. The two- and three-dimensional cases and the variational method // *Proceedings of the Royal Society A. Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 1985. Vol. 401. P. 195–202. <https://doi.org/10.1098/rspa.1985.0094>.
8. Li Shuicai, Liao Shi-Jun. An analytic approach to solve multiple solutions of a strongly nonlinear problem // *Applied Mathematics and Computation*. 2005. Vol. 169. Iss. 2. P. 854–865. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2004.09.066>.
9. Дик И. Г., Зурер А. Б. Расчет критических условий теплового взрыва в неоднородной среде методом интегральных соотношений // *Инженерно-физический журнал*. 1980. Т. 38. № 1. С. 95–98.
10. Гонтковская В. Т., Гордополова И. С., Перегудов А. Н. О критических условиях теплового взрыва в распределенных системах с цепными реакциями // *Физика горения и взрыва*. 1987. № 4. С. 64–68.
11. Novozhilov V. Critical conditions for conjugate thermal explosion // *Combustion Theory and Modelling*. 2008. Vol. 12. Iss. 3. P. 433–449. <https://doi.org/10.1080/13647830701750939>.
12. Novozhilov V. Thermal explosion in oscillating ambient conditions // *Scientific Reports*. 2016. Vol. 6. P. 29730. <https://doi.org/10.1038/srep29730>.
13. Merzhanov A. G., Averson A. E. The present state of the thermal ignition theory: an invited review // *Combustion and Flame*. 1971. Vol. 16. Iss. 1. P. 89–124. [https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(71\)80015-9](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(71)80015-9).
14. Merzhanov A. G., Barzykin V. V., Shteinberg A. S., Gontkovskaya V. T. Methodological principles in studying chemical reaction kinetics under conditions of programmed heating // *Thermochimica Acta*. 1977. Vol. 21. Iss. 3. P. 301–322. [https://doi.org/10.1016/0040-6031\(77\)85001-6](https://doi.org/10.1016/0040-6031(77)85001-6).
15. Мержанов А. Г., Озерковская Н. И., Шкадинский К. Г. Динамика теплового взрыва в послеиндукционный период // *Физика горения и взрыва*. 1999. Т. 35. № 6. С. 65–70.
16. Balakrishnan E., Swift A., Wake G. C. Critical values for some non-class A geometries in thermal ignition theory // *Mathematical and Computer Modelling*. 1996. Vol. 24. Iss. 8. P. 1–10. [https://doi.org/10.1016/0895-7177\(96\)00133-1](https://doi.org/10.1016/0895-7177(96)00133-1).
17. Sanchez-Rodriguez D., Farjas J., Roura P. The critical conditions for thermal explosion in a system heated at a constant rate // *Combustion and Flame*. 2017. Vol. 186. P. 211–219. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2017.08.008>.
18. Melguizo-Gavilanes J., Boettcher P. A., Mevel R., Shepherd J. E. Numerical study of the transition between slow reaction and ignition in a cylindrical vessel // *Combustion and Flame*. 2019. Vol. 204. P. 116–136. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2018.12.036>.
19. Zarubin V. S., Kuvyrkin G. N., Savelyeva I. Y. Variational estimates of the parameters of a thermal explosion of a stationary medium in an arbitrary domain // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. Vol. 135. P. 614–619. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.02.009>.
20. Attetkov A. V., Zarubin V. S., Kuvyrkin G. N. Dual variational form of the model of thermal explosion in a quiescent medium with temperature-dependent thermal conductivity // *Russian Journal of Physical Chemistry B*. 2018. Vol. 12. Iss. 1. P. 91–97. <https://doi.org/10.1134/S1990793118010037>.
21. Miura K., Maki T. A Simple method for estimating $f(E)$ and $k_0(E)$ in the distributed activation energy model // *Energy Fuels*. 1998. Vol. 12. Iss. 5. P. 864–869. <https://doi.org/10.1021/ef970212q>.
22. Czajka K., Kisiela A., Moron W., Ferens W., Rybak W. Pyrolysis of solid fuels: thermochemical behaviour, kinetics and compensation effect // *Fuel Processing Technology*. 2016. Vol. 142. P. 42–53. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.09.027>.
23. Li Mi, Jiang Lin, He Jia-Jia, Sun Jin-Hua. Kinetic triplet determination and modified mechanism function construction for thermo-oxidative degradation of waste polyurethane foam using conventional methods and distributed activation energy model method // *Energy*. 2019. Vol. 175. P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.032>.
24. Ma Junfang, Liu Jiaxun, Jiang Xiumin, Shen Jun. An improved parallel reaction model applied to coal pyrolysis // *Fuel Processing Technology*. 2021. Vol. 211. P. 106608. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106608>.
25. Varhegyi G., Bobály B., Jakab E., Chen Honggang. Thermogravimetric study of biomass pyrolysis kinetics. A distributed activation energy model with prediction tests // *Energy Fuels*. 2011. Vol. 25. No. 1. P. 24–32. <https://doi.org/10.1021/ef101079r>.
26. Wagh A. Modelling and simulation of biomass fast pyrolysis process: kinetics, reactor, and condenser systems // *Western Australia School of Mines: Minerals, Energy and Chemical Engineering*. 2019. <http://hdl.handle.net/20.500.11937/82905>.
27. Wichman I. S. On the use of operator-splitting methods for the equations of combustion // *Combustion and Flame*. 1991. Vol. 83. Iss. 3-4. P. 240–252. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(91\)90072-J](https://doi.org/10.1016/0010-2180(91)90072-J).
28. Мержанов А. Г., Зеликман Е. Г., Абрамов В. Г. Вырожденные режимы теплового взрыва // *Доклады Академии наук СССР*. 1968. Т. 180. № 3. С. 639–642.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Igor G. Donskoy,
Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher of the Laboratory
of Thermodynamics,
Melentiev Energy Systems Institute, Siberian
Branch of the Russian Academy of Sciences
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia

Authorship criteria

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

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

Information about the article

The article was submitted 07.07.2022; approved after reviewing 29.08.2022; accepted for publication 02.12.2022.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Донской Игорь Геннадьевич,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник Лаборатории
термодинамики,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130

Критерии авторства

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 07.07.2022; одобрена после рецензирования 29.08.2022; принята к публикации 02.12.2022.



Научная статья

УДК 621.311

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-640-656>

Обеспечение надежного электроснабжения электроприемников потребителей от собственной распределенной генерации: проблемные вопросы и способы их решения

Павел Владимирович Илюшин^{1✉}¹Институт энергетических исследований РАН, г. Москва, Россия¹ilyushin.pv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5183-3040>

Резюме. Цель – представить способы решения проблемных вопросов интеграции объектов распределенной генерации в сети внутреннего электроснабжения потребителей. Отмечено, что суммарная мощность объектов распределенной генерации в России составляет 22–23 ГВт или 9,5–10% от установленной мощности всех генерирующих объектов, из них в составе изолированных энергорайонов – 8,5–9 ГВт, а региональных энергосистем – 13,5–14 ГВт. Представлены подходы, позволяющие обеспечить надежное электроснабжение потребителей от объектов распределенной генерации, в том числе за счет корректного выбора алгоритмов работы и параметров настройки систем автоматического регулирования генерирующих установок. Показано, что в сетях внутреннего электроснабжения потребителей фиксируются значительные отклонения показателей качества электроэнергии, что может приводить к отключению генерирующих установок и электроприемников. Обоснована необходимость использования при выполнении комплексных расчетов режимов верифицированных математических моделей генерирующих установок, а также основных синхронных и асинхронных двигателей, с корректным учетом типов приводимых во вращение механизмов и реальных коэффициентов загрузки. Рассмотрены принципы выбора систем возбуждения генерирующих установок, а также согласования параметров настройки устройств релейной защиты генерирующих установок и других элементов в сети внутреннего электроснабжения потребителей. Даны рекомендации по определению допустимости коммутаций и обеспечению соответствия показателей качества электроэнергии нормативным требованиям в островном (автономном) режиме работы. Обоснована необходимость привлечения к выполнению проектов интеграции объектов распределенной генерации организаций, имеющих соответствующие требованиям программные комплексы, а также специалистов, обладающих опытом проведения комплексных расчетов режимов, учитывая, что объем расчетов больше и сложность их выше, чем при проектировании традиционных электростанций и систем электроснабжения.

Ключевые слова: распределенная генерация, генерирующая установка, надежность электроснабжения, электромеханический переходный процесс, моделирование нагрузки, аварийное возмущение

Для цитирования: Илюшин П. В. Обеспечение надежного электроснабжения электроприемников потребителей от собственной распределенной генерации: проблемные вопросы и способы их решения // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 4. С. 640–656. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-640-656>.

POWER ENGINEERING

Original article

Reliable power supply to power consuming units via isolated distributed generation: problematic issues and approaches to their solution

Pavel V. Ilyushin^{1✉}¹Energy Research Institute of the RAS, Moscow, Russia¹ilyushin.pv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5183-3040>

© Илюшин П. В., 2022

Abstract. The present study considers solutions to problematic issues concerning the integration of distributed generation facilities into the internal power supply network of power consuming units. The possibility of ensuring reliable power supply using verified models of generating plants and power consuming units is analysed along with a description of principles for the selection of control systems for generating plants. Full-scale measurements recording significant deviations in power quality indicators, were carried out. A total capacity of distributed generation facilities operating as a part of isolated energy districts is estimated at 8.5–9 GW. In addition, in the case of operation as a part of power systems, this capacity is equal to 13.5–14 GW. Therefore, the total capacity of these facilities is 22–23 GW or 9.5–10% of the total capacity of all generating facilities in Russia. The necessity of using verified mathematical models of generating plants, as well as main synchronous and asynchronous motors, along with the correct consideration of rotated mechanism types and real load factors, is substantiated. Principles for selecting the excitation systems of generating plants, as well as coordinating parameter settings for relay protection devices in generating plants and other elements in the internal power supply networks of power consuming units are considered. Recommendations regarding the permissibility of commutations and guaranteed correspondence between electric power quality indicators and regulatory requirements in island (autonomous) operating mode are provided. Thus, the need on the part of organizations that have necessary software systems and experience in conducting complex mode calculations to implement projects for integrating distributed generation facilities is substantiated. Here, the volume and complexity of calculations is higher than in the design of standard power plants and power supply systems.

Keywords: distributed generation, generating plant, power supply reliability, electromechanical transient process, load modeling, emergency disturbance

For citation: Ilyushin P. V. Reliable power supply to power consuming units via isolated distributed generation: problematic issues and approaches to their solution. *iPolytech Journal*. 2022;26(4):640-656. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-640-656>.

ВВЕДЕНИЕ

Основным трендом последнего десятилетия в энергетике является ее трансформация на основе принципов декарбонизации, децентрализации и цифровизации через реализацию организационных и технических мероприятий.

Достичь углеродной нейтральности ряд стран планирует к 2035–2050 гг., что подразумевает снижение до нуля выбросов CO₂, в том числе за счет реализации мер по их минимизации и компенсации [1]. Достичь цели возможно при кардинальном преобразовании технологических процессов на базе инновационных разработок в энергетике, промышленности, транспорте и сельском хозяйстве, выделяющих основные объемы CO₂. В энергетике это требует создания инновационных видов энергетического оборудования [2, 3].

В энергетике мира наблюдается устойчивый тренд на снижение объемов использования невозобновляемых энергоресурсов (каменный уголь, торф, нефть, природный газ и др.). Указанные энергоресурсы поэтапно замещаются на возобновляемые источники энергии (ВИЭ), поэтому основные объемы вводов генерирующих мощностей фиксируются в секторах ветровой и солнечной генераций [4, 5].

В ряде стран мира потери на передачу электрической и тепловой энергий превышают 10–15%, что связано с большой

протяженностью линий электропередачи (ЛЭП) и тепловых сетей. Децентрализация генерирующих мощностей и их приближение к потребителям позволяют снизить потери до 1,5–4%, что способствует энергосбережению и минимизации выбросов CO₂ [6, 7].

Децентрализованная генерация позволяет удовлетворять потребности всех категорий потребителей в различных видах энергии (электрическая, тепловая, холодовая) в необходимых объемах и по обоснованным ценам, а также обеспечивать доступное, безопасное и надежное энергоснабжение [8–10].

Интеграция в сети внутреннего электроснабжения потребителя или распределительные сети разнородных объектов распределенной генерации (РГ) на низком и/или среднем напряжении вызывают многообразие электрических режимов, делая эти сети активными. Перетоки мощности в таких сетях могут в течение суток несколько раз изменять свое направление и величину от максимума до минимума, в зависимости от режимов работы объектов РГ и отдельных потребителей.

Под «объектом распределенной генерации» понимается электростанция с одной или несколькими генерирующими установками (ГУ), подключаемая к сетям внутреннего электроснабжения потребителей или распределительным сетям на напряжении до 110 кВ, максимально приближенная к узлам

электропотребления, работающая параллельно с энергосистемой или в островном (автономном – одна ГУ) режиме, имеющая в точке присоединения суммарную установленную мощность до 25 МВт и использующая для производства необходимых видов энергии любые первичные или вторичные энергоресурсы [11].

В настоящее время статистические данные по находящимся в эксплуатации и ежегодно вводимым объектам РГ в России отсутствуют, что не позволяет представить объективную картину. Эксперты оценивают суммарную мощность объектов РГ, которые функционируют в составе изолированных энергорайонов, в 8,5–9 ГВт, а в составе энергосистем в 13,5–14 ГВт. Следовательно, суммарная мощность объектов РГ составляет не менее 22–23 ГВт или 9,5–10% от суммарной мощности всех объектов генерации в России.

Часть электроприемников, присоединенных к указанным сетям, являются особенно ответственными, а поэтому критичными к отклонениям показателей качества электроэнергии (ПКЭЭ) от нормативных значений. Отклонение нескольких ПКЭЭ может приводить к отключениям этих электроприемников электрическими или технологическими защитами с остановом непрерывных производственных процессов, сопровождающихся ущербами от брака и убытками от недоотпуска продукции [12, 13]. Следовательно, вопросам поддержания ПКЭЭ в сетях с объектами РГ следует уделять особенное внимание.

Реализация тренда на цифровизацию энергетики заключается в разработке современных цифровых платформ агрегации распределенных энергоресурсов, создании бизнес-моделей, розничных рынков, автоматизированных торговых площадок, предоставляющих всем участникам новые виды услуг.

При одновременном функционировании в указанных сетях активных потребителей с собственными объектами РГ, управляемой нагрузки и систем накопления электроэнергии (СНЭЭ) обеспечить ручное управление электрическими режимами на основании визуального их распознавания и оценки не представляется возможным [14]. В этих условиях требуется существенное преобразование как распределительных сетей, так и сетей

внутреннего электроснабжения потребителей за счет внедрения современных интеллектуальных систем и устройств управления, защиты и автоматизации.

Учитывая, что в подавляющем большинстве проектов строительства собственных объектов РГ применяются топливные ГУ – газотурбинные установки (ГТУ) и газопоршневые (ГПУ), то основное внимание в статье будет сконцентрировано именно на них.

Целью статьи является рассмотрение отдельных проблемных вопросов, возникающих при проектировании и эксплуатации объектов РГ в сетях внутреннего электроснабжения потребителей или распределительных сетях, а также возможных способов их решения.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ РАЗВИТИЯ СОБСТВЕННОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

Величина капитальных затрат на строительство объекта РГ в значительной мере зависит от его мощности, количества и типа ГУ, варианта исполнения и места размещения. Как показывает опыт строительства и ввода в эксплуатацию объектов РГ, их удельная стоимость на 1 кВт мощности примерно в 2–5 раз меньше затрат на сооружение традиционной тепловой электростанции. Это приводит к тому, что сроки окупаемости объектов РГ не превышают 3–6 лет при потреблении тепловой энергии на протяжении календарного года. Срок строительства объекта РГ от начала выполнения проектных работ и до ввода в работу составляет не более 10–14 месяцев, что существенно меньше, чем у традиционной тепловой электростанции, который составляет не менее 3–5 лет.

По статистическим данным аппаратная надежность различных видов, типов и мощностей ГУ, применяемых на объектах РГ, высокая. Чтобы оценить влияние аппаратной надежности ГУ на баланс электроэнергии, в энергосистеме применяется коэффициент готовности K_r (%), показывающий, какой период времени ГУ способна выполнять свои основные функции. Чтобы оценить влияние аппаратной надежности ГУ на баланс мощности в энергосистеме, применяется показатель – среднее время наработки на отказ T_n (ч), т.е.

время между внезапными отключениями ГУ по различным причинам. Причины могут быть обусловлены как внутренними повреждениями или неисправностями ГУ, так и внешними возмущениями в прилегающей распределительной сети [15].

Проведем анализ показателей аппаратной надежности ГУ с единичной мощностью не более 25 МВт:

- K_r у ГПУ находится в диапазоне 96,0–98,2%, а у ГТУ в диапазоне 93,5–97,1% (современные ГУ имеют большие интервалы между периодическими техническими обслуживаниями, а также более высокие показатели аппаратной надежности);

- с ростом единичной мощности ГПУ их K_r не снижается ниже 97,5%, при этом у ГТУ он снижается на 0,2 %/МВт, что связано со сложностью проведения ремонтных работ не в условиях завода-изготовителя;

- T_n у ГПУ находится в диапазоне 785–3583 ч, а у ГТУ в диапазоне 2220–3605 ч, что связано с большим числом коротких замыканий (КЗ) в сетях 3–35 кВ, с излишними и ложными срабатываниями устройств релейной защиты (РЗ), а также другими незначительными неисправностями);

- T_n растет с увеличением мощности ГПУ и ГТУ, составляя у ГПУ 750 ч/МВт, а у ГТУ – 100 ч/МВт, что связано с совершенством конструкции ГУ большей мощности, а также более благоприятными условиями работы;

- доля внутренних причин отключений ГПУ и ГТУ составляет около 32,5%, а внешних около 67,5%, что обусловлено близкими КЗ в сетях;

- ГПУ и ГПУ отключаются в 5–8 раз чаще и простаивают на 2–7% больше, чем крупноблочные паротурбинные установки и крупные ГТУ, что обусловлено совершенством конструкции ГУ, большим расстоянием до мест аварийных возмущений, применением цифровых устройств РЗ, качественным техническим обслуживанием, а также более ровным суточным графиком загрузки);

- на показатели аппаратной надежности ГУ значительное влияние оказывают условия их работы, что необходимо учитывать при анализе (в более тяжелых условиях работы K_r снижается до 40% от средних значений) [16].

Рассмотрим основные причины строительства потребителями объектов РГ:

- высокие экологические штрафы за сжигание в факеле попутного нефтяного газа на нефтедобывающих предприятиях;

- возможность использования для производства электрической и тепловой энергий вторичных энергоресурсов (биогаз, доменный газ, шахтный метан, конвертерный газ, отходы лесопромышленного комплекса и сельскохозяйственных предприятий) [17];

- возможность проведения технического перевооружения и реконструкции газовых производственных котельных с установкой на них когенерационных (тригенерационных) установок, позволяющих существенно повысить коэффициент использования теплоты топлива;

- необходимость повышения надежности электроснабжения особенно ответственных электроприемников, критичных к глубоким провалам напряжения и отклонениям других ПКЭЭ от нормативных значений;

- невозможность (отсутствие экономической целесообразности) присоединения к распределительным электрическим и тепловым сетям или увеличения мощности присоединения при расширении производства;

- необходимость снижения затрат на энергоснабжение производства в структуре себестоимости для повышения конкурентоспособности производимой продукции (снижение затрат на передачу и распределение электроэнергии по магистральным и распределительным сетям).

Необходимость повышения надежности электроснабжения особенно ответственных электроприемников обусловлена ростом количества системных и локальных аварий с тяжелыми последствиями для потребителей. Это, в свою очередь, обусловлено высокой величиной износа электросетевого оборудования в распределительных электрических сетях, неправильной работой устройств релейной защиты (РЗ) и противоаварийной автоматики (ПА), а также ростом количества ошибок обслуживающего персонала [18, 19].

Успешное выделение сети внутреннего электроснабжения потребителя в островной (автономный) режим с объектом РГ возможно

реализовать за счет применения многопараметрической делительной автоматики (МДА). МДА должна обеспечивать надежное выделение в островной режим при аварийном возмущении или превентивно по параметрам режима, а также балансировку режима по активной и реактивной мощности.

Для сдерживания процесса строительства объектов РГ электросетевыми компаниями предпринимаются шаги по введению платы за резерв сетевых мощностей с целью компенсации расходов на их содержание. Эти действия направлены на восполнение выпадающих доходов в структуре необходимой валовой выручки из-за снижения величины полезного отпуска.

Такой подход может привести к возникновению множества изолированных энергорайонов с большими объемами производства и потребления всех необходимых видов энергии объектов РГ. При использовании на объектах РГ для выработки необходимых видов энергии вторичных энергоресурсов это будет экономически оправдано. Для снижения величины резервов мощности на объектах РГ могут использоваться решения по резервированию изолированных энергорайонов от соседних, расположенных в непосредственной близости.

Наиболее вероятным сценарием развития событий может быть проведение реконструкции сети внутреннего электроснабжения потребителя, с выделением на параллельную работу с ЕЭС России части электроприемников, имеющих резкопеременный суточный график нагрузки. При этом особенно ответственные электроприемники и электроприемники с равномерным графиком нагрузки будут запитываться от изолированной сети внутреннего электроснабжения, функционирующей на основе объекта(-ов) РГ.

В сетях внутреннего электроснабжения потребителя, как правило, имеются электроприемники 1 и 2 категорий надежности, требующие организации питания от двух независимых источников. Известно, что независимыми считаются такие источники, у которых имеются две секции (системы) шин на одной или двух электростанциях или подстанциях, при условии, что каждая из секций (шин) питается от независимого источника и они не связаны

между собой или имеют связь, которая отключается в автоматическом режиме при нарушении нормальной работы одной из секций (систем) шин. Известны решения, когда ГУ одного объекта РГ подключены к разным секциям шин, при этом секционный выключатель нормально отключен, что образует два независимых источника. А в сети внутреннего электроснабжения установлены устройства автоматического ввода резервного питания (АВР) с контролем синхронизма.

Реализация приведенного подхода может привести к еще большему снижению полезного отпуска в электросетевых компаниях и ухудшению их экономических показателей. Международный опыт показывает, что гармоничное сочетание традиционной генерации и объектов РГ, включая генерацию на основе ВИЭ, дает наилучшие технико-экономические результаты.

Важно отметить, что строительство и ввод в эксплуатацию собственного объекта РГ не гарантирует обеспечения надежного электроснабжения электроприемников, так как в ряде случаев, как показывает опыт, приводит к снижению экономической эффективности реализации проекта, относительно плановой, а также к росту числа аварий, величины ущерба и убытков.

РАСЧЕТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ В СЕТЯХ С ОБЪЕКТАМИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

При интеграции в сети внутреннего электроснабжения потребителей объектов РГ состав и технические характеристики электроприемников, особенно синхронных (СД) и асинхронных двигателей (АД), определяют характер и параметры электромеханических переходных процессов (ЭМПП) при возникновении аварийных возмущений. Это обусловлено малыми значениями взаимных электрических сопротивлений между электроприемниками и ГУ, а также сопоставимыми суммарными мощностями СД, АД и ГУ [20].

При выполнении расчетов ЭМПП в магистральных электрических сетях (330 кВ и выше) нагрузка в расчетной модели сети представляется статическими характеристиками (СХН) в виде $P_{\text{нагр}}(U, f)$, $Q_{\text{нагр}}(U, f)$, как

это принято в расчетах установившихся режимов. Это обусловлено большой трудоемкостью создания расчетной модели сети 0,4–220 кВ, а также наличием в ней множества электростанций, устройств компенсации реактивной мощности и другого электросетевого оборудования, существенно ослабляющих и сглаживающих влияние нагрузки на параметры ЭМПП в магистральных электрических сетях. Характер ЭМПП в сетях внутреннего электроснабжения с ГУ объектов РГ и СД (АД) отличается от СХН в незначительной мере, если величины напряжений в узлах сети при возникновении аварийных возмущений не снижаются ниже $U_{кр}$. Это реально при удаленных КЗ, применении в сетях токоограничивающих устройств и/или динамических компенсаторов напряжения.

Однако, если ГУ объектов РГ присоединены к одним шинам с СД и АД или отделены от них одной ступенью трансформации, то применять СХН вместо динамических моделей нагрузки в расчетах ЭМПП при глубоких провалах напряжения недопустимо. Применять упрощенные динамические модели СД и АД и выполнять их эквивалентирование, как правило, допустимо при использовании соответствующих правил [21].

Исторически при проектировании сетей внутреннего электроснабжения расчеты ЭМПП не выполнялись, так как указанные сети были пассивными (не имели в своем составе ГУ). При интеграции в указанные сети объектов РГ выполнение расчетов ЭМПП становится обязательным.

Как правило, при разработке проекта объекта РГ вопрос обеспечения устойчивости ГУ сводится только к анализу нормативных возмущений, при которых устойчивость энергосистемы не должна нарушаться. При анализе сверхнормативных возмущений допускаются нарушения устойчивости. В Методических указаниях по устойчивости энергосистем² приводится перечень нормативных возмущений и величины коэффициентов запаса с уча-

занием режимов работы энергосистем (нормальный, послеаварийный и др.), которые следует учитывать при анализе устойчивости энергосистем.

При проектировании объектов РГ следует помимо нормативных возмущений рассматривать и сверхнормативные, если одной из задач строительства объекта РГ является обеспечение надежности электроснабжения электроприемников. В этом случае разрабатываемые и реализуемые противоаварийные мероприятия должны эффективно снижать отрицательные последствия любых аварийных возмущений.

Составление перечней кратковременных и длительных возмущений (аварийный ремонт, замена оборудования и др.) должно выполняться на основании статистических данных об их среднем количестве за год. Выбор возмущений, подлежащих анализу, производится на основании величин суммарных годовых ущербов и убытков. Общее число кратковременных возмущений в год, как правило, существенно больше длительных, но именно длительные приводят к значительным ущербам и убыткам. Перечень анализируемых аварийных возмущений в каждом проекте объекта РГ будет индивидуальным, так как определяется техническими характеристиками электроприемников, видами применяемых ГУ, допустимыми режимами их работы, а также алгоритмами работы и параметрами настройки устройств РЗ ГУ.

Для упрощения расчетов можно использовать данные о критической длительности нарушений электроснабжения ($\Delta T_{кр}$) для конкретных электроприемников, например СД и АД. Если $\Delta T < \Delta T_{кр}$, то режим работы СД и АД восстанавливается, при котором риска повреждения оборудования и массового брака продукции не возникает. Если $\Delta T > \Delta T_{кр}$, то работа СД и АД нарушается, что приводит к росту величины ущерба. Значение $\Delta T_{кр}$ может быть представлено в виде функции от напряжения в момент КЗ (U_0) – рис. 1.

²Об утверждении требований к обеспечению надежности электроэнергетических систем, надежности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок. Методические указания по устойчивости энергосистем. Приказ № 630 от 03.08.2018 (с изм. 28.12.2020).

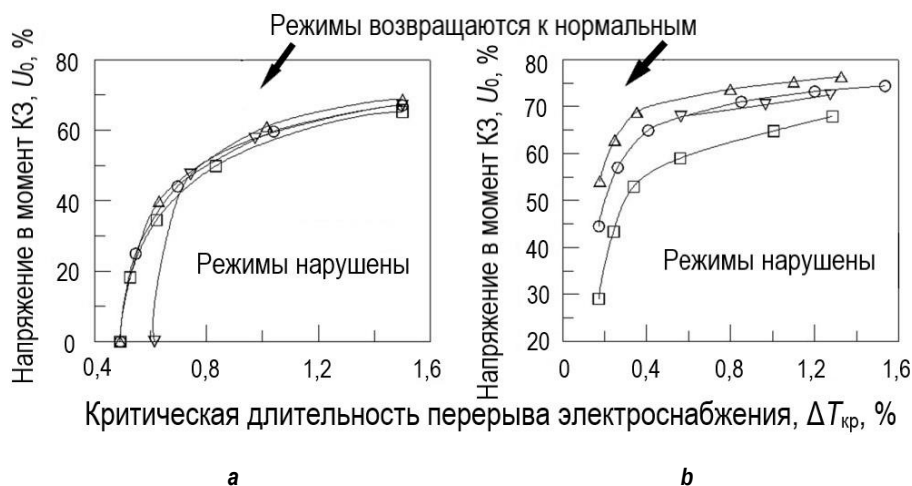


Рис. 1. Графики зависимости $\Delta T_{кр} = f(U_0)$: а – для асинхронных двигателей; б – для синхронных двигателей
Fig. 1. Graphs of $\Delta T_{кр} = f(U_0)$ dependence: а – for induction motors; б – for synchronous motors

Если зависимости $\Delta T_{кр} = f(U_0)$ были определены достаточно точно, то анализ аварийных возмущений будет сводиться к вычислению величин U_0 в начале каждого КЗ, с последующим сравнением с рис. 1 для принятия решения о последствиях данного аварийного возмущения [22].

Выводы о допустимости использования тех или иных видов и типов ГУ, формирование технических требований к ГУ, включая набор противоаварийных мероприятий, следует выполнять на основании результатов расчетов режимов. Для обеспечения обоснованности технических решений требуется, чтобы погрешность расчетов была не более 10%, для чего необходимо:

- использовать верифицированные математические модели ГУ;
- использовать верифицированные математические модели основных электроприемников (СД и АД) с корректным учетом типов приводимых во вращение механизмов и реальных коэффициентов загрузки;
- выполнять гармонический анализ с контролем ПКЭЭ в сети внутреннего электроснабжения потребителя для предотвращения отключений ГУ и особенно ответственных электроприемников.

Опыт выполнения расчетов электрических режимов в сетях с объектами РГ позволил сформировать следующие выводы:

- при интеграции объектов РГ требует выполнения существенно большего объема

расчетов режимов во всех допустимых режимах работы объекта РГ (островной, автономный, параллельный) анализируемых групп аварийных возмущений, а также оценки эффективности противоаварийных мероприятий;

- требуется учет особенностей алгоритмов автоматических регуляторов частоты вращения – АРЧВ ГУ (способы идентификации режима работы ГУ, способы переключения алгоритмов регулирования);

- необходим учет особенностей автоматических регуляторов возбуждения – АРВ ГУ (тип системы возбуждения, наличие модуля согласования нагрузки, наличие форсировки возбуждения, а также величины потолочного возбуждения и скорости его нарастания), что особенно критично в островном (автономном) режиме;

- требуется выполнение расчетов ударных электромагнитных моментов при близких трехфазных КЗ и несинхронных АПВ в прилегающей распределительной сети для контроля сохранения механической прочности ГУ;

- необходимо согласование уставок устройств РЗ ГУ с устройствами РЗ в сети внутреннего электроснабжения и прилегающей распределительной сети для предотвращения их отказов, излишних и ложных срабатываний [23];

- требуется проводить оценку влияния объекта РГ на алгоритмы работы и параметры настройки устройств автоматики энерго-

систем (электросетевой автоматики, противоаварийной автоматики), функционирующие в сети внутреннего электроснабжения и прилегающей распределительной сети;

- требуется разработка эффективных мер по сохранению динамической устойчивости ГУ с малыми механическими постоянными инерции (двухвалыные и трехвалыные ГТУ, микротурбины, ГПУ), самопроизвольной ресинхронизации без отключения, а также предотвращения вторичных нарушений устойчивости ГУ и нагрузки, находящихся вблизи;

- необходимо проведение расчетного анализа возможности обеспечения прямых пусков СД и АД, а также их групп, если это обосновано технологическим процессом, с разным составом включенных ГУ с целью принятия мер по снижению величины пусковых токов;

- необходим анализ допустимости для ГУ больших набросов/сбросов нагрузки, возможных по технологическим причинам, с целью разработки мер по предотвращению отключений ГУ в островном (автономном) режиме.

ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ ИНТЕГРАЦИИ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ И СПОСОБЫ ИХ РЕШЕНИЯ

Большинство рассмотренных в статье проблемных вопросов, которые не были решены при проектировании объекта РГ, проявлялись в процессе его эксплуатации, что приводило к последствиям различной степени тяжести. Отсутствие проявления проблемных вопросов в первые недели и даже месяцы эксплуатации объекта РГ, которые на самом деле существуют, обусловлены тем, что до этого момента не возникало определенных схемно-режимных ситуаций и аварийных возмущений в прилегающей сети.

До последнего времени на объектах РГ в России массово применялись ГУ зарубежных заводов-изготовителей. Эти ГУ обладают определенными особенностями, что приводит к возникновению проблемных вопросов, так как они разработаны на основании технических требований, которые действуют в тех странах, где они сконструированы и/или произведены. Требуется при проектировании объекта РГ уделять значительное внимание

этим особенностям.

Неучет или некорректный учет особенностей ГУ зарубежных заводов-изготовителей может приводить к негативным последствиям:

- повреждения ГУ, требующие проведения дорогостоящих капитальных ремонтов с заменой основных узлов, а также вывод из эксплуатации ГУ без возможности их восстановления;

- излишние отключения ГУ при различных аварийных возмущениях, включая удаленные, в сети внутреннего электроснабжения и прилегающей распределительной сети;

- сокращение интервалов между периодическим техническим обслуживанием (работа в автономном режиме, частые пуски/остановы ГУ, набросы/сбросы нагрузки, некачественное топливо) и капитальными ремонтами;

- снижение показателей экономической эффективности строительства объекта РГ (реализация дополнительных технических мероприятий, увеличение удельного расхода топлива и др.);

- значительные проблемы с обеспечением электроснабжения особенно ответственных электроприемников от объекта РГ.

Причинами возникновения проблемных вопросов на объектах РГ являются:

- некорректный выбор вида, типа и мощности ГУ;

- неправильный учет режимов работы ГУ;

- использование при выполнении расчетов режимов упрощенных математических моделей ГУ, а также некорректный учет электроприемников, включая СД и АД, в нагрузке;

- несогласование алгоритмов работы и параметров настройки устройств РЗ ГУ и другого оборудования в сети внутреннего электроснабжения и прилегающей распределительной сети;

- отсутствие в технических требованиях к ГУ важных пунктов, учитывающих особенности условий эксплуатации ГУ;

- некачественное выполнение проекта интеграции объекта РГ в сети внутреннего электроснабжения потребителя (отсутствие расчетов ЭМПП, гармонического анализа с контролем ПКЭЭ);

- неудовлетворительная эксплуатация ГУ на объекте РГ.

Рассмотрим отдельные проблемные вопросы, которые должны решаться при разработке проекта интеграции объекта РГ.

Использование верифицированных моделей генерирующих установок и электроприемников. Правильность принятия основных технических решений при проектировании интеграции объекта РГ в большой мере зависит от точности результатов расчетов режимов. А это зависит от использования в программных комплексах расчетов режимов верифицированных математических моделей ГУ и основных электроприемников – СД и АД.

В программных комплексах зарубежного производства в библиотеках имеется большое количество верифицированных математических моделей ГУ зарубежных заводов-изготовителей. Разработчики программных комплексов имеют соглашения с заводами-изготовителями ГУ, на основании которых получают указанные модели. Получение верифицированной математической модели ГУ возможно либо на заводе-изготовителе, либо в испытательном центре, так как для этого требуется проведение комплекса натурных испытаний ГУ для фиксации всех необходимых параметров и характеристик. В указанных программных комплексах отсутствуют верифицированные математические модели ГУ российского производства.

