

ISSN 2782-4004 (print)

# iPolytech Journal

Tom 26, № 1. 2022 / Vol. 26, № 1. 2022



<https://ipolytech.ru>

ISSN 2782-4004 (print)

# iPolytech Journal

Tom 26, № 1. 2022 / Vol. 26, № 1. 2022



<https://ipolytech.ru>

ISSN 2782-4004 (print)

**iPolytech Journal**

**Том 26, № 1. 2022 / Vol. 26, № 1. 2022**



## НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Издательство  
Иркутского национального исследовательского  
технического университета

---

Периодичность издания – 4 раза в год.

Учредитель:  
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](mailto:pgp@istu.edu)

ISSN 2782-4004 (print)

# iPolytech Journal

Tom 26, № 1. 2022 / Vol. 26, № 1. 2022

## SCIENTIFIC JOURNAL

Publishers  
of Irkutsk National Research  
Technical University

---

Frequency of publication – 4 times a year.

Founder:  
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](mailto: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 и машиноведение" (г. Иркутск, Россия)
- НЕМЧИНОВА Н.В.**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой металлургии цветных металлов Иркутского национального исследовательского технического университета, заместитель главного редактора по направлению "Металлургия и материаловедение" (г. Иркутск, Россия)
- СУСЛОВ К.В.**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники Иркутского национального исследовательского технического университета, заместитель главного редактора по направлению "Энергетика" (г. Иркутск, Россия)
- БАЖИН В.Ю.**, д.т.н., заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов и производств Санкт-Петербургского горного университета (г. Санкт-Петербург, Россия)
- БЛЮМЕНШТЕЙН В.Ю.**, д.т.н., профессор Кузбасского государственного технического университета (г. Кемерово, Россия)
- БОЛДЫРЕВ А.И.**, д.т.н., профессор кафедры технологии машиностроения Воронежского государственного технического университета (г. Воронеж, Россия)
- БОРОВИКОВ Ю.С.**, д.т.н., и.о. ректора Новгородского государственного университета имени Ярослава Мудрого (г. Великий Новгород, Россия)
- ГАВЛИК ЮЗЕФ**, профессор кафедры технологии производства и автоматизации Краковского технологического университета (г. Краков, Польша)
- ЗАКАРЮКИН В.П.**, д.т.н., профессор кафедры электроэнергетики транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения (г. Иркутск, Россия)
- КАРПЕНКО Е.И.**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой лаборатории плазменно-энергетических процессов и технологий Института физического материаловедения СО РАН (г. Улан-Удэ, Россия)
- КЛЕР А.М.**, д.т.н., главный научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)
- КОЛОСОК И.Н.**, д.т.н., ведущий научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)
- КРЮКОВ А.В.**, д.т.н., академик Российской академии транспорта, член-корр. АН ВШ РФ и Российской инженерной академии, заслуженный энергетик Республики Бурятия, профессор кафедры электроэнергетики транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения (г. Иркутск, Россия)
- КУРБАЦКИЙ В.Г.**, д.т.н., ведущий научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)
- ЛИХИ Пол**, профессор кафедры ветроэнергетики, Университетский колледж Корка, исследователь, Цент 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)
- 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)
- ФЕДЯЕВ А.А.**, д.т.н., заведующий кафедрой промышленной теплоэнергетики Братского государственного университета (г. Братск, Россия)
- ХЕЙФЕЦ М.Л.**, д.т.н., директор Государственного научного учреждения « Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси» (г. Минск, Республика Беларусь)
- ФИШОВ А.Г.**, д.т.н., профессор Новосибирского государственного технического университета (г. Новосибирск, Россия)
- ШОЛЬТЕС Бертольд**, директор Института металловедения Кассельского университета (г. Кассель, Германия)

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

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

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

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

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

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

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

**Yury S. 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)

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

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

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

**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)

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

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

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

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

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

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

**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)

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

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

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

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

**Содержание**

6

**Машиностроение и машиноведение**

<b>Боев А. Ф., Карпов И. В., Распопина В. Б.</b> 3d-моделирование конструкции системы кондиционирования самолета.....	10
<b>Самуль А. Г.</b> Кинематические характеристики процесса ультразвуковой поверхностной обработки.....	24
<b>Чащин Н. С.</b> Оптимизация процесса чистовой обработки отверстий в многокомпонентных пакетах из углепластиков и металлических сплавов.....	35

**Энергетика**

<b>Герасимова Н. П., Коваль Т. В.</b> Повышение коррозионной стойкости внутренних поверхностей энергетического оборудования.....	43
<b>Дмитриченко В. И., Ни Д. А., Джетписов М. А., Бауржан Б.</b> Комбинированная релейная защита от замыканий на землю в электросетях 6–10 кВ.....	53
<b>Кузьмин В. Р., Зароднюк М. С., Массель Л. В.</b> Оценка влияния выбросов от объектов энергетики на Байкальскую природную территорию.....	70
<b>Местников Н. П., Васильев П. Ф., Давыдов Г. И., Хоютанов А. М., Альзаккар А. М.-Н.</b> Исследование функционирования фотоэлектрической установки в условиях облачной погоды на территории Севера.....	81
<b>Папин В. В., Ефимов Н. Н., Дьяконов Е. М., Безуглов Р. В., Добрыдnev Д. В., Шмаков А. С.</b> Классификация форм энергии в соответствии с уровнями организации материи.....	92
<b>Фишов А. Г., Осинцев А. А., Фролов М. Ю., Армеев Д. В., Мурашкина И. С.</b> Автоматическая настройка регуляторов частоты и обменной мощности в энергосистемах малой мощности.....	102
<b>Чжан Жэнь, Лю Хаомин.</b> Локализация поврежденного участка в городской распределительной сети на основе маркировки повреждения.....	117

**Металлургия и материаловедение**

<b>Богатырев Д. М., Петров Г. В., Цымбулов Л. Б.</b> Закономерности распределения благородных металлов между шлаковой и штейновой фазами при плавке сульфидных медных и медно-никелевых концентратов.....	128
<b>Каримова Л. М., Кайралапов Е. Т.</b> Исследования по перколяционному выщелачиванию меди из глинистых смешанных медных руд.....	142

**Content**

7

**Mechanical engineering and machine science**

<b>Boev A. F., Karpov I. V., Raspopina V. B.</b> 3D modeling of the aircraft air conditioning system.....	10
<b>Samul A. G.</b> Kinematic characteristics of ultrasonic surface treatment.....	24
<b>Chashchin N. S.</b> Optimisation of the bore reaming process in hybrid stacks made of carbon fibre and metal alloys.....	35

**Power engineering**

<b>Gerasimova N. P., Koval T. V.</b> Improvement of corrosion resistance of internal surfaces in power-generating equipment.....	43
<b>Dmitrichenko V. I., Ni D. A., Dzhetpisov M. A., Baurzhan B.</b> Combined ground-fault relay protection in 6–10 kV power grids.....	53
<b>Kuzmin V. R., Zarodnyuk M. S., Massel L. V.</b> Impact assessment of emissions from energy facilities on the Baikal natural area.....	70
<b>Mestnikov N. P., Vasilyev P. F., Davydov G. I., Khoyutanov A. M., Alzakkar A. M.-N.</b> Operation of a photovoltaic installation in the North under various cloudiness conditions.....	81
<b>Papin V. V., Efimov N. N., Dyakonov E. M., Bezuglov R. V., Dobrydnev D. V., Shmakov A. S.</b> A classification of energy forms according to the levels of organization of matter.....	92
<b>Fishov A. G., Osintsev A. A., Frolov M. Yu., Armeev D. V., Murashkina I. S.</b> Automatic tuning of frequency and interchange power controllers in low-power energy systems.....	102
<b>Zhang Ren, Liu Haoming.</b> Fault section location in urban distribution network based on fault marking.....	117

**Metallurgy and materials science**

<b>Bogatyrev D. M., Petrov G. V., Tsymbulov L. B.</b> Distribution of noble metals between slag and matte phases during smelting of copper-sulphide and copper-nickel concentrates.....	128
<b>Karimova L. M., Kairalapov Y. T.</b> Percolation leaching of clay mixed copper ores.....	142



## *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 Минобрнауки России.

«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 и машиноведение
- Энергетика
- Металлургия и материаловедение

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 and Machine Science
- Power Engineering
- Metallurgy and Materials Science

**Editorial Board**



Научная статья

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-10-23>

УДК 621.81:075.8



## 3d-моделирование конструкции системы кондиционирования самолета

**Арсений Федорович Боев<sup>1</sup>, Иван Викторович Карпов<sup>2</sup>, Вера Борисовна Распопина<sup>3✉</sup>**<sup>1-3</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия<sup>1</sup> [Niganiga1234niga@gmail.com](mailto:Niganiga1234niga@gmail.com)<sup>2</sup> [karpovivann@mail.ru](mailto:karpovivann@mail.ru)<sup>3</sup> [vbr2604@mail.ru](mailto:vbr2604@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-8960-5644>

**Резюме.** Цель – формирование 3d-модели конструкции системы кондиционирования самолета для выполнения численного эксперимента в автоматизированной среде инженерного анализа. Полнота данной модели обусловлена требуемым результатом численного эксперимента. Суть эксперимента сводится к воссозданию условий протекания аэродинамических процессов в окрестности жалюзийной решетки, интегрированной в обшивку фюзеляжа в месте сообщения системы кондиционирования с внешней средой. Поэтому интерес представляет та часть конструкции системы кондиционирования, работа которой непосредственно влияет на параметры состояния прочности жалюзийной решетки. Для формирования цифровой копии оригинала была использована система автоматизированного проектирования Siemens NX. Ее инструментарий обладает возможностями построения высокоточных геометрических моделей. Результатом проделанной работы стала 3d-модель, которая позволит в цифровой среде инженерных расчетов получить модели процесса внешней и внутренней аэродинамики, позволяющие оценить параметры состояния прочности исследуемой детали. Показано, что данная модель представляет собой сочетание геометрических объектов, образованных совокупностью сборочных единиц. В частности, рассмотрены элементы системы кондиционирования: турбоохладитель, радиатор, клапан. Для воссоздания сложной геометрии оригиналов сборочных единиц этих агрегатов был разработан и оптимизирован алгоритм выбора и последовательности выполнения типовых операций системы Siemens NX таким образом, чтобы построить корректные 3d-модели. Построенная 3d-модель системы кондиционирования самолета позволит в цифровой среде инженерных расчетов смоделировать процессы внешней и внутренней аэродинамики, влияющие на параметры состояния прочности жалюзийной решетки. С помощью предложенной модели пользователь получает возможность изучить устройство системы кондиционирования самолета.

**Ключевые слова:** численный эксперимент, 3d-модель, CAD-программы, конструкция системы кондиционирования, полнотелая модель, тонкостенное тело

**Для цитирования:** Боев А. Ф., Карпов И. В., Распопина В. Б. 3d-моделирование конструкции системы кондиционирования самолета // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 1. С. 10–23. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-10-23>.

## MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Original article

## 3D modeling of the aircraft air conditioning system

**Arseniy F. Boev<sup>1</sup>, Ivan V. Karpov<sup>2</sup>, Vera B. Raspopina<sup>3✉</sup>**<sup>1-3</sup> Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia<sup>1</sup> [Niganiga1234niga@gmail.com](mailto:Niganiga1234niga@gmail.com)<sup>2</sup> [karpovivann@mail.ru](mailto:karpovivann@mail.ru)<sup>3</sup> [vbr2604@mail.ru](mailto:vbr2604@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-8960-5644>

**Abstract.** The study aim was to develop a 3D model representing the aircraft air conditioning system with the purpose of performing a numerical experiment in an automated environment of engineering analysis. The completeness of this model was associated with the required result of the numerical experiment. During the experiment, we simulated

conditions for the flow of aerodynamic processes in the vicinity of the louvre integrated into the fuselage skin at the point of communication between the air conditioning system and the external environment. Of particular interest was that part of the air conditioning system, which directly affects the louvre strength. The Siemens NX computer-aided design system was used to form a digital copy of the original. The toolkit of this system allows high-precision geometric models to be designed. As a result, a 3D-model was obtained applicable to simulate external and internal aerodynamical processes in the digital environment of engineering calculations for evaluating the strength parameters of the studied part. This model is a combination of geometric objects formed by a set of assembly units. In particular, such elements of the air conditioning system as the cooling turbine, radiator, and valve, are considered. In order to recreate the complex geometry of the original assembly parts of these units, an algorithm for selecting and performing typical operations of the Siemens NX system was developed and optimized for constructing correct 3D models. The constructed 3D model of the aircraft air conditioning system can be used when simulating external and internal aerodynamical processes affecting the louvre strength in the digital environment of engineering calculations. The proposed model allows users to study the structure of aircraft air conditioning systems.

**Keywords:** numerical experiment, 3d model, CAD programs, air conditioning system design, full-bodied model, thin-walled body

**For citation:** Boev A. F., Karpov I. V., Raspopina V. B. 3D modeling of the aircraft air conditioning system. *iPolytech Journal*. 2022;26(1):10-23. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-10-23>.

## ВВЕДЕНИЕ

Создание конструктивных элементов с заданными механическими характеристиками возможно только в том случае, если будут учтены все факторы, влияющие на него в процессе эксплуатации. В частности, это актуально при проектировании самолета. С одной стороны, конструкция самолета при наименьшем весе должна удовлетворять требованиям прочностной надежности, с другой – для этого необходимо учесть все факторы влияния, обуславливающие качественную и количественную картины параметров напряженно-деформированного состояния элемента при разных режимах эксплуатации самолета. Возможности информационных технологий по большей части позволяют достигнуть положительного результата при решении данной проблемы на этапе проектно-конструкторских работ [1–5]. Однако многофакторность условий нагружения, как конструкции самолета в целом, так и каждого элемента конструкции в частности, обуславливает невозможность заранее учесть все вариации силовых потоков по конструкции. Как следствие, у некоторых деталей выявляются отклонения параметров прочности от регламентированного уровня на следующих этапах жизненного цикла. Это требует оперативного определения причин отклонения с последующим их устранением.

В этом случае необходим детальный анализ всех факторов, влияющих на параметры напряженно-деформированного состояния

детали [6–9]. А именно: ее геометрия, материал, технология изготовления, назначение, воздействие соседних деталей и окружающей среды и т.д. Корректная математическая модель, сформированная в автоматизированной среде системы проектирования, позволяет получить цифровую копию реального процесса работы детали, достаточную для выявления причин ее разрушения и их устранения [10–13]. Причем возможности цифровых технологий позволяют построить модели, учитывающие разные факторы реального процесса, как по отдельности, так и в сочетании [14–18].

В частности, для исследования параметров напряженно-деформированного состояния конструктивного элемента, интегрированного в обшивку маневренного самолета, планируется использовать данную концепцию. Элемент представляет собой цельнометаллическую жалюзийную решетку. Наличие такого элемента конструкции обусловлено работой системы кондиционирования самолета. Следовательно, наряду с прочими факторами, влиять на параметры состояния прочности решетки будут внутренние и внешние воздушные потоки.

## ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для оценки влияния на параметры состояния прочности решетки было принято решение провести численный эксперимент, целью которого является выявление силового воздействия воздушных потоков на конструктивный элемент типа цельнометаллической жа-



люзийной решетки. Интерес представляет полетный расчетный случай. Поэтому элемент испытывает на себе воздействие двух воздушных потоков. Один поток действует на элемент изнутри, то есть обусловлен работой системы кондиционирования, второй – снаружи, со стороны внешней воздушной среды. Проведение численного эксперимента планируется в автоматизированной среде специализированного программного продукта, позволяющего как воссоздать поток, так и оценить его воздействие, фиксируя значения аэродинамических параметров<sup>4</sup> [19].

В качестве прототипа принята типовая система кондиционирования легкого маневренного самолета [20], рис. 1.

Важным этапом подготовки эксперимента является формирование 3d-модели той части конструкции системы кондиционирования самолета, которая позволит достоверно воссоздать условия протекания процесса обдувки решетки.

## ОПИСАНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Построение 3d-модели прежде всего требует однозначного понимания конструктивного решения оригинала. Как правило, конструктивное решение систем кондиционирования воздуха самолетов представляет собой функционально увязанную совокупность

следующих конструктивных элементов:

- корпусных деталей, внешние обводы которых образованы плоскостями и криволинейными поверхностями;

- деталей, которые можно классифицировать как массивы, пластины, оболочки (замкнутые и не замкнутые), брусья разных форм и габаритов (полые и сплошные).

Наглядным примером сложности и многокомпонентности неповторяемых деталей такой конструкции служит часть конструкции систем кондиционирования самолетов Boeing 787 и SSJ 100, рис. 2.

Для формирования 3d-модели важно понять, какова степень ее детализации. А это зависит от того, какие задачи должны быть решены с помощью формируемой модели, и какой параметр является исследуемым в рамках численного эксперимента.

Поскольку в данном случае целью эксперимента является исследование влияния воздушного потока, обусловленного работой системы кондиционирования воздуха, на параметры напряженно-деформированного состояния конкретной детали, то и модель должна адекватно отобразить ту часть геометрии конструкции, которая непосредственно влияет на параметры аэродинамического воздействия на исследуемый объект.

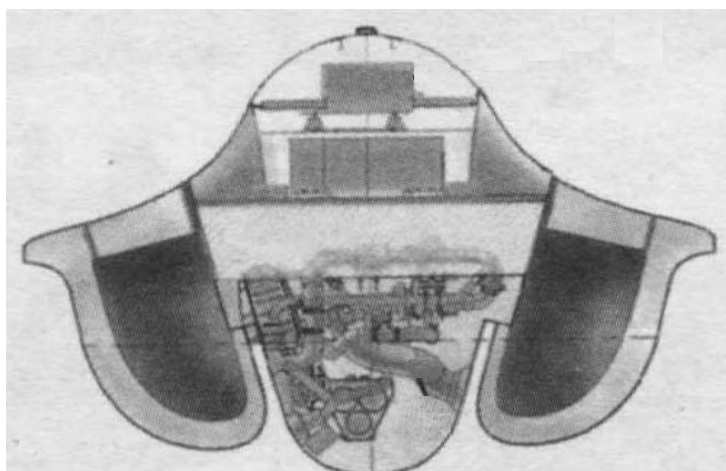
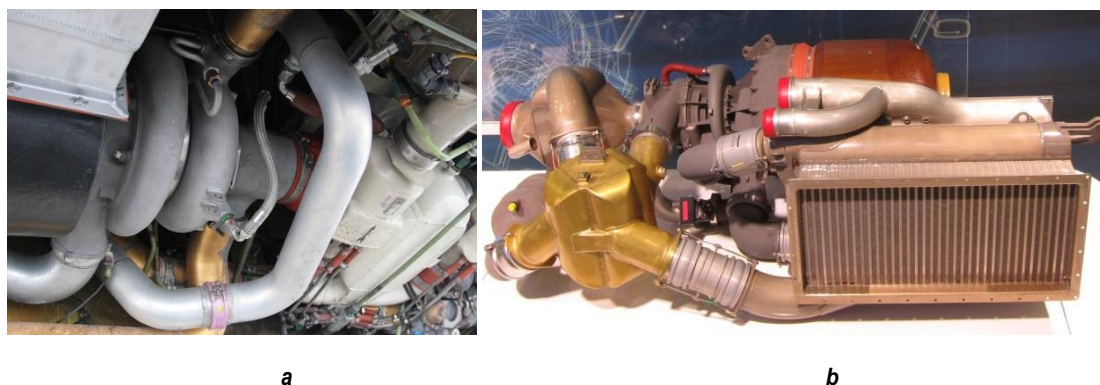


Рис. 1. Вид системы кондиционирования воздуха с выходом на обшивку фюзеляжа  
Fig. 1. View of the aircraft air conditioning system with an access to the fuselage skin

<sup>4</sup>Микеладзе В. Г., Титов В. М. Основные геометрические и аэродинамические характеристики самолетов и ракет: справочник. 2-е изд., доп. М.: Изд-во «Машиностроение», 1990. 144 с.



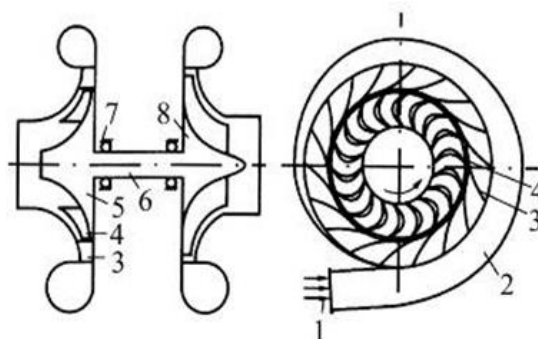
**Рис. 2. Часть системы кондиционирования: а – Boeing 787; б – SSJ 100**  
**Fig. 2. Part of the air conditioning system: a – Boeing 787; b – SSJ 100**

Анализ исследуемой системы кондиционирования с учетом данного критерия позволил выявить часть конструкции, которая актуальна для эксперимента. В частности, формирование 3d-модели предусматривает построение геометрических моделей следующих агрегатов системы: турбохолодильника, клапана, радиатора, части трубопровода.

Геометрия данных объектов весьма неоднозначна и не проста (см. рис. 2). Следует обратить внимание на тот факт, что целью данной работы не является изложение процесса исследования системы кондиционирования воздуха маневренного самолета в части ее конструкции и принципа функционирования. Этому будет посвящена следующая статья о численном эксперименте, для которого описываемая 3d-модель формируется. Ее формирование в своей основе содержит

трансформацию сложной многомерной геометрии прототипов в адекватные модели путем задействования математического аппарата, зашитого в инструментарий специализированной CAD-системы. Многогранность геометрии моделируемых объектов в сочетании с критериями их детализации требует однозначного, глубокого понимания математики, реализуемой тем или иным функционалом CAD-системы. Только тогда возможно корректно ассоциировать геометрическую особенность с математическим приемом. Соответственно, чем сложнее геометрия объекта моделирования, тем сложнее и чувствительнее должен быть задействованный математический аппарат системы.

Принципиальная схема турбохолодильника<sup>5</sup> (рис. 3) является бесспорным подтверждением вышесказанного.



**Рис. 3. Принципиальная схема турбохолодильника (1 – патрубок, 2 – «улитка», 3 – сопловой аппарат, 4 – лопасти рабочего колеса, 5 – рабочее колесо турбины, 6 – вал, 7 – подшипник, 8 – рабочее колесо вентилятора)**  
**Fig. 3. Schematic diagram of a cooling turbine (1 – exhaust pipe, 2 – 'snail', 3 – nozzle unit, 4 – impeller blades, 5 – turbine impeller; 6 – shaft, 7 – bearing, 8 – fan impeller)**

<sup>5</sup> Антонова Н. В., Дубровин Л. Д., Егоров Е. Е., Каллиоппин А. К., Петров Ю. М., Ружицкая В. В. [и др.]. Проектирование авиационных систем кондиционирования воздуха: учеб. пособ. М.: Изд-во «Машиностроение», 2006. 384 с.

Для более тщательного решения задачи 3d-моделирования следует выбрать автоматизированную среду 3d-моделирования, обладающую надлежащим инструментарием.

### ПРОЦЕСС ФОРМИРОВАНИЯ МОДЕЛИ

Для моделирования конструкции системы кондиционирования была использована система автоматизированного проектирования Siemens NX [21].

Построению геометрической модели предшествовали:

- детальный анализ возможностей автоматизированной среды в части CAD-программы;
- выявление операций, реализующих соответствующие возможности программы;
- просмотр инструментов среды, позволяющих выполнить конкретную операцию.

Владение таким системным видением функционала CAD-программы позволило построить геометрическую модель объекта путем выполнения требуемого ряда операций, выбор и хронология которых обусловлены причинно-следственной зависимостью заданной геометрии и имеющегося инструментария в арсенале системы автоматизированного проектирования NX.

**Моделирование «турбохолодильника».** Важной частью системы кондиционирования самолета является турбохолодильник. Эффект охлаждения в нем основан на преобразовании тепловой энергии воздуха в механическую работу. Геометрия турбохолодильника представляет собой сложную двухконтурную структуру. Во многом сложность моделирования турбохолодильника обусловлена неоднозначностью геометрии «улиток». Поэтапное формирование геометрической модели турбохолодильника заключается в выполнении логически увязанных специальных операций CAD-среды.

Используя панель инструментов, был создан эскиз тела вращения с последующей активацией операции вращения вдоль оси Oz. Соответствующее диалоговое окно представлено на рис. 4.

Переход из полнотелой модели в тонкостенную происходит при использовании функции NX «тонкостенное тело» (рис. 5). В диалоговом окне осуществляются требуемые настройки, позволяющие выбрать плоскости, относительно которых будет производиться удаление части модели. В исходном случае это верхняя и нижняя окружности. Указывается толщина требуемой детали.