В отечественных программных комплексах в библиотеках отсутствуют верифицированные математические модели ГУ зарубежных заводов-изготовителей. Использование имеющихся моделей (по принципу подобия) дает значительные ошибки в результатах расчетов, что обусловлено существенным различием конструкций приводных двигателей ГУ, алгоритмов работы и параметров настройки АРЧВ, АРВ, устройств РЗ и технологических защит у различных заводов-изготовителей. Так как получить самостоятельно верифицированные математические модели достаточно сложно и дорого, то в договор поставки ГУ следует включать требование об их предоставлении заводом-изготовителем.

Рассмотрим влияние ЭМПП в СД и АД на режимы работы ГУ:

– так как при КЗ происходит сброс нагрузки, то ГУ начинают ускоряться, а вероятность не

перейти в асинхронный режим зависит от величины активной нагрузки на ГУ после ликвидации КЗ. При самозапуске СД и АД потребляют большую активную мощность, что повышает динамическую устойчивость ГУ. В случае перехода ГУ в асинхронный режим потребляемая СД и АД активная мощность может способствовать ресинхронизации ГУ. Из-за того, что СД и АД при самозапуске потребляют большие токи по отношению к номинальным, это вызывает снижение напряжения на выводах ГУ и предела динамической устойчивости, что будет препятствовать ресинхронизации ГУ;

– величина потребляемой СД и АД активной и реактивной мощностей в ЭМПП существенно зависит от срабатывания устройств РЗ и технологических защит приводимых во вращение механизмов. Сброс нагрузки при снижении частоты и/или напряжения и ее последующий наброс при нормализации параметров режима в значительной мере влияют на функционирование ГУ;

– необходимо учитывать алгоритмы работы и параметры настройки устройств ПА, установленных на ГУ и в сети, так как их действия ликвидируют токовые перегрузки оборудования и снижения напряжений в узлах.

Корректный учет технических характеристик СД и АД позволяет установить факты нарушений работы особенно ответственных электроприемников до момента ликвидации КЗ, восстановления их нормального функционирования в послеаварийном режиме, а также определить продолжительности самозапусков и повторных пусков СД и АД.

Известны три способа представления смешанной нагрузки в расчетах ЭМПП: в виде СХН, что допустимо при медленных изменениях U и при $U > U_{кр}$ в виде $Z_n = \text{const}$, а также в виде упрощенной модели АД в виде статической асинхронной характеристики. Анализ зависимостей $P_{нагр}(t)$ и $Q_{нагр}(t)$ при КЗ в сети с тремя моделями нагрузки при $Q_{нагр.0} = 0,5P_{нагр.0}$ показывает, что только в третьем случае смешанная нагрузка представляется наиболее корректно.

Упрощенная динамическая модель смешанной нагрузки состоит из статической нагрузки и АД. Обобщенный АД потребляет активную мощность в режиме перед

аварийным возмущением равную $d_{\text{АД}} \cdot P_{\text{нагр.0}}$ ($d_{\text{АД}}$ – доля АД в составе нагрузки), а также реактивную мощность $Q_{\text{АД}}$, вычисляемую по техническим характеристикам АД и величине напряжения U_0 . Активная мощность, потребляемая статической нагрузкой, определяется по выражению:

$$S_{\text{стат}} = P_{\text{нагр.0}} - P_{\text{АД.0}} - P_{\text{СД.0}} + j(Q_{\text{нагр.0}} - Q_{\text{АД.0}} - Q_{\text{СД.0}}),$$

где $P_{\text{СД.0}} = Q_{\text{СД.0}} = 0$.

Рассмотрим принципы эквивалентирования АД:

- получение обобщенного АД с суммарным значением $P_{\text{ном}}$ и средневзвешенными (по $P_{\text{ном.}i}$) значениями максимального (M_{max}) и пускового моментов ($M_{\text{пуск}}$), пускового тока ($I_{\text{пуск}}$), $\text{tg}\varphi_{\text{ном}}$, статическими моментами сопротивления механизмов ($M_{\text{ст}}$), взамен группы отдельных АД, подключенной к одной секции (системе шин);

- получение АД, подключенного напрямую к секции (системе) шин, взамен присоединения через силовой трансформатор, с расчетом величины максимального и пускового моментов, пускового тока и $\text{tg}\varphi_{\text{ном}}$.

Выбор системы возбуждения генерирующих установок. Если ГУ оснащена системой самовозбуждения (ССВ), то питание ее обмотки возбуждения организовано через понижающий трансформатор, который подключен к выводам ГУ. В этом случае величина потолочного возбуждения будет пропорциональна снижению напряжения на выводах ГУ, вплоть до остаточной намагниченности ротора.

При близких КЗ в ССВ происходит существенное снижение тока возбуждения, следовательно, после ликвидации КЗ его величины будет не хватать для восстановления напряжения до номинального значения. При длительных провалах напряжения указанный недостаток ССВ будет определять параметры послеаварийного режима. Если напряжение сильно снижено, то ГУ с ССВ не сможет его повысить до значения близкого к $U_{\text{ном}}$, как показано на рис. 2 а. Расчеты ЭМПП были выполнены для двух режимов функцио-

нирования ГУ – без нагрузки и с нагрузкой, в которой $d_{\text{АД}} = 90\%$ от $S_{\text{ном.ГУ}}$.

Анализ рис. 2 а позволяет выявить существенную разницу между СВ. В случае применения ССВ на ГУ самозапуск всех АД будет невозможен и около 50% из них нужно будет отключить. Применение системы независимого возбуждения (СНВ) дает положительный эффект – ЭМПП будет успешным, хотя и затратным, но отключать нагрузку в этом случае не потребуется, как показано на рис. 2 б. Следовательно, вероятность восстановления нормальной работы нагрузки с большой долей СД и АД при аварийных возмущениях в островном (автономном) режиме работы ГУ с ССВ вероятность является крайне незначительной.

В составе СВ ГПУ некоторые заводы-изготовители применяют модули согласования нагрузки (МСН), роль которых заключается в минимизации глубины снижения частоты, возникающих при больших набросах нагрузки. Применение МСН, снижающего уставку по напряжению в СВ при снижении скорости вращения ГПУ, может не давать эффекта, регулирующий эффект активной мощности нагрузки по напряжению стремится к нулю, что характерно для предприятий с большим количеством СД и АД. Если переключение питания нагрузки осуществляется действием устройств АВР с бестоковой паузой, то условия самозапуска СД и АД при снижении напряжения будут значительно ниже. Снижение напряжения на выводах ГУ действием МСН может быть недопустимым, если это вызывает отключения СД и АД, а также содействует развитию лавины напряжения. Поэтому при заказе ГУ следует на основании расчетов ЭМПП проверять допустимость применения МСН на ГУ, работающих в конкретных схемно-режимных условиях.

Выбор параметров настройки устройств релейной защиты генерирующих установок. До недавнего времени на объектах РГ широкое применение находили ГУ зарубежных заводов-изготовителей. Заводы-изготовители для предотвращения повреждений выбирают такие параметры настройки устройств РЗ ГУ, которые регулярно

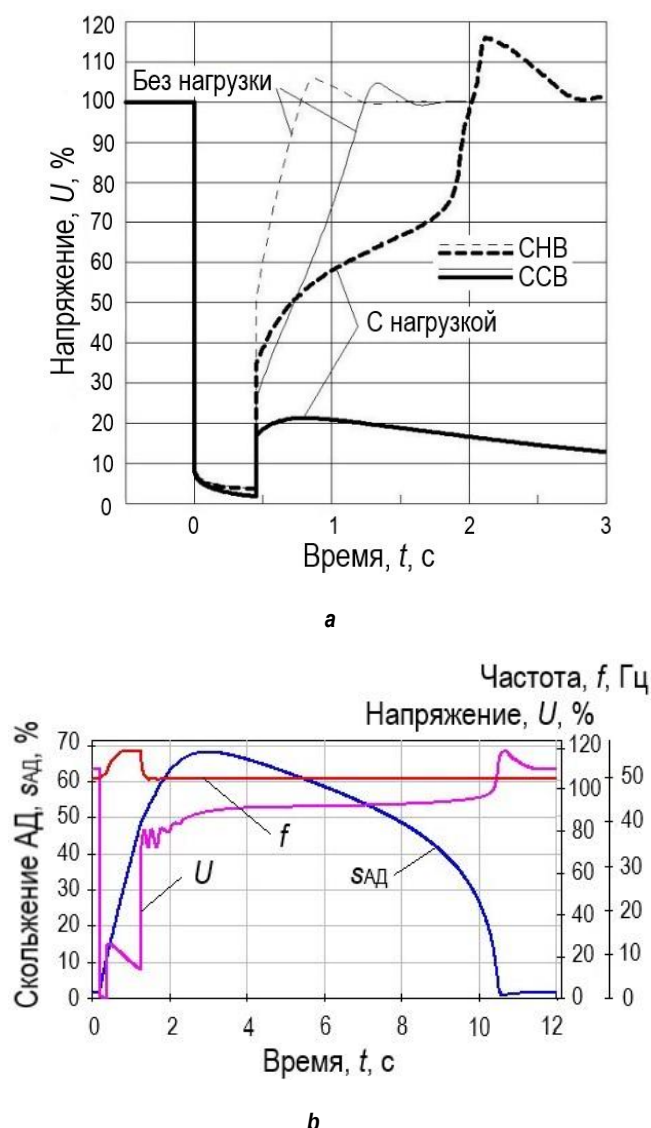


Рис. 2. Графики электромеханических переходных процессов: а – $U = f(t)$ в случае применения генерирующих установок с разными системами возбуждения при трехфазном коротком замыкании в сети; б – при применении на генерирующих установках системы независимого возбуждения

Fig. 2. Graphs of electromechanical transients: а – $U = f(t)$ generating units with different excitation systems with a three-phase short circuit in the network; б – generating units using an independent excitation system

приводят к их излишним отключениям при аварийных возмущениях. Важно отметить, что возмущения, сопровождающиеся кратковременными отклонениями напряжения/частоты, не опасны для ГУ, но из-за отключений ГУ вызывают нарушение электроснабжения СД и АД. Это, в свою очередь, вызывает недопустимые перегрузки электротехнического оборудования.

Выбор параметров настройки устройств РЗ ГУ по снижению напряжения без организации контроля токов статора/ротора недопустимы. Вероятность повреждения обмоток ГУ возникает только в том случае, если величина тока

статора/ротора или длительность перегрузки превышают допустимые значения. Данные величины определяются классом нагревостойкости изоляции обмоток статора/ротора, типом системы охлаждения (непосредственная, косвенная) и видом охлаждающей среды (воздух, вода, водород и др.). В случае превышения током статора заданной величины или длительности должно осуществляться отключение ГУ, а при превышении током ротора должна реализовываться расфорсировка ГУ до номинального возбуждения.

Известны случаи, когда на ГПУ были заданы такие параметры настройки устройства

РЗ, которые приводили к ее отключению при отклонении напряжения выше 110% от $U_{ном}$ и ниже 90% от $U_{ном}$, в также выше 51,5 Гц и ниже 49 Гц с выдержкой времени 0,2 с.

Характер ЭМПП в значительной мере зависит от структуры нагрузки и динамической устойчивости СД и АД. Учитывая это, фактическая длительность провала напряжения в результате трехфазного КЗ будет больше времени ликвидации КЗ на время самозапуска СД и АД; при самозапуске СД и АД, потребляющих повышенные реактивные токи, пока скорости их вращения не возвращаются к нормальным. На рис. 3 приведен пример, из которого видно, что при длительности КЗ – 0,18 с напряжение понижено около 0,5 с, а его величина восстанавливается до 90% от $U_{ном}$ только через 0,34 с, что приводит к отключению ГПУ при уставке по времени устройства РЗ – 0,2 с.

Результаты расчетов ЭМПП показывают, что продолжительность самозапуска СД и АД, как правило, составляет не менее длительности КЗ, если оно ликвидируется устройствами РЗ за время 0,5–1 с. Если КЗ ликвидируется максимально-токовой защитой или резервной защитой с большей выдержкой времени, то самозапуск СД и АД будет либо затяжным, либо неуспешным.

Большие набросы/сбросы нагрузки, возникающие по различным причинам, могут приводить к отключениям ГПУ устройствами РЗ. На рис. 4 показано, что при набросах/сбросах нагрузки с $P_0 = 60\%$ от $P_{ном}$ (на оси q_0 – отношение $Q_{ГПУ}/Q_{сети}$ в исходном режиме). Допустимая величина наброса нагрузки, обусловленная конструкцией ГПУ, $\Delta P = 10\%$ от $P_{ном}$. Максимально допустимая мощность ГПУ после наброса нагрузки составляет 70%, а технологический минимум нагрузки ГПУ составляет $P_{мин} = 30\%$ от $P_{ном}$.

В расчетах ЭМПП величины набросов/сбросов нагрузки $\pm \Delta P$ изменялись, при этом фиксировались срабатывания устройств РЗ. Ограничение **A** (см. рис. 4) соответствует условию $P_0 + \Delta P \leq P_{max}$, **B** – условию $P_0 + \Delta P \geq P_{мин}$. Другие ограничения на рис. 4: **1** – $U < 90\%$ от $U_{ном}$, **2** – $f < 49$ Гц, **3** – $f > 51,5$ Гц. Нормальной работе ГПУ соответствует режимная область между линиями **2** и **3**. Излишние ограничения при сбросах мощности несколько меньше, чем при набросах, поэтому интервал между ограничениями **3** и **B** больше, чем между **2** и **A** (область набросов мощности). При выделении ГУ объекта РГ с нагрузкой в островной режим и некорректной идентификации режима работы ГУ, ГПУ не будут отклю-

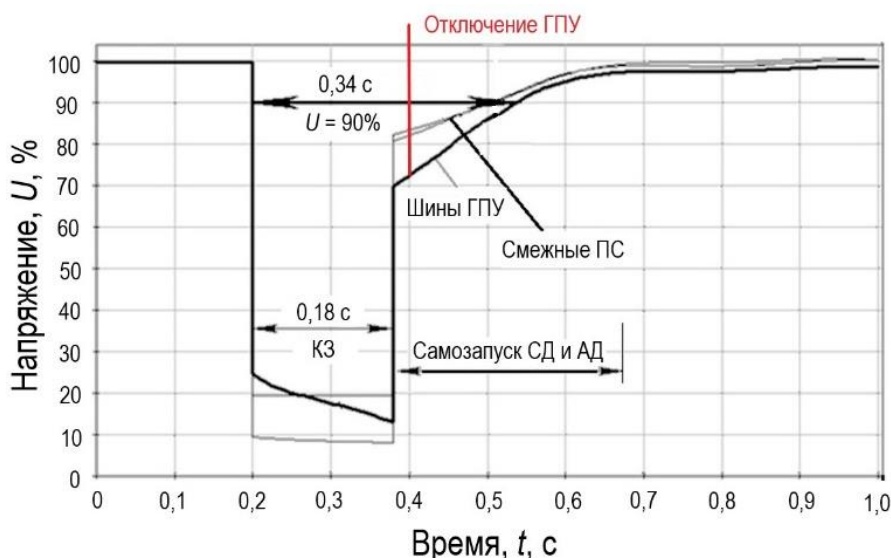


Рис. 3. График электромеханических переходных процессов при трехфазном коротком замыкании вблизи газотурбинных установок и самозапуске синхронных двигателей и асинхронных двигателей

Fig. 3. Graph of electromechanical transients under three-phase short circuit close to gas turbine installations and self-start of synchronous and induction motors

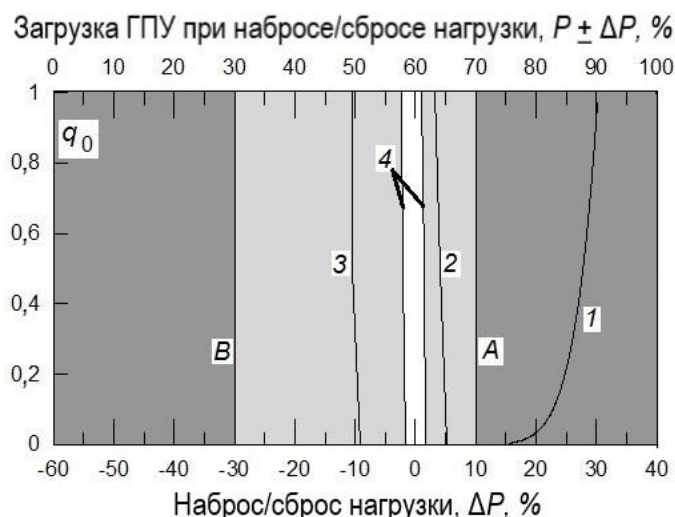


Рис. 4. График допустимых набросов/сбросов нагрузки на газопоршневые установки
Fig. 4. Graph of permissible load surges/discharges on gas reciprocating units

чаться устройствами РЗ только в режимной области 4, т.е. при набросах/сбросах нагрузки, не превышающих $\pm 2\%$ от $P_{ном}$.

Допустимые коммутации в островном режиме работы сети. При работе объекта РГ в островном режиме для электроснабжения электроприемников реальны такие схемно-режимные условия, при которых ГУ, присоединенные к разным секциям распределительного устройства, будут работать несинхронно. Такое возможно в эксплуатации в

случаях, когда в нормальном режиме секционные выключатели в сети внутреннего электроснабжения потребителя отключены с целью координации токов КЗ.

При этом действие устройств АВР, а также другие коммутации (временное включение секционных выключателей при переключениях) в сети внутреннего электроснабжения недопустимы [24]. На рис. 5 а, б показаны недопустимые коммутации, приводящих к несинхронному включению ГУ объекта РГ.

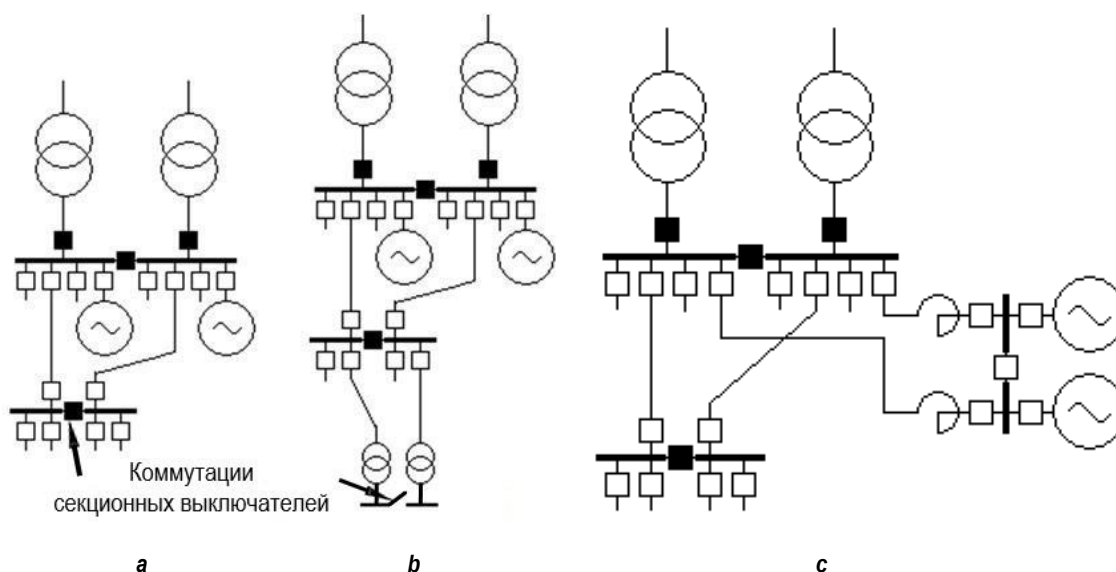


Рис. 5. Упрощенная однолинейная схема сети внутреннего электроснабжения потребителя с объектом распределенной генерации и возможными коммутациями: а – в сети среднего напряжения; б – в сети низкого напряжения; с – при неполном секционировании сети

Fig. 5. Simplified one-line diagram of the internal power supply network of the consumer with the distributed generation facility and possible switching in: a – medium voltage network; b – low voltage network; c – incomplete islanding of the network

В данном случае при выделении объекта РГ в островной режим требуется автоматическое введение блокировки на включение секционных выключателей во всех распределительных пунктах и подстанциях.

Проектом может быть предусмотрено неполное секционирование сети внутреннего электроснабжения. В этом случае секционный выключатель на объекте РГ будет включен в нормальном режиме, а секции шин будут работать параллельно, как показано на рис. 5 с. Реализовывать автоматическое введение блокировок на коммутации в сети в данном случае не потребуется.

Отклонения показателей качества электроэнергии в островном (автономном) режиме работы. В сетях внутреннего электроснабжения потребителей, занятых промышленным производством, функционируют технологические линии зарубежных заводов-изготовителей. Данное оборудование не рассчитано на допустимые в России провалы и прерывания напряжения, а также другие отклонения ПКЭЭ. Технологические линии могут отключаться действием защит при $U = 80\%$ от $U_{ном}$ с выдержкой времени менее 0,1–0,2 с, что приводит к останову производственного цикла, ущербу и убыткам.

В рассматриваемых сетях, как показывают результаты натурных измерений, фиксируются значительные отклонения ПКЭЭ от нормируемых значений. Это связано с внедрением различных устройств силовой электроники, таких как источники бесперебойного питания (ИБП), частотно-регулируемый привод, устройства плавного пуска и др. [25].

В системах бесперебойного электроснабжения потребителей ИБП широко используются для питания особенно ответственных электроприемников, к которым относится серверное оборудование, SCADA-системы, оборудование систем связи и др. Опыт эксплуатации показывает, что выбор мощности ИБП производится с большим запасом по отношению к расчетным электрическим нагрузкам, не менее чем в 2–3,5 раза. При загрузке ИБП на величину не более 30% коэффициент гармонических искажений по току (THDi) в системе бесперебойного электроснабжения будет составлять около 0,45–0,5 о.е.

При значениях THDi возможно возникновение следующих негативных последствий в островном режиме работы:

- если $THDi < 0,1$ – нормальная работа, отсутствуют сбои в работе электрооборудования;

- если $0,1 < THDi < 0,5$ – фиксируются существенные гармонические искажения токов, сопровождающиеся перегревом электрооборудования, требуется выявление источников искажений и принятие мер по снижению негативного влияния;

- если $THDi > 0,5$ – фиксируются значительные гармонические искажения токов, что ведет к отказам электрооборудования, его отключениям технологическими защитами, требуется установка в сети фильтрокомпенсирующих устройств.

Отклонения ПКЭЭ оказывают значительное воздействие на ГУ объектов РГ, вызывая перегрев обмотки ротора, лобовых частей обмоток статора ГУ, что может приводить к их отключениям технологическими защитами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Строительство и ввод в эксплуатацию собственного объекта РГ априори не гарантирует обеспечения надежного электроснабжения особенно ответственных электроприемников потребителей, но может приводить к росту числа аварий, а также величины ущерба и убытков.

Успешное выделение сети внутреннего электроснабжения потребителя в островной (автономный) режим работы с объектом РГ при аварийном возмущении во внешней сети или превентивно по параметрам режима возможно действием многопараметрической делительной автоматики.

При проектировании объекта РГ требуется выполнение комплексных расчетов электрических режимов, включая расчеты электромагнитных переходных процессов, во всех возможных режимах работы объекта РГ, с анализом как нормативных, так и сверхнормативных возмущений.

Объем расчетов электрических режимов при интеграции объекта РГ больше и сложность их выше, чем при проектировании типовых электростанций и систем электро-

снабжения, если требуется обеспечить надежное электроснабжение электроприемников от объекта РГ.

При выполнении расчетов электрических режимов требуется использовать верифицированные математические модели ГУ, а также уделять особенное внимание вопросам моделирования основных электроприемников с учетом допустимых упрощений моделей и принципов эквивалентирования.

Осуществлять закупку ГУ для объектов РГ следует на основании разработанных техни-

ческих требований к ГУ, которые следует формировать на исследовании анализа результатов комплексных расчетов электрических режимов.

Рассмотренные в статье проблемные вопросы должны решаться при выполнении проекта интеграции объекта РГ, поэтому к этой работе следует привлекать организации, имеющие необходимые программные комплексы и обладающие опытом проведения комплексных расчетов режимов.

Список источников

1. Dong Feng, Qin Chang, Zhang Xiaoyun, Zhao Xu, Pan Yuling, Gao Yujin, et al. Towards carbon neutrality: the impact of renewable energy development on carbon emission efficiency // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021;18(24):13284. <https://doi.org/10.3390/ijerph182413284>.
2. Zhang H. Technology innovation, economic growth and carbon emissions in the context of carbon neutrality: evidence from BRICS // *Sustainability*. 2021. Vol. 13. No. 20. 11138. <https://doi.org/10.3390/su132011138>.
3. Lin Juan, Shen Yijuan, Li Xin, Hasnaoui Amir. BRICS carbon neutrality target: measuring the impact of electricity production from renewable energy sources and globalization // *Journal of Environmental Management*. 2021. Vol. 298. P. 113460. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113460>.
4. Xu Jiuping, Liu Tingting. Technological paradigm-based approaches towards challenges and policy shifts for sustainable wind energy development // *Energy Policy*. 2020. Vol. 142. P. 111538. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111538>.
5. Senthil R. Recent innovations in solar energy education and research towards sustainable energy development // *Acta Innovations*. 2022. Vol. 42. P. 27–49. <https://doi.org/10.32933/ActaInnovations.42.3>.
6. Burkov A. F., Mikhannoshin V. V., Van Kha N. Energy losses in electrical networks // *Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering* / eds. A. A. Radionov, V. R. Gasiyarov. Cham: Springer, 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85230-6_45.
7. Syranov D. V., Kovalnogov V. N., Zolotov A. N. Modeling, research and optimization of heat losses during transport in energy systems // *Proceedings of the 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*. 2016. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2016.7911654>.
8. Есяков С. Я., Лукин К. А., Стенников В. А., Воропай Н. И., Редько И. Я., Баринков В. А. Трансформация электроэнергетических систем // *Электроэнергия. Передача и распределение*. 2019. № 4. С. 134–141.
9. Henckens M. L. C. M. The energy transition and energy equity: a compatible combination? // *Sustainability*. 2022. Iss. 14. P. 4781. <https://doi.org/10.3390/su14084781>.
10. Тягунов М. Г. Цифровая трансформация и энергетика // *Энергетическая политика*. 2021. № 9. С. 74–85. [Электронный ресурс]. URL: <https://energypolicy.ru/czifrovaya-transformacziya-i-energetika/energoperehod/2021/17/13/> (15.03.2022).
11. Папков Б. В., Илюшин П. В., Куликов А. Л. Надежность и эффективность современного электроснабжения: монография. Нижний Новгород: Научно-издательский центр «XXI век», 2021. 160 с.
12. Praiselin W. J., Edward J. B. A review on impacts of power quality, control and optimization strategies of integration of renewable energy based microgrid operation // *International Journal of Intelligent Systems and Applications*. 2018. Vol. 10. Iss. 3. P. 67–81. <https://doi.org/10.5815/ijisa.2018.03.08>.
13. Папков Б. В., Шарыгин М. В. Требования к системе обеспечения надежности электроснабжения // *Надежность и безопасность энергетики*. 2014. № 1. С. 53–55.
14. Куликов А. Л., Осокин В. Л., Папков Б. В. Проблемы и особенности распределённой электроэнергетики // *Вестник Нижегородского государственного инженерно-экономического института*. 2018. № 11. С. 123–136.
15. Бык Ф. Л., Мышкина Л. С. Надежность объектов распределенной энергетики // *Надежность и безопасность энергетики*. 2021. Т. 14. № 1. С. 45–51. <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2021-14-1-45-51>.
16. Илюшин П. В., Самойленко В. О. Анализ показателей надежности современных объектов распределенной генерации // *Промышленная энергетика*. 2019. № 1. С. 8–16.
17. Zakharov A. ORC plants application for secondary energy resources recycling in oil and gas sector enterprises // *World petroleum congress 2014: 21st Responsibly energising a growing world, WPC (Moscow, 15–19 June 2014)*. Moscow, 2014. P. 4197–4207.
18. Куликов А. Л., Шарыгин М. В. Применение статистических критериев распознавания режима релейной защиты сетей электроснабжения // *Электротехника*. 2019. № 2. С. 58–64.
19. Илюшин П. В. Выбор управляющих воздействий

противоаварийной автоматики в распределительных сетях для повышения надежности электроснабжения потребителей // Релейная защита и автоматизация. 2013. № 3. С. 74–81.

20. Илюшин П. В. Учет особенностей объектов распределенной генерации при выборе алгоритмов противоаварийного управления в распределительных сетях // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2011. № 4. С. 19–25.

21. Гуревич Ю. Е., Либова Л. Е. Применение математических моделей электрической нагрузки в расчетах устойчивости энергосистем и надежности электроснабжения промышленных предприятий. М.: Изд-во «Элекс-КМ», 2008. 248 с.

22. Гуревич Ю. Е., Кабиков К. В. Особенности электроснабжения, ориентированного на бесперебойную

работу промышленного потребителя. М.: Изд-во «Элекс-КМ», 2005. 408 с.

23. Илюшин П. В. Анализ обоснованности уставок устройств РЗА генерирующих установок с двигателями внутреннего сгорания на объектах распределенной генерации // Релейная защита и автоматизация. 2015. № 3. С. 24–29.

24. Илюшин П. В. О влиянии распределенной генерации на работу устройств автоматического включения резервного питания // Релейная защита и автоматизация. 2017. № 4. С. 28–36.

25. Вагин Г. Я., Юртаев С. Н. К вопросу о нормировании несинусоидальности напряжения и ущербах от высших гармоник // Промышленная энергетика. 2017. № 1. С. 43–47.

References

1. Dong Feng, Qin Chang, Zhang Xiaoyun, Zhao Xu, Pan Yuling, Gao Yujin, et al. Towards carbon neutrality: the impact of renewable energy development on carbon emission efficiency // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021;18(24):13284. <https://doi.org/10.3390/ijerph182413284>.

2. Zhang H. Technology innovation, economic growth and carbon emissions in the context of carbon neutrality: evidence from BRICS. *Sustainability*. 2021;13(20):11138. <https://doi.org/10.3390/su132011138>.

3. Lin Juan, Shen Yijuan, Li Xin, Hasnaoui Amir. BRICS carbon neutrality target: measuring the impact of electricity production from renewable energy sources and globalization. *Journal of Environmental Management*. 2021;298:113460. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113460>.

4. Xu Jiuping, Liu Tingting. Technological paradigm-based approaches towards challenges and policy shifts for sustainable wind energy development. *Energy Policy*. 2020;142:111538. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111538>.

5. Senthil R. Recent innovations in solar energy education and research towards sustainable energy development. *Acta Innovations*. 2022;42:27-49. <https://doi.org/10.32933/ActaInnovations.42.3>.

6. Burkov A. F., Mikhannoshin V. V., Van Kha N. Energy losses in electrical networks. In: Radionov A. A., Gasiyarov V. R. (eds.). *Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham: Springer; 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85230-6_45.

7. Syranov D. V., Kovalnogov V. N., Zolotov A. N. Modeling, research and optimization of heat losses during transport in energy systems. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*. 2016. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2016.7911654>.

8. Esyakov S. Ya., Lunin K. A., Stennikov V. A., Voropaj N. I., Red'ko I. Ya., Barinov V. A. Transformation of electric power systems. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie = Electric power. Transmission and Distribution*. 2019;4:134-141.

9. Henckens M. L. C. M. The energy transition and energy equity: a compatible combination? *Sustainability*. 2022;14:4781. <https://doi.org/10.3390/su14084781>.

10. Tyagunov M. G. Digital transformation and energy. *Energeticheskaya politika*. 2021;9:74-85. Available from: <https://energypolicy.ru/czifrovaya-transformatsiya-i-energetika/energoperehod/2021/17/13/> [Accessed 15th March 2022]. (In Russ.).

11. Papkov B. V., Ilyushin P. V., Kulikov A. L. *Reliability and efficiency of modern power supply*. Nizhnij Novgorod: XXI vek; 2021, 160 p. (In Russ.).

12. Praiselin W. J., Edward J. B. A review on impacts of power quality, control and optimization strategies of integration of renewable energy based microgrid operation. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*. 2018;10(3):67-81. <https://doi.org/10.5815/ijisa.2018.03.08>.

13. Papkov B. V., Sharygin M. V. Requirements for the power supply reliability provision system. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki*. 2014;1:53-55. (In Russ.).

14. Kulikov A. L., Osokin V. L., Papkov B. V. The problems and peculiarities of distributed electricity. *Vestnik Nizhegorodskogo gosudarstvennogo inzhenerno-ekonomicheskogo instituta = Bulletin NGIEI*. 2018;11:123-136. (In Russ.).

15. Byk F., Myshkina L. Reliability of distributed energy facilities. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry*. 2021;14(1):45-51. (In Russ.). <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2021-14-1-45-51>.

16. Ilyushin P. V., Samoylenko V. O. Analysis of reliability indicators of modern distributed generation facilities. *Promyshlennaya energetika*. 2019;1:8-16. (In Russ.).

17. Zakharov A. ORC plants application for secondary energy resources recycling in oil and gas sector enterprises. In: *World petroleum congress 2014: 21st Responsibly energising a growing world, WPC 15–19 June 2014, Moscow*. Moscow; 2014, p. 4197-4207. (In Russ.).

18. Kulikov A. L., Sharygin M. V. Using of statistical criteria for recognition of regimes of relay protection of power supply systems. *Elektrotehnika = Electrical Engineering*. 2019;2:58-64. (In Russ.).

19. Ilyushin P. V. The choice of automated emergency

controls in distribution networks to improve reliability of consumer power supply. *Relejnaya zashchita i avtomatizaciya*. 2013;3:74-81. (In Russ.).

20. Ilyushin P. V. Summary of special features of dispersed generation units and their impact on distribution network operating modes. *Elektro. Elektrotehnika, elektro-energetika, elektrotehnicheskaya promyshlennost' = Elektro. Electrical Engineering, Electrical Power Engineering, Electrical Industry*. 2011;4:19-25. (In Russ.).

21. Gurevich Yu. E., Libova L. E. Application of mathematical models of electric load in calculations of industrial enterprise power system stability and power supply reliability. Moscow: Eleks-KM; 2008, 248 p. (In Russ.).

22. Gurevich Yu. E., Kabikov K. V. Features of power supply designed for uninterrupted operation of industrial consumer. Moscow: Eleks-KM; 2005, 408 p. (In Russ.).

23. Ilyushin P. V. Justification study of protective relay's settings of generating units with internal combustion engines in distributed generation objects. *Relejnaya zashchita i avtomatizaciya*. 2015;3:24-29. (In Russ.).

24. Ilyushin P. V. Impact of distributed generation on automatic load transfer devices operation. *Relejnaya zashchita i avtomatizaciya*. 2017;4:28-36. (In Russ.).

25. Vagin G. Ya., Yurtaev S. N. To the rationing of voltage nonsinusoidality and detriment attributed to higher harmonics. *Promyshlennaya energetika*. 2017;1:43-47. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Илюшин Павел Владимирович,
доктор технических наук,
руководитель Центра интеллектуальных
электроэнергетических систем и
распределенной энергетики,
Институт энергетических исследований РАН,
117186, г. Москва, ул. Нагорная, 31/2, Россия

Критерии авторства

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 07.11.2022; одобрена после рецензирования 29.11.2022; принята к публикации 22.12.2022.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Pavel V. Ilyushin,
Dr. Sci. (Eng.)
Head of the Center for Intelligent
Power Systems and
Distributed Energy,
Energy Research Institute of the Russian Academy
of Sciences,
31/2, Nagornaya St., Moscow 117186, Russia

Authorship criteria

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

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

Information about the article

The article was submitted 07.11.2022; approved after reviewing 29.11.2022; accepted for publication 22.12.2022.



Научная статья

УДК 620.91(571.53) «312/313»

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-657-668>

Уголь в топливно-энергетическом балансе Республики Саха (Якутия)

Никита Владимирович Павлов^{1✉}, Людмила Николаевна Такайшвили²,
Альбина Егоровна Иванова³

^{1,3}Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН

²Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Россия

¹pavlov_nv@iptpn.ysn.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3936-9158>

²luci@isem.irk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1269-898X>

³aeiva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5748-0290>

Резюме. Цель – оценка роли угля в топливно-энергетическом балансе Республики Саха (Якутия) с учетом наличия значительных запасов угля, в том числе низкокачественных и местных углей в труднодоступных районах. Исследования проведены с применением методов системного анализа. Для оценки роли угля в топливно-энергетическом балансе рассматривались динамика добычи и потребления топливно-энергетических ресурсов в ретроспективе и прогнозные показатели. Прогнозные показатели получены в результате анализа программных документов, доступных ресурсов добычи угля и расчетов авторов. Выполнен анализ структуры производства и потребления топливно-энергетических ресурсов Республики Саха (Якутия). Показано, что для выработки электроэнергии и тепла уголь является одним из основных ресурсов наряду с газом и гидроресурсами. Его доля в потреблении первичных топливно-энергетических ресурсов в 2020 г. составила 34,6%. По результатам расчетов добыча угля республики в перспективе может составить до 43 млн т, что позволит в будущем стабилизировать экспортные поставки угля и потребность в топливе на электростанциях и котельных в республике и в ближайших регионах. Проекты развития угольной энергетики в республике рассчитаны на потребление каменных углей Южно-Якутского угольного бассейна. В оптимальных прогнозных балансах доля угля не претерпит существенных изменений и может составить от 37,8 до 38,7% к 2035 г. Установлено, что потенциальные возможности потребления угля могут возрасти с 3,5 млн т у.т. в 2020 г. до 4,1–4,8 млн т у.т. в год. Возможности добычи значительно превышают их востребованность как в настоящее время, так и в будущем. Системный анализ полученных результатов позволил определить основные факторы, влияющие на потребление угля в долгосрочной перспективе. Уголь разрабатываемых месторождений Южно-Якутского бассейна является надежным ресурсом топливоснабжения в дальнейшем районах в зоне централизованного энергоснабжения. В районах Республики Саха (Якутия) со слабо развитой инфраструктурой и малой плотностью населения уголь местных месторождений является альтернативой завозному топливу, если разработка этих месторождений экономически и социально оправдана.

Ключевые слова: топливно-энергетический баланс, угольная промышленность, потребление, добыча, прогноз

Благодарности: Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0004) и проекта государственного задания (№ FWRS-2021-0014).

Для цитирования: Павлов Н. В., Такайшвили Л. Н., Иванова А. Е. Уголь в топливно-энергетическом балансе Республики Саха (Якутия) // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 4. С. 657–668. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-657-668>.

Coal in energy balance of the Republic of Sakha (Yakutia)

Nikita V. Pavlov^{1✉}, Lyudmila N. Takaishvili², Albina E. Ivanova³

^{1,3}Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North SB RAS,

²Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia

¹pavlov_nv@iptpn.ysn.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3936-9158>

²luci@isem.irk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1269-898X>

³aeiva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5748-0290>

Abstract. In the article, the role of coal in the energy balance of the Republic of Sakha (Yakutia) is assessed by factoring in significant coal reserves, including low-quality and local coal in hard-to-reach areas. The research was carried out using system analysis methods. To this end, the retrospective dynamics of production and consumption of fuel and energy resources in retrospect and estimates were considered. The estimates were obtained by analysing reference documents, available resources for coal mining and the calculations performed by the authors. The production and consumption of fuel and energy resources of the Republic of Sakha (Yakutia) were analysed. It was shown that coal comprises one of the main resources for power and heat generation, along with gas and water resources. Its share in the consumption of primary fuel and energy resources in 2020 amounted to 34.6%. According to the calculation results, the coal production in the Republic in the future may reach 43 million tons, which will lead to the stabilisation of the export supply of coal and the demand for fuel at power plants and boiler houses in the Republic and neighbouring regions. Projects for developing the coal-fired power industry in the Republic rely on the consumption of coal from the South Yakut coal basin. In the optimal forecast balances, the share of coal generally remaining unchanged may range from 37.8 to 38.7% by 2035. It was established that the potential for coal consumption may increase from 3.5 million tons of coal, equivalent in 2020 to 4.1–4.8 million tons of coal equivalent per year. Mining opportunities significantly exceed their demand, both at present and in the future. A system analysis of the obtained results allowed the main factors affecting coal consumption in the long term to be identified. Coal mined in the South Yakut basin comprises a reliable fuel source in the zone of centralised energy supply in the future. In areas of the Republic of Sakha (Yakutia) having underdeveloped infrastructure and low population density, coal from local deposits becomes an alternative to imported fuel if their development is economically and socially justified.

Keywords: fuel and energy balance, coal industry, consumption, production, forecast

Acknowledgements: The work was carried out under the draft state assignment no. FWEU-2021-0004 and the draft state assignment no. FWRS-2021-0014.

For citation: Pavlov N. V., Takaishvili L. N., Ivanova A. E. Coal in energy balance of the Republic of Sakha (Yakutia). *iPolytech Journal*. 2022;26(4):657-668. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-657-668>.

ВВЕДЕНИЕ

Республика Саха (Якутия) является самым крупным по площади субъектом Российской Федерации и входит в состав Дальневосточного федерального округа. Особенностью территориального расположения республики является наличие значительных площадей со слабо развитой транспортной и энергетической инфраструктурой, в том числе отнесенных к территориям Арктической зоны Российской Федерации [1]. Площадь Арктической зоны составляет 1608,8 тыс. км² (52,2% территории республики). К Арктической зоне относится 52,2% территории республики. Там проживает всего 7,3% от численности населения, при плотности населения 0,04 чел/км². Особенности топливно-энергетического баланса (ТЭБ) республики обусловлены наличием зон

централизованного и децентрализованного энергоснабжения. В зоне централизованного энергоснабжения, составляющей 36% от территории, проживает 85% населения. На зону децентрализованного электроснабжения приходится, соответственно, 64% территории с 15% населения республики, основной проблемой топливоснабжения которой является сложная транспортная доступность из-за удаленности населенных пунктов. Основные виды топлива в этой зоне: привозной уголь, газоконденсат, сырая нефть, дизельное топливо.

Республика обладает значительными запасами энергоресурсов: угля, нефти, газа и гидроресурсов. Их использование находит отражение в ТЭБ республики. Тем не менее, основными ресурсами для выработки электроэнергии в республике являются уголь, газ,

гидроресурсы и дизтопливо, а теплоэнергии – уголь, газ, сырая нефть, газоконденсат. В потреблении первичных энергоресурсов доля угля в ретроспективе составляла от 60 до 80%⁴. Оценка роли и места углей Республики Саха (Якутия) в топливно-энергетическом балансе в Республике Саха (Якутия) важна, поскольку уголь является одним из основных видов топлива на электростанциях республики.

Исследование роли угля в ТЭБ республики на перспективу является актуальным в силу ряда причин. Наличие значительных ресурсов высококачественного угля, в том числе коксующегося, востребованного на мировом и российском рынках, предполагает развитие переработки угля. Продукты переработки в виде коксового и энергетического концентратов в настоящее время поставляются на экспорт и в коксохимические заводы России. В будущем спрос на них будет увеличиваться. Низкосортные продукты переработки должны использоваться для нужд энергетики, в основном в пределах республики. Невостребованность таких продуктов для нужд энергетики может сдерживать развитие угольной промышленности. Что касается территорий со слаборазвитой инфраструктурой, северных и арктической зоны, при наличии там даже мелких месторождений угля, уголь может быть основным, надежным энергоресурсом и составить конкуренцию другим

привозным энергоресурсам.

Курс на декарбонизацию экономики многими странами мира, в том числе России, стал в последние годы весьма актуальным направлением [2, 3]. Среди планирующих сокращение угольной генерации стран находятся в том числе и страны-импортеры Якутского угля.

Учитывая наличие значительных запасов угля на территории республики, в том числе в труднодоступных районах, представляется актуальным исследование роли угля в обеспечении топливом потребностей экономики Республики Саха (Якутия) на перспективу, отраженных в ряде официальных документов^{5,6}.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проведены с применением методов системного анализа: анализ и синтез, формализация и конкретизация, структурирование и реструктурирование, классификация [4–7]. В исследованиях использованы справочная литература по запасам углей Дальневосточного федерального округа⁷ и прогнозным ресурсам твердых и твердых горючих (уголь) полезных ископаемых Российской Федерации^{8,9}, официальные статистические данные по угольной промышленности и другим топливным отраслям, а также официальные программные документы^{10,11} и

⁴Статистические сборники и бюллетени по основным показателям деятельности организаций ТЭК Республики Саха (Якутия). Якутск, 2008–2020. [Электронный ресурс]. URL: <https://sakha.gks.ru/> (29.03.2022).

⁵ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СТРАТЕГИЯ Российской Федерации на период до 2035 года [Электронный ресурс]. URL: <http://static.government.ru/media/files/w4sigFOiDjGVDYT4lgsApssm6mZRb7wx.pdf>

⁶Проект Стратегии долгосрочного развития России с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года (далее — проект низкоуглеродной стратегии до 2050 года) [Электронный ресурс]. URL: https://www.economy.gov.ru/material/file/babacbb75d32d90e28d3298582d13a75/proekt_strategii.pdf

⁷Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации на 1 января 2019 года. Вып. 91, Уголь, Том VIII, Дальневосточный федеральный округ. М.: Министерство Природных Ресурсов и Экологии Российской Федерации, Федеральное агентство по недропользованию, Российский Федеральный геологический фонд, 2019. 412 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://rfgf.ru/info-resursy/raboty-po-izucheniyu-nedr> (26.05.2021).

⁸Прогнозные ресурсы твердых и твердых горючих (уголь) полезных ископаемых Российской Федерации на 1 января 2019 года. М.: Министерство Природных Ресурсов и Экологии Российской Федерации, Федеральное агентство по недропользованию, Российский Федеральный геологический фонд, 2019. 80 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://rfgf.ru/info-resursy/raboty-po-izucheniyu-nedr> (26.05.2021).

⁹Статистические и аналитические информационные материалы по основным показателям производственной деятельности организаций угольной отрасли России. М.: ЦДУ ТЭК, 2000–2020. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.cdu.ru> (20.12.2021).

¹⁰Сценарные условия развития электроэнергетики России на период до 2030 года [Электронный ресурс]. URL: https://atompool.ru/images/data/gallery/1_8337__usloviya_elektroenergetiki_na_period_do_2030_goda.pdf (02.08.2020).

¹¹Федеральная целевая программа «экономическое и социальное развитие Дальнего Востока и Байкальского региона на период до 2025 года» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.primorsky.ru/authorities/executive-agencies/departments/economics/program-social-economic-development-of-the-far-east-and-the-baikal-region-for-the-period-till-2025.php> (6.05.2021)

Программа развития угольной промышленности России на период до 2035 года¹².

БАЛАНСОВЫЕ ЗАПАСЫ УГЛЯ

По балансовым запасам углей и их качественным характеристикам республика относится к основным субъектам Российской Федерации. В республике расположены крупнейшие угольные бассейны России: каменно-угольные Южно-Якутский и Зырянский, преимущественно бурого угольного Ленский, восточная часть Тунгусского бассейна и отдельные месторождения в северо-восточном и северном регионах Якутии.

В разведанных балансовых запасах категорий А+В+С₁+С₂ доля коксующихся углей, представленных большей частью особо ценными марками, велика и составляет 47%. Энергетические угли в балансовых запасах представлены бурыми углями – 79% от объемов запасов и каменными – 21%, соответственно [5] (табл. 1).

Прогнозные ресурсы республики 923,8 млрд т составляют 23,5% от прогнозных ресурсов Российской Федерации и 79,6% Дальневосточного федерального округа [8]. Изученность запасов угля характеризует отношение балансовых запасов угля к ресурсам угля, которое для республики равно 1,1%. Наиболее изучены запасы угля в Южно-Якутском бассейне, где это отношение составляет 19,2%, в то время как для Ленского бассейна и прочих – менее 1%.

Доля Южно-Якутского бассейна в балансовых запасах республики составляет 51%, для открытой добычи пригодны около 40% от запасов, при этом бассейн является наиболее перспективным для развития угледобычи.

Перспективы развития добычи углей связаны с вовлечением в угледобычу подготовленных к разработке месторождений и освоением пока не освоенных прогнозных ресурсов. Основная часть балансовых запасов Южно-Якутского бассейна на территории с развитой инфраструктурой. Это позволяет достигнуть

высокой концентрации добычи и с относительно высокой эффективностью их освоения.

В районах с неразвитой транспортной и социальной инфраструктурой расположены отдельные месторождения Ленского, Зырянского и Тунгусского бассейнов, а также некоторые месторождения вне пределов угольных бассейнов, их можно отнести к местным углям (табл. 2). Основной особенностью месторождений местных углей является отсутствие транспортных коммуникаций и малая изученность. Марочный состав месторождений местных углей разнообразный – от бурого до высококачественного каменного.

Таблица 1. Балансовые запасы Республики Саха (Якутия) по направлениям использования и способу отработки, млрд т

Table 1. Balance reserves of the Republic of Sakha (Yakutia) by uses and mining method, billion tons

Вид угля, способ отработки	Категория запасов		
	А+В+С ₁	С ₂	А+В+С ₁ +С ₂
Всего, в том числе	9,7	4,6	14,3
Коксующийся	4,1	2,6	6,7
Энергетический	5,6	2	7,6
Бурый	4,5	1,6	6,0
Каменный	1,1	0,4	1,6
Для открытой разработки	6,5	2,1	8,5
Коксующийся	1,4	0,3	1,8
Энергетический	5,0	1,8	6,7
Бурый	4,4	1,6	6,0
Каменный	0,6	0,2	0,7

Примечание. Рассчитано по данным [5].

Таблица 2. Балансовые запасы местного угля Республики Саха (Якутия) по видам, млрд т

Table 2. Balance reserves of coal in the Sakha Republic (Yakutia) by the coal types, billion tons

Вид угля	Категория запасов		
	А+В+С ₁	С ₂	А+В+С ₁ +С ₂
Бурый	0,6	0,9	1,4
Каменный	1,0	1,0	2,0
Всего местные	1,6	1,9	3,4

Примечание. Рассчитано по данным [5].

¹²Программа развития угольной промышленности России на период до 2035 г. Утв. распоря. № 1582-р Правительства Российской Федерации от 13.06.2020.

Ограничения для развития угледобычи обусловлены не только климатическими факторами (продолжительная зима, резкие колебания температур и т.п.), но непосредственно характеристиками месторождений угля, такими как:

- сложные горно-геологические и гидрологические условия [9];
- наличие вечной мерзлоты на всей территории республики и наличие в последнее время процессов, связанных с таянием вечной мерзлоты;
- высокая вероятность необратимости негативного воздействия на окружающую среду, связанная с достаточно длинным периодом восстановления природы в северных районах [10];
- слаборазвитая или отсутствующая транспортная инфраструктура в районе перспективных месторождений.

ПРОИЗВОДСТВО И ПОТРЕБЛЕНИЕ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ В РЕСПУБЛИКЕ САХА (ЯКУТИЯ)

На территории Республики Саха (Якутия), как и в остальной части Сибири и Дальнего Востока, находятся крупные месторождения топливно-энергетических ресурсов (ТЭР). В связи со спросом на энергетические ресурсы

в странах АТР, импортирующих российские ТЭР, в республике неуклонно увеличивается их добыча. За период с 2008 г. по 2020 г. добыча ТЭР увеличилась в 3,2 раза. Добыча угля выросла в 1,3 раза, природного газа – в 3,9 раза, нефти и газоконденсата – в 20 раз (табл. 3). Возросла обеспеченность электроэнергией и теплоэнергией. В структуре выработки электроэнергии наибольшую долю занимают ТЭС (70,3%). Общий рост выработки электроэнергии произошел за счет газовой (доля изменилась с 28,6% до 36,6% в общей выработке электроэнергии) и угольной генерации (с 32,5% до 33,7%). Происходит кратный рост выработки электроэнергии за счет ввода в эксплуатацию возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Обеспеченность теплоэнергией возросла за счет котельных угольных, газовых и дизельных.

Доля республики в общероссийской добыче энергоресурсов возросла и в 2020 г. составила: по добыче нефти – 3,2%, угля – 4,1%, природного газа – 1%, по производству электроэнергии – 0,9%.

Районы Республики Саха (Якутия) по основным рынкам сбыта и критериям транспортной доступности условно разделяются на две группы: северную и южную [11].

Таблица 3. Динамика производства топливно-энергетических ресурсов в Республике Саха (Якутия)
Table 3. Production dynamics of fuel and energy resources in the Republic of Sakha (Yakutia)

Топливо-энергетический ресурс	Год			
	2008	2010	2015	2020
Уголь, млн т	12,4	11,1	15,3	16,3
Нефть и газовый конденсат, млн т	0,8	3,5	9,6	16,2
Газ природный, млрд м³	1,8	1,9	2,0	7,0
Газ попутный, млрд м³	0,2	0,5	0,8	1,1
Электроэнергия, млрд кВт·ч, в том числе:	7,7	7,3	9,0	10,1
– ГЭС, млрд кВт·ч	3,0	2,7	3,0	3,0
– ТЭС, млрд кВт·ч	4,7	4,6	6,0	7,1
– в т.ч. ДЭС, млрд кВт·ч	0,4	0,5	0,6	0,9
– ВИЭ, млн кВт·ч	0,1	0,0	0,2	3,0
Тепловая энергия, млн ГДж, в том числе:	59,9	60,7	59,4	64,1
– котельные	39,8	39,4	38,5	43,5
– ТЭС	18,4	18,8	19,3	18,8
– прочие	1,7	2,5	1,7	1,7

Примечания. Рассчитано по данным [2], оценки авторов.

Прочие – электробойлерные и теплоутилизационные установки.

Южные районы республики (Алданский и Нерюнгринский районы) имеют хорошо развитую энергетическую и транспортную инфраструктуру и более высокую плотность населения: от 0,26 чел/км² до 0,76 чел/км². Здесь добывается около 95% углей от всего добываемого объема угля в республике [2]. Угледобывающие предприятия южных регионов являются градообразующими и имеют большую социальную значимость. Стабильная добыча угля происходит на действующих предприятиях Южно-Якутского угольного бассейна и за счет реализации инвестиционных проектов ООО УК «Колмар», ООО «Эльгауголь».

На угледобывающих предприятиях северной группы ведется добыча энергетических, так называемых Якутских углей. Они используются для нужд жилищно-коммунального хозяйства. Основной объем поставок этих углей приходится на короткий навигационный период, соответственно, добыча угля носит сезонный характер.

В республике уголь является традиционным энергоресурсом для электростанций и котельных. Потребляются, преимущественно, угли месторождений Южно-Якутского бассейна, порядка 70% от объемов потребления. В структуре потребления котельно-печного топлива республики доля угля в 2020 г. составила 51,0%, газа природного и попутного – 41,1%, прочих – 7,9%. В качестве сравнения: в среднем по России доля угля составляет около 15%, а газа 20%. В последние годы потребление угля в республике имеет тенденцию к снижению, за счет увеличения доли природного газа, в который включено

потребление на топливные и нетопливные нужды (ежегодно около 0,9 млн т у.т.) (табл. 4).

Основными потребителями угля в республике являются объекты энергетики. На электростанциях Южной Якутии и соседних регионов потребляются чаще всего низкосортные продукты переработки высококачественных коксующихся и энергетических углей и рядовые каменные угли Нерюнгринского, Денисовского и Чульмаканского месторождений. Основной объем потребления угля приходится на Нерюнгринскую ГРЭС. В северных и арктических регионах – бурые и каменные угли в рядовом виде. Депутатская ТЭЦ в арктической зоне потребляет уголь с Бейского месторождения Республики Хакасия. На котельных республики используются как каменные угли, так и бурые, в том числе месторождений местных углей, а также привозные угли из Магаданской области аркагалинского месторождения, а также Минусинского угольного бассейна Республики Хакасия. Из месторождений местных углей для энергетического использования разрабатываются месторождения каменных углей Надеждинское, Джебарики-Хайское, Харбалахское и бурых углей: Кангаласское, Кировское и Кемпендяйское. Котельные используют природный газ, дизельное топливо, нефть и электроэнергию.

Южно-Якутские угли потребляются и на энергетических объектах Приморского и Хабаровского краев, где уголь является замыкающим топливом в балансе котельно-печного топлива [12]. Соответственно, его потребление зависит от среднегодовой температуры.

Таблица 4. Динамика потребления первичных топливно-энергетических ресурсов в Республике Саха (Якутия), в млн т у.т.

Table 4. Consumption dynamics of primary fuel and energy resources in the Republic of Sakha (Yakutia), million t OE

Топливо-энергетический ресурс	Год			
	2008	2010	2015	2020
Уголь	2,5	3,2	2,7	3,5
Нефть и газовый конденсат	0,9	0,5	0,7	2,3
Природный и попутный газ	2,3	2,8	3,3	3,9
Гидроэнергия и НВИЭ	0,4	0,3	0,4	0,4
ВСЕГО:	6,1	6,8	7,1	10,1

Примечания. Рассчитано по данным [2], оценки авторов.

НВИЭ – нетрадиционные и возобновляемые источники энергии.

Добыча газа в республике ведется на нескольких месторождениях: Чаяндинском, Среднеботуобинском – нефтегазоконденсатных, Средневилуйском, Среднетюнгском, Отраднинском – газоконденсатных. Самое крупное из которых – Чаяндинское. Газ Чаяндинского месторождения предназначен для поставок за пределы республики, газ других месторождений потребляется в республике. Почти весь объем добытой сырой нефти вывозится за пределы. Таким образом, около 80% добытого угля, более 55% природного газа и 97% нефти вывозятся за пределы республики. В 2020 г. поставлено в регионы России и на экспорт 15,4 млн т нефти, 4,6 млрд м³ газа, 15,2 млн т угля.

ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ УГЛЯ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИКИ

Ресурсы в энергетике складываются из непосредственно добываемых энергетических углей и низкосортных продуктов переработки высококачественных энергетических и коксующихся углей. Высококачественные продукты переработки, концентраты энергетического и коксующегося угля, как правило, предназначены для экспорта. В настоящее время потребность объектов энергетике в угле удовлетворяется в основном за счет Нерюнгринского, Денисовского месторождений на юге, Джебарики-Хайское, Харбалахское, Надеждинское месторождения и несколько других небольших месторождений.

Наличие запасов высококачественных углей, востребованных на мировом рынке, создает перспективы для развития экспорта угля. Согласно существующим проектам, объемы добычи углей экспортного качества могут составить до 50 млн т в год, включая Эльгинское месторождение – 30; Денисовское – 5,2; Чульмаканское – 4,8; Кабактинское – 3. На экспорт поставляются высококачественные концентраты углей. Низкосортные продукты переработки с перечисленных месторождений должны найти применение на объектах энергетике республики или других регионов России. Объёмы низкосортных продуктов переработки могут составить до 42% от объемов переработки или до 18 млн т.

Большинство месторождений местных

углей нуждается в дополнительных исследованиях качества угля и не разрабатываются. Угли месторождений, которые можно отнести к местным, как правило, низкого качества. Местные угли, в основном, низко-сернистые и среднезольные. Для них характерна неоднородность распределения зольности угля и теплоты его сгорания на отдельных участках. Использование таких углей сопровождается снижением эффективности работы котельного оборудования [13–15]

Проблемам использования углей низкого сорта в качестве топлива посвящено множество зарубежных и российских исследований [16–25]. Развитие угледобычи на этих месторождениях возможно, главным образом, при использовании этих углей на месте добычи, при наличии в этом потребности и экономической целесообразности.

В республике пока не стоит задача широкого вовлечения в хозяйственный оборот месторождений местных углей для энергетического использования в связи с наличием значительных запасов угля, которые используются без предварительной подготовки топлива, а также наличия альтернативных источников топлива и энергоснабжения изолированных регионов. Исключение, могут составить угли изолированных районов, где другие источники топливоснабжения экономически не оправданы или малодоступны. Тем не менее угли месторождений местных углей являются потенциальными ресурсами для энергетике.

ПРОГНОЗ ПРОИЗВОДСТВА И ПОТРЕБЛЕНИЯ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ В РЕСПУБЛИКЕ САХА (ЯКУТИЯ)

В программных документах^{10,13}, предусматривается как строительство (Эльгинская ГРЭС (КЭС¹³) и Джебарики-Хайская ТЭЦ¹³), так и расширение мощности действующих электростанций (Нерюнгринской ГРЭС¹⁴). Прирост мощности за счет реализации этих проектов может составить 2175 МВт. Востребованные объёмы потребления угля на представленных электростанциях составляют 5,3–6,5 млн т у.т., из которых более 90% составляют угли месторождений Южно-Якутского

бассейна. Потребность в топливе для электростанций рассчитана исходя из удельного нормативного расхода топлива, мощности электростанций, возможного годового объема выработки электроэнергии и низшей теплоты сгорания угля месторождения (проектного топлива).

Рассматривается также сооружение объектов энергетики на угле в зоне децентрализованного энергоснабжения в основном предназначенных для работы в промышленности. Так, в 2017 г. была введена ТЭЦ на угле мощностью 16 МВт на месторождении Гросс на территории Олекминского района.

Проекты строительства угольных ТЭС находятся зачастую в начальной степени проработки, и реализация проектов часто может сильно сдвигаться по срокам либо становиться недостижимой по разным причинам.

Исходя из анализа существующего состояния, и задач, решаемых «Стратегией социально-экономического развития Республики Саха (Якутия) до 2032 года и на перспективу до 2050 года»⁹, «Энергетической стратегией Республики Саха (Якутия) на период до 2030 года»¹⁰, разработаны сценарии развития энергетики республики на перспективу до 2035 года: базовый и консервативный. В представленных сценариях учтено расширение Нерюнгринской ГРЭС, вывод из эксплуатации Чульманской ТЭЦ (в связи с высоким износом оборудования), перевод существующих котельных с дров на сжигание угля, строительство новых промышленных котельных, перевод на газ объектов энергетики населенных пунктов в Алданском, Ленском, Нерюнгринском и Олекминском районах республики. Ввод в эксплуатацию Эльгинской ГРЭС и Джебарики-Хайской ТЭЦ планируется за

пределами рассматриваемого периода.

Базовый сценарий предполагает сценарий развития экономики республики с учетом принимаемых мер и предстоящих внешних обстоятельств, при этом принят за основу возрастающий спрос на производимую экспортно-ориентированную продукцию.

Среднегодовые темпы роста ВРП по консервативному сценарию прогнозируются на уровне 102% в 2021–2025 гг., а в перспективе до 2035 г. – 101,2%^{15,16}.

В консервативном сценарии рассматривается усиление для России санкционного режима, более длительное восстановление экономики, замедление ее роста в среднесрочной перспективе.

Выполнен прогноз потребления первичных ТЭР с учетом заданных предпосылок. Потребление ТЭР к 2035 г. может составить 10,6–12,7 млн т у.т. (табл. 5). Основными видами топлива продолжают оставаться уголь и природный и попутный газ. В 2020 г. доля угля составила 35%, а газа 39% (табл. 5). В перспективе доля угля в потреблении ТЭР может возрасти незначительно – до 38–39% за счет сокращения доли нефти и газового конденсата.

Для обеспечения внутреннего потребления в топливных ресурсах, а также объемов межрегиональных и экспортных поставок, производство энергоресурсов в 2035 г. должно достигнуть следующих показателей: угля – 37,1–43 млн т; нефти – 21–23 млн т; природного газа – 23,3–24 млрд м³ (табл. 6).

Перспективы декарбонизации экономики республики связаны с развитием возобновляемой энергетики и переводом на газ объектов энергетики. Предусмотрен ввод к 2025 г. котельной на природном газе мощностью

¹³Стратегия социально-экономического развития Республики Саха (Якутия) до 2032 года и на перспективу до 2050 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://publication.pravo.gov.ru/%2FFile%2FGet-File%2F1400202008170001%3Ftype%3Dpdf&usg=AOvVaw0mJR8npu9f1S5Onb4SBqGJ> (20.12.2021).

¹⁴Энергетическая стратегия Республики Саха (Якутия) на период до 2030 года [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/26740479/> (20.12.2021).

¹⁵О внесении изменений в постановление Правительства Республики Саха (Якутия) от 23 ноября 2016 г. № 422. «О долгосрочном прогнозе социально-экономического развития Республики Саха (Якутия) на период до 2035 года» от 27 января 2020 г. № 6. Постановление Правительства Республики Саха (Якутия).

¹⁶О прогнозе социально-экономического развития Республики Саха (Якутия) на 2022–2024 годы. Постановление Правительства Республики Саха (Якутия) от 15 сентября 2021 г. № 334.

Таблица 5. Прогноз потребления первичных топливно-энергетических ресурсов в Республике Саха (Якутия), млн т у.т/год

Table 5. Forecast of primary fuel and energy resources consumption in the Sakha Republic (Yakutia), million t OE per year

Вид топлива	Год			
	факт	прогноз*		
	2020	2025	2030	2035
Всего, в том числе	10,1	10,2–10,5	10,5–12,5	10,6–12,7
Уголь	3,5	3,6–3,9	4,1–4,8	4,1–4,8
Нефть и газовый конденсат	2,3	2,3–2,3	2,1–3,3	2,1–3,2
Природный и попутный газ	3,9	3,9–3,9	3,9–4,0	4,0–4,3
Гидроэнергия и НВИЭ	0,4	0,4–0,4	0,4–0,4	0,4–0,4

Примечание. *Оценки авторов.

Таблица 6. Прогноз добычи (производства) топливно-энергетических ресурсов в Республике Саха (Якутия)

Table 6. Forecast of fuel and energy resources production in the Republic of Sakha (Yakutia)

Топливо-энергетический ресурс	Год			
	факт	прогноз		
	2020	2025	2030	2035
Уголь, млн т	16,3	27,7–37,1	37,1–42,3	37,1–43
Нефть и газовый конденсат, млн т	16,2	17,8–18,5	19,8–20,7	20,6–23,0
Природный и попутный газ, млрд м ³	8,1	11,9–17,9	16,6–21,0	23,3–24,0
Электроэнергия, млрд кВт·ч	10,1	10,1–10,2	10,1–10,2	12,8–13,6
Тепловая энергия, млн ГДж	64,1	66,6–66,6	72,9–74,1	77,9–80,0

Примечание. Источник – оценки авторов.

460,6 ГДж/ч. Республика обладает ресурсами для развития возобновляемой энергетики, которые можно использовать для экономии привозного дизтоплива [26]. Значительной преградой для широкомасштабного использования потенциала возобновляемой энергетики в условиях республики является продолжительный зимний период, характеризующийся отсутствием солнечного излучения, снижения ветрового и водного потенциалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ роли угля в ТЭБ Республики Саха (Якутия) и сырьевой базы для развития угольной энергетики показывает:

- республика обладает достаточными для обеспечения потребности в топливе большинства регионов республики ресурсами угля;
- уголь является надежным ресурсом топливоснабжения на длительную перспективу;
- декарбонизация не окажет существенного влияния на потребление угля;

– слаборазвитая транспортная инфраструктура вкупе со сложной транспортной схемой доставки создают сложности для доставки топлива потребителям;

– в регионах республики с малой плотностью населения и низкой транспортной доступностью уголь местных месторождений может составить альтернативу завозному мазу, если там имеются месторождения угля и разработка этих месторождений экономически и социально оправдана;

– ограниченная потребность в низкосортных продуктах переработки энергетических и коксующихся углей, предназначенных для поставок на экспорт может служить ограничением для роста добычи этих углей.

В перспективе – до 2035 г. и далее уголь будет оставаться одним из основных топливно-энергетических ресурсов Республики Саха (Якутия) как наиболее доступный топливно-энергетический ресурс.

Список источников

1. Фаузер В. В., Лыткина Т. С., Смирнов А. В. Дифференциация арктических территорий по степени заселенности и экономической освоенности // Арктика: экология и экономика. 2017. № 4. С. 18–31. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2017-4-18-31>.
2. Плакиткин Ю. А., Плакиткина Л. С., Дьяченко К. И. Основные тенденции развития угольной промышленности мира и России в условиях низкоуглеродной энергетики. Часть I. Анализ темпов и пропорций развития угольной отрасли, сформированных под воздействием стран-лидеров угольного рынка // Горный журнал. 2022. № 7. С. 10–16. <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.07.01>.
3. Honoré A. Decarbonization and industrial demand for gas in Europe. Oxford: Oxford Institute for Energy Studies, 2019. 45 p. <https://doi.org/10.26889/9781784671396>.
4. Воропай Н. И. Системные исследования в энергетике: ретроспектива научных направлений Сибирского энергетического института – Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева. Новосибирск: Изд-во «Наука», 2010. 686 с.
5. Макаров А. А., Воропай Н. И. Системные исследования в энергетике: методология и результаты. М.: Изд-во ИНЭИ РАН, 2018. 308 с.
6. Макаров А. А. Системные исследования энергетики: 50-летие надежд и 20 лет в тени // Известия Российской Академии наук. Энергетика. 2014. № 2. С. 3–15.
7. Такайшвили Л. Н. Учет свойств угольной промышленности, как системы топливно-энергетического комплекса при моделировании ее развития // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 10. С. 138–149. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-10-138-149>.
8. Таразанов И. Г., Губанов Д. А. Итоги работы угольной промышленности России за январь–декабрь 2020 года // Уголь. 2021. № 3. С. 27–43. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2021-3-27-43>.
9. Подолян В. И., Елисафенко Т. Н., Пензин Ю. П. Угольная база России. Т. V. Кн. 2. Угольные бассейны и месторождения Дальнего Востока (Республика Саха, Северо-Восток, о. Сахалин, п-ов Камчатка). М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1999. 638 с.
10. Тихановский А. Н. Проблемы и методы биологической рекультивации техногенно нарушенных земель Крайнего Севера // Успехи современного естествознания. 2017. № 2. С. 43–47.
11. Соколов А. Д., Такайшвили Л. Н., Петров Н. А., Павлов Н. В. Угольная промышленность Республики Саха (Якутия): существующее состояние и возможности развития // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2010. № 4. С. 63–69.
12. Такайшвили Л. Н., Агафонов Г. В. Перспективы использования энергетических углей Иркутской области // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 6. С. 1271–1284. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1271-1284>.
13. Батугина Н. С., Гаврилов В. Л., Шепелева Е. Г. Малые угледобывающие предприятия в заполярных районах Якутии // ЭКО. 2017. № 2. С. 134–145.
14. Хоютанов Е. А., Гаврилов В. Л. Моделирование угольных месторождений заполярной зоны Якутии // Проблемы недропользования. 2017. № 4. С. 53–60. <https://doi.org/10.18454/2313-1586.2017.04.053>.
15. Батугина Н. С., Гаврилов В. Л., Хоютанов Е. А., Попова К. С. Оценка вариантов завоза и использования угля при освоении месторождений золота Арктической зоны Республики Саха (Якутия) // Арктика: экология и экономика. 2021. № 2. Т. 11. С. 152–163. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2021-2-152-163>.
16. Filippov S. P. New technological revolution and energy requirements // Foresight and STI Governance. 2018. Vol. 12. Iss. 4. P. 20–33. <https://doi.org/10.17323/2500-2597.2018.4.20.33>.
17. Agraniotis M., Bergins C., Stein-Cichoszewska M., Karas E. 5 - High-efficiency pulverized coal power generation using low-rank coals // Low-Rank Coals for Power Generation, Fuel and Chemical Production. 2017. P. 95–124. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100895-9.00005-X>.
18. Ryabov G. A., Antonenko E. V., Krutitskii I. V., Folomeev O. M., Belyaev A. V. Application of the technology of combustion of solid fuels in a circulating fluidized bed // Power Technology and Engineering. 2018. Vol. 52. P. 308–313. <https://doi.org/10.1007/s10749-018-0950-0>.
19. Katalambula H., Gupta R. Low-grade coals: a review of some prospective upgrading technologies // Energy Fuels. 2009. Vol. 23. Iss. 7. P. 3392–3405. <https://doi.org/10.1021/ef801140t>.
20. Росляков П. В., Кондратьева О. Е., Головтеева А. Н., Сиваковский А. М. Алгоритм оптимального выбора наилучших доступных технологий для российских ТЭС // Теплоэнергетика. 2019. № 4. С. 60–72. <https://doi.org/10.1134/S0040363619040064>.
21. Ma Cheng, Zou Chong, Zhao Junxue, Shi Ruimeng, Li Xiaoming, He Jiangyong, et al. Pyrolysis characteristics of low-rank coal under a CO-containing atmosphere and properties of the prepared coal chars // Energy Fuels. 2019. Vol. 33. Iss. 7. P. 6098–6112. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b00860>.
22. Ge Lichao, Zhang Yanwei, Xu Chang, Wang Zhihua, Zhou Junhu, Cen Kefa. Influence of the hydrothermal dewatering on the combustion characteristics of Chinese low-rank coals // Applied Thermal Engineering. 2015. Vol. 90. P. 174–181. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.07.015>.
23. Mills S. Low quality coals – key commercial, environmental and plant considerations // IEA Clean Coal Centre. 2016. [Электронный ресурс]. URL: <https://usea.org/sites/default/files/Low%20quality%20coals%20-%20key%20commercial%2C%20environmental%20and%20plant%20considerations%20-ccc270.pdf> (20.12.2021).
24. Violidakis I., Drosatos P., Nikolopoulos N. Critical review of current industrial scale lignite drying technologies // Low-Rank Coals for Power Generation, Fuel and Chemical Production. 2017. P. 41–71. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100895-9.00003-6>.
25. Мессерле В. Е., Паскалов Г., Умбеткалиев К. А.,

Устименко А. Б. Использование органических топливных добавок для повышения эффективности сжигания угля // Теплоэнергетика. 2020. № 2. С. 46–53. <https://doi.org/10.1134/S0040363620020046>.
26. Иванова И. Ю., Ноговицын Д. Д., Тугузова Т. Ф.,

Шейна З. М., Сергеева Л. П. Анализ функционирования солнечных электростанций в децентрализованной зоне Республики Саха (Якутия) // Альтернативная энергетика и экология. 2018. № 10-12. С. 12–22. <https://doi.org/10.15518/isjaee.2018.10-12.012-022>.