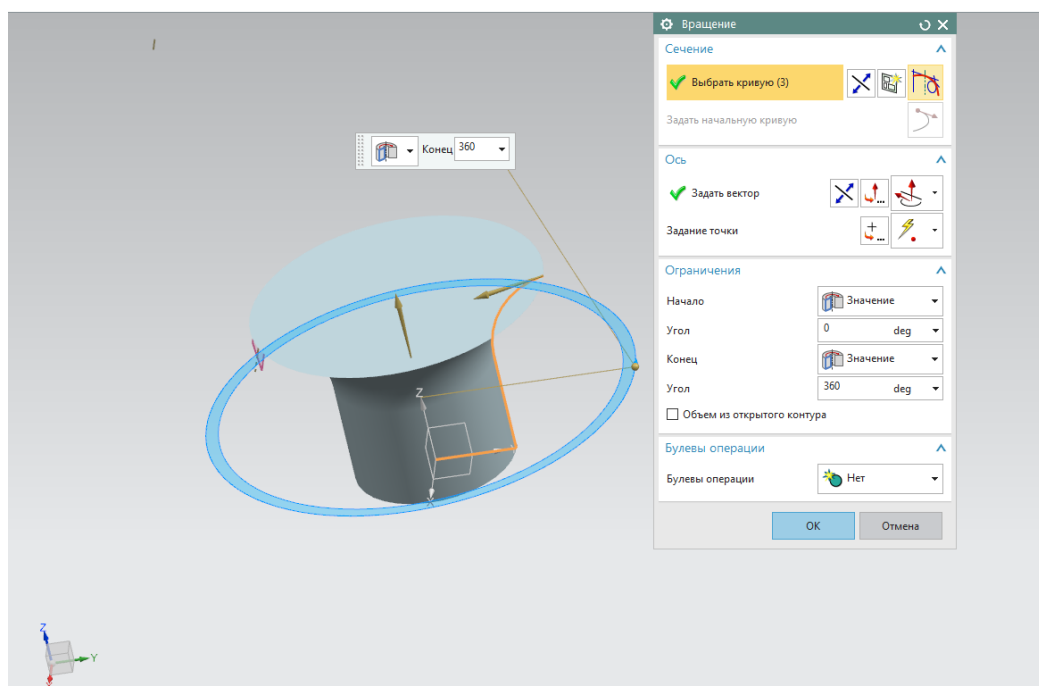
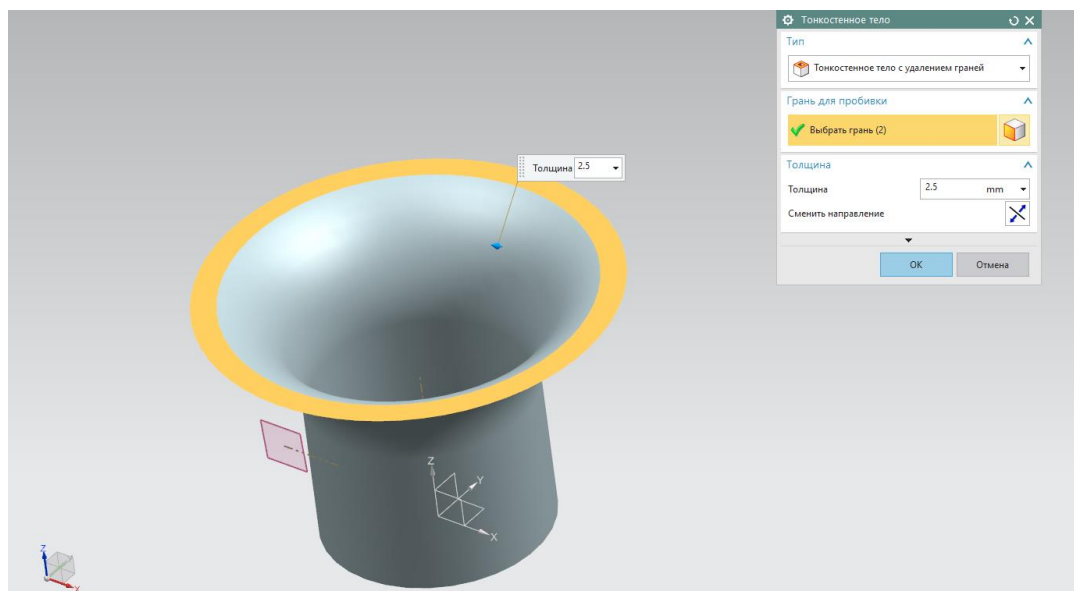


Рис. 4. Моделирование входа турбохолодильника: операция «Вращение»  
Fig. 4. Simulation of the cooling turbine inlet: 'Rotation' operation

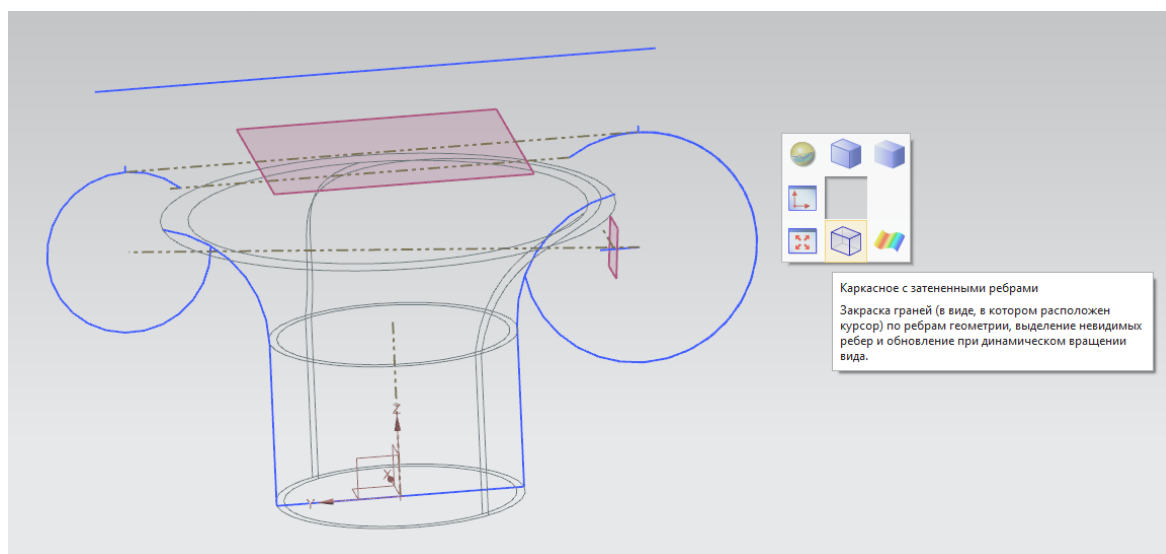


**Рис. 5. Моделирование прохода для воздушного потока**  
**Fig. 5. Simulation of a passage for air flow**

Далее был использован инструментальный каскадного изображения модели. Для этого в свободной части рабочего стола зажимается правая кнопка мыши и выбирается необходимый вид представленной модели. Такой способ позволяет сосредоточиться только на построении эскиза для будущей «улитки». Интерфейс инструментария продемонстрирован на рис. 6.

Простота использования вспомогательных поверхностей облегчает построение эс-

кизов под углом. При создании эскиза «улитки» создается также вспомогательная линия с требуемым углом отклонения относительно оси Oy. Любую построенную линию можно преобразовать во вспомогательную (без потери ее полного функционала). Для этого в окне построения эскиза была выбрана необходимая линия, щелчком правой кнопки мыши открыто выпадающее меню работы с эскизом, затем выбрана функция «преобразование во вспомогательный» (рис. 7).



**Рис. 6. Моделирование «улитки» с помощью каскадного изображения**  
**Fig. 6. Simulation of a 'snail' using cascade image**

Использование таких линий позволяет быстро ориентироваться в постройке любой сложной конфигурации переходных форм модели.

Переменный диаметр не позволяет сделать вращение по направляющей, поэтому использовалась функция «заметание», она позволяет создавать поверхность различной формы вдоль кривой. Необходимо использовать ленточный *проводник NX*. В диалоговом

окне, представленном на рис. 8, данный функционал реализован.

Такой подход позволяет NX распознать имеющиеся сечения как общее целое, а не как набор различных линий. В теме ниже была выбрана опция «направляющая линия», в результате получили поверхность разной диаметральной формы. Для построения симметричной части использована функция «зеркальная геометрия», рис. 9.

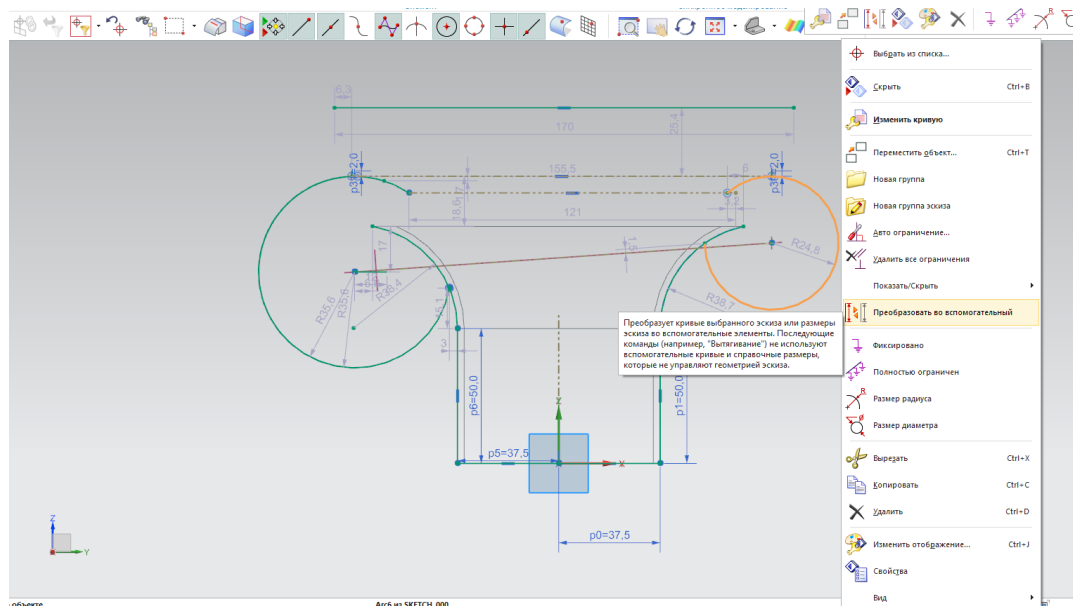


Рис. 7. Построение модели «улитки»: вспомогательные построения  
Fig. 7. Designing of a 'snail' model: auxiliary constructions

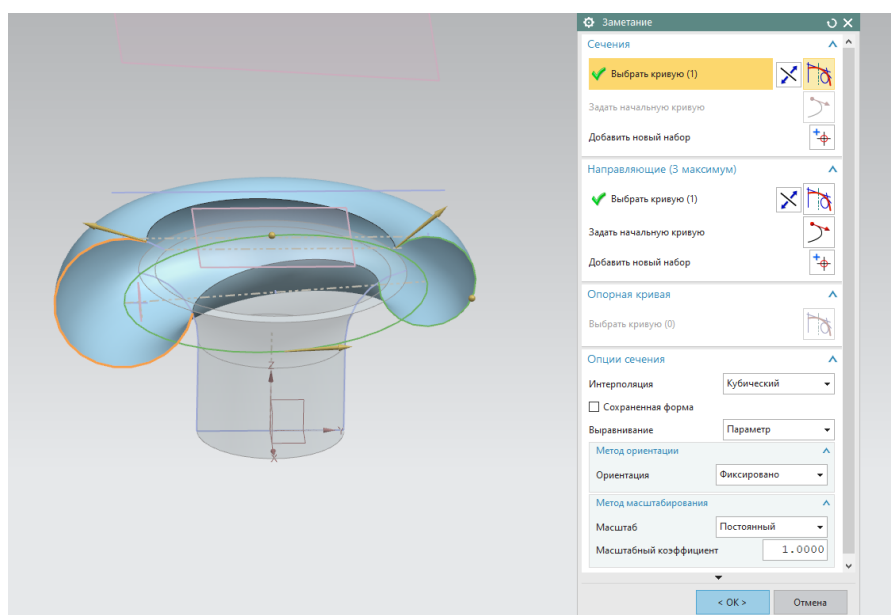
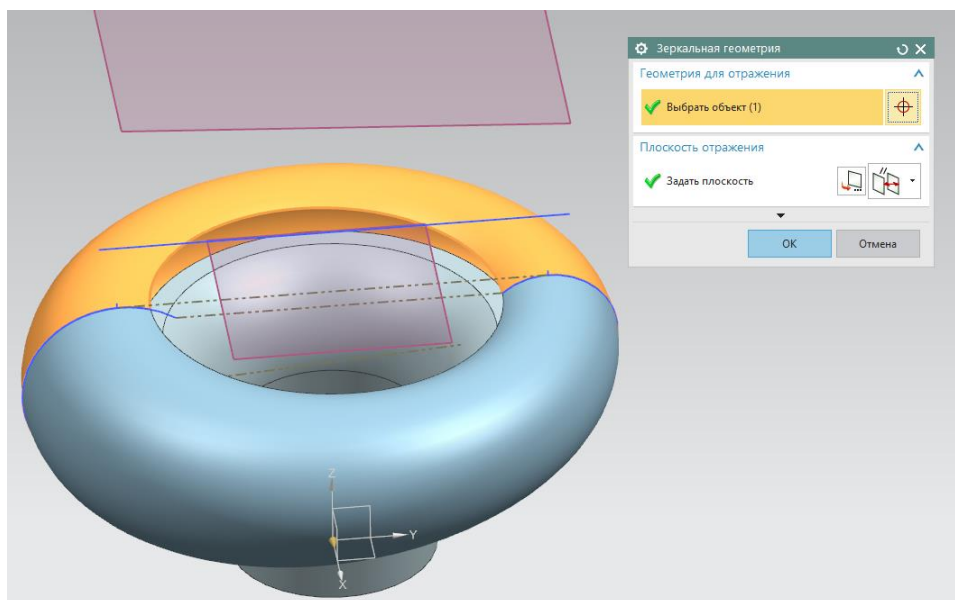


Рис. 8. Проектирование «улитки»  
Fig. 8. Designing a 'snail'





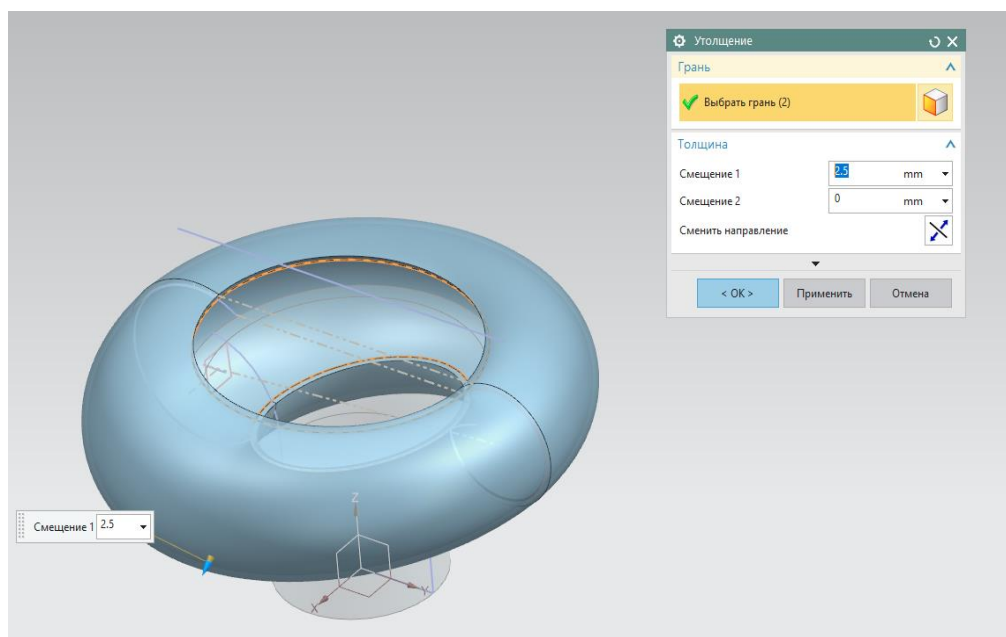
**Рис. 9. Моделирование «улитки»**  
**Fig. 9. 'Snail' simulation**

Созданные поверхности являются вспомогательными, для придания им толщины была использована функция «утолщение», рис. 10. Выделение соответствующих плоскостей «улитки» позволяет NX построить необходимое твердое тело с соответствующей толщиной.