References

1. Fauzer V. V., Lytkina T. S., Smirnov A. V. Arctic territories differentiation by density of population and economic development. *Arktika: ekologiya i ekonomika = The Arctic: ecology and economy*. 2017;4:18-31. (In Russ.). <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2017-4-18-31>.
2. Plakitkin Yu. A., Plakitkina L. S., Dyachenko K. I. Major trends shaping development of coal industry in the world and in Russia under conditions of low-carbon energy economy: major trends. Part I. Coal sector development ratio and rates under the influence of major coal market countries. *Gornyi Zhurnal*. 2022;7:10-16. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.07.01>.
3. Honoré A. *Decarbonization and industrial demand for gas in Europe*. Oxford: Oxford Institute for Energy Studies; 2019, 45 p. <https://doi.org/10.26889/9781784671396>.
4. Voropaj N. I. *System research in the energy sector: a retrospective review of the scientific areas of the Siberian Energy Institute – Melentiev Energy Systems Institute*. Novosibirsk: Nauka; 2010, 686 p. (In Russ.).
5. Makarov A. A., Voropaj N. I. *System research in the energy sector: methodology and results*. Moscow: Melentiev Energy Systems Institute SB RAS; 2018, 308 p. (In Russ.).
6. Makarov A. A. System research in energy sector: 50 years of hopes and 20 years in the shadows. *Izvestiya Rossijskoj Akademii nauk. Energetika*. 2014;2:3-15. (In Russ.).
7. Takaishvili L. N. Consideration of system features of coal industry as a part of fuel and energy sector when its development modeling. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2017;10:138-149. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-10-138-149>.
8. Tarazanov I. G., Gubanov D. A. Performance results of Russian coal industry for the period from January 2020 to December 2020. *Ugol'*. 2021;3:27-43. (In Russ.). <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2021-3-27-43>.
9. Podolyan V. I., Elisafenko T. N., Penzin Yu. P. *Coal base of Russia*. Vol. 5. Book 2. Coal basins and deposits of the Far East (Republic of Sakha (Yakutia), Northeast, Sakhalin Island, Kamchatka Peninsula) Moscow: Geoinformmark; 1999, 638 p. (In Russ.).
10. Tihanovskij A. N. Problems and methods of biological recultivation of technogenic-disturbed land in the Far North. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = Advances in current natural sciences*. 2017;2:43-47. (In Russ.).
11. Sokolov A. D., Takaishvili L. N., Petrov N. A., Pavlov N. V. Coal industry of Chukotka autonomous area: current condition and development possibilities. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2010;4:63-69. (In Russ.).
12. Takaishvili L. N., Agafonov G. V. Application prospects of Irkutsk region thermal coals. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(6):1271-1284. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1271-1284>.
13. Batugina N. S., Gavrilov V. L., Shepeleva E. G. Small-scale coal mines in polar regions of Yakutia: state and prospects. *EKO*. 2017;2:134-145. (In Russ.).
14. Khoitunov E. A., Gavrilov V. L. Modeling of coal deposits in the polar zones of Yakutia. *Problemy nedropol'zovaniya = Problems of Subsoil Use*. 2017;4:53-60. (In Russ.). <https://doi.org/10.18454/2313-1586.2017.04.053>.
15. Batugina N. S., Gavrilov V. L., Khoitunov E. A., Popova K. S. Assessment of coal supply and use in the development of gold deposits in the Arctic zone of the Republic of Sakha (Yakutia). *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: Ecology and Economy*. 2021;11(2):152-163. (In Russ.). <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2021-2-152-163>.
16. Filippov S. P. New technological revolution and energy requirements. *Foresight and STI Governance*. 2018;12(4):20-33. <https://doi.org/10.17323/2500-2597.2018.4.20.33>.
17. Agraniotis M., Bergins C., Stein-Cichoszewska M., Karakas E. 5 - High-efficiency pulverized coal power generation using low-rank coals. *Low-Rank Coals for Power Generation, Fuel and Chemical Production*. 2017;95-124. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100895-9.00005-X>.
18. Ryabov G. A., Antonenko E. V., Krutitskii I. V., Folomeev O. M., Belyaev A. V. Application of the technology of combustion of solid fuels in a circulating fluidized bed. *Power Technology and Engineering*. 2018;52:308-313. <https://doi.org/10.1007/s10749-018-0950-0>.
19. Katalambula H., Gupta R. Low-grade coals: a review of some prospective upgrading technologies. *Energy Fuels*. 2009;23(7):3392-3405. <https://doi.org/10.1021/ef801140t>.
20. Roslyakov P. V., Kondrat'eva O. E., Golovteeva A. N., Sivakovskii A. M. Optimal choice of the best available technologies for Russian thermal power plants. *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2019;4:60-72. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0040363619040064>.
21. Ma Cheng, Zou Chong, Zhao Junxue, Shi Ruimeng, Li Xiaoming, He Jiangyong, et al. Pyrolysis characteristics of low-rank coal under a CO-containing atmosphere and properties of the prepared coal chars. *Energy Fuels*. 2019;33(7):6098-6112. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b00860>.
22. Ge Lichao, Zhang Yanwei, Xu Chang, Wang Zhihua, Zhou Junhu, Cen Kefa. Influence of the hydrothermal dewatering on the combustion characteristics of Chinese low-rank coals. *Applied Thermal Engineering*. 2015;90:174-181. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.07.015>.
23. Mills S. Low quality coals – key commercial,

environmental and plant considerations. *IEA Clean Coal Centre*. 2016. Available from: <https://usea.org/sites/default/files/Low%20quality%20coals%20-%20key%20commercial%2C%20environmental%20and%20plant%20considerations%20-ccc270.pdf> [Accessed 20th December 2021].

24. Violidakis I., Drosatos P., Nikolopoulos N. Critical review of current industrial scale lignite drying technologies. *Low-Rank Coals for Power Generation, Fuel and Chemical Production*. 2017;41-71. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100895-9.00003-6>.

25. Messerle V. E., Umbetkaliyev K. A., Paskalov G., Ushtimenko A. B. Application of organic fuel additives to enhance coal combustion efficiency. *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2020;2:46-53. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0040363620020046>.

26. Ivanova I. Yu., Nogovitsyn D. D., Tuguzova T. F., Sheina Z. M., Sergeeva L. P. An analysis of solar power plants operation in the off-grid area of the Republic of Sakha (Yakutia). *Al'ternativnaya energetika i ekologiya*. 2018;10-12:12-22. (In Russ.). <https://doi.org/10.15518/issue.2018.10-12.012-022>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Павлов Никита Владимирович,
заведующий Отделом проблем энергетики,
Институт физико-технических проблем Севера
им. В.П. Ларионова СО РАН,
677980, г. Якутск, ул. Октябрьская, 1, Россия

Такайшвили Людмила Николаевна,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник Лаборатории
ТЭК Сибири и Дальнего Востока,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия

Иванова Альбина Егоровна,
ведущий инженер Отдела проблем энергетики,
Институт физико-технических проблем Севера
им. В.П. Ларионова СО РАН
677980, г. Якутск, ул. Октябрьская, 1, Россия

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 11.05.2022; одобрена после рецензирования 12.07.2022; принята к публикации 25.11.2022.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nikita V. Pavlov,
Head of the Energy Problems Department,
Larionov Institute of the Physical-Technical Problems
of the North SB RAS,
1 Oktyabrskaya St, Yakutsk 677980, Russia

Lyudmila N. Takaishvili,
Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher of the Laboratory of Energy Sector
of Siberia and Far East,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia

Albina E. Ivanova,
Leading Engineer of the Energy Problems Department,
Larionov Institute of the Physical-Technical Problems
of the North SB RAS,
1 Oktyabrskaya St, Yakutsk 677980, Russia

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the preparation of the 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 11.05.2022; approved after reviewing 12.07.2022; accepted for publication 25.11.2022.



Научная статья

УДК 669:519.216

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-669-676>

Исследование процесса обжига цинковых концентратов в кипящем слое методом математического моделирования

Владимир Михайлович Алкацев^{1✉}, Александр Леонидович Рутковский²,
Алла Константиновна Макоева³

¹⁻³Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), г. Владикавказ, Россия

¹avm340@mail.ru

²rutkowski@mail.ru

³makoeva_alla@mail.ru

Резюме. Цель – стабилизация процесса обжига цинковых сульфидных концентратов в печах кипящего слоя при использовании обогащенного кислородом дутья. Баланс между заданным (в среднем 20%) избытком воздушного дутья и количеством загрузки шихты устанавливается за счет подбора количества элементов испарительного охлаждения печи кипящего слоя – кессонов. Данные о влиянии избытка кислорода в дутье на качество обжига сульфидных концентратов и влияние количества дутья на физическое состояние кипящего слоя были получены путем изучения научно-технической информации и обзора литературных источников по теме исследования. Статистические данные для исследования получены в результате анализа производственного опыта работы печей кипящего слоя ОАО «Электроцинк». Произведен расчет теплового баланса обжига. При данном расчете были учтены основные технические характеристики печей кипящего слоя, применяемых для обжига цинковых сульфидных концентратов: уровень кипящего слоя, число сопел, диаметр печи, диаметр в зоне слоя, толщина подины и общая масса печи. На основании полученных в результате изучения производственных данных работы печей кипящего слоя предложен способ регулирования подачи кислорода в зависимости от количества загружаемой шихты. Регулирование подачи кислорода производится с целью обеспечения стабильного избытка кислорода в дутье без заметного изменения количества дутья, и, как следствие, максимального удаления серы из шихты. Установлено, что снижение избытка дутья ниже 15% влечет за собой значительное ухудшение качества получаемого огарка и пыли, а увеличение свыше 20% приводит к снижению содержания SO₂ в отходящих газах без заметного улучшения качества огарка. Таким образом, предлагаемый способ регулирования подачи кислорода в печь будет способствовать улучшению технико-экономических показателей процесса обжига цинковых сульфидных концентратов в печах кипящего слоя.

Ключевые слова: цинковый концентрат, обжиг, кислород, температура, шихта, кипящий слой, математическое моделирование, оптимизация

Для цитирования: Алкацев В. М., Рутковский А. Л., Макоева А. К. Исследование процесса обжига цинковых концентратов в кипящем слое методом математического моделирования // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 4. С. 669-676. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-669-676>.

METALLURGY

Original article

Mathematical modeling of zinc concentrate roasting in a fluidized bed

Vladimir M. Alkatsev^{1✉}, Alexander L. Rutkovsky², Alla K. Makoeva³

¹⁻³North Caucasian Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Vladikavkaz, Russia

¹avm340@mail.ru

²rutkowski@mail.ru

³makoeva_alla@mail.ru

Abstract. The paper aims to stabilize the roasting of zinc sulfide concentrates in fluidized-bed furnaces using oxygen-enriched air. The balance between the given excess air blast (on average 20%) and the amount of loaded charge is achieved by selecting an appropriate number of evaporative cooling elements in the fluidized-bed furnace. Through the evaluation of scientific and technical information, as well as literature sources on the research topic, data were collected on the effects produced by an oxygen excess in the blast on the quality of sulfide concentrate roasting and by a blast volume on the state of the fluidized bed. In addition, statistical data for the study were obtained by analyzing the operation of fluidized-bed furnaces at ElectroZinc. As part of the study, the heat balance in roasting was determined, taking into account the following technical characteristics of fluidized-bed furnaces used for roasting zinc sulfide concentrates: fluidized-bed level, number of nozzles, furnace diameter, diameter in the bed zone, hearth thickness, and the total weight of the furnace. Relying on the operation analysis of fluidized-bed furnaces, a method was proposed to regulate the oxygen supply depending on the amount of loaded charge. The oxygen supply is regulated in order to ensure a stable excess of oxygen in the blast without causing any significant changes in the blast volume and, consequently, to maximize the sulfur removal from the charge. A decrease in the excess air blast below 15% was found to significantly degrade the quality of the resulting cinder and dust, while an increase of over 20% reduced the SO₂ content in the exhaust gases with no noticeable improvement in the quality of cinder. Therefore, the proposed method for regulating the oxygen supply to the furnace can improve the techno-economic performance of zinc sulfide concentrate roasting in fluidized-bed furnaces.

Keywords: zinc concentrate, roasting, oxygen, temperature, charge, fluidized bed, mathematical modeling, optimization

For citation: Alkatsev V. M., Rutkovsky A. L., Makoeva A. K. Mathematical modeling of zinc concentrate roasting in a fluidized bed. *iPolytech Journal*. 2022;26(4):669-676. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-669-676>.

ВВЕДЕНИЕ

Металлический цинк используется в различных отраслях промышленности. Технологическая схема его получения включает предварительный обжиг сульфидных цинковых концентратов в печах кипящего слоя (КС), характеризующихся высокими технико-экономическими показателями⁴ [1–9].

Важнейшими факторами, обеспечивающими качество получаемого в печах КС огарка и пыли являются температура и избыток дутья, показателем которого служит содержание кислорода под сводом печи⁵ [10–12].

Температура в печи регулируется изменением количества подаваемой в печь шихты⁵. Сульфиды металлов, содержащиеся в шихте, фактически являются топливом, так как при их окислении выделяется большое количество тепла. Баланс между воздушным дутьем с заданным избытком и количеством загрузки устанавливается за счет подбора количества элементов испарительного охлаждения – кессонов. Это делается для того, чтобы при оптимальном и неизменном коли-

честве дутья в печь избыток дутья составлял в среднем 20%. Снижение избытка дутья ниже 15% влечет за собой значительное снижение качества огарка и пыли, а увеличение свыше 20% снижает содержание SO₂ в отходящих газах без заметного улучшения качества обжига⁶ [13].

Печи кипящего слоя, предназначенные для окислительного обжига сульфидных концентратов, относятся к классу агрегатов для автогенных процессов, в которых тепло, необходимое для поддержания рабочей температуры, появляется в результате химических реакций в самой печи. Сульфиды цветных металлов, содержащиеся в концентратах, окисляются кислородом дутья. В результате этого огарок содержит оксиды металлов, чаще всего высшей степени окисления, а в газовую фазу переходит сера в виде SO₂ [1]. Помимо обжига, в печах КС тяжелые цветные металлы перерабатываются различными методами и из различного сырья с получением различных продуктов⁷ [14–20].

⁴Nyberg J. Characterisation and control of the zinc roasting process [Электронный ресурс]. URL: https://kipdf.com/characterisation-and-control-of-the-zinc-roasting-process_5ac47aeb1723dddb8e77b615.html (29.03.2022).

⁵Худяков И. Ф., Тихонов А. И., Деев В. И., Набойченко С. С. Металлургия меди, никеля и кобальта: учеб. пособ. М.: Изд-во «Металлургия», 1977. 405 с.

⁶Кляйн С. Я., Козлов П. А., Набойченко С. С. Извлечение цинка из рудного сырья: учебник для вузов. Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2009. 492 с.

⁷Алымов М. И., Левинский Ю. В., Набойченко С. С., Касимцев А. В., Панов В. С., Оглезнева С. А. [и др.]. Металлические порошки и порошковые материалы: справочник. М.: Изд-во «Научный мир», 2018. 608 с.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обжиг в печах кипящего слоя – это процесс, относящийся к разряду многомерных нестационарных динамических объектов. Временное отставание информации о качественных параметрах продуктов обжига, неполное понимание взаимосвязи выходных параметров с режимами работы печи, значительное число неконтролируемых возмущений, ограниченное количество возможностей управления процессом – все это значительно затрудняет ведение процесса в оптимальном режиме [2].

Особенностью, характеризующей современное цинковое производство, является переработка концентратов различных месторождений разного состава, имеющих неодинаковые физические свойства и химический состав. Это требует вносить изменения в контроль над процессом обжига концентратов⁸.

В таблице приведены основные технические характеристики печей КС для обжига концентратов.

Выгружаемый из печи огарок имеет непостоянный химический состав. В связи с этим в технологической схеме получения Zn могут возникнуть отклонения от существующих параметров процесса [7]. Следовательно, проведение обжига в оптимальном режиме должно базироваться на результатах анализа характеристик объекта исследований.

Для успешного протекания окислительных реакций и максимального удаления серы необходим избыток дутья с коэффициентом $1,2 \pm 0,5$ от стехиометрического соотношения. С учетом коэффициента избытка дутья удельный расход воздуха составляет 1600–1700 м³/т обжигаемого концентрата [7]. Согласно данным⁹, суммарное содержание кислорода в отходящих от печей КС газах может достигать 2–4%.

Для автоматического регулирования температуры в печи необходимо контролировать изменение количества подаваемой шихты.

Для обеспечения устойчивой работы печи кипящего слоя необходимо в процессе обжига подавать шихту в печь непрерывно и постоянно.

Как было установлено ранее [7, 8], тепловой баланс в установившемся режиме:

$$Gtqt + Gvcv + Gctctt = Gctf, \quad (1)$$

где Gt – расход концентрата, кг/с; qt – теплотворная способность концентрата, кДж/кг; Gv – расход воздуха, кг/с; cv – теплоемкость воздуха, кДж/(кг·°C); tv – температура воздуха, °C; ct – теплоемкость концентрата, кДж/(кг·°C); tt – температура концентрата, °C; $G = Gt + Gv$ – расход продуктов обжига, кг/с; c – теплоемкость продуктов обжига кДж/(кг·°C); tf – температура в кипящем слое, °C.

Количество тепла, поступающее с шихтой и воздухом и выделяющееся при горении сульфидов, будет соответствовать количеству тепла, уносимого с отходящими газами и в виде потерь через футеровку, а также теплу, отводимому кессонами печи.

Тогда температуру в кипящем слое можно определить следующим образом:

$$tf = \frac{Gtqt + Gvcv + Gctctt}{(Gt + Gv)c}. \quad (2)$$

Данное количество теплоты имеет незначительную величину в сравнении с производением $Gtqt$. Следовательно, этот показатель можно не учитывать. Также принимаем, что теплоемкость продуктов обжига не зависит от температуры, т.е. постоянна во всем интервале температур¹⁰ [8].

Следовательно, возможно рассчитать основные параметры процесса обжига в печи

⁸Барон Н. М., Пономарева А. М., Равдель А. А., Тимофеева З. Н. Краткий справочник физико-химических величин. СПб.: Изд-во «Иван Федоров», 2003. 182 с.

⁹Шиврин Г. Н. Металлургия свинца и цинка: учебник для техникумов цветной металлургии. М.: Изд-во «Металлургия», 1982. 352 с.

¹⁰Крестовников А. Н., Владимиров Л. П., Гуляницкий Б. С., Фишер А. Я. Справочник по расчетам равновесий металлургических реакций. М.: Изд-во «Металлургиздат», 1963. 416 с.

Технические характеристики печей кипящего слоя
Specifications of fluidized bed furnaces

Показатели	Площадь пода, м ²				
	38*	35,6*	29*	22**	16,5***
Уровень кипящего слоя, мм	1200	1200	1200	1500	1500
Температура кипящего слоя, °С	900	900-950	1000	1000	1500
Число воздушных камер	2	2	2	2	2
Число сопел, шт.	2137	–	–	1165	865
Диаметр печи, мм	7600	–	–	6560	5840
Диаметр в зоне слоя, мм	6636	6500	5820	4000	4200
Толщина подины, мм	250	250	250	250	250
Общая масса печи, т	286	–	–	360	–

* – для обжига цинковых концентратов;

** – для обжига никелевых концентратов;

*** – для обжига медных концентратов.

КС. Количество железа, связанное с серой в виде FeS₂:

$$Fe_{FeS_2} = (S - 0,49Zn - 0,16Pb - 0,01Cu) \cdot 0,8, \quad (3)$$

где *S, Zn, Pb, Cu* – содержание в шихте серы, цинка, свинца и меди, соответственно, %.

Количество Fe в CuFeS₂:

$$Fe_{CuFeS_2} = 0,88Cu. \quad (4)$$

Суммарное количество сульфидного железа:

$$SumFe = Fe_{FeS_2} + Fe_{CuFeS_2}. \quad (5)$$

Теоретически необходимое количество O₂, требуемое для окисления сульфидов концентрата, определяется как:

$$O_{2T} = 0,734Zn + 0,232Pb + 1,576SumFe + 1,511Cu; \quad (6)$$

$$V_{O_{2T}} = \frac{22,4O_{2T}}{32}. \quad (7)$$

Теоретически необходимое количество для окисления концентрата:

$$V_{vozdT} = 3,762V_{O_{2T}} + V_{O_{2T}}. \quad (8)$$

Реальное же количество воздуха, необходимое для окисления концентрата, определяется так [7]:

$$V_{vozD} = V_{vozdT} \alpha; \quad (9)$$

$$V_{O_{2D}} = 0,21V_{vozD}; \quad (10)$$

$$O_{2D} = O_{2T} \rho_{O_2},$$

где α – коэффициент избытка дутья; ρ_{O_2} – плотность O₂, кг/м³.

Теплотворная способность концентрата (Q_{xt} , кДж/кг):

$$Q_{xt} = 129,3S + 10,09Zn + 28,1Cu + 10,5Pb.$$

Расход воздуха:

$$V_V = \frac{10V_{vozD} \rho_V G t 24}{1440 f_1 60},$$

где ρ_V – плотность воздуха, кг/м³; f_1 – коэффициент нахождения печи под дутьем.

Для проверки результатов использованы практические данные завода ОАО «Электроцинк», где печи перерабатывали шихту следующего состава, % масс.: *Zn* – 50,0; *Pb* – 1,5; *S* – 32,0; *Cu* – 1,0. Остальное – до 100%: Fe, SiO₂, Cd, Co, Sb, As, O.

В результате определили основные режимные параметры процесса.

Количество Fe, связанное с серой в пирите:

$$Fe_{FeS_2} = (S - 0,49Zn - 0,16Pb - 0,01Cu) \times 0,8 = 6,38 \text{ кг}.$$

Количество Fe в CuFeS_2 :

$$Fe_{\text{CuFeS}_2} = 0,88\text{Cu} = 0,88 \text{ кг.}$$

Общее количество железа в виде сульфидных минералов:

$$\text{SumFe} = Fe_{\text{FeS}_2} + Fe_{\text{CuFeS}_2} = 7,26 \text{ кг.}$$

Теоретически необходимое количество кислорода, необходимое для окисления сульфидов концентрата, составляет:

$$O_{2T} = 0,734\text{Zn} + 0,232\text{Pb} + 1,576\text{SumFe} + 1,511\text{Cu} = 50 \text{ кг;}$$

$$V_{O_{2T}} = \frac{O_{2T} \cdot 22,4}{32} = 35 \text{ м}^3.$$

Тогда количество воздуха, необходимое для окисления всего концентрата:

$$V_{\text{возд}T} = V_{O_{2T}} \cdot 3,762 + V_{O_{2T}} = 166,67 \text{ м}^3.$$

Практическое количество воздуха, необходимое для окисления сульфидов концентрата, составляет:

$$V_{\text{возд}D} = 200 \text{ м}^3.$$

Теплотворная способность концентрата:

$$q_t = 129,3S + 10,09Zn + 28,1\text{Cu} + 10,5\text{Pb} = 4677 \text{ кДж/кг.}$$

Расход воздуха:

$$V_V = \frac{10V_{\text{возд}D} \rho_V Gt \cdot 24}{1440 f_1 \cdot 60} = 5,5 \text{ кг/с.}$$

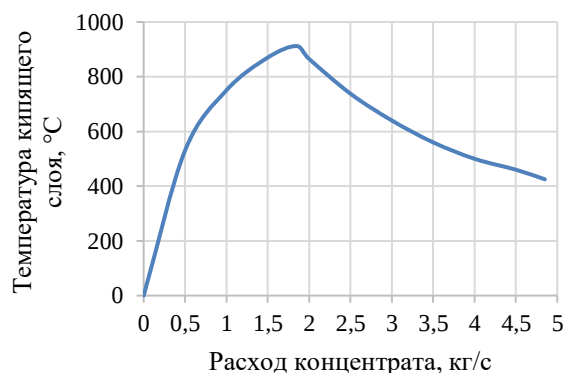
Для полного окисления 1,85 кг Zn концентрата необходимо 5,5 кг воздуха, поэтому количество воздуха для полного окисления 1 кг концентрата составит 2,99 кг. Произведение $Gtqt$ будет зависеть от расхода воздуха

G_V до того периода, пока этот расход не станет равным 5,5 кг/с. Данная зависимость определяется¹¹ пропорцией $\frac{1}{2,99} = \frac{Gt}{G_V}$, $Gt = \frac{G_V}{2,99}$.

При расчете температуры КС соотношение (2) использовали компьютерную программу MathCad [7, 8]:

$$T_f(G_V) := \begin{cases} T_f \leftarrow \frac{\frac{G_V}{2,99} \cdot qt + G_V \cdot cv \cdot tv}{(GT + G_V)c} & \text{if } G_V \leq 5.5 \\ T_f \leftarrow \frac{GT \cdot qt + G_V \cdot cv \cdot tv}{(GT + G_V)c} & \text{otherwise} \end{cases}$$

На рисунке приведена зависимость температуры слоя от расхода на обжиг сульфидного цинкового концентрата.



Зависимость температуры слоя от расхода концентрата
 Bed temperature vs concentrate consumption

Экстремальная точка на графике, после которой при увеличении количества подаваемой шихты начинает происходить «лавинообразный» спад температуры, объясняется нехваткой кислорода для окисления избыточного количества концентрата. Загружаемое в печь избыточное количество влажной шихты отнимает тепло, расходуемое на ее нагрев и испарение воды¹².

¹¹Трусова П. В. Введение в математическое моделирование: учеб. пособ. М.: «Университетская книга»; «Логос», 2007. 439 с.

¹²Набойченко С. С., Агеев Н. Г., Карелов С. В., Мамяченков С. В. Сергеев В. А. Процессы и аппараты цветной металлургии. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2013. 564 с.

Регулирование загрузки производится автоматически, что дает возможность поддерживать оптимальную температуру в интервале $\pm 20...-25^{\circ}$. Но если задача поддержания температуры выполняется достаточно легко, независимо от каких-либо других возмущающих факторов, то избыток дутья изменяется от: изменения влажности концентрата, нестациональности работы механизмов загрузки, и, самое главное, от скорости работы средств автоматики, поддерживающей температуру. В зависимости от конструкции питателя и влажности концентрата в печь одновременно может попасть ком концентрата весом до 3 кг, и потом образоваться пауза в загрузке до 2 с. При среднем темпе загрузки около 3 кг/с – это значительное относительное изменение. Кроме того, запаздывание изменения температуры в печи от изменения загрузки достигает 10 с, количество загружаемой в печь шихты все это время может быть заниженным или завышенным на десятки процентов. Колебания в загрузке, инициируемые средствами автоматики, могут доходить до 50% от среднего уровня при нормальной работе и до 100% при экстремальных отклонениях температуры. На температуру в печи подобные колебания осо-

бого воздействия не оказывают потому, что масса огарка в печи среднего размера превышает 200 т, а вот содержание кислорода под сводом регулярно на $1\div 2$ с падает до 0, и в это время вся пыль, выходящая из печи, остается недообожженной. Неслучайно даже по нормам содержание сульфидной серы в пыли допускается на порядок выше, чем в огарке (Ss в огарке – 0,2%, Ss в пыли – 3%). При пылеуносе, достигающем 60÷70%, содержание сульфидной серы в пыли оказывается главным показателем качества продуктов обжига.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При обогащении дутья кислородом в печи кипящего слоя для обжига цинковых сульфидных концентратов проблема низкого качества пыли может быть решена с помощью создания системы регулирования количества подаваемого с дутьем кислорода в зависимости от показаний весоизмерителя на питателе загрузки шихты. Таким образом, будет обеспечена возможность при любых колебаниях загрузки гарантировать стабильный избыток кислорода под сводом печи и, как следствие, более качественный обжиг.

Список источников

1. Fleissner F., Eberhard P. Load balanced parallel simulation of particle-fluid DEM-SPH systems with moving boundaries // *Parallel Computing: Architectures, Algorithms and Applications: Proceedings of Conference (Julich, 4–7 September 2007)*. Julich, 2007. Vol. 38. P. 37–44.
2. Алкацев М. И., Алкацева В. М. Исследование зависимости показателей обжига сульфидных никелевых концентратов в печах кипящего слоя от различных факторов методом планируемого имитационного эксперимента // *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2009. № 3. С. 60–63.
3. Constantineau J. P., Bouffard S. C., Grace J. R., Richards G. G., Lim C. Jim. Demonstration of the conditions conducive to agglomeration of zinc calcine in fluidized bed roasters // *Minerals Engineering*. 2011. Vol. 24. Iss. 13. P. 1409–1420. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.06.002>.
4. Chen T. T., Dutrizac J. E. Mineralogical changes occurring during the fluid-bed roasting of zinc sulfide concentrates // *JOM*. 2004. Vol. 56. Iss. 12. P. 46–51. <https://doi.org/10.1007/s11837-004-0235-y>.
5. Davies R. H., Dinsdale A. T., Gisby J. A., Robinson J. A. J., Martin S. M. MTDATA - thermodynamic and phase equilibrium software from the national physical laboratory // *Calphad*. 2002. Vol. 26. Iss. 2. P. 229–271. [https://doi.org/10.1016/S0364-5916\(02\)00036-6](https://doi.org/10.1016/S0364-5916(02)00036-6).
6. Svens K., Kerstiens B., Runkel M. Recent experiences with modern zinc processing technology // *Erzmetall*. 2003. Iss. 2. P. 94–103.
7. Рутковский А. Л., Дюнова Д. Н., Бигулов А. В., Яковенко И. С., Билаонов Б. Д., Дзантиев С. Ш. Исследование процесса обжига цинковых концентратов в кипящем слое методом математического моделирования // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2013. № 3. С. 217–222.
8. Герасименко Н. П., Рутковский А. Л. Исследование процесса обжига цинковых концентратов в кипящем слое с целью оптимизации // *Науч.-техн. конф. обучающихся и молодых ученых СКГМИ «НТК-2018»: сб. докл. по итогам науч.-иссл. работ (г. Владикавказ, 17–25 мая 2018 г.)*. Владикавказ: Изд-во Северо-Кавказского горно-металлургического института, 2018. С. 13–17.
9. Ивакина С. А., Мунц В. А. Печь кипящего слоя для обжига цинковых концентратов как объект регулирования // *Известия Томского политехнического*

университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 9. С. 31–42.
<https://doi.org/10.18799/24131830/2018/9/2086>.
10. Кубашевский О., Олкок С. Б. *Металлургическая термодинамика* / пер. с англ. М.: Изд-во «Металлургия», 1982. 392 с.
11. Седов Л. И. *Методы подобия и размерности в механике*. М.: Изд-во «Наука», 1977. 440 с.
12. Пестунова Н. П., Ремизов Ю. С., Комков Н. М. О механизме обжига цинковых концентратов в печах кипящего слоя // *Комплексное использование минерального сырья*. 1990. № 8. С. 55–60.
13. Панышин А. М., Шакирзянов Р. М., Избрехт П. А., Затонский А. В. Основные направления совершенствования производства цинка на ОАО «Челябинский цинковый завод» // *Цветные металлы*. 2015. № 5. С. 19–21.
<https://doi.org/10.17580/tsm.2015.05.03>.
14. Boateng A. A. Rotary kilns: transport phenomena and transport processes. Amsterdam: Elsevier Science, 2015. 369 p.
15. Orhan G. Leaching and cementation of heavy metals from electric arc furnace dust in alkaline medium // *Hydrometallurgy*. 2005. Vol. 78. Iss. 3-4. P. 236–245.

<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2005.03.002>.
16. Krashenin A. G., Khalezov B. D., Bornovolokov A. S., Ordinartsev D. P. Technology for extracting manganese from vanadium converter slag after leaching vanadium // *Metallurgist*. 2019. Vol. 63. Iss. 5. P. 534–542.
<https://doi.org/10.1134/S0036029520010073>.
17. Панышин А. М., Видуцкий М. Г., Козлов Д. А., Ивкин Д. А. Использование флотации цинковых кеков в аппаратах колонного типа для повышения эффективности вельц-процесса // *Цветные металлы*. 2015. № 5. С. 59–64. <https://doi.org/10.17580/tsm.2015.05.12>.
18. Козлов П. А., Казанбаев Л. А., Затонский В. А., Травкин В. Ф. *Экстракционно-электролизные методы переработки цинкового сырья*. М.: Изд-во «Руда и металлы», 2008. 269 с.
19. Farkhondehkavaki M., Soleimani M., Latifi M., Berruti F., Briens C., McMillan J. Characterization of moisture distribution in a fluidized bed // *Measurement*. 2014. Vol. 47. Iss. 1. P. 150–160. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.08.063>.
20. Молодцова М. Ю., Добрыднев С. В. Условия получения основных карбонатов цинка из аммиачно-карбонатных водных растворов // *Успехи в химии и химической технологии*. 2013. Т. 27. № 7. С. 102–105.