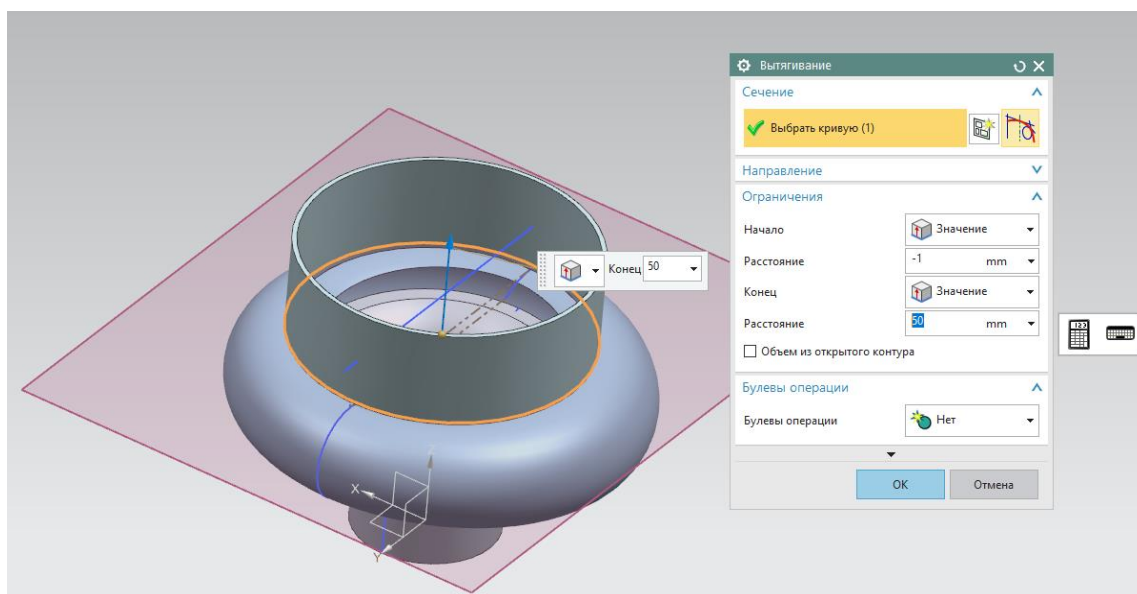
Моделирование корпуса турбохолодильника выполнено с помощью функции «выдавливание». Из заданного диаметра окруж-

ности корпуса выдавливается полнотелый объект заданной длины. Для создания пустотелой модели была использована функция «тонкостенное тело». В результате получили модель, представленную на рис. 11.

Следующая часть геометрии турбохолодильника также представляет собой тело вращения. Поэтому для его построения была использована функция «вращение», описанная выше.



**Рис. 10. Придание толщины «улитке»**  
**Fig. 10. Thickening the 'snail'**



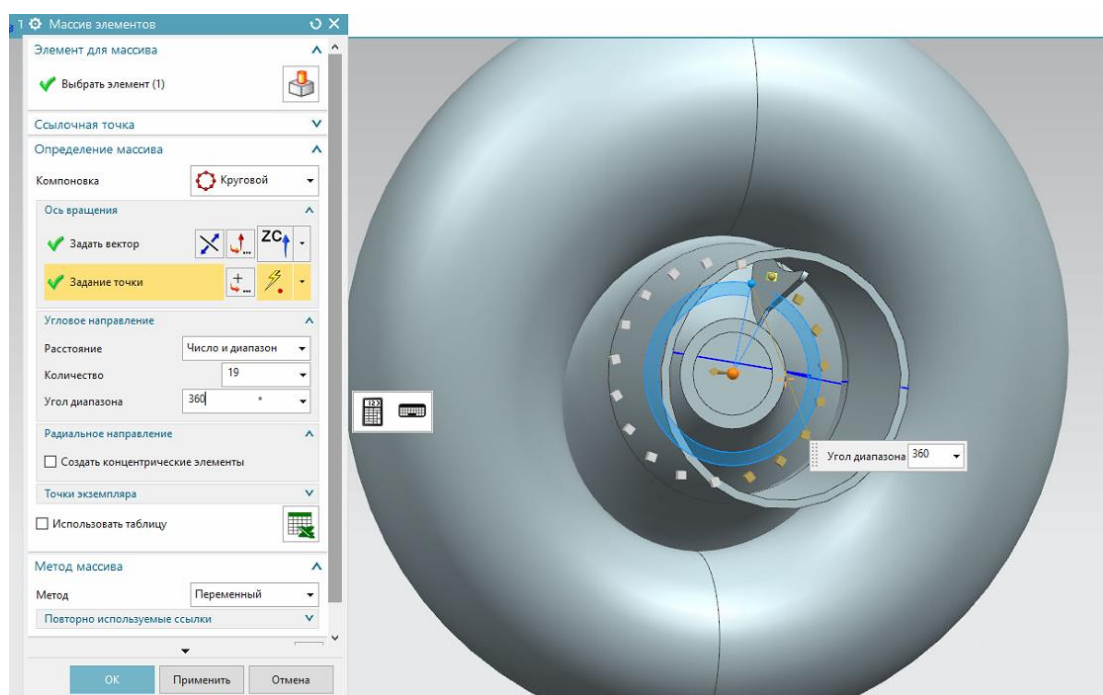
**Рис. 11. Создание корпуса турбохолодильника**  
**Fig. 11. Designing a cooling turbine housing**

Конструкция турбохолодильника включает в себя лопасти. Создание лопастей выполнялось в два этапа:

- моделирование одной лопасти с помощью выдавливания;
- построение всех лопастей путем вращения первой лопасти вдоль вспомогательной линии или оси Oz.

Для выполнения второго этапа нужно непременно задать количество лопастей вентилятора. Данный параметр указывается в диалоговом окне «массив элементов», рис. 12.

Аналогично была построена вторая часть турбохолодильника с учетом отличия в габаритных размерах. Построенный турбохолодильник представлен на рис. 13.



**Рис. 12. Создание лопастей вентилятора**  
**Fig. 12. Designing fan blades**



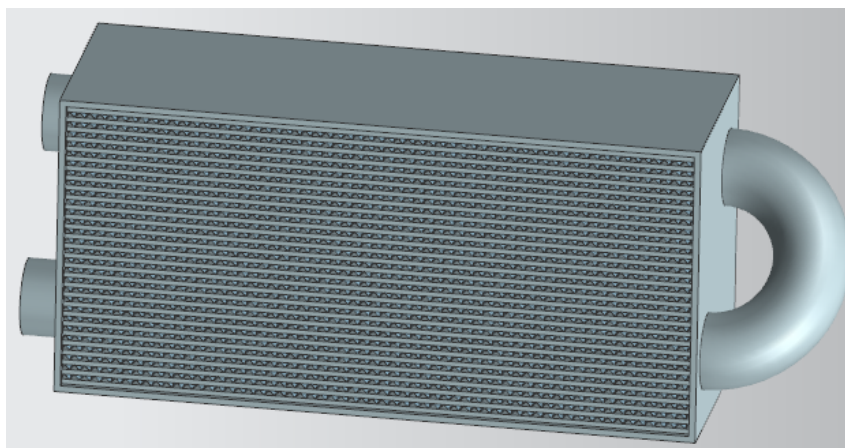
**Рис. 13. Модель турбоохладителя с каркасным выделением невидимых элементов**  
**Fig. 13. Model of a cooling turbine with the frame selection of invisible elements**

**Моделирование «радиатора».** Радиатор служит для охлаждения потока, поступающего от двигателей и от вспомогательной силовой установки. Горячий поток проходит через трубу в радиаторе и охлаждается.

Для начала был смоделирован корпус радиатора, после чего – вертикальные пластины, и затем размножены операцией «массив». Следующим шагом стало моделирова-

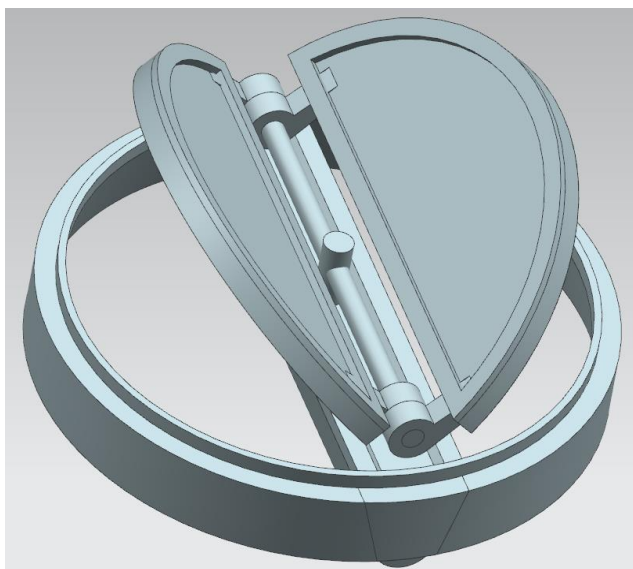
ние трубы. Готовая модель представлена на рис. 14.

**Моделирование «клапана».** Клапан в системе кондиционирования регулирует циркуляцию воздушного потока. Для моделирования клапана были в соответствующей очередности использованы вышеописанные операции. Полученная модель представлена на рис. 15.



**Рис. 14. Модель радиатора**  
**Fig. 14. Radiator model**





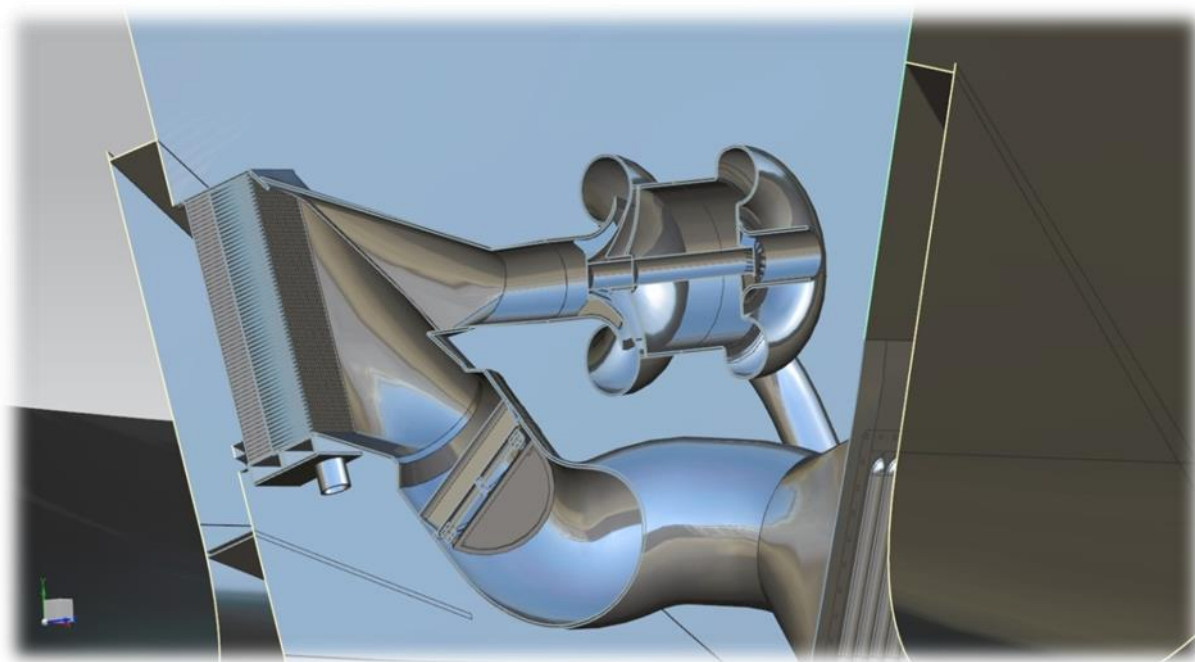
*Рис. 15. Клапан обратный*  
*Fig. 15. Check valve*

Моделирование других компонентов конструкции системы кондиционирования не представляет особенной сложности, поскольку в основе своей это «трубопроводные тела». Их построение с помощью инструментария системы NX выполняется с помощью типовых операций.

**Итоговая модель.** Готовая модель актуальной части конструкции системы кондиционирования для численного эксперимента

представлена на рис. 16.

Эта модель представляет собой тоже сборку, поскольку описанные выше модели агрегатов являются ее компонентами. Соответственно, для формирования этой комплексной модели был также задействован арсенал операций по созданию сборок, позиционированию компонентов и наложению сборочных связей.



*Рис. 16. Готовая 3d-модель с разрезом*  
*Fig. 16. Finished 3d model with a section*

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы построена 3d-модель системы кондиционирования самолета, которая позволит в цифровой среде инженерных расчетов смоделировать процессы внешней и внутренней аэродинамики, влияющие на параметры состояния прочности жалюзийной решетки.

Помимо этого, построенная модель поз-

воляет пользователю получить наглядную картину конструкции оригинала. Инструментарий управления видами модели в CAD-программе дает возможность оценить особенности геометрии построенного объекта, как в общем виде, так и изучить детально его элементы. Особенный интерес представляет возможность визуализации внутренних полостей элементов конструкции.

## Список источников

1. Еловенко Д. А., Мироненко В. В. Рациональные методы редактирования CAD-моделей на этапе их подготовки к анализу в САЕ-системах // Вестник Байкальского союза стипендиатов DAAD. 2013. № 1. С. 26–34.
2. Стрекоз А. В., Сидоренко В. В., Ледовских И. В. Анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) элерона из полимерных композиционных материалов (ПКМ) с применением метода конечных элементов (МКЭ) // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2019. № 6. С. 122–133. <https://doi.org/10.23683/2311-3103-2019-6-122-133>.
3. Пронин А. И., Щелкунов Е. Б., Султангареева А. С., Латышев К. А., Иваненко А. А. Исследование и разработка конструкции детали кронштейна с использованием CAD/CAE систем // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Серия: Науки о природе и технике. 2017. № 1-1(29). С. 27–32. [https://doi.org/10.17084/2017.1-1\(29\)](https://doi.org/10.17084/2017.1-1(29)).
4. Protasov A. V., Nikolaychuk O. A. Applying the finite-element method for evaluating the reliability of mechanical systems // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2011. Vol. 40. No. 1. P. 27–30. <https://doi.org/10.3103/S105261881101016X>.
5. Klochkov Y. V., Nikolaev A. P., Vakhnina O. V., Kiseleva T. A. Stress-strain analysis of a thin-shell part of fuselage using a triangular finite element with Lagrange multipliers // Russian Aeronautics. 2016. Vol. 59. No. 3. P. 316–323. <https://doi.org/10.3103/S1068799816030041>.
6. Рыжиков И. Н., Нгуен Тьен Куэт. Использование пружинно-массово-демпферных моделей при анализе колебаний и долговечности рабочих колес турбомашин с расстройкой параметров // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 4. С. 756–767. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-4-756-767>.
7. Иващенко А. П. Исследование статической прочности шестерни, входящей в состав вала-шестерни // Современные наукоемкие технологии. 2020. № 11-1. С. 31–36. <https://doi.org/10.17513/snt.38334>.
8. Лашков В. А., Калимуллин Ф. А., Каратаев О. Р., Усманов Р. А. Трехмерное проектирование и инженерный анализ элементов конического редуктора в системе Autodesk Inventor // Вестник Казанского технологического университета. 2020. Т. 23. № 5. С. 94–97.
9. Zenkov E. V. Update of the equations of the limit state of the structural material with the realization of their deformation // Journal of Physics Conference Series. 2017. Vol. 944. Iss. 1. P. 012128. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/944/1/012128>.
10. Распопина В. Б., Бодров Е. А., Ковалёв А. А. Оценка параметров прочности шатуна ДВС в автоматизированной среде модуля APM Structure 3D системы APM WinMachine // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2011. № 01. С. 125–137.
11. Марков С. П., Распопина В. Б. Система Femap with NX Nastran как инструмент для оценки достоверности результатов численного эксперимента в среде программы APM FEM в КОМПАС-3D // Авиамашиностроение и транспорт Сибири: сб. статей XIV Междунар. науч.-практ. конф. (г. Иркутск, 22 декабря 2020 г.). Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2020. С. 45–52.
12. Жильцов Ю. В., Ёлшин В. В. Использование программного комплекса ANSYS CFX при разработке модели комбинированного котла // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 3. С. 81–90. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-3-81-90>.
13. Leonovich D. S., Zhuravlev D. A., Karlina Yu. I., Gorkov A. S. Automated assessment of the low-rigid composite parts influence on the product assimilability in the GePARD system // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2020. Vol. 760. Iss. 1. P. 012038. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/760/1/012038>.
14. Dizon J. R. C., Espera A. H., Chen Qiyi, Advincula R. C. Mechanical characterization of 3D-printed polymers // Additive Manufacturing. 2017. Vol. 20. P. 44–67. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.12.002>.
15. Novikov A. D., Reznik S. V., Denisov O. V. An experimental study to determine mechanical and thermophysical characteristics of thin-walled carbon plastic antenna reflectors // BMSTU Journal of Mechanical Engineering. 2020. No. 3. P. 84–91. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2020-3-84-91>.
16. Гайдаржи Ю., Коляда Е. Цифровой подход для подготовки к сертификации авиационной техники // САПР и графика. 2021. № 1. С. 12–15.
17. Глушков Т. Д. Исследования компактных вентиляторных установок с переменной циркуляцией по длине лопаток рабочего колеса // Вестник Московского авиационного института. 2020. Т. 27. № 1. С. 30–42. <https://doi.org/10.34759/vst-2020-1-30-42>.

18. Leggett J., Priebe S., Shabbir A., Michelassi V., Sandberg R., Richardson E. Loss prediction in an axial compressor cascade at off-design incidences with free stream disturbances using large eddy simulation // *Journal of Turbomachinery*. 2018. Vol. 140. No. 7. P. 071005. <https://doi.org/10.1115/1.4039807>.

19. Рыжиков И. Н. Использование пружинно-массово-демпферных моделей при анализе колебаний рабочих колес энергетических турбомашин с расстройкой па-

раметров // *Системы. Методы. Технологии*. 2020. № 4. С. 20–25. <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2020-4-20-25>.

20. Юргенсон А. А. Учебно-боевой самолет Як-130 // Приложение журнала «Моделист-конструктор». 2006. № 9. 32 с.

21. Данилов Ю., Артамонов И. Практическое использование NX. М.: ДМК Пресс, 2011. 332 с.

## References

1. Elovenko D. A., Mironenko V. V. Rational methods for CAD models editing at the stage of their preparation for the analysis in CAE systems. *Vestnik Bajkal'skogo soyuza stipendiatov DAAD = Letter der DAAD - Stipendiaten*. 2013;1:26-34. (In Russ.).
2. Strekoz A. V., Sidorenko V. V., Ledovskih I. V. Analysis of the stress-strain state (SSS) of ailerons from polymer composite materials (PCM) using the finite element method (FEM). *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2019;6:122-133. (In Russ.). <https://doi.org/10.23683/2311-3103-2019-6-122-133>.
3. Pronin A. I., Shchelkunov Ye. B., Sultangareeva A. Ye., Latyshev K. A., Ivanenko A. A. Research and working out of the bracket part with CAD/CAE systems. *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Nauki o prirode i tekhnike = Scholarly Notes of Komsomolsk-na-Amure State Technical University*. 2017;1-1(29):27-32. (In Russ.). [https://doi.org/10.17084/2017.1-1\(29\)](https://doi.org/10.17084/2017.1-1(29)).
4. Protasov A. V., Nikolaychuk O. A. Applying the finite-element method for evaluating the reliability of mechanical systems. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2011;40(1):27-30. <https://doi.org/10.3103/S105261881101016X>.
5. Klochkov Y. V., Nikolaev A. P., Vakhnina O. V., Kiseleva T. A. Stress-strain analysis of a thin-shell part of fuselage using a triangular finite element with Lagrange multipliers. *Russian Aeronautics*. 2016;59(3):316-323. <https://doi.org/10.3103/S1068799816030041>.
6. Ryzhikov I. N., Nguyen Tien Q. The use of the spring-mass-damping model for the analysis of vibrations of the mistuned power turbomachines impeller. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(4):756-767. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-4-756-767>.
7. Ivaschenko A. P. Research of the static strength of a pinion which is part in a pinion-shaft. *Sovremennii naukoemkie tekhnologii = Modern high technologies*. 2020;11-1:31-36. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/snt.38334>.
8. Lashkov V. A., Kalimullin F. A., Karataev O. R., Usmanov R. A. Three-dimensional design and engineering analysis of elements of a conic reducer in the Autodesk inventor system. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2020;23(5):94-97. (In Russ.).
9. Zenkov E. V. Update of the equations of the limit state of the structural material with the realization of their deformation. *Journal of Physics Conference Series*. 2017;944(1):012128. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/944/1/012128>.
10. Raspopina V. B., Bodrov E. A., Kovalyov A. A. Assessment of strength parameters in regard of a DBC connecting rod in the automated surroundings of an APM structure 3D component cell pertaining to an APM Win Machine system. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2011;1:125-137. (In Russ.).
11. Markov S. P., Raspopina V. B. Femap with NX Nas-tran system as a reliability assessment tool of numerical experiment results in the environment of the APM FEM program in COMPASS-3D. *Aviamashinostroyeniye i transport Sibiri: sbornik statej XIV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Aircraft Engineering and Transport of Siberia: collected articles of the 14th International Scientific and Practical Conference*. 22 December, 2020. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2020, 45-52. (In Russ.).
12. Zhiltsov Yu. V., Elshin V. V. Use of ANSYS CFX software for combined boiler model development. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2017;21(3):81-90. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-3-81-90>. (In Russ.).
13. Leonovich D. S., Zhuravlev D. A., Karlina Yu. I., Govorkov A. S. Automated assessment of the low-rigid composite parts influence on the product assimilability in the GePARD system. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020;760(1):012038. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/760/1/012038>.
14. Dizon J. R. C., Espera A. H., Chen Qiyi, Advincula R. C. Mechanical characterization of 3D-printed polymers. *Additive Manufacturing*. 2017;20:44-67. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.12.002>.
15. Novikov A. D., Reznik S. V., Denisov O. V. An experimental study to determine mechanical and thermophysical characteristics of thin-walled carbon plastic antenna reflectors. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2020;3:84-91. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2020-3-84-91>.
16. Gaidargi U., Kolada E. Digital approach for preparation for aviation equipment certification. *SAPR i grafika*. 2021;1:12-15. (In Russ.).
17. Glushkov T. D. The study of compact fan installations with variable circulation distribution along blade

length. *Vestnik Moskovskogo aviacionnogo instituta = Aerospace MAI Journal*. 2020;27(1):30-42. <https://doi.org/10.34759/vst-2020-1-30-42>. (In Russ.).  
18. Leggett J., Priebe S., Shabbir A., Michelassi V., Sandberg R., Richardson E. Loss prediction in an axial compressor cascade at off-design incidences with free stream disturbances using large eddy simulation. *Journal of Turbomachinery*. 2018;140(7):071005. <https://doi.org/10.1115/1.4039807>.  
19. Ryzhikov I. N. The use of the spring-mass-damping

model for the analysis of vibrations of the mistuned power turbomachines impeller. *Sistemy. Metody. Tekhnologii = Systems. Methods. Technologies*. 2020;4:20-25. <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2020-4-20-25>. (In Russ.).  
20. Yurgenson A. A. Combat training aircraft Yak-130. *Prilozhenie zhurnala "Modelist-konstruktor"*. 2006;9:32 p. (In Russ.).  
21. Danilov Yu., Artamonov I. *Practical use of NX*. Moscow: DMK Press; 2011, 332 p. (In Russ.).

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Боев Арсений Федорович**,  
студент,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

**Карпов Иван Викторович**,  
студент,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

**Распопина Вера Борисовна**,  
кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры самолетостроения и эксплуатации  
авиационной техники,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

#### Вклад авторов

Боев А. Ф., Карпов И. В. изучали принцип функционирования и анализировали конструкцию типовой системы кондиционирования самолета, формировали 3D-модель системы, описывали операции построения моделей;  
Распопина В. Б. руководила проектом, систематизировала полученный материал и подготовила рукопись данной статьи.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

#### Информация о статье

Статья поступила в редакцию 13.09.2021; одобрена после рецензирования 18.01.2022 принята к публикации 23.03.2022.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Arseniy F. Boev**,  
Student,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

**Ivan V. Karpov**,  
Student,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

**Vera B. Raspopina**,  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Aircraft  
Engineering and Operation of Aviation Equipment,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

#### Contribution of the authors

Boev A. F., Karpov I. V. studied the operation principle and analyzed the design of a standard aircraft air conditioning system, formed a 3D model of the system, described the model building operations.  
Raspopina V. B. supervised the project, systemized the received material and wrote 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 13.09.2021; approved after reviewing 18.01.2022; accepted for publication 23.03.2022.

Научная статья

УДК 621.9.048.6

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-24-34>

## Кинематические характеристики процесса ультразвуковой поверхностной обработки

Артём Геннадьевич Самуль<sup>1✉</sup><sup>1</sup>Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия<sup>1</sup>[samul.2012@corp.nstu.ru](mailto:samul.2012@corp.nstu.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6021-7154>

**Резюме.** Цель – исследование кинематических характеристик процесса ультразвукового поверхностно-пластического деформирования с направлением ввода колебаний по касательной к обрабатываемой поверхности для прогнозирования возможности его применения на деталях из металлов и сплавов различной твердости. Описание кинематических параметров (траектория, скорость, ускорение) процесса ультразвукового поверхностно-пластического деформирования рассматривалось в прямоугольной системе координат. Получены аналитические зависимости, определяющие длину траектории, величины результирующей скорости и ускорения как функции от составляющих видов движений (вращательного, поступательного, колебательного). На основании полученных уравнений и их графических решений установлено, что при ультразвуковом поверхностно-пластическом деформировании перемещение индентора осуществляется по сложной траектории с переменной по величине скоростью и ускорением. Показано, что сообщение ультразвуковых колебаний индентору обуславливает сложный характер его движения, существенно отличающийся от метода алмазного выглаживания. При этом наблюдается изменение параметров процесса (скорости и ускорения) по циклическому (синусоидальному) закону, периодичность которого зависит от частоты ультразвуковых колебаний, что должно сказаться на итоговом состоянии обработанной поверхности. Анализ полученных результатов позволил установить, что смена направления ввода ультразвуковых колебаний (с нормального на касательное) дает возможность изменить условие контактирования с циклического на постоянное, что оказывает влияние на значение деформирующего усилия, возникающего в процессе обработки. Выявлено, что угол ввода колебаний относительно вектора главной скорости является технологическим параметром, существенно влияющим на кинематические характеристики. Проведенные исследования позволили сделать предположение о возможности применения ультразвукового поверхностно-пластического деформирования по касательной схеме для деталей, выполненных из металлов и сплавов различной твердости.