References

1. Fleissner F., Eberhard P. Load balanced parallel simulation of particle-fluid DEM-SPH systems with moving boundaries. In: *Parallel Computing: Architectures, Algorithms and Applications: Proceedings of Conference*. 4–7 September 2007, Julich. Julich; 2007, vol. 38, p. 37–44.
2. Alkatsev M. I., Alkatseva V. M. An investigation of the dependence of roasting characteristics of sulfide nickel concentrates in fluidized bed furnaces on various factors by the method of design imitation experiment. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya = Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2009;3:60–63. (In Russ.).
3. Constantineau J. P., Bouffard S. C., Grace J. R., Richards G. G., Lim C. Jim. Demonstration of the conditions conducive to agglomeration of zinc calcine in fluidized bed roasters. *Minerals Engineering*. 2011;24(13): 1409–1420. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.06.002>.
4. Chen T. T., Dutrizac J. E. Mineralogical changes occurring during the fluid-bed roasting of zinc sulfide concentrates. *JOM*. 2004;56(12):46–51. <https://doi.org/10.1007/s11837-004-0235-y>.
5. Davies R. H., Dinsdale A. T., Gisby J. A., Robinson J. A. J., Martin S. M. MTDATA – thermodynamic and phase equilibrium software from the national physical laboratory. *Calphad*. 2002;26(2):229–271. [https://doi.org/10.1016/S0364-5916\(02\)00036-6](https://doi.org/10.1016/S0364-5916(02)00036-6).
6. Svens K., Kerstiens B., Runkel M. Recent experiences with modern zinc processing technology. *Erzmetall*. 2003;2:94–103.
7. Rutkovsky A. L., Dyunova D. N., Bigulov A. V., Yakovenko I. S., Bilaonov B. D., Dzantiev S. Sh. Investigation of the roasting process of zinc concentrates in a fluidized bed by mathematical modeling. *Mining informational and*

analytical bulletin (scientific and technical journal). 2013;3:217–222.
8. Gerasimenko N. P., Rutkovskij A. L. Investigation of zinc concentrate roasting in a fluidized bed for the purpose of optimization. In: *Nauchno-tekhnicheskaya konferenciya obuchayushchih i molodyh uchenykh SKGMI "NTK-2018": sbornik dokladov po itogam nauchno-issledovatel'skih rabot = Scientific and technical conference of students and young scientists of North Caucasian Mining and Metallurgical Institute "STC-2018": collected reports on the results of scientific research works*. 17–25 May 2018, Vladikavkaz. Vladikavkaz: North Caucasian Mining and Metallurgical Institute; 2018, p. 13–17. (In Russ.).
9. Ivakina S. A., Munts V. A. Fluidized bed furnace for roasting zinc concentrates as a control object. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2018;329(9):31–42. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2018/9/2086>.
10. Kubaschewski O., Alcock S. B. *Metallurgical thermochemistry*, 1982. 392 p. (Russ. ed.: *Metallurgicheskaya termohimiya*. Moscow, Metallurgiya; 1982, 392 p.)
11. Sedov L. I. *Methods of similarity and dimension in mechanics*. Moscow: Nauka; 1977, 440 p. (In Russ.).
12. Pestunova N. P., Remizov Yu. S., Komkov N. M. On the mechanism of zinc concentrate roasting in fluidized bed furnaces. *Kompleksnoe ispol'zovanie mineral'nogo syr'ya = Complex use of mineral resources*. 1990;8:55–60. (In Russ.).
13. Panshin A. M., Shakirzyanov R. M., Izbrekht P. A., Zatonskiy A. V. Basic ways of improvement of zinc pro-

duction at JSC "Chelyabinsk zinc plant". *Tsvetnye metall.* 2015;5:19-21. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2015.05.03>.

14. Boateng A. A. *Rotary kilns: transport phenomena and transport processes*. Amsterdam: Elsevier Science; 2015, 369 p.

15. Orhan G. Leaching and cementation of heavy metals from electric arc furnace dust in alkaline medium. *Hydro-metallurgy*. 2005;78(3-4):236-245. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2005.03.002>.

16. Krasheninina A. G., Khalezov B. D., Bornovolokov A. S., Ordinartsev D. P. Technology for extracting manganese from vanadium converter slag after leaching vanadium. *Metallurgist*. 2019;63(5):534-542. <https://doi.org/10.1134/S0036029520010073>.

17. Panshin A. M., Viduetskiy M. G., Kozlov D. A., Ivakin D. A. Using zinc cake flotation in columnar type equipment

for increasing of Waelz-process efficiency. *Tsvetnye metall.* 2015;5:59-64. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2015.05.12>.

18. Kozlov P. A., Kazanbaev L. A., Zatonitskiy V. A., Travkin V. F. *Extraction-electrolysis processing methods of zinc raw materials*. Moscow: Ruda i metall; 2008, 269 p. (In Russ.).

19. Farkhondehkhaki M., Soleimani M., Latifi M., Berruti F., Briens C., McMillan J. Characterization of moisture distribution in a fluidized bed. *Measurement*. 2014;47(1):150-160.

<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.08.063>.

20. Molodtsova M. Yu., Dobrydnev S. V. Conditions for obtaining the main zinc carbonates from ammonium carbonate water solutions. *Advances in chemistry and chemical technology*. 2013;27(7):102-105. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Алкацев Владимир Михайлович,

кандидат технических наук,
доцент кафедры металлургии цветных металлов
и автоматизации металлургических процессов,
Северо-Кавказский горно-металлургический
институт (государственный технологический
университет),
362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44, Россия

Рутковский Александр Леонидович,

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры металлургии цветных металлов
и автоматизации металлургических процессов,
Северо-Кавказский горно-металлургический
Институт (государственный технологический
университет),
362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44, Россия

Макоева Алла Константиновна,

ассистент кафедры металлургии цветных металлов
и автоматизации металлургических процессов,
Северо-Кавказский горно-металлургический
институт (государственный технологический
университет),
362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44, Россия

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 14.11.2022; одобрена после рецензирования 12.12.2022; принята к публикации 23.12.2022.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir M. Alkatsev,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the
Department of Non-ferrous Metals Metallurgy
and Automation of Metallurgical Processes,
North Caucasian Mining and Metallurgical
Institute (State Technological University),
44, Nikolaev St., Vladikavkaz, 362021, Russia

Alexander L. Rutkovsky,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Non-ferrous
Metals Metallurgy and Automation of
Metallurgical Processes,
North Caucasian Mining and Metallurgical
Institute (State Technological University),
44, Nikolaev St., Vladikavkaz, 362021, Russia

Alla K. Makoeva,

Assistant Professor of the Department of
Non-ferrous Metals Metallurgy
and Automation of Metallurgical Processes,
North Caucasian Mining and Metallurgical
Institute (State Technological University),
44, Nikolaev St., Vladikavkaz, 362021, Russia

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the preparation of the 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 14.11.2022; approved after reviewing 12.12.2022; accepted for publication 23.12.2022.



Обзорная статья

УДК 669.02.09

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-677-687>

Гидрометаллургические технологии переработки мышьяковистого сырья

Роман Евгеньевич Васильев^{1✉}, Анна Ярославовна Бодуэн²,
Анна Андреевна Васильева³

¹⁻³ Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

¹vasilroman2308@ya.ru

²Boduen_aya@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3580-4394>

³fml0914@mail.ru

Резюме. Цель – проведение литературного обзора способов переработки высокомышьяковистого медного сырья, позволяющих перевести мышьяк в малорастворимые и устойчивые соединения. Анализ существующих технологий переработки высокомышьяковистого медного сырья, которые базируются преимущественно на применении гидрометаллургических методов, проводился на основе обзора отечественной и зарубежной научной литературы. Показано, что применение гидрометаллургических способов переработки позволяет перевести опасные для окружающей среды компоненты продуктов переработки в инертные твердые отходы, избегая образования газообразных выбросов. Проведенный литературный анализ позволил подробно рассмотреть способы утилизации мышьяка из технологического процесса переработки сырья. Установлено, что это – методы окисления и осаждения мышьяка в виде малорастворимых и устойчивых соединений. Рассмотрены методы окисления мышьяка, подразумевающие использование таких веществ, как кислород, пероксид водорода, озон, смесь кислорода и диоксида серы, гипохлорит натрия. Проанализированы способы, в которых окисление осуществляется посредством ионов железа и перманганата, бактерий (биоокисление), а также за счет введения катализатора процесса – активированного угля. Показано, что основными методами осаждения являются нейтрализация известью, осаждение сульфидов, соосаждение мышьяка с помощью ионов железа, осаждение скородита, технология инкапсуляции. В результате анализа рассмотренных способов намечены перспективные пути решения проблемы переработки высокомышьяковистых медных концентратов, которая связана с экологическими требованиями к выбросам мышьяка в окружающую среду: комплексная переработка данного типа сырья при помощи автоклавного окисления. Данный способ позволит не только эффективно осажать мышьяк в виде малотоксичного соединения – скородита, но и выделить ценные компоненты (медь, золото, серебро) с их последующим извлечением в самостоятельные готовые продукты. Полученные результаты позволили задать направление для дальнейшего углубленного изучения проблемы.

Ключевые слова: мышьяк, медные концентраты, окисление мышьяка, осаждение мышьяка, комплексная переработка

Для цитирования: Васильев Р. Е., Бодуэн А. Я., Васильева А. А. Гидрометаллургические технологии переработки мышьяковистого сырья // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 4. С. 677–687. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-677-687>.

METALLURGY

Review article

Hydrometallurgical technologies of processing arsenic raw materials

Roman E. Vasiliev^{1✉}, Anna Ya. Boduen², Anna A. Vasilieva³

¹⁻³ Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

¹vasilroman2308@ya.ru

²Boduen_aya@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3580-4394>

³fml0914@mail.ru

© Васильев Р. Е., Бодуэн А. Я., Васильева А. А., 2022

<https://ipolytech.ru>

Abstract. Methods presented in Russian and foreign scientific literature sources for processing high-arsenic copper raw materials to convert arsenic into low-soluble and stable compounds are reviewed. Hydrometallurgical processing methods are shown to be applicable for converting environmentally hazardous components into inert solid wastes while avoiding the formation of gaseous emissions. The isolation of arsenic when processing raw materials involves its oxidation and precipitation in the form of low-soluble and stable compounds. Methods for arsenic oxidation using oxygen, hydrogen peroxide, ozone, mixture of oxygen and sulphur dioxide, sodium hypochlorite are compared. Methods of oxidation by iron and permanganate ions, bacteria (biooxidation), as well as by introducing an activated carbon catalyst, are also considered. Precipitation approaches include neutralization by lime, precipitation of sulphides, co-precipitation of arsenic with iron ions, precipitation of scorodite, and encapsulation technology. As a result of the performed analysis, the authors present a promising approach for solving the problem of processing high-arsenic copper concentrates to comply with standards governing arsenic emissions into the environment, including the comprehensive processing of these raw materials using autoclave oxidation. In addition to the ensuring effective precipitation of arsenic in the form of a low-toxic compound (scorodite), this method can be used to isolate valuable components (copper, gold, silver) with their subsequent extraction into individual finished products. The obtained results establish a direction for a further in-depth study of the problem.

Keywords: arsenic, copper concentrates, arsenic oxidation, arsenic precipitation, complex processing

For citation: Vasiliev R. E., Boduen A. Ya., Vasilieva A. A. Hydrometallurgical technologies of processing arsenic raw materials. *iPolytech Journal*. 2022;26(4):677-687. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-677-687>.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время происходит значительное истощение запасов богатых легкообогащаемых руд. С каждым годом в переработку вовлекается все более бедное полиметаллическое упорное сырье. Снижение содержания ценных компонентов и повышение количества вредных примесей создает необходимость в разработке и применении комплексных технологий, позволяющих повысить эффективность и рентабельность переработки такого сырья.

Различные ученые и исследователи проводят работы, целью которых является поиск новых или усовершенствование уже существующих решений. Важными критериями при выборе технологии переработки являются минералогический и химический составы сырья, удаленность месторождений от предполагаемых предприятий, стоимость и доступность требуемых реагентов и оборудования и т.д.

Распространенным способом переработки сульфидного медного сырья является окислительный обжиг с последующей плавкой, конвертированием, отливкой анодов и электролизом [1]. Однако при наличии высокого содержания вредных примесей, в частности мышьяка, данная схема усложняется за счет внедрения системы вывода мышьяка и его соединений из процесса [2].

Мышьяк, присутствующий в минералах, в ходе гидрометаллургических и пирометаллургических процессов высвобождается из них и впоследствии попадает в окружающую среду [3]. Мышьяк стал всемирной экологической проблемой в металлургической и горнодо-

бывающей промышленности. Перед выбросом отходов, содержащих мышьяк, необходимо провести операции по его переводу в наиболее прочные и нетоксичные соединения. Начальным этапом связывания мышьяка является окисление трехвалентного мышьяка, чтобы улучшить как его удаление, так и стабильность его конечных соединений. Процесс осаждения мышьяка может быть осуществлен с использованием гидрометаллургических и пирометаллургических методов [4]. Пятивалентный мышьяк обычно утилизируют с помощью гидрометаллургических процессов, включающих нейтрализацию известью, осаждение сульфидов мышьяка, связывание мышьяка с ионами железа и образование скородита. В пирометаллургическом методе мышьяк и сера улавливаются при помощи различных систем пыле- и газоулавливания, с последующим переводом в жидкую фазу и применением специальных реагентов, с получением стабильного осадка. Данные мероприятия не только усложняют схему производства, но и увеличивают затраты [5].

Таким образом, текущая практика переработки сульфидного высокомышьяковистого медного сырья, используя пирометаллургические способы, создает необходимость модернизации системы вывода вредных примесей или поиска новых решений, в частности применения гидрометаллургических операций. Стоит отметить, что поведение мышьяка при его переводе в малотоксичные соединения индивидуально для конкретного исходного материала.

СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ УДАЛЕНИЯ МЫШЬЯКА ИЗ СТОКОВ ПРОИЗВОДСТВ

Процессы окисления мышьяка. Первым шагом к удалению мышьяка в горнодобывающей и металлургической промышленности является его окисление. Слабокислотные стоки, получаемые на кислотных и медеплавильных заводах, а также стоки повторной обработки пыли плавильных и обжиговых печей содержат значительное количество трехвалентного мышьяка. Поэтому окисление As (III) необходимо для его максимального удаления из раствора и повышения стабильности осадков. Окисление трехвалентного мышьяка до пятивалентного может происходить в условиях окружающей среды в присутствии кислорода, однако без катализаторов этот процесс протекает медленно.

Для достижения необходимой скорости реакции требуется использовать сильные окислители, такие как пероксид водорода, озон, смесь сернистого газа и кислорода, хлор и гипохлорит натрия.

Применение воздуха и кислорода в окислении As (III) ограничено из-за очень низкой скорости окисления [6]. Было установлено, что пропускание воздуха через раствор, содержащий 200 мкг/л As (III), в течение пяти дней привело к окислению мышьяка всего на 25%.

Пероксид водорода является важным окислителем в гидрометаллургических процессах. Пероксид водорода в 100% избытке может действовать как эффективный окислитель мышьяка в широком диапазоне pH, особенно в щелочной среде при комнатной температуре [7]. Проведен ряд исследований, показывающий, что скорость окисления мышьяка пероксидом водорода зависит от начальной концентрации арсенита, температуры, количества самого пероксида, а также ионов металлов. В специализированном источнике 2005 г. [7] Ritcey G. M. «Ecometales» (Чили): пероксид водорода используется в качестве окислителя в промышленности – на предприятии, осуществляющем утилизацию мышьяка из стоков производства меди путем осаждения его виде скородита (рисунок). Пероксид водорода имеет высокую стоимость, однако

на данном предприятии концентрация арсенита составляет менее 15% от общего количества мышьяка, что делает использование данного метода экономически целесообразным [8].

Феррат-ион, в котором железо находится в степени окисления +6, считается сильным окислителем и коагулянт для очистки сточных вод в широком диапазоне pH. В ряде проведенных исследований [9, 10] авторы утверждают, что использование железоосновных окислителей позволяет окислить арсениты на 90%. Однако этот метод неэкономичен, поскольку соли Fe (VI) являются относительно дорогими расходными реагентами.

Озон является еще одним реагентом для окисления, который может эффективно перевести трехвалентный мышьяк в пятивалентный [6]. Озон обладает высокой окислительной способностью, поэтому он все чаще используется для очистки различного типа вод. Реакция окисления мышьяка озоном существенно зависит от уровня pH. Чтобы повысить эффективность метода озонирования для окисления As (III), газ должен быть диспергирован в водном растворе в виде микропузырьков, уравнение (1). Проведенные исследования [11, 12] показали, что As (III) был полностью окислен до As (V) в течение 20 мин под действием озона, когда начальная концентрация мышьяка (III) составляла 40–200 мкг/дм³.



Кислород, смешанный с диоксидом серы, используется для окисления трехвалентного мышьяка. За протекание данного процесса отвечают гидроксильные радикалы, которые образуются в результате взаимодействия S (IV) с кислородом. Смесь SO₂/O₂ является относительно менее дорогостоящим реагентом, чем другие окислители, используемые для перевода мышьяка в пятивалентное состояние. Различные параметры, такие как pH раствора, температура, молярное соотношение SO₂/O₂ в газовой смеси, скорость подачи сернистого газа и скорость перемешивания, могут значительно контролировать скорость окислительных процессов, уравнение (2). Газовая

смесь SO_2/O_2 также может использоваться для соосаждения мышьяка и железа из раствора в виде арсената железа. В работах [8, 13] было также показано, что гетит с начальной концентрацией $17,6 \text{ г/дм}^3$ при $\text{pH} = 0,75$ не только ускорял скорость окисления As(III) при 90°C , но и способствовал образованию

скородитовых осадков. Стоит отметить, что кислотонейтрализующая способность гетита привела к снижению количества нейтрализующего реагента, необходимого для корректировки pH .

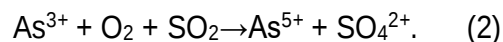
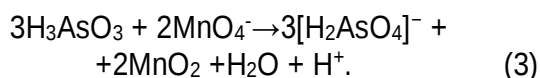


Схема водоочистки на заводе «Ecometales» (Чили)
Water treatment diagram at the Ecometales plant (Chile)

Перманганат-ион считается подходящим окислителем для очистки как питьевой воды, так и подземных вод [14]. Реакция окисления As (III) с помощью перманганат иона характеризуется высокой скоростью и небольшой зависимостью от уровня pH. Проведенные исследования в работах [14, 15] позволили установить, что окисление происходит в три последовательных этапа:

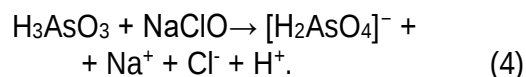
- 1) сорбция As (III) в твердый продукт;
- 2) окисление до As (V);
- 3) десорбция As (V) в раствор.

Стоит отметить, что окисление As (III) приводит к восстановлению MnO_2 и, следовательно, образованию As (V) и Mn (II) при низком уровне pH, уравнение (3).



Гипохлорит натрия является сильным окислителем для As (III). Применение соединений хлора для окисления мышьяка представлено в работе [16]. Трехвалентный мышьяк с начальным содержанием 50 и 300 $мкг/дм^3$, присутствующий в деминерализованной воде, был полностью окислен в присутствии ионов гипохлорита, где соотношение концентрации окислителя и мышьяка составило 3:1 за 5 мин в диапазоне pH от 5 до 8. Диоксид хлора и монохлорамина оказались неэффективны для окисления мышьяка. Так, 100-кратная стехиометрическая загрузка диоксида хлора привела к окислению 76% As (III) в течение 5 мин при pH = 8,3. Авторы утверждают, что 60% трехвалентного мышьяка из раствора деминерализованной воды с концентрацией 50 $мкг/дм^3$ было окислено до пятивалентного диоксидом хлора через два дня. Однако степень окисления мышьяка в реальных грунтовых водах при той же его концентрации и соотношении с окислителем увеличилась до 80% при времени эксперимента равным 30 мин. Авторы связывают это с наличием различных ионов в воде, в частности металлов, которые ускоряют процесс окисления мышьяка. Более того, 100% окисление As (III) было достигнуто как для деминерализованной, так и для природной неочищенной воды после двух дней контакта при pH = 6, когда

соотношение концентрации монохлорамина к As (III) составило 3:1. Окисление арсенита монохлорамином и диоксидом хлора сильно зависит от уровня pH. Диссоциация монохлорамина ускоряется в воде при снижении уровня pH, и в этой связи становится доступно большее количество ионов хлора для окисления трехвалентного мышьяка, уравнение (4).



Активированный уголь ускоряет реакцию окисления арсенита до арсената в присутствии кислорода. Было показано, что 90% As (III) было окислено при использовании 5–10 $г/дм^3$ активированного угля за 20–30 мин, когда начальная концентрация As (III) в воде составляла 40 $мкг/дм^3$ [6]. В 2014 г. был разработан новый метод окисления мышьяка, в котором для ускорения реакции его окисления используется активированный уголь, а в качестве расходного реагента применяется только кислород [17]. Данный процесс протекает в кислых условиях при температуре и давлении окружающей среды менее чем за сутки и имеет эффективность окисления до 99%. Одна из гипотез для описания нового процесса, предложенная авторами, заключается в том, что вода и кислород реагируют на поверхности активированного угля с образованием сильного окислителя, например, пероксида водорода, который затем реагирует с арсенитом с последующим образованием арсената. По мнению авторов, о вероятности такого механизма протекания процесса могут свидетельствовать следующие два факта:

1) использование чистого кислорода повышает скорость реакции окисления по сравнению с использованием воздуха;

2) в непрерывных и серийных экспериментах наблюдаются незначительные изменения уровня pH-системы.

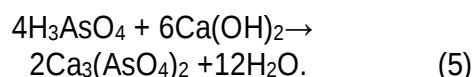
Процесс окисления различных минералов, в том числе минералов мышьяка, при помощи специальных бактерий и микроорганизмов получил название «биоокисление». Медная промышленность с 1900-х годов использует кучное и отвальное биовыщелачивание для обработки медных руд с низким содержанием

меди [18, 19]. Биоокисление значительно повышает скорость процессов окисления при наличии таких бактерий, как *Thiobacillus thiooxidans* и *Thiobacillus ferrooxidans* [20]. В конце 1970-х годов компания «Glencor Process Research» в Южной Африке разработала процесс BIOX™, в котором происходит окисление арсенит-иона до арсенат-иона, с последующим его выводом в виде арсената железа [21, 22].

ПРОЦЕССЫ ОСАЖДЕНИЯ МЫШЬЯКА

Осаждение является широко используемым процессом для удаления мышьяка из отходов производства [23]. Наиболее распространенными малорастворимыми соединениями мышьяка в гидрометаллургических процессах являются следующие: сульфиды мышьяка, арсенит и арсенат кальция, арсенат железа. Каждое из этих соединений обладает относительно низкой растворимостью в соответствующем диапазоне pH.

Нейтрализация известью (CaO) – это простой метод осаждения мышьяка в виде арсенита или арсената кальция при pH = 11–12. Тип образующегося осадка и его растворимость зависят от уровня pH-раствора, температуры, времени осаждения и начального молярного соотношения Ca:As. Осадки образуются в результате добавления извести к мышьяк-содержащему раствору, уравнение (5). Нейтрализация известью является относительно экономичным процессом осаждения мышьяка, однако осадки демонстрируют низкую стабильность в течение длительного промежутка времени, и поэтому должны складироваться на специальных полигонах [24].



На медеплавильном заводе компании «Atlantic Copper» (Испания) был разработан новый процесс обработки мышьяк-содержащего кислого раствора с целью сокращения объема отходов, подлежащих захоронению, и связанных с этим расходов [25].

Эта технология включает три этапа:

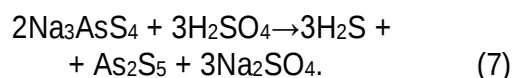
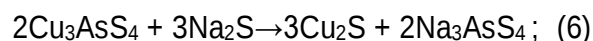
1) добавление извести при температуре 50–80°C для осаждения гипса при pH < 1;

2) повышение уровня pH до 12 для осаждения гипса, арсенита кальция и гидроксидов тяжелых металлов;

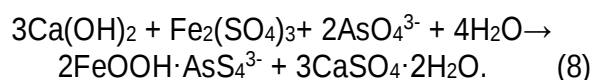
3) осаждение остаточного арсенита в виде железистого арсенита при pH = 7 с молярным соотношением Fe:As более 3:1.

Полученные арсениты кальция и железа сбрасываются в хвостохранилище, а гипс, полученный на первом этапе, продается в качестве побочного продукта цементным заводам.

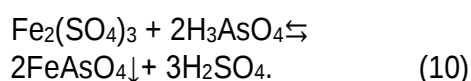
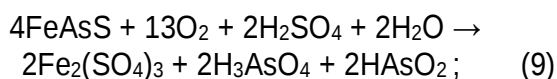
Осаждение сульфидов мышьяка. Процесс щелочного выщелачивания сульфидом натрия был впервые применен для удаления сурьмы из тетраэдрита с целью улучшения серебряных концентратов [26]. Сущность метода заключается в следующем: сырье выщелачивается с помощью Na_2S в присутствии NaOH при температуре 80–105°C (уравнение 6, 7); эта температура ниже температуры кипения раствора гидроксида и сульфида натрия. В результате данного приема мышьяк количественно переходит в раствор. После разделения жидкой и твердой фаз, тиоарсенат натрия кристаллизуют путем выпаривания, охлаждения и фильтрации. Затем кристаллы обрабатывают серной кислотой с образованием As_2S_5 [27, 28]:



Соосаждение мышьяка с помощью ионов железа. Нейтрализация растворов, содержащих ионы Fe (III), приводит к образованию оксигидроксидной фазы железа, известной как ферригидрит (FH), уравнение (8). FH как адсорбент проявляет хорошие сорбционные свойства для поглощения катионов и анионов, таких как AsO_4^{3-} [29]. Этот метод является лучшей демонстрационной доступной технологией (BDAT – от англ. Best Demonstrated Available Technology) для обработки кислых мышьяк-содержащих сточных растворов [30].



Осаждение скородита. Скородит (кристаллический арсенат железа) является встречающимся в природе вторичным минералом мышьяка с химической формулой: $\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Он часто ассоциируется с мышьяксодержащими первичными минералами, такими как арсенопирит [31] и энаргит [32, 33]. Выветривание первичных минералов, включая химические и биологические механизмы окисления, способствует растворению арсенатных и железистых ионов, а следовательно, образованию скородита, уравнения (9) и (10). Скородиты природного происхождения содержат 30% As и имеют молярное соотношение $\text{Fe}:\text{As} = 1:1$. В настоящее время большое внимание уделяется скородиту для осаждения и удаления мышьяка благодаря высокой стабильности данного соединения в кислых и нейтральных условиях [34]. Для эффективного осаждения мышьяка достаточно молярного отношения $\text{Fe}:\text{As} = 1-1,5:1$, содержание мышьяка в полученном продукте достигает 25–30%. Кроме того, благодаря кристаллической структуре, скородиты демонстрируют высокую скорость осаждения и хорошие фильтрационные свойства:



Технология инкапсуляции. Инкапсуляция – это метод, при котором загрязняющие вещества, содержащие тяжелые металлы/металлоиды, в виде мелких частиц или крупных блоков изолируются внутри инертного соединения с высокой структурной целостностью. Это позволяет минимизировать площадь поверхности опасных отходов, подвергающихся воздействию выщелачивающего раствора и последующему растворению токсичных материалов. Метод инкапсуляции осуществляется посредством химического взаимодействия (процессы на основе цемента, извести и фосфатов), физического взаимодействия (нехи-

мическая инкапсуляция) и термического взаимодействия (стеклование и инкапсуляция термопластичными полимерами) между отходами и твердеющими реагентами [35].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В качестве основного способа очистки был выбран метод осаждения мышьяка в форме скородита при автоклавном окислении медного концентрата. Данная технология является перспективной для исследования, так как позволяет не только удалять вредные примеси, в частности мышьяк, из технологического процесса в устойчивой и малотоксичной форме, но и разделять ценные компоненты (медь, золото, серебро) с последующим их переводом в самостоятельные продукты.

В результате проведенного анализа были сделаны следующие выводы:

1. Проблема переработки сырья с высоким содержанием мышьяка является актуальной, что подтверждается работами различных исследователей всего мира.

2. Пирометаллургические способы переработки медных концентратов нуждаются в использовании сложных системы пыле- и газоочистки для снижения выбросов в окружающую среду.

3. Подавляющее большинство существующих методов выделения мышьяка в малотоксичные соединения являются гидрометаллургическими.

4. Более устойчивыми являются соединения пятивалентного мышьяка.

5. Соосаждение мышьяка при помощи ионов железа является наилучшей известной в данное время технологией.

6. Осаждение мышьяка в форме скородита является эффективным методом, но требует параллельного извлечения ценных компонентов для снижения затрат на очистку.

7. Процесс автоклавного окислительного выщелачивания позволит переводить мышьяк в малорастворимую форму (скородит), а также разделять ценные компоненты и переводить их в самостоятельные продукты.

Список источников

1. Зайцев П. В., Кравченко Н. А. Гидрометаллургическое извлечение меди и серебра из концентратов флотации смешанной руды // Цветные металлы. 2020. № 9. Р. 84–91. <https://doi.org/10.17580/tsm.2020.09.07>.
2. Mikula K., Izydorczyk G., Skrzypczak D., Moustakas K., Witek-Krowiak A., Chojnacka K. Value-added strategies for the sustainable handling, disposal, or value-added use of copper smelter and refinery wastes // Journal of Hazardous Materials. 2021. Т. 403. Р. 123602. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123602>.
3. Селиванов Е. Н., Новиков Д. О., Беляков В. В., Скопов Г. В. Распределение мышьяка по продуктам пирометаллургической переработки медно-цинкового концентрата // Цветные металлы. 2020. Vol. 1. Р. 14–18. <https://doi.org/10.17580/tsm.2020.01.02>.
4. Бодуэн А. Я., Петров Г. В., Кобылянский А. А., Булаев А. Г. Сульфидное выщелачивание медного концентрата с высоким содержанием мышьяка // Обогащение руд. 2022. № 1. С. 14–19. <https://doi.org/10.17580/or.2022.01.03>.
5. Strauss J. A., Bazhko V., Ventruti G., Liguó X., Gomez M. A. Arsenic behavior during the treatment of refractory gold ores via POX: characterization of Fe-AsO₄-SO₄ precipitates // Hydrometallurgy. 2021. Vol. 203. Р. 105616. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105616>.
6. Bissen M., Frimmel F. H. Arsenic – a Review. Part II: Oxidation of arsenic and its removal in water treatment // Acta hydrochimica et hydrobiologica. 2003. Vol. 31. Iss. 2. Р. 97–107. <https://doi.org/10.1002/ahch.200300485>.
7. Ritcey G. M. Tailings management in gold plants // Hydrometallurgy. 2005. Vol. 78. Iss. 1-2. Р. 3–20. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2005.01.001>.
8. Jia Yongfeng, Demopoulos G. P. Coprecipitation of arsenate with iron (III) in aqueous sulfate media: effect of time, lime as base and co-ions on arsenic retention // Water Research. 2008. Vol. 42. Iss. 3. Р. 661–668. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.08.017>.
9. Pucek R., Tuček J., Kolařík J., Filip J., Marušák Z., Sharma V. K., Zbořil R. Ferrate(VI)-induced arsenite and arsenate removal by in situ structural incorporation into magnetic iron (III) oxide nanoparticles // Environmental Science & Technology. 2013. Vol. 47. Iss. 7. Р. 3283–3292. <https://doi.org/10.1021/es3042719>.
10. Hao Linlin, Liu Mengzhu, Wang Nannan, Li Guiju. A critical review on arsenic removal from water using iron-based adsorbents // The Royal Society of Chemistry. 2018. Vol. 3. Iss. 69. Р. 39545–39560. <https://doi.org/10.1039/C8RA08512A>.
11. Khuntia S., Majumder S. K., Ghosh P. Oxidation of As(III) to As(V) using ozone microbubbles // Chemosphere. 2014. Vol. 97. Р. 120–124. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.046>.
12. Dodd M. C., Vu Ngoc Duy, Ammann A., Le Van Chieu, Kissner R., Pham Hung Viet, et al. Kinetics and mechanistic aspects of As(III) oxidation by aqueous chlorine, chloramines, and ozone: relevance to drinking water treatment // Environmental Science & Technology. 2006. Vol. 40. Iss. 10. Р. 3285–3292. <https://doi.org/10.1021/es0524999>.
13. Zhang W., Singh P., Muir D. M. SO₂/O₂ as an oxidant in hydrometallurgy // Minerals Engineering. 2000. Vol. 13. Iss. 13. Р. 1319–1328. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(00\)00115-1](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(00)00115-1).
14. Lee Giehyeon, Song Kyungsun, Bae Jongseong. Permanganate oxidation of arsenic(III): reaction stoichiometry and the characterization of solid product // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2011. Vol. 75. Iss. 17. Р. 4713–4727. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2011.02.043>.
15. Lafferty B. J., Ginder-Vogel M., Sparks D. L. Arsenite oxidation by a poorly crystalline manganese-oxide 1. Stirred-flow experiments // Environmental Science & Technology. 2010. Vol. 44. Iss. 22. Р. 8460–8466. <https://doi.org/10.1021/es102013p>.
16. Sorlini S., Gialdini F. Conventional oxidation treatments for the removal of arsenic with chlorine dioxide, hypochlorite, potassium permanganate and monochloramine // Water Research. 2010. Vol. 44. Iss. 19. Р. 5653–5659. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.06.032>.
17. Patente no. 10077487, United States of America. Method for arsenic oxidation and removal from process and waste solutions / Yeonuk Choi, A. G. Gharelar, N. Ahern. Depose 28.05.2014; publ. 04.12.2014.
18. Адамов Э. В., Панин В. В. Биотехнология металлов: реальность и перспективы // Записки Горного института. 2005. Т. 165. С. 10–11.
19. Marsden J. O. Overview of gold processing techniques around the world // Mining, Metallurgy & Exploration. 2006. Vol. 23. Iss. 3. Р. 121–125. <https://doi.org/10.1007/BF03403198>.
20. Теляков Н. М., Дарьин А. А., Луганов В. А. Перспективы применения биотехнологий в металлургии и обогащении // Записки Горного института. 2016. Т. 217. С. 113–124.
21. Bulaev A., Elkina Y., Melamud V. Copper and zinc bioleaching from arsenic-containing polymetallic concentrate // 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019 (Sofia, 9–11 December 2019). Sofia, 2019. Vol. 19. Iss. 6.3. Р. 83–88. <https://doi.org/10.5593/sgem2019V6.3/S08.011>.
22. Nan Xin-yuan, Cai Xin, Kong Jun. Pretreatment process on refractory gold ores with as // The Iron and Steel Institute of Japan. 2014. Vol. 54, Iss. 3. Р. 543–547. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.543>.
23. Качор О. Л., Сарапулова Г. И., Богданов А. В. Исследование возможности иммобилизации подвижных форм мышьяка в техногенных субстратах // Записки Горного института. 2019. Т. 239. С. 596–602. <https://doi.org/10.31897/PMI.2019.5.596>.
24. Zhu Y. N., Zhang X. H., Xie Q. L., Wang D. Q., Cheng G. W. Solubility and stability of calcium arsenates at 25°C // Water, Air, and Soil Pollution. 2006. Vol. 169. Р. 221–238. <https://doi.org/10.1007/s11270-006-2099-y>.
25. Nazari A. M., Radzinski R., Ghahreman A. Review of arsenic metallurgy: treatment of arsenical minerals and the immobilization of arsenic // Hydrometallurgy. 2017. Vol. 174. Р. 258–281. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.10.011>.