**Ключевые слова:** ультразвуковая обработка, колебания, кинематика процесса, поверхностное пластическое деформирование, траектория движения инструмента, параметры обработки

**Финансирование:** исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-31-90059.

**Для цитирования:** Самуль А. Г. Кинематические характеристики процесса ультразвуковой поверхностной обработки // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 1. С. 24–34. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-24-34>.

### MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Original article

## Kinematic characteristics of ultrasonic surface treatment

Artyom G. Samul<sup>1✉</sup><sup>1</sup>Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia<sup>1</sup>[samul.2012@corp.nstu.ru](mailto:samul.2012@corp.nstu.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6021-7154>

**Abstract.** We investigate the kinematic characteristics of ultrasonic surface-plastic deformation when the oscillations are introduced in the direction tangential to the treated surface in order to assess the potential of this method for treating parts made of metals and alloys of various hardness. The kinematic parameters (trajectory, velocity, acceleration) of ultrasonic surface-plastic deformation were calculated in a rectangular coordinate system. Analytical dependencies were

obtained for the trajectory length, resulting velocity, and acceleration as functions of the constituent types of motion (rotational, translational, oscillatory). The obtained equations and their graphical solutions allowed us to establish that, under ultrasonic surface-plastic deformation, the indenter moves along a complex trajectory with a variable velocity and acceleration. It is shown that the translation of ultrasonic oscillations to the indenter determines the complex nature of its movement, which differs significantly from that in the diamond burnishing method. In this case, the process parameters (velocity and acceleration) change according to a cyclic (sinusoidal) law, the periodicity of which depends on the frequency of ultrasonic oscillations and determines the final state of the treated surface. According to the obtained results, the change in the input direction of ultrasonic oscillations (from normal to tangential) ensures the possibility of changing the contact condition from cyclic to constant, thereby affecting the deforming force during processing. It was found that the angle of oscillation input relative to the main velocity vector is a technological parameter significantly affecting the kinematic characteristics. An assumption is made about the possibility of using the tangential pattern of ultrasonic surface-plastic deformation for parts made of metals and alloys of various hardness.

**Keywords:** ultrasonic surface machining, vibrations, process kinematics, surface plastic deformation, toolpath, processing parameters

**Funding:** the study was funded by the Russian Foundation for Basic Research within the framework of the research project no. 20-31-90059.

**For citation:** Samul A. G. Kinematic characteristics of ultrasonic surface treatment. *iPolytech Journal*. 2022;26(1):24-34. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-24-34>.

## ВВЕДЕНИЕ

Непрерывно возрастающие требования к качеству выпускаемых машин и приборов связаны с необходимостью повышения их точности и надежности, производительности и коэффициента полезного действия, которые в значительной мере определяют их функциональные характеристики.

Эксплуатационные свойства в значительной степени зависят от микрогеометрического (макроотклонение, волнистость, шероховатость) и физико-механического состояния (микротвердость, остаточные напряжения) поверхностного слоя (ПС) деталей. Чаще всего достижение итогового состояния ПС реализуется с помощью лезвийных методов обработки. Недостатком данных методов является ограниченность влияния на формирование физико-механических характеристик обрабатываемых поверхностей. При этом процессы резания характеризуются формированием остаточных растягивающих напряжений, негативно сказывающихся на износостойкости деталей. Наиболее рациональными в отношении обеспечения итогового состояния рабочих поверхностей являются методы поверхностного пластического деформирования. Их применение позволяет формировать поверхностный слой деталей с оптимальными микрогеометрическими и физи-

ко-механическими параметрами.

Среди большого разнообразия способов поверхностно-пластического деформирования (ППД)<sup>2</sup> [1] выделяются методы, связанные с использованием энергии ультразвуковых колебаний, в частности ультразвуковое поверхностно-пластическое деформирование. Первые упоминания о применении и реализации ультразвукового поверхностно-пластического деформирования (УЗПД) были приведены в исследовании И. И. Муханова [2]. В данной работе показано, что применение этого метода приводит к снижению шероховатости, повышению микротвердости и формированию сжимающих остаточных напряжений.

Анализ литературных источников [3–16] показал, что развитие методов УЗПД связано с применением различных схем реализации данного процесса. При этом каждый из этих методов обладает своими особенностями и рациональной областью применения. Наиболее распространенной является схема с вводом колебаний к нормали к обрабатываемой поверхности [3–13]. При использовании данного метода имеет место дробный контакт индентора с упрочняемой деталью, что обеспечивает реализацию высокой степени деформации. В связи с этим рациональной областью применения УЗПД с вводом колеба-

---

<sup>2</sup> Одинцов Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник. М.: Изд-во «Машиностроение», 1987. 328 с.



ний по нормали является обработка деталей из материалов высокой твердости. В работах [14–16] рассматривается применение амплитудно-модулированных и крутильных УЗК. Реализация данных методов позволяет снизить усилие деформирования (по сравнению с нормальной схемой) и способствует проведению обработки деталей из металлов и сплавов средней и низкой твердости. Недостатком данных методов является сложность их реализации.

Также известен метод УЗПД по схеме с вводом колебаний по касательной к обрабатываемой поверхности, особенности которого в литературных источниках практически не раскрыты. Определение основных параметров этого процесса позволит сделать предположение о рациональной области его применения и представляет научный и практический интерес.

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМ ПОВЕРХНОСТНО- ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Изучение кинематики и динамики применяемых методов ППД позволяет выявить их основные различия и сходства, а также установить основные факторы, оказывающие наибольшее влияние на формирование качества поверхностного слоя деталей. Характер взаимного движения инструмента и детали определяется кинематическими факторами, такими как перемещение, скорость и ускорение, которые существенно влияют и на силовые параметры процесса. Поэтому понимание данных особенностей процесса УЗПД необходимо для прогнозирования состояния поверхностного слоя обрабатываемых изделий.

Для изучения кинематических особенностей различных методов ППД проведены анализ и сравнение схем обработки УЗПД с вводом колебаний по нормали и по касательной, а также путем применения широко практикуемого метода алмазного выглаживания, близкого по своим параметрам к ультразвуковому поверхностно-пластическому деформированию. Описание кинематических параметров процесса обработки тел вращения рассмотрено в прямоугольной системе координат, при этом выбрано следующее направление осей –

ось  $X$  совпадает с направлением главного движения, ось  $Y$  имеет радиальное направление, ось  $Z$  находится в направлении подачи. Анализ проводился при условии, что деталь неподвижна, а все виды движения (вращательное, поступательное, колебательное) совершает инструмент.

В процессе УЗПД по схеме с вводом колебаний по касательной к обрабатываемой поверхности (рис. 1) инструмент [17–19] за время обработки  $t$  оставляет на поверхности след, проекции которого на оси координат равны [17]:

$$\begin{cases} L_x = V_v t + A \sin(2\pi f t) \cos \beta \\ L_y = 0 \\ L_z = V_s t + A \sin(2\pi f t) \sin \beta \end{cases}, \quad (1)$$

где  $V_v = \pi D n$  – скорость главного движения;  $V_s = S n$  – скорость подачи;  $f$  – частота колебаний инструмента;  $A$  – амплитуда колебаний;  $\beta$  – угол между векторами главной и колебательной скорости (угол ввода колебаний);  $S$  – подача;  $n$  – обороты;  $D$  – диаметр детали.

Поскольку инструменту одновременно сообщается несколько видов движения, то его результирующая скорость вычисляется следующим образом [17]:

$$V_{рез} = \sqrt{(V_v + V_K \cos \beta)^2 + (V_s + V_K \sin \beta)^2}, \quad (2)$$

где  $V_K = 2\pi f A \cos(2\pi f t)$ .

Из уравнения (2) видно, что результирующая скорость является переменной величиной, на значение которой оказывают существенное влияние колебательная скорость инструмента и угол  $\beta$ . Наличие колебательной скорости обуславливает одновременное изменение составляющих  $\overline{V_x}$  и  $\overline{V_z}$ , обеспечивая широкий диапазон варьирования величиной и направлением скорости  $\overline{V_{рез}}$ . Графическое решение уравнения (2) при фиксированных значениях  $\overline{V_v}$ ,  $\overline{V_K}$ ,  $\overline{V_s}$  приведено на рис. 2 ( $\beta = \text{const}$ ).

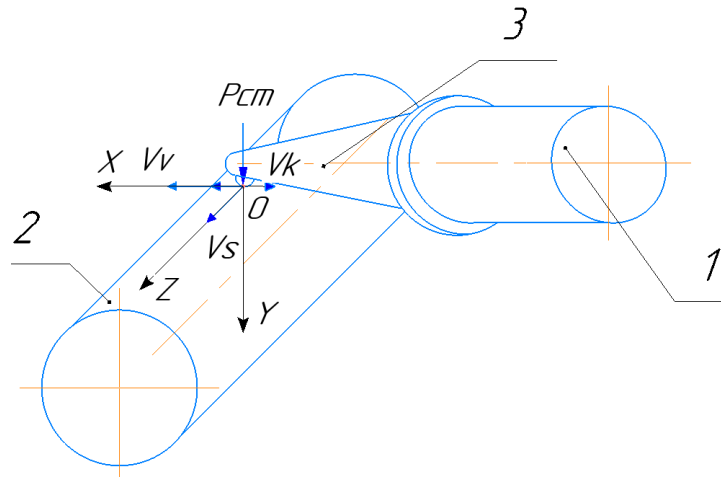


Рис. 1. Ультразвуковое поверхностно-пластическое деформирование по тангенциальной схеме (1 – ультразвуковой преобразователь, 2 – обрабатываемая деталь, 3 – волновод;  $P_{cm}$  – статическая нагрузка,  $V_s$  – вектор скорости подачи инструмента,  $V_v$  – вектор главной скорости инструмента,  $V_k$  – вектор колебательной скорости инструмента)

Fig. 1. Ultrasonic surface-plastic deformation according to the tangential scheme (1 – ultrasonic transducer, 2 – processed part, 3 – waveguide;  $P_{cm}$  – static load,  $V_s$  – vector of the tool feed rate,  $V_v$  – vector of the main tool velocity,  $V_k$  – vector of the tool oscillating velocity)

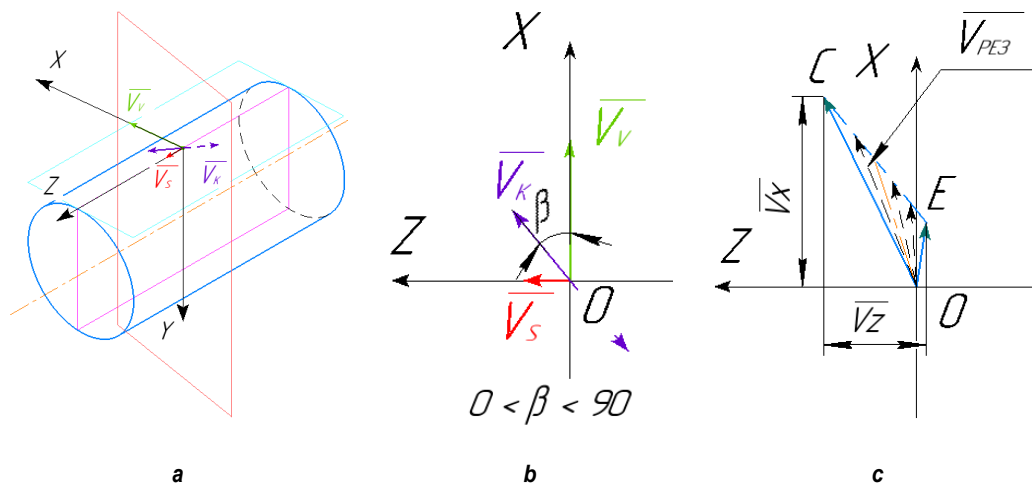


Рис. 2. Схема направления скоростей движений инструмента при ультразвуковом поверхностно-пластическом деформировании (колебания – в касательной плоскости  $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$ ): а – расположение векторов скоростей обработки относительно точки контакта инструмента;

б – пространственное расположение векторов скоростей обработки;

с – диапазон варьирования результирующей скорости

Fig. 2. Diagram of the tool movement velocity directions at ultrasonic surface-plastic deformation (vibrations are in the tangent plane  $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$ ): а – location of processing speed vectors relative to the tool contact point; б – spatial location of processing speed vectors; с – variation range of resultant velocity

Диапазон изменения результирующей скорости характеризуется областью ОСЕ. Расположение вектора  $\overline{V_{PE3}}$  в плоскости  $XOZ$  обеспечивает непрерывный контакт индентора с деталью и постоянство значения нор-

мальной составляющей статического нагружения.