26. Filippou D., St-Germain P., Grammatikopoulos T. Recovery of metal values from copper–arsenic minerals and other related resources // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2007. Vol. 28. Iss. 4. P. 247–298. <https://doi.org/10.1080/08827500601013009>.
27. Мамяченков С. В., Анисимова О. С., Костина Д. А. Совершенствование процесса осаждения трисульфида мышьяка из промывных вод серно-кислотного производства медеплавильных заводов // *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2017. Iss. 2. С. 36–42. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2017-2-36-42>.
28. Zhang Shaojian, Peiffer Stefan, Liao Xiaoting, Yang Zhengheng, Ma Xiaoming, He Di. Sulfidation of ferric (hydr) oxides and its implication on contaminants transformation: a review // *Science of The Total Environment*. 2022. Vol. 816. P. 151574. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151574>.
29. Riveros P. A., Dutrizac J. E., Spencer P. Arsenic disposal practices in the metallurgical industry // *Canadian Metallurgical Quarterly*. 2001. Vol. 40. Iss. 4. P. 395–420. <https://doi.org/10.1179/cmqr.2001.40.4.395>.
30. Adelman J. G., Elouatik S., Demopoulos G. P. Investigation of sodium silicate-derived gels as encapsulants for hazardous materials – the case of scorodite // *Journal of Hazardous Materials*. 2015. Vol. 292. P. 108–117. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.03.008>.

31. Corkhill C. L., Vaughan D. J. Arsenopyrite oxidation – a review // *Applied Geochemistry*. 2009. Vol. 24. Iss. 12. P. 2342–2361. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2009.09.008>.
32. Lattanzi P., Da Pelo S., Musu E., Atzei D., Elsener B., Fantauzzi M. Enargite oxidation: a review // *Earth-Science Reviews*. 2008. Vol. 86. Iss. 1–4. P. 62–88. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2007.07.006>.
33. Zhao Yu, Zhao Hongbo, Abashina T., Vainshtein M. Review on arsenic removal from sulfide minerals: an emphasis on enargite and arsenopyrite // *Minerals Engineering*. 2021. Vol. 172. P. 107133. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107133>.
34. Касымова Д. Р., Фокина С. Б. Влияние параметров автоклавной переработки упорного сульфидного золотосодержащего сырья на переход мышьяка в жидкую фазу // *Металлургия XXI столетия глазами молодых: сб. докл. III Международ. науч.-практ. конф. молодых ученых и студентов (г. Донецк, 25 мая 2017)*. Донецк: Изд-во Донецкого национального технического университета, 2017. С. 227–229.
35. Conner J. R., Hoeffner S. L. A Critical Review of Stabilization/Solidification Technology // *Environmental Science and Technology*. 1998. Vol. 28. Iss. 4. P. 397–462. <https://doi.org/10.1080/10643389891254250>.

References

1. Zaitsev P. V., Kravchenko N. A. Hydrometallurgical recovery of copper and silver from flotation concentrates obtained from mixed ore. *Tsvetnye Metally*. 2020;9:84–91. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2020.09.07>.
2. Mikula K., Izydorczyk G., Skrzypczak D., Moustakas K., Witek-Krowiak A., Chojnacka K. Value-added strategies for the sustainable handling, disposal, or value-added use of copper smelter and refinery wastes. *Journal of Hazardous Materials*. 2021;403:123602. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123602>.
3. Selivanov E. N., Novikov D. O., Belyakov V. V., Skopov G. V. Distribution of arsenic between the pyrometallurgical products of copper-zinc concentrate. *Tsvetnye Metally*. 2020;1:14–18. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2020.01.02>.
4. Boduen A. Ya., Petrov G. V., Kobylansky A. A., Bulaev A. G. Sulphide leaching of high-grade arsenic copper concentrates. *Obogashchenie Rud*. 2022;1:14–19. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/or.2022.01.03>.
5. Strauss J. A., Bazhko V., Ventruti G., Ligu X., Gomez M. A. Arsenic behavior during the treatment of refractory gold ores via POX: characterization of Fe-AsO₄-SO₄ precipitates. *Hydrometallurgy*. 2021;203:105616. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105616>.
6. Bissen M., Frimmel F. H. Arsenic – a Review. Part II: Oxidation of arsenic and its removal in water treatment. *Acta hydrochimica et hydrobiologica*. 2003;31(2):97–107. <https://doi.org/10.1002/ahch.200300485>.
7. Ritcey G. M. Tailings management in gold plants. *Hydrometallurgy*. 2005;78(1–2):3–20. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2005.01.001>.

8. Jia Yongfeng, Demopoulos G. P. Coprecipitation of arsenate with iron (III) in aqueous sulfate media: effect of time, lime as base and co-ions on arsenic retention. *Water Research*. 2008;42(3):661–668. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.08.017>.
9. Prucek R., Tuček J., Kolařík J., Filip J., Marušák Z., Sharma V. K., Zbořil R. Ferrate(VI)-induced arsenite and arsenate removal by in situ structural incorporation into magnetic iron (III) oxide nanoparticles. *Environmental Science & Technology*. 2013;47(7):3283–3292. <https://doi.org/10.1021/es3042719>.
10. Hao Linlin, Liu Mengzhu, Wang Nannan, Li Guiju. A critical review on arsenic removal from water using iron-based adsorbents. *The Royal Society of Chemistry*. 2018;3(69):39545–39560. <https://doi.org/10.1039/C8RA08512A>.
11. Khuntia S., Majumder S. K., Ghosh P. Oxidation of As(III) to As(V) using ozone microbubbles. *Chemosphere*. 2014;97:120–124. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.046>.
12. Dodd M. C., Vu Ngoc Duy, Ammann A., Le Van Chieu, Kissner R., Pham Hung Viet, et al. Kinetics and mechanistic aspects of As(III) oxidation by aqueous chlorine, chloramines, and ozone: relevance to drinking water treatment. *Environmental Science & Technology*. 2006;40(10):3285–3292. <https://doi.org/10.1021/es0524999>.
13. Zhang W., Singh P., Muir D. M. SO₂/O₂ as an oxidant in hydrometallurgy. *Minerals Engineering*. 2000;13(13):1319–1328. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(00\)00115-1](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(00)00115-1).
14. Lee Giehyeon, Song Kyungsun, Bae Jongseong. Permanganate oxidation of arsenic(III): reaction stoichiometry

and the characterization of solid product. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2011;75(17):4713-4727. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2011.02.043>.

15. Lafferty B. J., Ginder-Vogel M., Sparks D. L. Arsenite oxidation by a poorly crystalline manganese-oxide 1. Stirred-flow experiments. *Environmental Science & Technology*. 2010;44(22):8460-8466. <https://doi.org/10.1021/es102013p>.

16. Sorlini S., Gialdini F. Conventional oxidation treatments for the removal of arsenic with chlorine dioxide, hypochlorite, potassium permanganate and monochloramine. *Water Research*. 2010;44(19):5653-5659. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.06.032>.

17. Choi Yeonuk, Gharelar A. G., Ahern N. Method for arsenic oxidation and removal from process and waste solutions. Patent US, no. 10077487; 2014.

18. Adamov E. V., Panin V. V. Biotechnology of metals: reality and prospects. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*. 2005;165:10-11. (In Russ.).

19. Marsden J. O. Overview of gold processing techniques around the world. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2006;23(3):121-125. <https://doi.org/10.1007/BF03403198>.

20. Telyakov N. M., Daryin A. A., Luganov V. A. Prospects of biotechnologies application in metallurgy and enrichment. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*. 2016;217:113-124. (In Russ.).

21. Bulaev A., Elkina Y., Melamud V. Copper and zinc bioleaching from arsenic-containing polymetallic concentrate. In: *19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019*. 9–11 December 2019, Sofia. Sofia; 2019, vol. 19, iss. 6.3, p. 83-88. <https://doi.org/10.5593/sgem2019V6.3/S08.011>.

22. Nan Xin-yuan, Cai Xin, Kong Jun. Pretreatment process on refractory gold ores with as. *The Iron and Steel Institute of Japan*. 2014;54(3):543-547. <https://doi.org/10.2355/isi-jinternational.54.543>.

23. Kachor O. L., Sarapulova G. I., Bogdanov A. V. Investigation of the possibility of immobilisation of mobile forms of arsenic in technogenic soils. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*. 2019;239:596-602. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2019.5.596>.

24. Zhu Y. N., Zhang X. H., Xie Q. L., Wang D. Q., Cheng G. W. Solubility and stability of calcium arsenates at 25°C. *Water, Air, and Soil Pollution*. 2006;169:221-238. <https://doi.org/10.1007/s11270-006-2099-y>.

25. Nazari A. M., Radzinski R., Ghahreman A. Review of arsenic metallurgy: treatment of arsenical minerals and the immobilization of arsenic. *Hydrometallurgy*. 2017;174:258-281. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.10.011>.

26. Filippou D., St-Germain P., Grammatikopoulos T. Recovery of metal values from copper–arsenic minerals

and other related resources. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2007;28(4):247-298. <https://doi.org/10.1080/08827500601013009>.

27. Mamyachenkov S. V., Anisimova O. S., Kostina D. A. Improvement of arsenic trisulfide precipitation from sulfuric acid production flush waters at copper works. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya = Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2017;(2):36-42. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2017-2-36-42>.

28. Zhang Shaojian, Peiffer Stefan, Liao Xiaoting, Yang Zhengheng, Ma Xiaoming, He Di. Sulfidation of ferric (hydr) oxides and its implication on contaminants transformation: a review. *Science of The Total Environment*. 2022;816:151574. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151574>.

29. Riveros P. A., Dutrizac J. E., Spencer P. Arsenic disposal practices in the metallurgical industry. *Canadian Metallurgical Quarterly*. 2001;40(4):395-420. <https://doi.org/10.1179/cm.2001.40.4.395>.

30. Adelman J. G., Elouatik S., Demopoulos G. P. Investigation of sodium silicate-derived gels as encapsulants for hazardous materials – the case of scorodite. *Journal of Hazardous Materials*. 2015;292:108-117. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.03.008>.

31. Corkhill C. L., Vaughan D. J. Arsenopyrite oxidation – a review. *Applied Geochemistry*. 2009;24(12):2342-2361. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2009.09.008>.

32. Lattanzi P., Da Pelo S., Musu E., Atzei D., Elsener B., Fantauzzi M. Enargite oxidation: a review. *Earth-Science Reviews*. 2008;86(1-4):62-88. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2007.07.006>.

33. Zhao Yu, Zhao Hongbo, Abashina T., Vainshtein M. Review on arsenic removal from sulfide minerals: an emphasis on enargite and arsenopyrite. *Minerals Engineering*. 2021;172:107133. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107133>.

34. Kasymova D. R., Fokina S. B. Influence of pressure treatment parameters of refractory sulphide gold-containing raw materials on arsenic transition to the liquid phase. In: *Metallurgiya XXI stoletiya glazami molodyh: sbornik dokladov III Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii molodyh uchenykh i studentov = Metallurgy of the 21st century through the eyes of the young: Collected reports of the 3^d International scientific and practical conference of young scientists and students*. 25 May 2017, Doneck. Doneck: Donetsk National Technical University; 2017, p. 227-229. (In Russ.).

35. Conner J. R., Hoeffner S. L. A Critical review of stabilization/solidification technology. *Environmental Science and Technology*. 1998;28(4):397-462. <https://doi.org/10.1080/10643389891254250>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Васильев Роман Евгеньевич,
аспирант,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Roman E. Vasiliev,
Postgraduate Student,
St. Petersburg Mining University,
2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia

Бодуэн Анна Ярославовна,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры металлургии,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2, Россия

Anna Ya. Boduen,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Metallurgy Department,
St. Petersburg Mining University,
2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia

Васильева Анна Андреевна,
аспирант,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2, Россия

Anna A. Vasilieva,
Postgraduate Student,
St. Petersburg Mining University,
2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the preparation of the article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 15.03.2022; одобрена после рецензирования 03.08.2022; принята к публикации 15.11.2022.

Information about the article

The article was submitted 15.03.2022; approved after reviewing 03.08.2022; accepted for publication 15.11.2022.

МЕТАЛЛУРГИЯ



Научная статья

УДК 669.213.4

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-688-696>

Выбор выщелачивающей системы для извлечения золота из руды месторождения «Быньговское»

Владимир Геннадьевич Лобанов^{1✉}, Раиса Энверовна Хабибулина²Ольга Борисовна Колмачихина³, Ольга Юрьевна Маковская⁴¹⁻⁴Уральский федеральный университет им. первого Президента России

Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

¹lobanov-vl@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6450-8434>²raisa.khabibulina@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2764-4434>³o.b.kolmachikhina@urfu.ru⁴o.i.makovskaia@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5794-1475>

Резюме. Цель работы – формирование научных основ экологически чистой технологии извлечения золота из минерального сырья. В качестве альтернативы традиционному цианиду предложены хлорсодержащие производные изоциануровой кислоты, относящейся к разряду органических кислот ($C_3H_3N_3O_3$). Данный реагент в изучаемом процессе сочетает роль окислителя пролонгированного действия и комплексообразователя, в роли которого служит образующийся ион Cl^- . В исследованиях использована методика вращающегося диска. Результаты экспериментов оценивали измерением содержания золота в растворах с использованием атомно-адсорбционного метода. Изучены теоретические особенности растворения золота с использованием предлагаемого реагента. С целью оценки применимости выявленных закономерностей для практического использования оценены сравнительные показатели выщелачивания золота из руды месторождения «Быньговское» (Свердловская область) предложенным реагентом, цианидом и китайским заменителем цианида «Цикада». Изучена зависимость скорости растворения золотого диска от температуры, концентраций выщелачивающего реагента и соляной кислоты. В опытах с дисковым образцом установлена экспоненциальная зависимость скорости от концентрации изучаемого реагента, при этом максимальная интенсивность процесса достигается при достижении концентрации выше 50 г/дм^3 . Оптимальный уровень кислотности – $0,3\text{--}0,4 \text{ г-ион/дм}^3$ соляной кислоты. Установлено, что повышение температуры позволяет ускорить растворение, но технологически это не оправдано. Скорость растворения золотого диска в оптимальных условиях достигает $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ г-ион/(см}^2\text{-мин)}$, что примерно в 100 раз выше, чем при растворении цианистыми растворами в традиционных режимах. При выщелачивании золота из руды в сопоставимых условиях достигнута близкая степень извлечения золота растворами цианидов и хлорсодержащих производных изоциануровой кислоты, при использовании растворов «Цикады» данный показатель в 2 раза ниже. В целом по результатам исследований установлены высокая скорость растворения золота при использовании предложенного реагента и технологическая возможность выщелачивания золота из руды при использовании данного экологически чистого реагента.

Ключевые слова: золото, растворение, органический хлор, производные изоциануровой кислоты, руда, выщелачивание

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке за счет средств, составляющих доход от доверительного управления целевым капиталом на развитие УрФУ, сформированным при участии ООО «УГМК-Холдинг».

Для цитирования: Лобанов В. Г., Хабибулина Р. Э., Колмачихина О. Б., Маковская О. Ю. Выбор выщелачивающей системы для извлечения золота из руды месторождения «Быньговское» // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 4. С. 688–696. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-688-696>.

Selection of a leaching system for the extraction of gold from the ore of the Byn'govskoye deposit

Vladimir G. Lobanov^{1✉}, Raisa E. Khabibulina²,
Olga B. Kolmachikhina³, Olga Yu. Makovskaia⁴

¹⁻⁴Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

¹lobanov-vl@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6450-8434>

²raisa.khabibulina@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2764-4434>

³o.b.kolmachikhina@urfu.ru

⁴o.i.makovskaia@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5794-1475>

Abstract. A theoretical substantiation of an environmentally friendly technology for extracting gold from mineral raw materials is presented. In terms of an alternative to conventional cyanide, the authors propose chlorine-bearing derivatives of organic isocyanuric acid ($C_3H_3N_3O_3$). In the studied process, this reagent combines the roles of a long-acting oxidant and complexing agent due to the resulting Cl^- ion. For experimental purposes, the rotating disc technique was applied. Experimental results were evaluated by measuring the concentration of gold in solutions using the atomic adsorption method. The theoretical characteristics of gold dissolution using the proposed reagent were studied. In order to evaluate the applicability of the revealed regularities for practical purposes, comparative indicators for leaching gold from the ore of the Byn'govskoye deposit (Sverdlovsk Oblast) using the proposed reagent, cyanide and CYCAD cyanide substitute (China) were evaluated. The dependence of the gold disc dissolution rate on temperature, as well as leaching reagent and hydrochloric acid concentrations, were studied. In disc sample experiments, the exponential dependence of the dissolution rate on the concentration of the studied reagent was established. In this case, the maximum intensity of the process is achieved at a concentration higher than 50 g/dm^3 . The optimum acidity level comprises $0.3\text{--}0.4 \text{ g ion/dm}^3$ of hydrochloric acid. Despite an increase in temperature being shown to accelerate the dissolution process, this appears to be technologically unjustified. Under optimal conditions, the gold disc dissolution rate reaches $0.5 \cdot 10^{-3} \text{ g ion/(cm}^2 \cdot \text{min)}$, which is approximately one hundred times higher than during the dissolution by the cyanic solutions in conventional modes. Close gold extraction values were achieved in the solutions of cyanides and chlorine-bearing derivatives of isocyanuric acid during the leaching of gold from the ore under the comparable conditions. For CYCAD solutions, the same indicator is two times lower. The results of the performed studies demonstrate the high dissolution rate of gold using the proposed reagent along with the technological possibility of leaching gold from ores using this environmentally friendly reagent.

Keywords: gold, dissolution, organic chlorine, isocyanuric acid derivatives, ore, leaching

Funding: The research was funded by means of the trust income from the target capital for the development of Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin formed with the participation of LLC Ural Mining and Metallurgical Company Holding (UMMC-Holding).

For citation: Lobanov V. G., Khabibulina R. E., Kolmachikhina O. B., Makovskaia O. Yu. Selection of a leaching system for the extraction of gold from the ore of the Byn'govskoye deposit. *iPolytech Journal*. 2022;26(4):688-696. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-688-696>.

ВВЕДЕНИЕ

Благородные металлы крайне устойчивы к химическому воздействию, растворяются только в том случае, если раствор содержит окислитель и лиганд, связывающий золото в прочный комплекс. Сочетание лиганда и окислителя, обеспечивающих растворение ценных компонентов, называется выщелачивающей системой.

Выбор оптимальной выщелачивающей

системы определяется рациональным сочетанием ряда факторов, прежде всего экономических, технологических, безопасностью для окружающей среды и персонала при практическом использовании.

ОБЗОР СОСТОЯНИЯ РАССМАТРИВАЕМОЙ ПРОБЛЕМЫ

Для выщелачивания золота и серебра из минерального и вторичного сырья известно и

в разной мере апробировано порядка 40 выщелачивающих систем, способных переводить золото и серебро в растворимое состояние. Однако лишь немногие из них заслуживают серьезного рассмотрения с точки зрения возможности промышленного использования в гидрометаллургии благородных металлов. В числе наиболее изученных систем лиганд/окислитель: тиомочевина, серная кислота [1, 2] и тиоцианат [3] с ионами трехвалентного железа; сульфит, тиосульфат натрия [3–5], сульфат меди (II) и аммиак в сочетании с кислородом [6]; бромат, бромид натрия и бром, йодид и йод [7, 8], раствор серы в известковом молоке, раствор роданида и перманганат [9], дитиооксамид или замещенный дитиооксамид и др. До изобретения цианистого метода для переработки руд и концентратов широко использовали кислые и щелочные растворы, содержащие хлор-ион как комплексообразователь и активный хлор, способный окислить золото. В качестве окислителя использовали газообразный хлор, гипохлориты [10] и перхлораты щелочных металлов. Последний вариант принято называть жидкофазное хлорирование [11, 12].

Разновидностью хлорирования является технология, включающая предварительное закисление руды разбавленным раствором соляной кислоты и последующее выщелачивание золота солянокислыми растворами, содержащими галит и молекулярный хлор [13], поверхностно-активное вещество и гипохлорит [14], соляную кислоту, гипохлориты натрия, калия или кальция, водный раствор хлорноватистой кислоты [15, 16].

В практической металлургии для извлечения золота из руд и концентратов наиболее широко используется система, представляющая собой сочетание цианида натрия (калия) в качестве лиганда с воздухом (кислородом) в качестве окислителя. Термодинамической основой предпочтительного применения цианидов является исключительная прочность образующихся комплексов. Даже сравнительно низкий окислительный потенциал кислорода в водных растворах при атмосферном

давлении достаточен для окисления и перевода золота в цианистый комплекс [17, 18].

Цианиды, несмотря на исключительную токсичность, на сегодняшний день являются основным реагентом для выщелачивания золота из минерального сырья. Вместе с тем, специалисты всего мира находятся в поиске выщелачивающей системы, альтернативной цианидам.

Примерно 10–15 лет назад китайские производители впервые представили несколько вариантов реагента, которые по совокупности свойств были полным аналогом цианидов – Flotent GoldSC, EarthGold 570, Goldix 570 и некоторые другие. Реагенты подобного типа заявляются как недорогие, экологически безопасные химические вещества, обеспечивающие высокое извлечение золота, с возможностью использовать в обороте для кучного или чанового выщелачивания.

Другой альтернативный и весьма перспективный способ выщелачивания золота основан на использовании соединений органического хлора, в частности дихлоризоцианурата натрия дигидрата. Данный реагент относят к хлорсодержащей производной циануровой кислоты ($C_3H_3N_3O_3$), относящейся к разряду органических кислот [19]. Важнейшей особенностью хлоризоциануратов является их экологическая безопасность. Реагенты подобного типа относятся к III классу опасности химических веществ (СТО 14175996-202009), что является показателем предельно низкой токсикологической категории реагента. При растворении хлоризоциануратов в воде выделяется активный хлор, который и обеспечивает окислительную функцию реагента. В воде обсуждаемый реагент растворяется медленно, и эта особенность обуславливает пролонгацию окислительных свойств хлоризоциануратов, возможность синхронизировать растворение золота и генерацию окислителя, обеспечивает уверенное регулирование и поддержание требуемого окислительно-восстановительного потенциала выщелачивающей системы в широком диапазоне pH на требуемом уровне [20].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ

На основании результатов предварительных тестовых опытов установлено, что извлечение золота из частной пробы окисленной золотосодержащей руды с использованием производных изоциануровой кислоты сопоставимо с данным показателем при цианистом выщелачивании. Ожидаемыми преимуществами выщелачивания золота соединениями органического хлора метода могут стать экологичность реагента, высокие скорость и степень извлечения золота.

С использованием методики вращающегося диска диаметром 5 мм изучены принципиальные особенности растворения золота чистотой 99,9% с использованием изоциануровой кислоты (ИЦК). По окончании опытов раствор анализировали методом атомной адсорбции (новАА300). Длительность всех опытов выбиралась с учетом необходимости достижения уверенно определяемой концентрации золота в растворе и не превышала 5–10 мин. В опытах с растворением дискового образца необходимое количество окислителя (ИЦК) предварительно растворяли в заданном объеме воды и только после этого погружали диск в раствор. При заведомо избыточной концентрации ИЦК наблюдалось пересыщение раствора хлором, пузырьки которого выделялись из раствора. В качестве других

реагентов в опытах использовали цианид натрия, соляную кислоту категории «техническая».

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Важнейшим параметром любой технологии по извлечению золота является скорость растворения. На кинетику процесса влияет прежде всего концентрация комплексообразователя и окислителя. На предварительном этапе установлено, что интенсивное растворение золота в растворах ИЦК протекает в слабокислом растворе. На рис. 1 представлена зависимость скорости растворения золотого диска от концентрации окислителя. Экспоненциальный характер кривой предположительно определяется увеличением непродуктивного визуально наблюдаемого выделения хлора в атмосферу при повышенных концентрациях ИЦК в растворе. Диапазон рациональной дозировки, обеспечивающей максимально возможное вовлечение ИЦК в растворение золота, соответствует 5–10 г/дм³.

На первом этапе были выбраны заведомо завышенные концентрации реагентов и целью дальнейших опытов являлось изучение зависимости скорости растворения золота от других параметров процесса (рис. 2). В частности, соляная кислота не только обеспечивает кислый характер среды, но и является

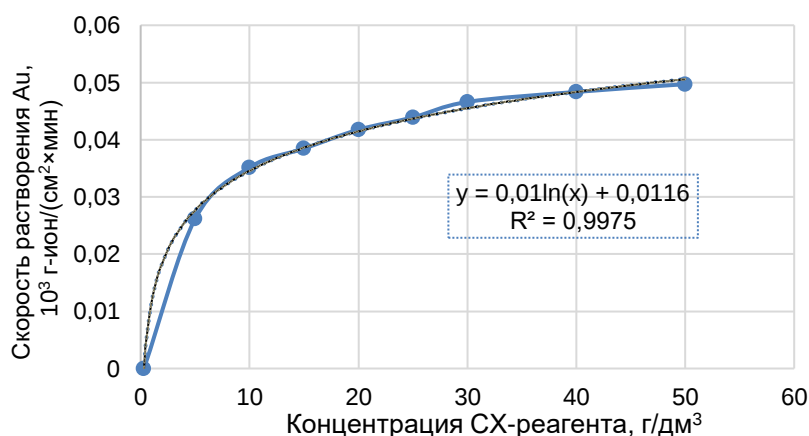


Рис. 1. Зависимость скорости растворения золота от концентрации окислителя в растворе
(условия: 25°C; 300 об/мин; $C_{HCl} = 1,4$ г-ион/дм³)

Fig. 1. Gold dissolution rate vs oxidizer concentration in solution (conditions: 25°C; 300 rpm; $C_{HCl} = 1.4$ g-ion/dm³)

источником ионов хлора, выступающего в данном случае в качестве комплексообразователя.

Из приведенных результатов следует, что максимально достигаемая скорость растворения золота наблюдается при концентрации соляной кислоты 0,3–0,5 г-ион/дм³ и достигает $0,5 \cdot 10^{-3}$ г-ион/(см²×мин). Для сравнения, скорость растворения золота в цианистом растворе, оцененная И. А. Каковским, примерно в 100 раз меньше. Уменьшение скорости растворения золота в области повышенной кислотности объясняется интенсификацией разложения ИЦК.

При оценке влияния температуры на скорость растворения золота использовали термостатированный лабораторный стакан. Результаты приведены на рис. 3.

С увеличением температуры скорость растворения золота возрастает линейно. При температурах 50°C и выше визуально наблюдаемое непродуктивное разложение окислителя интенсифицируется.

С учетом результатов, полученных выше, в работе проведено сравнение основных показателей цианирования в традиционном варианте с показателями альтернативных реагентов, в частности, с одним из китайских

заменителей цианида, получившего у российских пользователей название «Золотая ци-када», и растворами органического хлора – ИЦК.

Объектом исследований являлась окисленная глинистая золотосодержащая руда Быньговская (Средний Урал) крупностью 1,5 мм. Основными породообразующими минералами всех проб являются кварц, оксиды железа и алюминия, слюды. Химический состав материала представлен в табл. 2.

Содержание золота по данным пробирного анализа составляет 2,5 г/т.

Опыты по выщелачиванию золота проводили с использованием бутылочного агитатора при Ж:Т = 3:1 при комнатной температуре. Состав выщелачивающих растворов:

- ИЦК – 5 г/дм³, соляной кислоты – 0,4 г-ион/дм³;
- цианида натрия – 2 г/дм³, pH = 10,7;
- «цикада» – 2 г/дм³, pH = 10,9.

Представительные навески сухой руды массой 100 г засыпали в пластиковые бутылки объемом 0,5 дм³, заливали выщелачивающий раствор. Реагент ИЦК загружали в бутылки в порошкообразном виде. Бутылки герметично закрывали, закрепляли на траверсе и включали вращение. Скорость вращения траверсы

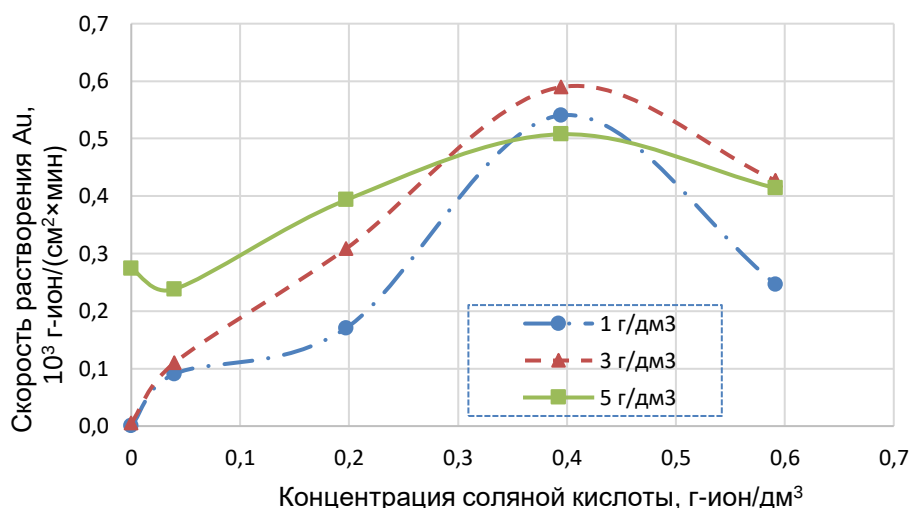


Рис. 2. Влияние концентрации соляной кислоты на скорость растворения золота (условия: 25°C, 300 об/мин, концентрация ИЦК 1; 3; 5 г/дм³)

Fig. 2. Effect of hydrochloric acid concentration on gold dissolution rate (conditions: 25°C, 300 rpm, concentration of target-controlled infusion (TCI) – 1; 3; 5 g/dm³)

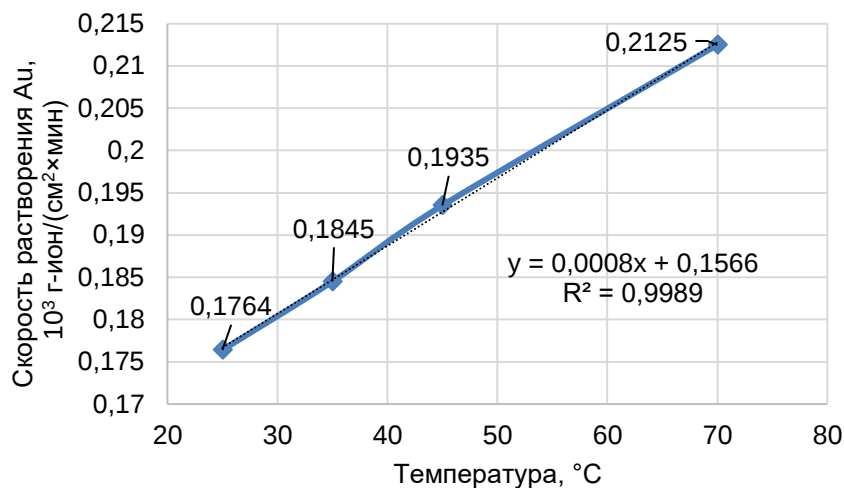


Рис. 3. Зависимость скорости растворения Au от температуры
 (условия: 300 об/мин, $C_{\text{ицк}} - 1 \text{ г/дм}^3$, $C_{\text{Cl}} - 0,4 \text{ г-ион/дм}^3$)

Fig. 3. Gold dissolution rate vs temperature (conditions: 300 rpm, $C_{\text{TCI}} - 1 \text{ g/dm}^3$, $C_{\text{Cl}} - 0.4 \text{ g-ion/dm}^3$)

составила 30–40 об/мин. Через 10, 24, 48 ч по ходу опытов отбирали пробы растворов объемом 20 см³, в которых методом атомной адсорбции определяли концентрацию золота.

По истечении суток извлечение золота в раствор дало следующие показатели: цианированием – 71,6%; «цикадой» – 28%; ИЦК –

78,4% (рис. 4).

Примечательно, что за первый час выщелачивания концентрация золота в растворе при использовании цианида составила 0,52 г/т, а при использовании ИЦК в три раза больше – 1,7 г/т.

Таблица 2. Химический состав исследуемого материала
 Table 2. Chemical composition of the material under investigation

Компонент	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	Fe _{общ.}
Содержание, %	51–55	18–21	0,9–1	0,2–0,3	0,15–0,2	5–6	2,8–3,0	11–12

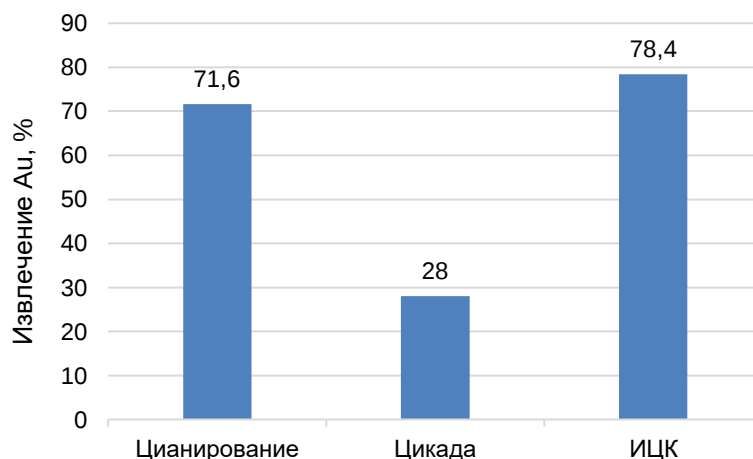


Рис. 4. Результаты опытов по выщелачиванию золота из руды (условия: 25 °C, продолжительность 24 ч, $C_{\text{циан}} = 2 \text{ г/дм}^3$; $C_{\text{цикада}} = 2 \text{ г/дм}^3$; $C_{\text{ицк}} = 5 \text{ г/дм}^3$ и $C_{\text{HCl}} - 0,4 \text{ г-ион/дм}^3$, Ж:Т = 3:1)

Fig. 4. Results of experiments on leaching gold from ore (conditions: 25 °C, 24 hours duration, $C_{\text{cyan}} = 2 \text{ g/dm}^3$; $C_{\text{cicada}} = 2 \text{ g/dm}^3$; $C_{\text{TCI}} = 5 \text{ g/dm}^3$ and $C_{\text{HCl}} - 0.4 \text{ g-ion/dm}^3$, W:T = 3:1)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Поиск альтернативы цианидам для выщелачивания золота из минерального сырья чрезвычайно актуален.

2. Изучено влияние состава раствора и температуры на скорость растворения дискового образца золота экологически чистым реагентом – хлорсодержащими растворами ИЦК.

3. Скорость растворения золота при температуре 20°C и концентрации ИЦК 15 г/дм³

достигает $0,5 \cdot 10^{-3}$ г-ион/(см²×мин), что в 100 раз выше, чем при цианировании.

4. При сопоставимых условиях извлечение золота из руды при использовании цианида и ИЦК более чем в 2 раза выше по сравнению с китайским реагентом «цикада».

5. Растворы органического хлора обеспечивают конкурентоспособные показатели скорости и степени выщелачивания золота из руды в сопоставлении с растворами цианидов.

Список источников

1. Дмитриенко В. П., Дмитриенко И. В., Макасеев Ю. Н., Сидоров М. Е. Тиомочевинное выщелачивание золота из гравитационного концентрата // Золото и технологии. 2019. № 1. С. 82–85.
2. Whitehead J. A., Zhang J., Cluskey A., Lawrance G. A. Comparative leaching of a sulfidic gold ore in ionic liquid and aqueous acid with thiourea and halides using Fe(III) or HSO₅⁻ oxidant // Hydrometallurgy. 2009. Vol. 98. Iss. 3-4. P. 276–280. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2009.05.012>.
3. Холов Х. И., Шарифбоев Н. Т., Самихов Ш. Р., Джуракулов Ш. Р., Зарифова М. С. Выщелачивание золота различными растворами, заменители цианида и их перспективы в будущем // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2021. Т. 14. № 4. С. 433–447. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0324>.
4. Syed S. Recovery of gold from secondary sources – a review // Hydrometallurgy. 2012. Vol. 115-116. P. 30–51. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.12.012>.
5. Grosse A. C., Dicinoski G. W., Shaw M. J., Haddad P. R. Leaching and recovery of gold using ammoniacal thiosulfate leach liquors (a review) // Hydrometallurgy. 2003. Vol. 69. Iss. 1-3. P. 1–21. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(02\)00169-X](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(02)00169-X).
6. Gökelma M., Birich A., Stopic S., Friedrich B. A Review on alternative gold recovery reagents to cyanide // Journal of Materials Science and Chemical Engineering. 2016. Vol. 4. Iss. 8. P. 8–17. <https://doi.org/10.4236/msce.2016.48002>.
7. Tein I., Ziyadanogullari R. The effect of sulfurization process on flotation of copper ore containing gold and silver // Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering. 2008. Vol. 7. No. 3. P. 193–202. <http://dx.doi.org/10.4236/jmmce.2008.73015>.
8. Hodouin D., Makni S. Real-time reconciliation of mineral processing plant data using bilinear material balance equations coupled to empirical dynamic models // International Journal of Mineral Processing. 1996. Vol. 48. Iss. 3-4. P. 245–264. [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(96\)00025-7](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(96)00025-7).
9. Ширяева В. В. Разработка технологического режима извлечения золота из комплексных золотоурановых руд с использованием роданидных растворов методом кучного выщелачивания // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. № 7. С. 403–412.
10. Baghalha M. Leaching of base gold-bearing ore with chloride-hypochlorite solutions // International Journal of Mineral Processing. 2007. Vol. 82. Iss. 4. P. 178–186. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2006.09.001>.
11. Olteanu A. F., Dobre T., Panturu E., Radu A. D., Akcil A. Experimental process analysis and mathematical modeling for selective gold leaching from slag through wet chlorination // Hydrometallurgy. 2014. Vol. 144-145. P. 170–185. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.02.011>.
12. Guo Xue-Yi, Liu Zuo-Wei, Tian Qing-Hua, Li Dong, Zhang Lei. Gold extraction from Carlin-type concentrate by a novel environmentally friendly lixiviant // Hydrometallurgy. 2022. Vol. 211. P. 105884. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2022.105884>.
13. Yannopoulos J. C. The extractive metallurgy of gold. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991. 273 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4684-8425-0>.
14. Neto I. F. F., Soares H. M. V. M. Simple and near-zero-waste processing for recycling gold at a high purity level from waste printed circuit boards // Waste Management. 2021. Vol. 135. P. 90–97. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.08.025>.
15. Ahtiainen R., Lundström M. Cyanide-free gold leaching in exceptionally mild chloride solutions // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 234. P. 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.197>.
16. Hasab M. G., Rashchi F. Chloride-hypochlorite leaching and hydrochloric acid washing in multi-stages for extraction of gold from a refractory concentrate // Hydrometallurgy. 2014. Vol. 142. P. 56–59. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2013.11.015>.
17. Barani K., Kogani Y., Nazarian F. Leaching of complex gold ore using a cyanide-glycine solution // Minerals Engineering. 2022. Vol. 180. P. 107475.

<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107475>.

18. Самихов Ш. Р., Зинченко З. А. Изучение кинетики процесса цианирования золота и серебра из руды месторождения Мосариф // Наука и инновация. 2014. № 1. С. 88–92.
 19. Хабибулина Р. Э., Лобанов В. Г. Экологически чистая технология выщелачивания золота из техногенного сырья // Актуальные проблемы развития технических наук: сб. ст. участников XXIV Областного конкурса науч.-иссл. работ «Научный Олимп» по направлению «Технические науки». Екатеринбург: Уральский

федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2021. С. 31–35.

20. Хабибулина Р. Э., Лобанов В. Г., Колмачихина О. Б., Коновалов М. В., Дружинин Д. И. Извлечение золота из концентратов экологически чистым способом // Современные технологии производства цветных металлов: матер. Междунар. науч. конф., посвящ. 80-летию С. С. Набойченко (г. Екатеринбург, 24 марта 2022 г.). Екатеринбург: Изд-во Уральского университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2022. С. 192–196.

References

1. Dmitrienko V. P., Dmitrienko I. V., Makaseev Yu. N., Sidorov M. E. Thiourea leaching of gold from gravity concentrate. *Zoloto i tekhnologii*. 2019;1:82-85. (In Russ.).
 2. Whitehead J. A., Zhang J., Cluskey A., Lawrance G. A. Comparative leaching of a sulfidic gold ore in ionic liquid and aqueous acid with thiourea and halides using Fe(III) or HSO₅⁻ oxidant. *Hydrometallurgy*. 2009;98(3-4):276-280. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2009.05.012>.
 3. Kholov K. I., Sharifboev N. T., Samikhov S. R., Dzhurakulov S. R. Gold leaching by various solutions, cyanide substitutes and their future prospects. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2021;14(4):433-447. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0324>.
 4. Syed S. Recovery of gold from secondary sources – a review. *Hydrometallurgy*. 2012;115-116:30-51. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.12.012>.
 5. Grosse A. C., Dicinoski G. W., Shaw M. J., Haddad P. R. Leaching and recovery of gold using ammoniacal thiosulfate leach liquors (a review). *Hydrometallurgy*. 2003;69(1-3):1-21. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(02\)00169-X](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(02)00169-X).
 6. Göknelma M., Birich A., Stopic S., Friedrich B. A Review on alternative gold recovery reagents to cyanide. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*. 2016;4(8):8-17. <https://doi.org/10.4236/msce.2016.48002>.
 7. Tein I., Ziyadanogullari R. The effect of sulfurization process on flotation of copper ore containing gold and silver. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*. 2008;7(3):193-202. <http://dx.doi.org/10.4236/jmmce.2008.73015>.
 8. Hodouin D., Makni S. Real-time reconciliation of mineral processing plant data using bilinear material balance equations coupled to empirical dynamic models. *International Journal of Mineral Processing*. 1996;48(3-4):245-264. [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(96\)00025-7](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(96)00025-7).
 9. Shiryayeva V. V. Development of a technological regime for gold recovery from complex gold-uranium ores by heap leaching using rhodanide solutions. *Gornyy informacionno-analiticheskij byulleten' = Mining informational and Analytical Bulletin*. 2012;7:403-412. (In Russ.).
 10. Baghalha M. Leaching of base gold-bearing ore with chloride-hypochlorite solutions. *International Journal of Mineral Processing*. 2007;82(4):178-186.

<https://doi.org/10.1016/j.minpro.2006.09.001>.

11. Olteanu A. F., Dobre T., Panturu E., Radu A. D., Akcil A. Experimental process analysis and mathematical modeling for selective gold leaching from slag through wet chlorination. *Hydrometallurgy*. 2014;144-145:170-185. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.02.011>.
 12. Guo Xue-Yi, Liu Zuo-Wei, Tian Qing-Hua, Li Dong, Zhang Lei. Gold extraction from Carlin-type concentrate by a novel environmentally friendly lixiviant. *Hydrometallurgy*. 2022;211:105884. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2022.105884>.
 13. Yannopoulos J. C. *The extractive metallurgy of gold*. New York: Van Nostrand Reinhold; 1991, 273 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4684-8425-0>.
 14. Neto I. F. F., Soares H. M. V. M. Simple and near-zero-waste processing for recycling gold at a high purity level from waste printed circuit boards. *Waste Management*. 2021;135:90-97. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.08.025>.
 15. Ahtiaienena R., Lundström M. Cyanide-free gold leaching in exceptionally mild chloride solutions. *Journal of Cleaner Production*. 2019;234:9-17. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.197>.
 16. Hasab M. G., Rashchi F. Chloride-hypochlorite leaching and hydrochloric acid washing in multi-stages for extraction of gold from a refractory concentrate. *Hydrometallurgy*. 2014;142:56-59. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2013.11.015>.
 17. Barani K., Kogani Y., Nazarian F. Leaching of complex gold ore using a cyanide-glycine solution. *Minerals Engineering*. 2022;180:107475. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107475>.
 18. Samikhov S. R. Studying kinetic of gold and silver cyanidation from the Mosarif deposit ores. *Nauka i innovaciya = Science and Innovation*. 2014;1:88-92. (In Russ.).
 19. Khabibulina R. E., Lobanov V. G. Environmentally friendly technology of gold leaching from anthropogenic raw materials. In: *Aktual'nye problemy razvitiya tekhnicheskikh nauk: sbornik statej uchastnikov XXIV Oblastnogo konkursa nauchno-issledovatel'skikh rabot "Nauchnyj Olimp" po napravleniyu "Tekhnicheskie nauki" = Topical problems of engineering sciences development: collected articles of the participants of the 24th Regional competition*

of research works "Scientific Olympus" in the direction of "Engineering Sciences". Ekaterinburg: Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin; 2021, p. 31-35. (In Russ.).

20. Khabibulina R. E., Lobanov V. G., Kolmachikhina O. B., Konovalov M. V., Druzhinin D. I. Environmentally friendly extraction of gold from concentrates. *Sovremennye tekhnologii proizvodstva cvetnyh metallov: materialy*

Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii, posvyashchennoj 80-letiyu S. S. Nabojchenko = Modern production technologies for non-ferrous metals: materials of the International scientific conference dedicated to the 80th anniversary of S. S. Naboychenko (24 March 2022, Ekaterinburg. Ekaterinburg: Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin; 2022, p. 192-196. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лобанов Владимир Геннадьевич,

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры металлургии цветных металлов,
Уральский федеральный университет им. первого
Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия

Хабибулина Раиса Энверовна,

аспирант,
Уральский федеральный университет им. первого
Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия

Колмачихина Ольга Борисовна,

кандидат технических наук,
доцент кафедры металлургии цветных металлов,
Уральский федеральный университет им. первого
Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия

Маковская Ольга Юрьевна,

кандидат технических наук, доцент кафедры
металлургии цветных металлов,
Уральский федеральный университет им. первого
Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия

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 10.10.2022; одобрена после рецензирования 11.11.2022; принята к публикации 20.12.2022.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir G. Lobanov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Non-Ferrous
Metals Metallurgy,
Ural Federal University named after the first President
of Russia B.N. Yeltsin,
19 Mira St., Yekaterinburg 620002, Russia

Raisa E. Khabibulina,

Postgraduate Student,
Ural Federal University named after the first President of
Russia B.N. Yeltsin,
19 Mira St., Yekaterinburg 620002, Russia

Olga B. Kolmachikhina,

Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Non-Ferrous
Metals Metallurgy,
Ural Federal University named after the first President of
Russia B.N. Yeltsin,
19 Mira St., Yekaterinburg 620002, Russia

Olga Yu. Makovskaia,

Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Non-Ferrous
Metals Metallurgy,
Ural Federal University named after the first President of
Russia B.N. Yeltsin,
19 Mira St., Yekaterinburg 620002, Russia

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 10.10.2022; approved after reviewing 11.11.2022; accepted for publication 20.12.2022.



Использование кека выщелачивания от переработки огнеупорной футеровки демонтированных электролизеров в производстве цемента*

Алексей Анатольевич Петровский¹, Нина Владимировна Немчинова^{2✉},
Андрей Александрович Тютрин³, Наталья Алексеевна Корепина⁴

¹⁻⁴Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

¹beginmotus@mail.ru

²ninavn@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9895-1709>

³an.tu@inbox.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9983-2680>

⁴cosmir@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0003-1572-8427>

Резюме. Цель – определение оптимального количества добавки в шихту кека выщелачивания (продукта гидрометаллургической обработки огнеупорной отработанной части футеровки алюминиевых электролизеров) и подбор параметров получения цементного клинкера из полученной сырьевой шихты. Анализ кека выщелачивания осуществляли с помощью рентгенофлуоресцентного и рентгеноструктурного методов анализа. Содержание компонентов в шихте рассчитывалось по традиционной методике путем задания значений коэффициента насыщения и силикатного модуля. Показано, что в результате водной обработки огнеупорной части демонтированной футеровки в раствор переходят фторсодержащие соединения, что позволяет в дальнейшем получать криолит для использования в процессе электролиза. Твердый остаток от выщелачивания (кек) с минимальным содержанием щелочей и фтора рекомендовано использовать в качестве добавки в шихту для производства цемента. Проведены эксперименты по составлению собственной композиции сырьевой шихты (с добавкой кека выщелачивания) и ее обжигу в камерной печи типа СНОЛ 12/16 (Россия) для получения цементного клинкера. По результатам проведенных экспериментов по получению портландцемента по традиционной обжиговой технологии определено предельное содержание оксидов щелочных металлов (не выше 4,5% масс. в пересчете на Na₂O) в кеке выщелачивания; установлено оптимальное содержание данной добавки в шихте – от 5 до 12% в зависимости от химического состава применяемой для получения цемента извести. Для повышения силикатной составляющей в качестве корректирующей добавки использовался микрокремнезем (с содержанием SiO₂ в среднем 92% масс.) – пыль системы газоочистки производства кристаллического кремния АО «Кремний» ОК «РУСАЛ» (г. Шелехов, Иркутская обл.). Полученное соотношение кека выщелачивания и микрокремнезема в шихте составило 3:4. В лабораторных условиях получен цемент, соответствующий марке ПЦ-300. Таким образом, предложено использовать кек от выщелачивания огнеупорной части отработанной футеровки алюминиевых электролизеров в производстве цементного клинкера.

Ключевые слова: производство алюминия, электролизер, катодное устройство, отработанная огнеупорная футеровка, кек выщелачивания, цементный клинкер

Финансирование: Исследования выполнялись при финансовой поддержке НИР № 14.577.21.0190 на основании соглашения о предоставлении субсидии и НИР № 11.7210.2017/8.9 в рамках государственного задания (Министерство образования и науки Российской Федерации).

Для цитирования: Петровский А. А., Немчинова Н. В., Тютрин А. А., Корепина Н. А. Использование кека выщелачивания от переработки огнеупорной футеровки демонтированных электролизеров в производстве цемента // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 4. С. 697–708. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-697-708>.

*Перевод статьи: Petrovskiy A. A., Nemchinova N. V., Tyutrin A. A., Korepina N. A. Use of leaching cake from refractory lining of dismantled electrolyzers in cement production. In: International Symposium «Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research» dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019). Series: Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). Publications. 2019;1:465-470. <https://doi.org/10.2991/isees-19.2019.91>. Публикуется с разрешения авторов.

Use of leaching cake from refractory lining of dismantled electrolyzers in cement production

Alexey A. Petrovskiy¹, Nina V. Nemchinova^{2✉},
Andrey A. Tyutrin³, Natalia A. Korepina⁴

¹⁻⁴Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

¹begimotus@mail.ru

²ninavn@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9895-1709>

³an.tu@inbox.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9983-2680>

⁴cosmir@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0003-1572-8427>

Abstract. A hydrometallurgical technology has been proposed for processing the refractory part of the lining of aluminium production electrolyzers dismantled and disabled for overhaul. Fluorine-containing compounds are transferred to the solution, which allows obtaining cryolite for being used in the electrolysis process. It is recommended to use solid residue from leaching (cake) with a minimum content of alkalis and fluorine as an additive to the mixture for cement production. According to the results of experiments on obtaining portland cement by traditional firing technology, the limiting content of alkali metal oxides (not higher than 4.5% by weight, calculated as Na₂O) in the leaching cake was determined, the optimum content of this additive in the charge is from 5 to 12% depending on chemical composition of lime used.

Keywords: aluminium production, electrolyser, cathode lining, spent firebrick lining, leaching cake, cement clinker

Funding: The studies were carried out with the financial support of research work No. 14.577.21.0190 on the basis of the grant agreement and research work No. 11.7210.2017/8.9 within the framework of a state task (Ministry of Education and Science of the Russian Federation).

For citation: Petrovskiy A. A., Nemchinova N. V., Tyutrin A. A., Korepina N. A. Use of leaching cake from refractory lining of dismantled electrolyzers in cement production. *iPolytech Journal*. 2022;26(4):697-708. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-697-708>.

ВВЕДЕНИЕ

Алюминиевая промышленность является крупнейшей отраслью цветной металлургии. Основным промышленным способом производства первичного алюминия считается электролиз криолит-глиноземных расплавов (способ Эру-Холла) [1, 2]. Одним из недостатков данной технологии является образование большого количества твердых техногенных продуктов (угольная пена, хвосты флотации, глиноземные сметки) [3–5]. В настоящее время основным видом твердого техногенного сырья при производстве алюминия выступают материалы демонтажа катодного устройства электролизеров – отработанная футеровка (ОФ), которая насыщается компонентами электролита в течение всего срока эксплуатации. Ежегодно в России образуется до 130 тыс. т футеровки демонтированных и отключенных на капитальный ремонт электролизеров, которая хранится на открытых полигонах, взаимодействует с водой и воздухом, образуя щелочные фторсодержащие растворы и другие токсичные со-

единения. В связи с этим разработка технологии переработки фторсодержащих, в частности, огнеупорных материалов демонтажа электролизеров с целью извлечения фтористых солей для возврата их в процесс электролиза криолит-глиноземных расплавов является актуальной задачей [6, 7].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Катодное устройство электролизера, используемого для получения первичного алюминия, представляет собой футерованную ванну, предназначенную для удержания расплава и катодного металла в течение всего срока эксплуатации ванны [8]. Конструктивно катод нового электролизера состоит из следующих основных частей:

- катодного кожуха в виде прямоугольной емкости с прямыми или наклонными бортами;

- подовых углеродных токопроводящих блоков с металлическими токоведущими стержнями (блюдцами) и бортовых блоков из углеродистых или карбидкремниевых мате-

риалов, составляющих внешнюю часть футеровки катода и непосредственно контактирующих с расплавом;

– огнеупорной (теплоизоляционной) футеровки.

Огнеупорная часть футеровки катода электролизера состоит из слоя огнеупорных материалов или сухих барьерных смесей, располагающихся под угольными блоками, слоя теплоизоляционных материалов (на основе диатомита, перлита или вермикулита) и выравнивающего слоя из порошкообразного огнеупорного материала (чаще всего шамотной крупки) [9].

Огнеупорная футеровка состоит из природных неорганических материалов (на основе алюмосиликатных кирпичей) и имеет двойное назначение: противостоять химическому и физическому воздействию электролита и теплоизолировать ванну, но между ними имеются существенные различия. Огнеупорные кирпичи имеют плотность, как правило, более 1 г/см^3 и в целом более устойчивы к воздействию компонентов расплава, но у них наименее выраженные теплоизоляционные свойства, чем у материалов с малой плотностью ($0,35\text{--}0,8 \text{ г/см}^3$), которые имеют более низкие показатели химической и физической стойкости. В качестве огнеупорных материалов применяют кирпич с высоким содержанием глинозема, то есть глинозем-кремнеземные огнеупоры (шамот), состоящие в основном из муллита ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$) и наиболее устойчивые к воздействию компонентов расплава [9]. В качестве теплоизоляционных материалов широко применяются диатомитовые кирпичи марок ПД-350, ПД-400, Д-500 [10] и вермикулит различного состава [11].

Основным назначением теплоизоляционной составляющей огнеупорной ОФ является снижение потерь тепла в окружающую среду и, как следствие, снижение расхода электроэнергии на производство алюминия. Кроме этого, правильное устройство теплоизоляционной части огнеупорной футеровки позволяет поддерживать необходимую температуру расплава и элементов стального кожуха для работы электролизера в оптимальном режиме, увеличивая срок службы ванны.

В результате тепловых и электрохимических факторов с компонентами отработанной футеровки взаимодействуют пары натрия и электролита. Как известно, электролит, используемый при получении алюминия способом Эру – Холла, состоит из криолита, глинозема и корректирующих добавок – фтористого алюминия и фторида кальция. В процессе электролиза происходит пропитка катодной футеровки фтористыми солями, металлическим алюминием и растворенными в электролите газами, при этом возникают сложные физико-химические превращения. Так, катодная футеровка электролизера средней мощности ($150\text{--}160 \text{ кА}$) при отключении на капитальный ремонт может содержать до 5 т фтора [12].

Основным механизмом попадания фтористых солей натрия к огнеупорному слою является капиллярное течение электролита по проникаемым порам подовых угольных блоков, межблочных и периферийных швов, заполненных подовой массой. Это обусловлено тем, что при температурах электролиза вязкость электролита (от $2,5$ до $3,5 \text{ мПа}\cdot\text{с}$) соизмерима с вязкостью воды ($1,0 \text{ мПа}\cdot\text{с}$). На практике к основной причине проникновения солей к огнеупорной футеровке добавляются протечи электролита в зазоры, трещины и другие дефекты подины, возникающие при ее обжиге при пуске электролизера. В процессе эксплуатации электролизера при высоких температурах в огнеупорную часть футеровки проникает электролит, содержащий 40–50% фтора и до 30% натрия, за счет чего происходит расплавление шамотного кирпича с образованием линз и разрушения части кирпичей фтористыми солями [13].

В настоящее время известны методы переработки углеродсодержащей части отработанной футеровки, наиболее пропитанной компонентами электролита, с целью получения фтористых солей для их использования в процессе электролиза [14, 15]. Исследований по эффективной переработке огнеупорной части отработанной футеровки с целью получения криолита (для его использования в процессе электролиза) и твердого остатка, возможного для реализации сторонним потребителям, практически нет. В связи с этим

целью наших исследований явилось получение кека выщелачивания от гидрометаллургической переработки огнеупорной футеровки, пригодного для производства цементного клинкера.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Отработанная огнеупорная часть по внешнему виду и составу разделяется на четыре части: слой под блоками (линза и прореагировавший с компонентами электролита кирпич), неповрежденный шамотный кирпич, теплоизоляция (диатомит, вермикулит или перлит) и шамотная засыпка. Слой под блоками образован электролитом, проникшим через подину и растворившим часть шамотного кирпича. Он представляет собой монолит серого, светло-серого и желтого цвета с вкраплениями конгломератов составляющих электролита: криолита Na_3AlF_6 , хиолита $\text{Na}_5\text{Al}_3\text{F}_{14}$, глинозема Al_2O_3 . Эта часть неуглеродной футеровки наиболее богата фтором и натрием. Вторая часть – непрореагировавший с электролитом и натрием шамотный кирпич. Значительная часть кирпича обычно бывает не разрушена и содержит 0,2–1,5% фтора. Это связано со стойкостью шамота к парам фтора. Третья часть – теплоизоляционные материалы, содержащие до 7% фтора, что обусловлено их пористой структурой и высокой удельной поверхностью. Четвертая часть – шамотная засыпка, которая в большинстве случаев остается неизменной [9].

По различным литературным данным [16–18] огнеупорная часть ОФ содержит муллит, фторид натрия NaF , криолит, хиолит, оксид кремния SiO_2 (в виде кристобалита, кварца, тридимита), фторид кальция CaF_2 , оксид алюминия, оксид железа Fe_2O_3 , нефелин NaAlSiO_4 и альбит $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$. Установлено [19, 20], что из образующихся алюмосиликатов натрия при избытке глинозема в огнеупоре преобладает нефелин, а при избытке кремнезема – альбит.

Средний химический состав огнеупорной части отработанной футеровки по данным разных исследователей [18, 21, 22] значительно различается, % масс., соответственно: С – от 0,1 до 6; F – от 5 до 15; Al – от 10 до 18; Na – от 5 до 15; Ca – от 0,5 до 1,0; Si –

от 10 до 30; Mg – от 0,2 до 1,0; Fe – от 1,0 до 2,0; прочие – от 35 до 45. Прочие представлены в основном кислородом. Различия в химическом составе связаны с тем, что де-струкция огнеупорной данного вида техно-генного сырья для каждого электролизера индивидуальна.

Нами были отобраны пробы огнеупорной части продукта демонтажа отключенного на капитальный ремонт электролизера ПАО «РУСАЛ Красноярск» компании РУСАЛ (г. Красноярск). Общий вид отработанной огнеупорной футеровки представлен на рис. 1.



Рис. 1. Демонтированная огнеупорная часть отработанной футеровки электролизера
Fig. 1. Dismantled refractory part of electrolyzer's spent lining

Демонтаж проводился на участках выбойки в цехах капитального ремонта электролизеров по «мокрой» технологии. Эта технология заключается в том, что после извлечения кускового электролита для ускорения охлаждения катода и облегчения демонтажных работ в ванну заливают воду, которая вступает в химическое взаимодействие с электролитом, карбидом алюминия, с внедрившимся в угольную футеровку натрием, что приводит к разбуханию и разрушению футеровки. При этом образуются солевые шлаки, из которых возможно получение фтористых солей [23]. Далее образцы подвергались измельчению в дробилке типа СМД-108 (производство Россия). Химический состав исследуемых образцов (по результатам рентгенофлуоресцентного анализа, выполненного на спектрометре S8 TIGER компании Bruker

Таблица 1. Химический состав составляющих огнеупорной части отработанной футеровки
Table 1. Chemical composition of the components of the refractory part of the finished layer

Составляющие отработанной футеровки	Содержание, % масс.									
	C	F	Na	Mg	Al	Si	Ca	Fe	K	Прочие*
Прореагировавший с электролитом шамот	3,20	20,60	17,20	0,12	16,30	16,80	0,70	0,70	0,90	23,48
Первый слой шамота	2,80	12,80	19,10	0,14	16,00	19,50	0,90	1,50	0,70	26,56
Второй слой шамота	0,00	1,30	3,60	0,23	16,50	26,10	0,27	0,78	0,44	50,78
Третий слой шамота	0,00	0,20	2,20	0,30	16,50	26,90	0,68	1,90	0,44	50,88
Диатомит	0,00	6,90	3,00	8,40	4,50	22,40	0,47	7,20	3,00	44,13

*Прочие представлены в основном кислородом в виде Al_2O_3 , Si.

(Германия), оснащенном программным обеспечением SPECTRAplus и QUANT EXPRESS), приведен в табл. 1.

Как видно из данных, представленных в табл. 1, слой под угольными блоками (прореагировавший с электролитом шамот и первый слой шамота) представляет собой разложившийся под действием проникшего расплава электролита шамотный кирпич и содержит натрий, алюминий, фтор и кремний. Вторая часть – шамотный кирпич (второй и третий слой шамота). Значительная часть кирпича остается неразрушенной и содержит незначительное количество фтора – 0,2–1,3%. Это связано со стойкостью шамота к проникновению фтора. Третья часть – теплоизоляция (диатомит) – содержит 6,9% фтора, что обусловлено, как указано выше, пористой структурой материала.

Основные фазы, зафиксированные в исследуемых образцах техногенной огнеупорной отработанной футеровки методом рентгеноструктурного анализа, выполненного с помощью порошкового дифрактометра Shimadzu XRD-7000S (Япония), следующие: $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$, NaF, Na_3AlF_6 , $Na_5Al_3F_{14}$, SiO_2 (в виде кристобалита, кварца, тридимита), CaF_2 , Al_2O_3 , $NaAlSiO_4$, $NaAlSi_3O_8$.

Фтор в огнеупорной отработанной футеровке присутствует в виде четырех соединений: NaF, Na_3AlF_6 , $Na_5Al_3F_{14}$, CaF_2 ; на долю фторида натрия приходится более 50% всего фтора. Алюмосиликаты, фторид кальция и оксид алюминия практически нерастворимы в воде, криолит и хиолит малорастворимы, однако NaF растворяется практически полностью до достижения предела растворимости в данной водно-солевой системе. Таким об-

разом, при водной обработке данных фторсодержащих огнеупорных материалов может быть извлечена большая часть фтора при растворении NaF. Криолит, хиолит и фторид кальция при водном выщелачивании практически полностью остаются в кеке.

В результате исследований состава и свойств составляющих огнеупорной отработанной футеровки возникла необходимость изучения комплекса вопросов ее переработки, а именно: изучение влияния основных параметров выщелачивания фтора из данного техногенного сырья с переводом в раствор фторида натрия и получение кремнеземсодержащего кека, пригодного для дальнейшего использования в строительной индустрии – производстве цементного клинкера.

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РАБОТ

Как следует из приведенных выше данных, при водном выщелачивании весь NaF, содержащийся в изучаемой пробе, переходит в раствор. В кеке выщелачивания отсутствует NaF, что свидетельствует о том, что при данных условиях гидрометаллургической переработки огнеупорной отработанной футеровки он перешел в раствор полностью. Процесс обработки измельченной пробы огнеупорной отработанной футеровки проводили дистиллированной водой либо солевыми растворами, моделирующими растворы газочистки, образующиеся в технологическом процессе, нагретыми до определенной температуры во фторопластовом стакане, помещенном в жидкостной термостат TERMEX M01. Перемешивание осуществлялось с использованием верхнеприводной лаборатор-

ной мешалки BIOSAN MM-1000 с двупластной насадкой. Частота вращения устанавливалась на уровне 800 мин^{-1} (окружная скорость – $0,2 \text{ м/с}$), то есть перемешивание было достаточно интенсивным, и распределение твердых частиц в объеме реактора оказывалось наиболее равномерным. Параметры процесса: Ж:Т = 7–11:1, температура выщелачивания – $60\text{--}80^\circ\text{C}$, продолжительность выщелачивания составила 360 мин. По истечении заданного времени пульпу фильтровали под вакуумом на воронке Бюхнера с двойным фильтром «синяя лента». В растворе выщелачивания определяли величину pH и концентрации фторида, карбоната и бикарбоната натрия. Для определения степени извлечения фтора использовали данные по его содержанию в исходной пробе, кеке и растворе после выщелачивания. Для этого пробы исследовали с помощью рентгенофлуоресцентного (РФА) и рентгеноструктурного методов анализа.

Твердый остаток (кек) от обработанной водой пробы огнеупорной части футеровки при демонтаже электролизеров (как побочный продукт при переводе водорастворимого фторида натрия в раствор) было предложено использовать в составе сырьевой смеси для получения цементного клинкера. Для изучения возможности его использования нами были проведены исследования, целью которых являлось определение оптимального количества добавки в шихту кека выщелачивания и подбор параметров получения цементного клинкера из полученной сырьевой шихты.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Кек выщелачивания после гидрометаллургической переработки усредненной пробы огнеупорной части отработанной футеровки имел следующий состав (по данным РФА), % масс.: С – 0,39; F – 3,49; Al – 22,59; Na – 2,61; Ca – 0,92; Si – 23,85; Mg – 0,32; Fe – 0,98; прочие – 44,85. Основными соединениями, присутствующими в исследуемой пробе, являются (по данным рентгеноструктурного

анализа), % масс.: муллит, нефелин, кристобалит, кварц, флюорит (рис. 2). Также в отдельных пробах были зафиксированы оксид алюминия, хиолит, тридимит, альбит.

Традиционно шихта для производства цементного клинкера состоит из, % масс.: от 70 до 80 карбонатные породы (известняк); от 15 до 25 глинистые породы (глины, мергели); от 3 до 5 корректирующие добавки (железосодержащий компонент). Применение огнеупорной части отработанной футеровки в качестве глинистой составляющей сырьевой шихты без какой-либо переработки ограничено из-за высокого содержания в ней щелочных металлов. Их суммарное содержание в цементном клинкере не должно превышать 1,2% (в пересчете на Na_2O) согласно ГОСТ 10178-85 «Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия»⁵. Но при этом наличие фтора в отработанной футеровке снижает температуру обжига клинкера, тем самым уменьшая энергетические затраты.

Состав и свойства портландцементного клинкера предопределяется следующими характеристиками: химическим составом клинкера, значениями коэффициента насыщения (KH), силикатного (M_{SiO_2}) и глиноземного ($M_{\text{Al}_2\text{O}_3}$) модулей, содержанием основных клинкерных минералов.

Содержание оксидов в клинкере колеблется в следующих пределах, % масс.: CaO – от 62 до 67; SiO_2 – от 20 до 24; Al_2O_3 – от 4 до 7; Fe_2O_3 – от 2 до 5; MgO, SO_3 и др. – от 1,5 до 4. Значение KH колеблется в пределах от 0,8 до 0,95, M_{SiO_2} – от 1,7 до 3,5, $M_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ – от 1,0 до 3,0. Величины KH и модулей определяют по следующим формулам:

$$\text{KH} = \frac{\text{CaO} - 1,65\text{Al}_2\text{O}_3 - 0,35\text{Fe}_2\text{O}_3 - 0,7\text{SO}_3}{2,8\text{SiO}_2};$$

$$M_{\text{SiO}_2} = \frac{\text{SiO}_2}{(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)};$$

$$M_{\text{Al}_2\text{O}_3} = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3},$$

где CaO, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SO_3 – содержание оксидов в клинкере, % масс.

⁵ГОСТ 10178-85. Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия. Введ. 01.01.1987, оконч. срока действия 01.03.2021. М.: Изд-во стандартов.

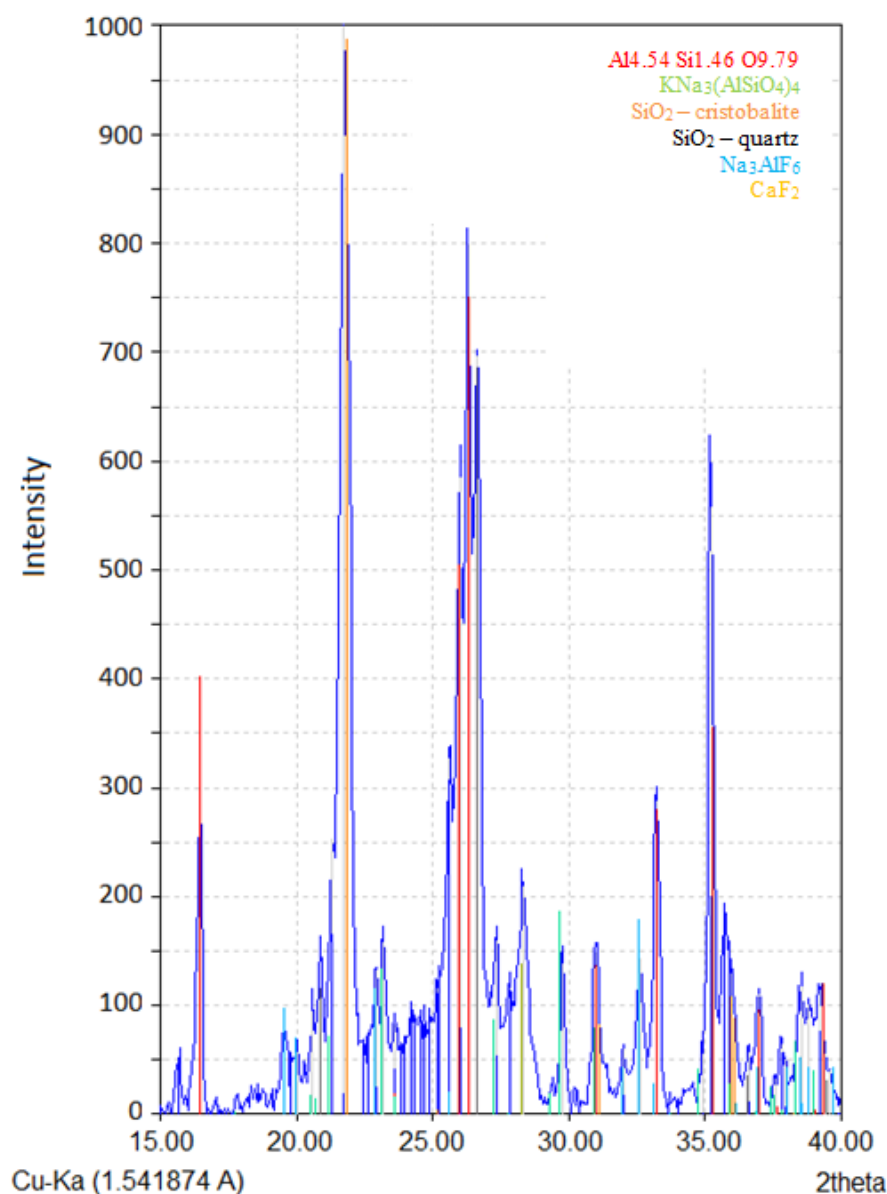


Рис. 2. Дифрактограмма образца кека выщелачивания
Fig. 2. Diffractogram of sample leach cake

Содержание основных клинкерных минералов в обычном клинкере колеблется в следующих пределах, % масс.: трехкальциевый силикат $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (алит) – от 40 до 60; двухкальциевый силикат $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (белит) – от 15 до 35; трехкальциевый алюминат $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ – от 4 до 14; четырехкальциевый алюмоферрит $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ – от 10 до 18.