Переменный характер результирующей скорости обусловлен наличием ускорения, которое определяется уравнением (3):

$$j = \frac{dV_{PE3}}{dt} = \frac{-2\pi^2 f^2 A \sin(2\pi ft) ((2V_s + V_{KS}) \sin \beta + (2V_v + V_{KC}) \cos \beta)}{\sqrt{(V_s + V_{KS})^2 + (V_v + V_{KC})^2}}, \quad (3)$$



где  $V_{KS} = V_K \sin(\beta)$ ;  $V_{KC} = V_K \cos(\beta)$ .

Как следует из уравнения (2), величина результирующей скорости зависит не только от значений  $\overline{V_V}$ ,  $\overline{V_K}$ ,  $\overline{V_S}$ , но и от угла ввода колебаний  $\beta$ , значение которого может варьироваться от 0 до 180°. Стоит отметить, что методу УЗПД с вводом колебаний по касательной характерны два частных случая –  $\beta = 0^\circ$  и  $\beta = 90^\circ$ . При  $\beta = 0^\circ$  (рис. 3) имеем:

$$\begin{cases} L_X = V_V t + A \sin(2\pi ft) \\ L_Y = 0 \\ L_Z = V_S t \end{cases} \quad (4)$$

При скорости, результирующей перемещения:

$$V_{рез} = \sqrt{(V_V + V_K)^2 + V_S^2}. \quad (5)$$

Из рис. 3 видно, что в случае с  $\beta = 0^\circ$  только составляющая результирующей скорости  $\overline{V_X}$  имеет переменный характер, диапазон изменения которой зависит от величин  $\overline{V_V}$  и  $\overline{V_K}$ .

Другая картина наблюдается при значе-

нии угла  $\beta = 90^\circ$  (рис. 4). Составляющие траектории перемещения определяются:

$$\begin{cases} L_X = V_V t \\ L_Y = 0 \\ L_Z = V_S t + A \sin(2\pi ft) \end{cases}, \quad (6)$$

а результирующая скорость

$$V_{рез} = \sqrt{V_V^2 + (V_S + V_K)^2}. \quad (7)$$

При  $\beta = 90^\circ$  составляющая результирующей скорости  $\overline{V_Z}$  становится переменной величиной, а  $\overline{V_X}$  – постоянной.

Из представленных схем рис. 2–4 видно, что применение УЗПД с вводом колебаний по касательной позволяет варьировать значение и направление результирующей скорости в широком диапазоне. Переменный характер  $\overline{V_{рез}}$  и  $j$  инструмента при УЗПД будет оказывать влияние на интенсивность и направление течения материала в очаге деформирования, что приведет к изменению физико-механического и микрогеометрического состояния ПС.

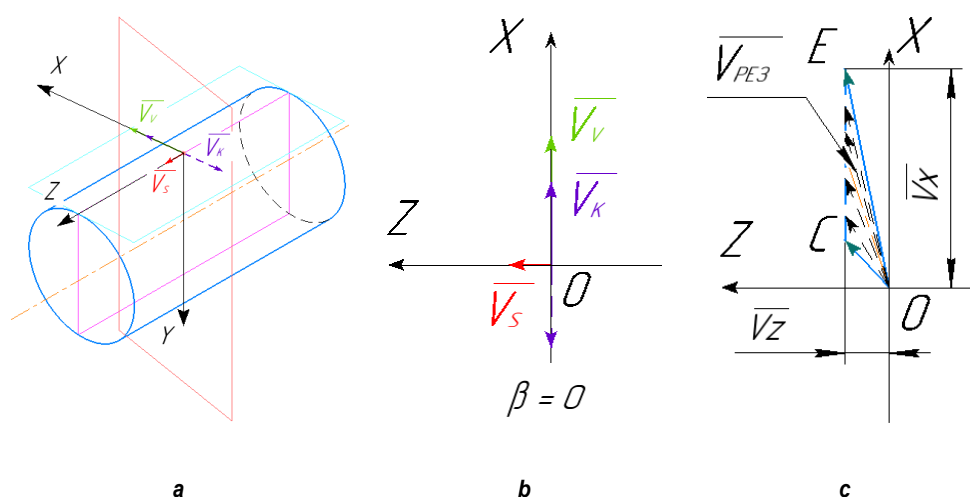


Рис. 3. Схема направления скоростей движений инструмента при ультразвуковом поверхностно-пластическом деформировании (колебания – в касательной плоскости, угол  $\beta = 0^\circ$ ): а – расположение векторов скоростей обработки относительно точки контакта инструмента; б – пространственное расположение векторов скоростей обработки; с – диапазон варьирования результирующей скорости

Fig. 3. Diagram of the tool movement velocity direction at ultrasonic surface-plastic deformation (vibrations are in the tangent plane, angle  $\beta = 0^\circ$ ): а – location of processing speed vectors relative to the tool contact point; б – spatial location of processing speed vectors; с – variation range of resultant velocity

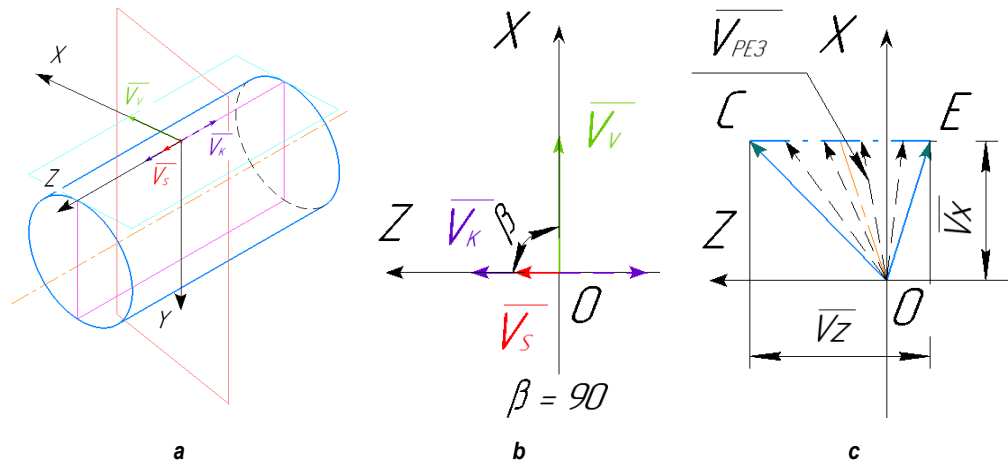


Рис. 4. Схема направления скоростей движений инструмента при ультразвуковом поверхностно-пластическом деформировании (колебания – в касательной плоскости, угол  $\beta = 90^\circ$ ): а – расположение векторов скоростей обработки относительно точки контакта инструмента; б – пространственное расположение векторов скоростей обработки; с – диапазон варьирования результирующей скорости

Fig. 4. Diagram of the tool movement velocity direction at ultrasonic surface-plastic deformation (vibrations are in the tangent plane, angle  $\beta = 90^\circ$ ): а – location of processing speed vectors relative to the tool contact point; б – spatial location of processing speed vectors; с – variation range of resultant velocity

Поскольку значения компонентов результирующей скорости  $\overline{V}_V$ ,  $\overline{V}_K$ ,  $\overline{V}_S$  определяют режимами обработки, то их варьирование позволяет управлять параметрами  $\overline{V}_{PE3}$  в широком диапазоне.

При рассмотрении метода УЗПД с вводом колебаний по нормали компоненты траектории движения инструмента в направлении осей координат описывается уравнениями:

$$\begin{cases} L_X = V_V t \\ L_Y = A \sin(2\pi ft) \\ L_Z = V_S t \end{cases} \quad (8)$$

При этом результирующая скорость перемещения деформатора результирующей обрабатываемой поверхности описывается выражением:

$$V_{pe3} = \sqrt{V_V^2 + V_K^2 + V_S^2}. \quad (9)$$

Ускорение:

$$\begin{aligned} j &= \frac{dV_{PE3}}{dt} = \\ &= -\frac{4\pi^2 f^2 A V_K \sin(2\pi ft)}{\sqrt{V_S^2 + V_V^2 + V_K^2}}. \end{aligned} \quad (10)$$

Кроме величины результирующей скорости (в течение периода колебания инструмента), изменяется и ее направление относительно плоскости  $XOZ$ , которую можно характеризовать углом  $\alpha$  (рис. 5 с). При этом тангенс этого угла определяется отношением:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\overline{V}_K}{V_S + \overline{V}_V}. \quad (11)$$

Из анализа кинематики видно, что инструмент совершает сложное движение в пространстве, составляющие которого расположены в 3-х плоскостях. Из данной схемы (см. рис. 5) становится понятным наличие дробности контакта обрабатываемой детали и инструмента. Часть времени обработки, составляющая результирующей скорости  $\overline{V}_Y$ , будет совпадать с положительным направлением оси  $Y$  (к оси обрабатываемой детали), обеспечивая внедрение индентора в деформируемую поверхность. Оставшееся время ее направления изменится на противоположное (от оси изделия), что приведет к потере контакта инструмента с деталью.

Также необходимо отметить, что величина и направление результирующей скорости обработки в значительной степени зависят от скорости колебательного движения  $V_K$ .

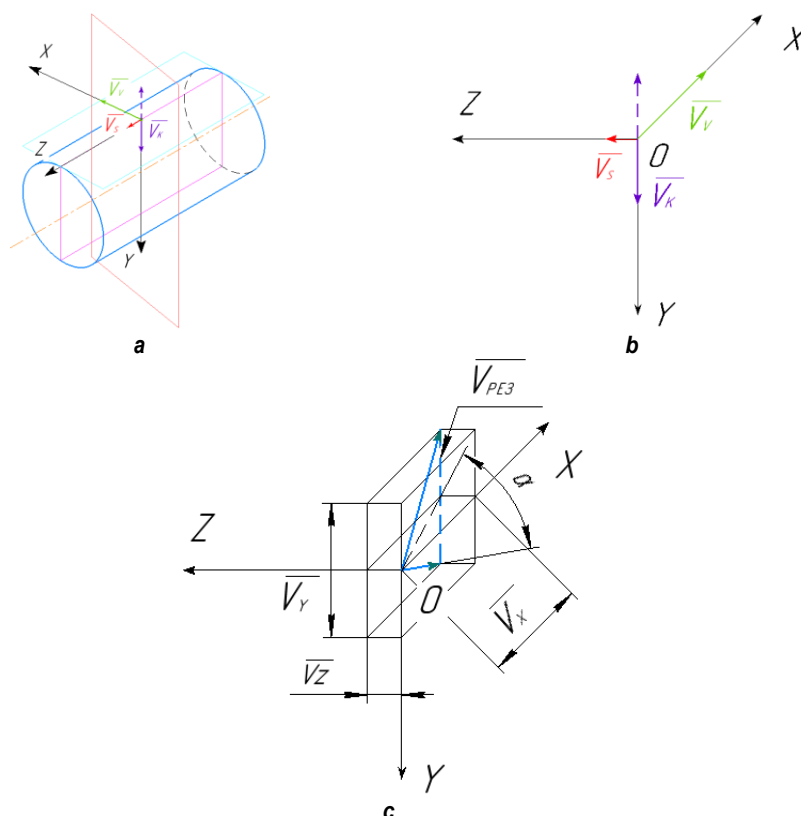


Рис. 5. Схема направления скоростей движений инструмента при ультразвуковом поверхностно-пластическом деформировании (колебания – по нормали): а – расположение векторов скоростей обработки относительно точки контакта инструмента; б – пространственное расположение векторов скоростей обработки; с – диапазон варьирования результирующей скорости

Fig. 5. Diagram of the tool movement velocity direction at ultrasonic surface-plastic deformation (vibrations are along the normal): а – location of processing speed vectors relative to the tool contact point; б – spatial location of processing speed vectors; с – variation range of the resultant velocity

Путь, пройденный индентором за время  $t$ , будет описываться выражением:

$$L = \sqrt{L_x^2 + L_y^2 + L_z^2}. \quad (12)$$

Наличие дробности контакта инструмента с обрабатываемой деталью приводит к тому, что проходимый инструментом путь не равен длине следа, оставляемого инструментом на детали. Длина следа  $L$  будет определяться только перемещениями по осям  $X$  и  $Z$ .