Для подтверждения возможности применения в производстве цемента кека от обработанной водой огнеупорной отработанной футеровки нами был проведен эксперимент

по составлению собственной композиции сырьевой шихты (с добавкой кека выщелачивания) и ее обжигу в камерной печи типа СНОЛ 12/16 (Россия) для получения цементного клинкера. В качестве контрольного образца в этой же печи одновременно с исследуемой шихтой обжигалась стандартная сырьевая шихта ОАО «Ангарскцемент» (г. Ангарск, Иркутская область), используемая в настоящее время в производстве цемента.

Рекомендуемый состав сырьевой шихты готовился из извести, кека выщелачивания огнеупорной части ОФ и железосодержащего

песка. Химический состав кека выщелачивания (51,8% масс. SiO_2) не в полной мере соответствует составу глинистой составляющей сырьевой шихты, которая должна содержать 75% масс. SiO_2 . Для повышения силикатной составляющей в качестве корректирующей добавки использовался микрокремнезем (с содержанием SiO_2 в среднем 92% масс.) – пыль системы газоочистки производства кристаллического кремния АО «Кремний» ОК «РУСАЛ» (г. Шелехов, Иркутская обл.). Полученное соотношение кека выщелачивания и микрокремнезема – 3:4. То есть в нашей композиции сырьевой шихты глинистая составляющая представлена двумя видами техногенных материалов металлургического производства – кеком выщелачивания (от огнеупорной части отработанной футеровки демонтированных и отключенных на капитальный ремонт электролизеров производства алюминия) и микрокремнеземом (пыли системы газоочистки при получении металлургического кремния [24]).

Содержание компонентов в шихте рассчитывалось по традиционной методике путем задания значений KH и M_{SiO_2} . Расчет шихты заключается в определении соотношений между ее компонентами на основе химического состава сырьевых материалов и требуемых характеристик клинкера. Были заданы следующие величины: $\text{KH} = 0,9$ и $\text{M}_{\text{SiO}_2} = 2,3$. Было рассчитано соотношение между компонентами, % масс., соответствен-

но: известь – 82,90, кек выщелачивания – 5,90, микрокремнезем – 7,86, кварцевый песок – 3,34. Компоненты были измельчены в шаровой мельнице до крупности частиц -80 мкм, полученная мелкодисперсная шихта была увлажнена до 8% и спрессована в брикеты на ручном винтовом прессе ВП10М. Брикеты обжигались в печи совместно с контрольными образцами при технологических параметрах работы трубчатой вращающейся печи действующего цеха обжига ОАО «Ангарскцемент» (минуя зону сушки, поскольку шихта не содержит избытка влаги): от 100 до 800°C – 45 мин; от 800 до 1100°C – 50 мин; от 1100 до 1300°C – 10 мин; от 1300 до 1450°C – 20 мин.

Спеки клинкера измельчались на щековой дробилке, а затем на шаровой мельнице до крупности частиц -80 мкм, помол производился совместно с добавленным в количестве 5% масс. двухводным гипсом $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ для предотвращения ложного схватывания. Из полученных цементов были подготовлены образцы для проведения испытаний по ГОСТ 310.1-76 «Цементы. Методы испытаний. Общие положения»⁶ по определению различных характеристик в соответствии с ГОСТ 30744-2001 «Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка»⁷. Результаты испытаний цементов (контрольного и с добавлением техногенных материалов) представлены в табл. 2.

Таблица 2. Характеристики образцов полученных цементов и результаты испытаний

Table 2. Characteristics of received cements samples and test results

Характеристики, ед. изм.	Вид образца	
	с добавлением техногенных материалов	контрольный
Истинная плотность, г/см ³	3,0	3,03
Насыпная плотность, г/см ³	1,085	1,100
Тонкость помола: остаток на сите 0,08, %	13,8	13,1
Нормальная густота, % масс.	28,50	25,75
Начало схватывания, мин	220	200
Конец схватывания, мин	430	470
Коэффициент водоотделения, %	28,1	29,0
Предел прочности на сжатие в продолжительности 28 сут (средний результат по испытаниям трех образцов), МПа	29,6	29,8

⁶ГОСТ 310.1-76. Цементы. Методы испытаний. Общие положения. Введ. 01.01.1978. М.: ИПК Изд-во стандартов.

⁷ГОСТ 30744-2001. Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка. Введ. 01.03.2002. М.: Изд-во МНТКС, 2002.

Проведенные исследования подтвердили возможность применения твердого остатка от водного выщелачивания фтора из огнеупорной части отработанной футеровки в качестве глинистой составляющей сырьевой шихты для получения цементного клинкера. В лабораторных условиях получен цемент, соответствующий марке ПЦ-300.

На заводах ОАО «Ангарскцемент» из шихты (контрольный образец) обычно получают цемент марок ПЦ-400 и ПЦ-500. Снижение марки полученных цементов из шихты, содержащей техногенные материалы, обусловлено низким содержанием алита в клинкере, это связано с тем, что в камерной печи образцы обжигались в стационарном режиме, без обеспечения достаточного для взаимодействия контакта твердых частиц шихты при высокой температуре, которому шихта подвергается во вращающихся трубчатых

печах при перемешивании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных исследований нами было определено предельное содержание оксидов щелочных металлов, которое не должно превышать 4,5% масс. (в пересчете на Na_2O) в кеке выщелачивания, чтобы его рекомендовать для производства цемента. Также было определено оптимальное содержание данной добавки в сырьевой шихте – от 5 до 12% – в зависимости от химического состава применяемой извести. В ходе проведенных исследований была рекомендована корректировка силикатной составляющей кека выщелачивания микрокремнеземом – для соблюдения необходимых значений коэффициента насыщения и модульных характеристик сырьевой шихты для производства цементного клинкера.

Список источников

1. Grjotheim K., Welch B. Aluminium smelter technology. Dusseldorf: Aluminium Verlag, 1993. 260 p.
2. Solheim A., Skybakmoen E. The future of the Hall-Héroult technology // Цветные металлы и минералы: сб. докл. X Междунар. конгресса (г. Красноярск, 10–14 сентября 2018 г.). Красноярск, 2018. С. 300–309.
3. 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>.
4. Зенкин Е. Ю., Гавриленко А. А., Немчинова Н. В. О переработке отходов производства первичного алюминия ОАО «РУСАЛ БРАТСК» // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 3. С. 123–132. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-3-123-132>.
5. Малышкин А. В., Рожнев А. Н. Переработка хвостов флотации угольной пены алюминиевого электролизера // Цветные металлы и минералы: сб. докл. X Междунар. конгр. (г. Красноярск, 10–14 сентября 2018 г.). Красноярск, 2018. С. 468–472.
6. Holywell G., Breault R. An overview of useful methods to treat, recover, or recycle spent potlining // JOM. 2013. Vol. 65. P. 1441–1451. <https://doi.org/10.1007/S11837-013-0769-Y>.
7. Patrin R. K., Bazhin V. Yu. Spent linings from aluminum cells as a raw material for the metallurgical, chemical, and construction industries // Metallurgist. 2014. Vol. 58. Iss. 7-8. P. 625–629. <https://doi.org/10.1007/s11015-014-9967-2>.
8. Sørli M., Øye H. Cathodes in aluminium electrolysis. 3rd edition. Dusseldorf: Aluminium-Verlag, 2010. 662 p.
9. Yurkov A. Refractories for aluminum: electrolysis and the cast house. Cham; Heidelberg; New York; Dordrecht; London: Springer, 2015. 254 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-11442-2>.
10. Каплан Ф. С., Аксельрод Л. М., Пучкелевич Н. А., Юрков А. Л. О выборе теплоизоляционных материалов для алюминиевых электролизеров // Новые огнеупоры. 2003. № 10. С. 26–33.
11. Суворов С. А., Скурихин В. В. Высокотемпературные теплоизоляционные материалы на основе вермикулита // Новые огнеупоры. 2002. № 12. С. 39–44.
12. Куликов Б. П., Истомин С. П. Переработка отходов алюминиевого производства. Красноярск: ООО «Классик Центр», 2004. 480 с.
13. Tschöpe K., Schoning Ch., Grande T. Autopsies of spent pot linings – a revised view // Light Metals. 2009. P. 1085–1090.
14. Сомов В. В., Немчинова Н. В., Пьявкина А. А. О способах утилизации отработанной футеровки электролизеров алюминиевого производства // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 5. С. 155–161.
15. Zhao Xia, Ma Lei. Hazardous waste treatment for spent pot liner // Earth and Environmental Science: IOP Conference Series. 2018. Vol. 108. Iss. 4. P. 042023. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/108/4/042023>.
16. Бажин В. Ю., Патрин Р. К. Современные способы переработки отработанной огнеупорной футеровки алюминиевого электролизера // Новые огнеупоры. 2011. № 2. С. 39–42.
17. Holywel G., Breault R. An overview of useful methods to treat, recover, or recycle spent potlining //

JOM. 2013. Vol. 65. Iss. 11. P. 1441–1451. <https://doi.org/10.1007/s11837-013-0769-y>.

18. Сомов В. В., Немчинова Н. В., Корепина Н. А. Аналитические методы исследования образцов отработанной футеровки алюминиевого электролизера // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2017. Т. 10. № 5. С. 607–620. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-2017-10-5-607-620>.

19. Siljan O. J., Slagnes S., Sekkingstad A., Aarman S. Olivine-based refractories in potlinings of aluminium electrolysis // *Light Metals*. 2004. P. 405–411.

20. Прошкин А. В., Пингин В. В., Симаков Д. А. Анализ футеровки электролизера РА-300 // Цветные металлы Сибири: сб. докл. X Междунар. конгр. (г. Красноярск, сентябрь 2007 г.). Красноярск, 2007. С. 133–141.

21. Silveira B. I., Dantas A. E., Blasquez J. E., Santos R. K. P. Characterization of inorganic fraction of spent potlin-

ers: evaluation of the cyanides and fluorides content // *Journal of Hazardous Materials*. 2002. Vol. 89. Iss. 2-3. P. 177–183. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(01\)00303-X](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(01)00303-X).

22. Бажин В. Ю., Власов А. А., Патрин Р. К. Утилизация техногенных отходов электролизного производства алюминия // *Безопасность жизнедеятельности*. 2010. № 9. С. 18–21.

23. Baranov A. N., Morenko A. V., Gavrilenko L. V. Gavrilenko A. A. Resource-saving processing technologies of salt slags on the bottom of aluminum electrolyzers // *Russian Journal of Non-ferrous Metals*. 2011. Vol. 52. No. 4. P. 357–359. <https://doi.org/10.3103/S1067821211040031>.

24. Харисов В. М., Бельский С. С. Шихта для выплавки кремния // *Переработка природного и техногенного сырья: сб. науч. тр. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ*, 2018. С. 40–44.

References

1. Grjotheim K., Welch B. *Aluminium smelter technology*. Dusseldorf: Aluminium Verlag; 1993, 260 p.

2. Solheim A., Skybakmoen E. The future of the Hall-Héroult technology. *Tsvetnye metally i mineraly: sbornik dokladov X Mezhdunarodnogo kongressa = Non-ferrous metals & minerals: book of papers of the tenth international congress*. 10–14 September 2018, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk; 2018, p. 300–309. (In Russ.).

3. Burdonov A. E., Zelinskaya E. V., Gavrilenko L. V., Gavrilenko A. A. Investigation of substantial composition of alumina-bearing material of aluminium electrolyzers for usage in primary aluminium technology. *Tsvetnye metally*. 2018;3:32–38. <https://doi.org/10.17580/tsm.2018.03.05>.

4. Zenkin E. Yu., Gavrilenko A. A., Nemchinova N. V. On «RUSAL Bratsk» JSC primary aluminum production waste recycling. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2017;21(3):123–132. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-3-123-132>.

5. Malyshekin A. V., Rozhnev A. N. Processing of the aluminium electrolysis dust as a flotation waste. *Tsvetnye metally i mineraly: sbornik dokladov X Mezhdunarodnogo kongressa = Non-ferrous metals & minerals: book of papers of the tenth international congress*. 10–14 September 2018, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk; 2018, p. 468–472. (In Russ.).

6. Holywell G., Breault R. An overview of useful methods to treat, recover, or recycle spent potlining. *JOM*. 2013;65:1441–1451. <https://doi.org/10.1007/S11837-013-0769-Y>.

7. Patrin R. K., Bazhin V. Yu. Spent linings from aluminum cells as a raw material for the metallurgical, chemical, and construction industries. *Metallurgist*. 2014;58(7-8):625–629. <https://doi.org/10.1007/s11015-014-9967-2>.

8. Sørli M., Øye H. *Cathodes in aluminium electrolysis. 3rd edition*. Dusseldorf: Aluminium-Verlag; 2010. 662 p.

9. Yurkov A. Refractories for aluminum: electrolysis and the cast house. Cham; Heidelberg; New York; Dordrecht; London: Springer; 2015, 254 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-11442-2>.

10. Kaplan F. S., Aksel'rod L. M., Puchkelevich N. A., Yurkov A. L. On the choice of thermal insulation materials for aluminum electrolysis cells. *Novye ognepory = Refractories and Industrial Ceramics*. 2003;10:26–33. (In Russ.).

11. Suvorov S. A., Skurihin V. V. High-temperature thermal insulation materials based on vermiculite. *Novye ognepory = Refractories and Industrial Ceramics*. 2002;12:39–44. (In Russ.).

12. Kulikov B. P., Istomin S. P. Aluminum production waste treatment. Krasnoyarsk: ООО «Klassik Cent»; 2004, 480 p. (In Russ.).

13. Tschöpe K., Schoning Ch., Grande T. Autopsies of spent pot linings – a revised view. *Light Metals*. 2009:1085–1090.

14. Comov V. V., Nemchinova N. V., Pyavkina A. A. On disposal methods of aluminum production spent pot lining. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2015;5:155–161. (In Russ.).

15. Zhao Xia, Ma Lei. Hazardous waste treatment for spent pot liner. In: *Earth and Environmental Science: IOP Conference Series*. 2018;108(4):042023. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/108/4/042023>.

16. Bazhin V. Yu., Patrin R. K. Modern ways of processing waste refractory lining of an aluminum electrolyzer. *Novye ognepory = Refractories and Industrial Ceramics*. 2011;2:39–42. (In Russ.).

17. Holywel G., Breault R. An overview of useful methods to treat, recover, or recycle spent potlining. *JOM*. 2013;65(11):1441–1451. <https://doi.org/10.1007/s11837-013-0769-y>.

18. Somov V. V., Nemchinova N. V., Korepina N. A. Analytical methods of researching the aluminium electrolysis cell fulfilled lining samples. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii = Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2017;10(5):607–612. (In Russ.). <https://doi.org/10.17516/1999-494X-2017-10-5-607-620>.

19. Siljan O. J., Slagnes S., Sekkingstad A., Aarman S.

Olivine-based refractories in potlinings of aluminium electrolysis. *Light Metals*. 2004;405-411.

20. Proshkin A. V., Pingin V. V., Simakov D. A. Analysis of the lining of the RA-300 electrolyzer. *Tsvetnye metally Sibiri: sbornik dokladov X Mezhdunarodnogo kongressa = Non-ferrous metals of Siberia: book of the reports*. September 2007, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk; 2007, p. 133-141. (In Russ.).

21. Silveira B. I., Dantas A. E., Blasquez J. E., Santos R. K. P. Characterization of inorganic fraction of spent potliners: evaluation of the cyanides and fluorides content. *Journal of Hazardous Materials*. 2002;89(2-3):177-183. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(01\)00303-X](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(01)00303-X).

22. Bazhin V. Yu., Vlasov A. A., Patrin R. K. A utilization

placer waste disposal of aluminium smelters. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*. 2010;9:18-21. (In Russ.).

23. Baranov A. N., Morenko A. V., Gavrilenko L. V. Gavrilenko A. A. Resource-saving processing technologies of salt slags on the bottom of aluminum electrolyzers. *Russian Journal of Non-ferrous Metals*. 2011;52(4):357-359. <https://doi.org/10.3103/S1067821211040031>.

24. Harisov V. M., Bel'skij S. S. A mixture for smelting silicon. In: *Pererabotka prirodnogo i tekhnogennogo syr'ya: sbornik nauchnyh trudov = Processing of natural and man-made raw materials: book of the scientific papers*. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2018, p. 40-44. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Петровский Алексей Анатольевич,

кандидат технических наук,
доцент кафедры металлургии цветных металлов,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

Немчинова Нина Владимировна,

доктор технических наук, профессор,
заведующая кафедрой металлургии цветных
металлов,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

Тютрин Андрей Александрович,

кандидат технических наук, доцент,
кафедра металлургии цветных металлов,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

Корепина Наталья Алексеевна,

кандидат филологических наук, доцент,
кафедра иностранных языков № 2,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

Вклад авторов

Петровский А. А. провел эксперименты и обобщил полученные результаты. Немчинова Н. В. осуществляла научное руководство исследованиями. Тютрин А. А. оформил полученные результаты экспериментов и осуществил подбор списка литературных источников по тематике исследования. Корепина Н. А. провела анализ известных литературных данных по тематике исследований и общее редактирование текста.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexey A. Petrovskiy,

Cand. Sci. (Eng.),
Engineer of the Research department,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Nina V. Nemchinova,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of the Department of Metallurgy of Non-ferrous
Metals,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Andrey A. Tyutrin,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Metallurgy of
Non-ferrous Metals,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Natalia A. Korepina,

Cand. Sci. (Philology), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Foreign
Languages № 2,
Irkutsk National Research Technical University
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Contribution of the authors

Petrovskiy A. A. conducted experiments and summarized the results. Nemchinova N. V. supervised the research. Tyutrin A. A. designed the experiment results and selected a list of references for the study. Korepina N. A. made the literature review on the research topic and edited the text of the article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 02.09.2022; одобрена после рецензирования 07.10.2022; принята к публикации 29.11.2022.

Information about the article

The article was submitted 02.09.2022; approved after reviewing 07.10.2022; accepted for publication 29.11.2022.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ



Научная статья

УДК 669:620.19:544.63

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-709-713>

Особенности латексных покрытий для защиты стали от коррозии

Ариадна Алексеевна Яковлева^{1✉}, Сергей Владимирович Садловский²,Наталья Игоревна Вострикова³, Владимир Валерьевич Халбаев⁴¹⁻⁴Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия¹ayakovistu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5747-2864>²vip.sadlovskiy@mail.ru³vosnatalia@mail.ru⁴khalbaev98@mail.ru

Резюме. Цель работы – оценка результатов исследования кинетики коррозионного процесса на образцах стали Ст3, защищенных латексным покрытием 69Б-2к, выпускаемым ООО «Капиталь» (г. Иркутск). Для достижения цели проанализированы результаты гравиметрических испытаний с экспериментальными образцами стали. В качестве электролита использовали 3% масс. раствор хлорида натрия. Достоверность полученных результатов подтверждена проведением как минимум двух параллельных опытов. Перед нанесением покрытий поверхности металлических образцов были тщательно подготовлены согласно ГОСТ Р 9.907-2007. Пленочные покрытия нанесены на поверхность металла трехкратным окунанием образцов в жидкий латекс и высушиванием в течение суток. Качество покрытия до и после опытов оценивали визуально и с помощью микрофотографирования. Гравиметрические исследования были проведены при термостатировании ($25 \pm 0,2$ °C) рабочего пространства. При этом фиксировали изменения массы образцов за контролируемый промежуток времени (от 1 до 24 ч). Полученные в ходе опытов результаты взвешивания образцов до и после опытов проанализированы с помощью кинетической блок-схемы, в которой поиск типа реакции проводится поэтапно в логической последовательности. Кинетический анализ результатов гравиметрических исследований подтвердил отсутствие характерных признаков протекания химических взаимодействий на поверхности стали Ст3 с покрытием из латекса 69Б-2к. Из известных математических моделей феноменологической кинетики для описания механизма процесса приемлемым оказывается использование уравнения первого порядка, моделирующее протекание простой реакции – вариант, наиболее обоснованный для гетерогенного взаимодействия, в котором лимитирующей стадией оказывается проникновение реагентов через латексную пленку. В результате проведенного кинетического анализа выявилась необходимость изучить свойства латексных пленок, определен рациональный путь дальнейших коррозионных исследований.

Ключевые слова: коррозия, механизм, лимитирующая стадия, константа скорости, антикоррозионное покрытие, латекс

Для цитирования: Яковлева А. А., Садловский С. В., Вострикова Н. И., Халбаев В. В. Особенности латексных покрытий для защиты стали от коррозии // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 4. С. 709–713. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-709-713>.

BRIEF COMMUNICATION

Characteristics of latex coatings for steel protection against corrosion

Ariadna A. Yakovleva^{1✉}, Sergey V. Sadlovsky²,Natalia I. Vostrikova³, Vladimir V. Khalbaev⁴¹⁻⁴Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia¹ayakovistu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5747-2864>²vip.sadlovskiy@mail.ru³vosnatalia@mail.ru⁴khalbaev98@mail.ru

Abstract. This paper examines the kinetics of corrosion for steel St3 samples covered with a latex coating 69B–2k, manufactured by Kapitel LLC (Irkutsk), by analysing gravimetric tests performed using steel samples. A 3 wt % solution of sodium chloride was used as an electrolyte. The accuracy of the obtained results was confirmed by carrying out at least two parallel experiments. Prior to coating, the metal surface of samples was carefully prepared as per GOST R 9.907-2007. Film coatings were applied onto the metal surface by threefold dipping of samples in liquid latex followed by drying within 24 hours. The quality of the coating prior to and following the experiments was assessed visually and by microphotography. Gravimetric studies were carried out under temperature control ($25 \pm 0.2^\circ\text{C}$) in the working area. At the same time, changes in the sample mass were recorded over a controlled time interval (from 1 to 24 hours). The results of weighing samples obtained prior to and following the experiments were analysed using a kinetic flowchart, in which the type of reaction is defined in stages in a natural sequence. Kinetic analysis of the gravimetric results confirmed the absence of characteristic signs associated with chemical interactions on the surface of steel St3 coated with latex 69B-2k. Out of the known mathematical models of phenomenological kinetics, it is admissible to use a first-order equation to describe the course of a simple reaction during heterogeneous interaction, where the penetration of reagents through a latex film comprises a limiting stage. The kinetic analysis showed that it is necessary to study the properties of latex films; a strategy for further corrosion studies was determined.

Keywords: corrosion, mechanism, rate-limiting step, rate constant, corrosion resistant coating, latex

For citation: Yakovleva A. A., Sadlovsky S. V., Vostrikova N. I., Khalbaev V. V. Characteristics of latex coatings for steel protection against corrosion. *iPolytech Journal*. 2022;26(4):709-713. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-709-713>.

ВВЕДЕНИЕ

Коррозия может приводить к сложным и опасным повреждениям различных сооружений – от мостов и общественных зданий до сооружений в химической, металлургической и других отраслях промышленности. При защите от коррозии в атмосферных условиях или в случаях защиты конструкций, уложенных на землю или находящихся в постоянном контакте с водой и жидкостями, необходимо рассматривать большое количество факторов, оказывающих влияние на выбор систем защитных покрытий. В современном материаловедении антикоррозионная защита стальных поверхностей покрытиями на основе органических связующих является актуальной темой [1–6].

Представляемая работа является продолжением в ходе разработки специализированных полимерных покрытий, предназначенных для защиты днищ, выполненных из стали Ст3, морских кораблей и связана с необходимостью получения кинетических характеристик для оценки свойств защитных пленок, их устойчивости во времени. Цель работы состоит в кинетической оценке результатов исследования коррозионного процесса на стали Ст3, защищенной латексным покрытием 69Б-2к, выпускаемым ООО «Капител» (г. Иркутск).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования были образцы стали Ст3 в виде пластинок. В ходе исследований проводили испытание их защищенности от коррозии латексной пленкой. Используемые методические приемы представлены ранее [7].

В качестве защитной пленки был испытан латекс 69Б-2к – смесь стирол-акриловых латексов, полученных методом радикальной эмульсионной полимеризации сополимеров акриловой кислоты и бутилакрилата, в качестве эмульгаторов использованы сульфонал и неонол – добавки, способствующие повышению антикоррозионных свойств покрытий. Используемый латекс 69Б-2к предоставлен компанией ООО «Капител-Иркутск». В ходе опытов была отработана методика получения пленок, достаточно прочных и эластичных (рис. 1).

В качестве электролита использовали солевой раствор, близкий по составу к морской воде – 3% масс. раствор NaCl в дистиллированной воде.

Подготовку поверхности перед нанесением покрытия проводили по стандартной методике⁵, которая состояла из зачистки, обезжиривания, полирования и других необходимых процедур. Образцы стали погружали в солевой раствор на 1 ч, 2 ч, 4 ч, 8 ч, 12 ч и

⁵ГОСТ Р 9.907-2007. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы, сплавы, покрытия металлические. Методы удаления продуктов коррозии после коррозионных испытаний. Введ. 01.01.2009. М.: Изд-во стандартов, 2009.

24 ч. Для возможности сравнения использовали схожие образцы без покрытий. Все результаты получены усреднением из двух параллельных опытов. Коррозионные испытания проводили при температуре $25 \pm 0,2^\circ\text{C}$, поддерживаемой термостатом.

По истечении времени образцы извлекали из раствора, сушили и взвешивали на аналитических весах серии HR-150AZ с точностью до $\pm 0,0002$ г. Вычисляли разность массы образцов до опыта m_0 и после – m_τ . В качестве количественного показателя коррозии рассчитывали скорость коррозии: $K = \frac{m_0 - m_\tau}{S \cdot \tau} = \frac{\Delta m}{S \cdot \tau}$ с размерностью $\text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Площадь поверхности S определяли, измеряя размеры образцов штангенциркулем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Из данных эксперимента установлено, что гравиметрический показатель K для исследуемого латекса часто принимает отрицательное значение: $(m_0 - m_\tau)_0 < 0$. Темпы роста величины m_τ во времени настолько активны, что могут служить основанием для предположения о накоплении каких-то веществ на поверхности пленки в результате протекания химического взаимодействия. Следов набухания пленки или ее механического повреждения ни визуально, ни микрофотографированием не обнаруживается. Чтобы разобраться, были проведены кинетические расчеты, для которых данные гравиметрического эксперимента оказались

наиболее подходящими. Была использована кинетическая блок-схема, в которой сравниваются скорости расходования реагентов (или образования продуктов), устанавливаются их взаимосвязи и выявляются интермедиаты на основе анализа материального баланса [5]. Одной из основных идей данной методики является линеаризация кинетических уравнений, например, для реакции первого порядка – линеаризация уравнения $k = \frac{1}{\tau} \ln \frac{c_0}{c_\tau}$ или $\ln c_\tau = \ln c - k\tau$, которое в нашем случае удобнее представить через массы (начальную и при времени τ) в следующем виде: $\ln m_\tau = \ln m_0 - k\tau$.

При графической интерпретации линейность графика является доказательством того, что поверхностный процесс протекает по закономерностям реакций первого порядка, а угол наклона равен константе скорости реакции (рис. 2).

Из рис. 2 видно, что достоверность аппроксимации данных линейным уравнением первого порядка высока и составляет 0,94. Из уравнения линии тренда $\ln m_\tau = -4,7387 - 0,0853 \cdot \tau$ константа скорости оказывается равной $0,0853 \text{ ч}^{-1}$. Данное значение имеет смысл кажущейся или экспериментально определенной константы скорости, полученной в частном случае, однако это не снижает его значимости для анализа дальнейших результатов. Использование рассчитанного по кинетическому уравнению значения m_τ для определения скорости коррозии K



Рис. 1. Образец пленки латекса
Fig. 1. Latex film sample

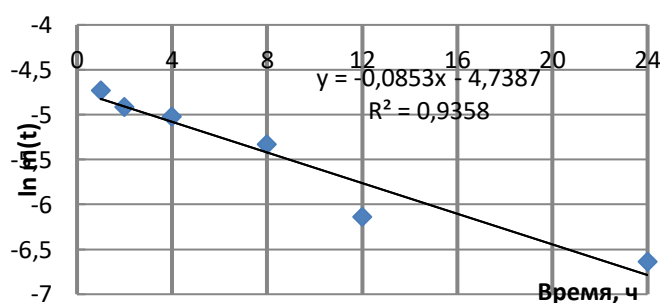


Рис. 2. Кинетическая интерпретация коррозионных испытаний
Fig. 2. Kinetic interpretation of corrosion tests

дает высокую сходимость с экспериментальными результатами, это позволяет модернизировать эксперимент и работать с другими конфигурациями образца, который, например, в электрохимических исследованиях выполняет функцию электрода [3].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Примененный в настоящей работе кинетический подход позволил объяснить результаты исследования коррозионного процесса на поверхности стали Ст3, защищенной ла-

тексным покрытием. По результатам экспериментальных исследований показано, что химические взаимодействия на поверхности пленок отсутствуют, процесс протекает по механизму первого порядка и лимитируется диффузионными процессами. Полученные данные важны для выбора направления дальнейших исследований, поскольку стали типа Ст3 используются очень широко, например, из них изготавливают днища морских судов.

Список источников

1. Шинкарева Е. В., Кошевар В. Д. Антикоррозионная грунтовка на основе водной эпоксидной эмульсии и углеродных наночастиц // Журнал прикладной химии. 2016. Т. 89. № 1. С. 68–76.
2. Смирнов М. А., Соколова М. П., Дмитриев И. Ю., Власова Е. Н., Розова Е. Ю., Ляшевич Г. К. Барьерные свойства и структура неорганических слоев на границе раздела полианилин-сталь // Журнал прикладной химии. 2015. Т. 88. № 7. С. 1007–1082.
3. Яковлева А. А., Анциферов Е. А., Гусева Е. А., Садловский С. В. Влияние защитного покрытия на основе органического связующего на коррозионную устойчивость стали // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2019. Т. 9. № 4. С. 600–611. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2019-9-4-600-611>.
4. Гусева Е. А., Константинова М. В. Порошковые полимерные покрытия как альтернативный способ защиты металлов от коррозии // Вестник Иркутского государственного технического универси-

- тета. 2015. № 10. С. 71–76.
5. Петрунин М. А., Максаева Л. Б., Гладких Н. А., Юрасова Т. А., Котенев В. А., Цивадзе А. Ю. Адсорбция органосиланов на поверхности металлов и неорганических материалов. 1. Адсорбция на минеральных поверхностях // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2021. Т. 57. № 5. С. 451–468. <https://doi.org/10.31857/S004418562105020X>.
6. Яковлева А. А., Анциферов Е. А., Садловский С. В. Определение коррозионных характеристик в координатах Найквиста при защите поверхности стали латексами // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2021. Т. 25. № 4. С. 519–527. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-519-527>.
7. Немчинова Н. В., Яковлева А. А. Оптимизация кинетических исследований в металлургии // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. № 9. С. 119–129. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-9-119-129>.

References

1. Shinkareva E. V., Koshevar V. D. Corrosion inhibiting primer based on aqueous epoxy emulsion and carbon nanoparticles. *Zhurnal Prikladnoj Himii = Russian Journal of Applied Chemistry*. 2016;89(1):68-76. (In Russ.).
2. Smirnov M. A., Sokolova M. P., Dmitriev I. Yu., Vlasova E. N., Rozova E. Yu., L'yashevich G. K. Barrier properties and structure of inorganic layers at polyaniline-steel interface. *Zhurnal Prikladnoj Himii = Russian Journal of Applied Chemistry*. 2015;88(7):1007-1082.
3. Yakovleva A. A., Antsiferov E. A., Guseva E. A., Sadlovsky S. V. Effect of an organic binder protective coating on the corrosion resistance of steel. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2019;9(4):600-611. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2019-9-4-600-611>.
4. Guseva E. A., Konstantinova M. V. Polymer powder coatings as an alternative to protect metals from corrosion. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical Uni-*

- versity*. 2015;10:71-76. (In Russ.).
5. Petrunin M. A., Maksaeva L. B., Gladkih N. A., Yurasova T. A., Kotenev V. A., Civadze A. Yu. Organosilanes adsorption on the surface of metals and inorganic materials. *Fizikohimiya poverhnosti i zashchita materialov*. 2021;57(5):451-468. <https://doi.org/10.31857/S004418562105020X>.
6. Yakovleva A. A., Antsiferov E. A., Sadlovsky S. V. Determination of corrosion characteristics of steel protected by a latex coating in Nyquist coordinates. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(4):519-527. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-519-527>.
7. Nemchinova N. V., Yakovleva A. A. Kinetic studies optimization in metallurgy. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2016;20(9):119-129. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-9-119-129>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Яковлева Ариадна Алексеевна,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры химии и биотехнологии
им. В. В. Тугуриной,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

Садловский Сергей Владимирович,
аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

Вострикова Наталья Игоревна,
магистрант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

Халбаев Владимир Валерьевич,
магистрант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

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 11.04.2022; одобрена после рецензирования 29.06.2022; принята к публикации 09.12.2022.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ariadna A. Yakovleva,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Chemistry
and Biotechnology named after V.V. Tugurina,
Irkutsk National Research Technical
University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Sergey V. Sadlovsky,
Postgraduate student,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Natalia I. Vostrikova,
Master's Degree Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Vladimir V. Khalbaev,
Master's Degree Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the preparation of the 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 11.04.2022; approved after reviewing 29.06.2022; accepted for publication 09.12.2022.

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: **pgr@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.

«iPolytech Journal» 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 «Кибер-Ленинка» (CYBERLENINKA), рассылается в Российскую книжную палату, ВИНТИ РАН.

Статьи, опубликованные в журнале «iPolytech Journal», 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: **pgr@istu.edu**

ISSN 2782-4004 (print) ISSN 2782-6341 (online)

iPolytech Journal

Том 26, № 4. 2022 / Vol. 26, №4. 2022

16+



Редактор Я.В. Макшанцева
Дизайнер В.Г. Лисицин
Ответственный секретарь
Г.П. Привалова
Перевод на английский язык
Tomas A. Beavitt,
Н.Г. Попова, В.В. Батицкая
Верстка Н.П. Дзюндзя

Выход в свет 26.12.2022 г.
Формат 60x90/8.
Бумага офсетная. Печать трафаретная.
Усл. печ. л. 20.
Тираж 500 экз. Заказ 151. 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, 83А