Наиболее близким к УЗПД с вводом колебаний по касательной является метод алмазного выравнивания (АВ) (рис. 6). Известно, что алмазное выравнивание позволяет повышать качество поверхностного слоя деталей, выполненных из материалов широкого диапазона твердости [5, 16, 20]. Составляющие траектории перемещения инструмента при АВ описываются:

$$\begin{cases} L_x = V_v t \\ L_y = 0 \\ L_z = V_s t \end{cases}, \quad (13)$$

а результирующая скорость равна

$$V_{pez} = \sqrt{V_v^2 + V_s^2}. \quad (14)$$

Ускорение:

$$j = \frac{dV_{PE3}}{dt} = 0. \quad (15)$$

В связи с постоянством величин  $\overline{V_v}$ ,  $\overline{V_s}$  при АВ результирующая скорость является также постоянной величиной, как по значению, так и по направлению, и является неизменной на протяжении всего процесса. Это

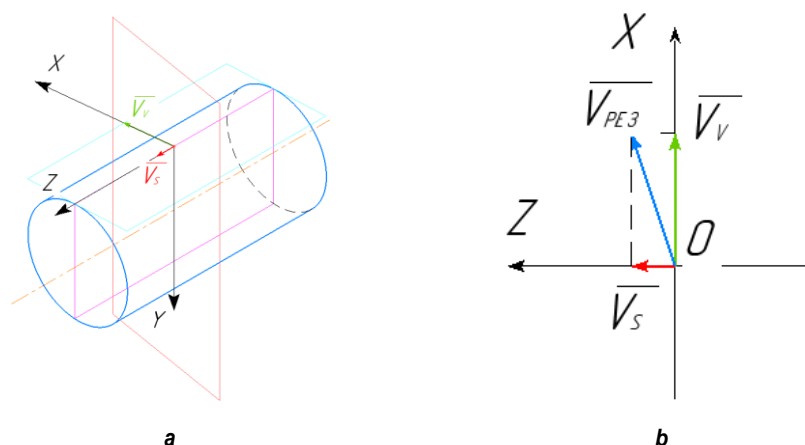


Рис. 6. Схема скоростей при выглаживании: а – расположение векторов скоростей обработки относительно точки контакта инструмента; б – пространственное расположение векторов скоростей обработки  
 Fig. 6. Diagram of velocities under burnishing: а – location of processing speed vectors relative to the tool contact point; б – spatial location of processing speed vectors

обуславливает сохранение условия контактирования деформатора с обрабатываемой деталью.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из анализа рассматриваемых методов ППД видно, что при сообщении инструменту УЗК наблюдаются следующие особенности обработки:

- сложная траектория движения инструмента относительно обрабатываемой детали;
- переменные по величине и направлению скорость и ускорение деформатора в процессе УЗПД;
- высокочастотное изменение кинематических параметров обработки;
- изменение угла ввода колебаний ( $\beta$ ) позволяет варьировать скоростью и ускорением инструмента, изменяя как их величину, так и направление.

Управление кинематическими и динамическими параметрами процесса обеспечивается за счет варьирования технологических параметров обработки. Как известно, любой метод обработки характеризуется технологическими параметрами, влияющими на параметры качества поверхностного слоя. Увеличение их числа расширяет возможности по управлению состоянием поверхностного слоя. Из анализа рассматриваемых методов технологическими параметрами являются:

АВ:  $V_V$ ,  $S$ ,  $r_q$ ,  $P_{CT}$ .

УЗПД по нормали:  $V_V$ ,  $S$ ,  $r_q$ ,  $P_{CT}$ ,  $f$ ,  $A$ .

УЗПД по касательной:  $V_V$ ,  $S$ ,  $r_q$ ,  $P_{CT}$ ,  $f$ ,  $A$ ,  $\beta$ , где  $P_{CT}$  – статическая нагрузка.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод о том, что каждый из приведенных методов обладает различным набором технологических параметров и разным характером движения деформирующего инструмента относительно обрабатываемой поверхности. При этом их наибольшее количество имеет УЗПД с вводом колебаний по касательной, что позволяет (путем варьирования условий обработки) управлять микрогеометрическим и физико-механическим состоянием поверхностного слоя в более широком диапазоне.

Дополнительно на основе кинематического анализа можно говорить о том, что изменение схемы ввода колебаний влияет на условия контактирования инструмента с деталью и позволяет изменять его с постоянно-го на циклический.

Наличие постоянного контакта деформатора с обрабатываемой деталью при УЗПД с вводом колебаний по касательной (аналогично и для АВ) позволяет сделать предположение о том, что данный метод применим для обработки металлов и сплавов различной твердости.

Поскольку технологические возможности УЗПД с вводом колебаний по касательной к

обрабатываемой поверхности недостаточно изучены, то их установление представляет научный и практический интерес. Дальнейшие исследования необходимы для опреде-

ления влияния процесса на итоговое состояние деформируемой детали и определения рациональной области применения данного метода.

### Список источников

1. Лещинский В. М., Рябичева Л. А., Механические свойства деформированной инструментальной стали // Вестник машиностроения. 1993. № 3. С. 88–94.
2. Муханов И. И. Ультразвуковая упрочняющая обработка стали и чугуна // Вестник машиностроения. 1968. № 6. С. 51–54.
3. Хлыбов А. А., Кувшинов М. О. Исследование влияния ультразвуковой обработки на структуру и свойства поверхностного слоя конструкционной стали 30ХГСА // Технология металлов. 2021. № 1. С. 12–16. <https://doi.org/10.31044/1684-2499-2021-0-1-12-16>.
4. Хлыбов А. А., Кувшинов М. О. Исследование структуры поверхностного слоя стали 03Н18К9М5Т после ультразвуковой обработки // Физическая мезомеханика. 2019. Т. 22. № 6. С. 100–106. <https://doi.org/10.24411/1683-805X-2019-16009>.
5. Rakhimyanov K. M., Semenova I. S. Surface state control by ultrasonic plastic deformation at the final machining stage // Materials and Manufacturing Processes. 2016. Vol. 31. Iss. 6. P. 764–769. <https://doi.org/10.1080/10426914.2015.1058948>.
6. Семенова Ю. С., Самуль А. Г., Мажуга С. В. Применение ультразвукового поверхностного пластического деформирования при модификации поверхностного слоя // Упрочняющие технологии и покрытия. 2020. Т. 16. № 5. С. 200–204.
7. Li Meiyan, Zhang Qi, Han Bin, Song Lixin, Li Jianlong, Yang Jie. Investigation on microstructure and properties of  $\text{Al}_x\text{CoCrFeMnNi}$  high entropy alloys by ultrasonic impact treatment // Journal of Alloys and Compounds. 2020. Vol. 816. P. 152626. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152626>.
8. Kumar S., Wu C. S., Padhy G. K., Ding W. Application of ultrasonic vibrations in welding and metal processing: a status review // Journal of Manufacturing Processes. 2017. Vol. 26. P. 295–322. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.02.027>.
9. Zhou Changping, Jiang Fengchun, Xu De, Guo Chunhuan, Zhao Chengzhi, Wang Zhenqiang, et al. A calculation model to predict the impact stress field and depth of plastic deformation zone of additive manufactured parts in the process of ultrasonic impact treatment // Journal of Materials Processing Technology. 2020. Vol. 280. P. 116599. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116599>.
10. Gujba A. K., Ren Zhencheng, Dong Yalin, Ye Chang, Medraj Mamoun. Effect of ultrasonic nanocrystalline surface modification on the water droplet erosion performance of Ti–6Al–4V // Surface and Coatings Technology. 2016. Vol. 307. Part A. P. 157–170. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.08.054>.
11. Zhao Jingyi, Dong Yalin, Ye Chang. Optimization of residual stresses generated by ultrasonic nanocrystalline surface modification through analytical modeling and data-driven prediction // International Journal of Mechanical Sciences. 2021. Vol. 197. P. 106307. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106307>.
12. Kim Min-seob, Oh Wook-jin, Baek Gyeong-yoon, Jo Yeong-kwan, Lee Ki-yong, Park Sang-hu, et al. Ultrasonic nanocrystal surface modification of high-speed tool steel (AISI M4) layered via direct energy deposition // Journal of Materials Processing Technology. 2020. Vol. 277. P. 116420. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116420>.
13. Zhao Weidong, Liu Daoxin, Chiang Richard, Qin Haifeng, Zhang Xiao Hua, Zhang Hao, et al. Effects of ultrasonic nanocrystal surface modification on the surface integrity, microstructure, and wear resistance of 300M martensitic ultra-high strength steel // Journal of Materials Processing Technology. 2020. Vol. 285. P. 116767. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116767>.
14. Пегашкин В. Ф., Осипенкова Г. А. Выглаживание поверхности отверстий с использованием УЗ крутильных колебаний // Научно-технический вестник Поволжья. 2019. № 4. С. 69–72.
15. Пегашкин В. Ф., Осипенкова Г. А., Кузнецов М. С. Модификации поверхности деталей из сплавов цветных металлов // Научно-технический вестник Поволжья. 2019. № 7. С. 51–53.
16. Киселев Е. С., Степчева З. В. Эффективность касательно-осевых наложений ультразвуковых колебаний в процессе алмазного выглаживания стальных заготовок // Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. № 7(31). С. 34–38.
17. Rakhimyanov K., Gileta V., Samul A. Kinematics of ultrasonic processing // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2020. Vol. 971. No. 2. P. 022054. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/971/2/022054>.
18. Rakhimyanov K., Gileta V., Samul A. Ultrasonic surface hardening of low carbon steels and non-ferrous alloys // Innovations in Mechanical Engineering: X International Scientific and Practical MATEC Web Conference. 2019. Vol. 297. P. 05005. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201929705005>.
19. Рахимьянов Х. М., Гилета В. П., Самуль А. Г. Обеспечение микрогеометрического состояния поверхности деталей, выполненных из пластичных материалов, ультразвуковой обработкой // Упрочняющие технологии и покрытия. 2020. Т. 16. № 6. С. 256–259.
20. Одинцов Л. Г. Финишная обработка деталей алмазным выглаживанием. М.: Изд-во «Машиностроение», 1981. 160 с.

### References

1. Leshchinskij V. M., Ryabicheva L. A. Mechanical properties of deformed tool steel. *Vestnik mashinostroeniya = Russian Engineering Research*. 1993;3:88-94. (In Russ.).
2. Mukhanov I. I. Ultrasonic hardening and finishing treatment of steel and cast iron. *Vestnik mashinostroeniya = Russian Engineering Research*. 1968;6:51-54. (In Russ.).
3. Khlybov A. A., Kuvshinov M. O. Investigation of effect of ultrasonic treatment on structure and properties of surface layer of structural steel 30ХГСА. *Tekhnologiya metallov = Russian Metallurgy (Metally)*. 2021;1:12-16. (In Russ.). <https://doi.org/10.31044/1684-2499-2021-0-1-12-16>.
4. Khlybov A. A., Kuvshinov M. O. Structural study of the surface layer of steel 03N18CO9MO5TI after ultrasonic treatment. *Fizicheskaya mezomekhanika = Physical Mesomechanics*. 2019;22(6):100-106. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/1683-805X-2019-16009>.
5. Rakhimyanov K. M., Semenova I. S. Surface state control by ultrasonic plastic deformation at the final machining stage. *Materials and Manufacturing Processes*. 2016;31(6):764-769. <https://doi.org/10.1080/10426914.2015.1058948>.
6. Semenova Yu. S., Samul' A. G., Mazhuga S. V. Use of ultrasonic surface hardening in modification of surface layer. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Strengthening Technologies and coatings*. 2020;16(5):200-204. (In Russ.).
7. Li Meiyang, Zhang Qi, Han Bin, Song Lixin, Li Jianlong, Yang Jie. Investigation on microstructure and properties of Al<sub>x</sub>CoCrFeMnNi high entropy alloys by ultrasonic impact treatment. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020;816:152626. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152626>.
8. Kumar S., Wu C. S., Padhy G. K., Ding W. Application of ultrasonic vibrations in welding and metal processing: a status review. *Journal of Manufacturing Processes*. 2017;26:295-322. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.02.027>.
9. Zhou Changping, Jiang Fengchun, Xu De, Guo Chunhuan, Zhao Chengzhi, Wang Zhenqiang, et al. A calculation model to predict the impact stress field and depth of plastic deformation zone of additive manufactured parts in the process of ultrasonic impact treatment. *Journal of Materials Processing Technology*. 2020;280:116599. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116599>.
10. Gujba A. K., Ren Zhencheng, Dong Yalin, Ye Chang, Medraj Mamoun. Effect of ultrasonic nanocrystalline surface modification on the water droplet erosion performance of Ti-6Al-4V. *Surface and Coatings Technology*. 2016;307(A):157-170. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.08.054>.
11. Zhao Jingyi, Dong Yalin, Ye Chang. Optimization of residual stresses generated by ultrasonic nanocrystalline surface modification through analytical modeling and data-driven prediction. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2021;197:106307. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106307>.
12. Kim Min-seob, Oh Wook-jin, Baek Gyeong-yoon, Jo Yeong-kwan, Lee Ki-yong, Park Sang-hu, et al. Ultrasonic nanocrystal surface modification of high-speed tool steel (AISI M4) layered via direct energy deposition. *Journal of Materials Processing Technology*. 2020;277:116420. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116420>.
13. Zhao Weidong, Liu Daoxin, Chiang Richard, Qin Haifeng, Zhang Xiao Hua, Zhang Hao, et al. Effects of ultrasonic nanocrystal surface modification on the surface integrity, microstructure, and wear resistance of 300M martensitic ultra-high strength steel. *Journal of Materials Processing Technology*. 2020;285:116767. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116767>.
14. Pegashkin V. F., Osipenkova G. A. Surface drilling using ultrasonic torsional vibrations. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzh'ya = Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2019;4:69-72. (In Russ.).
15. Pegashkin V. F., Osipenkova G. A., Kuznetsov M. S. Surface modification of non-ferrous metal alloy parts. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzh'ya = Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2019;7:51-53. (In Russ.).
16. Kiselev E. S., Stepcheva Z. V. The efficiency of using the tangent-axial direction of ultrasonic fluctuations in process diamond burnishing. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Strengthening Technologies and coatings*. 2007;7(31):34-38. (In Russ.).
17. Rakhimyanov K., Gileta V., Samul A. Kinematics of ultrasonic processing. *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020;971(2):022054. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/971/2/022054>.
18. Rakhimyanov K., Gileta V., Samul A. Ultrasonic surface hardening of low carbon steels and non-ferrous alloys. In: *Innovations in Mechanical Engineering: X International Scientific and Practical MATEC Web Conference*. 2019;297:05005. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929705005>.
19. Rakhimyanov Kh. M., Gileta V. P., Samul A. G. Assurance of microgeometric state of parts surface made of plastic materials by ultrasonic machining. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Strengthening Technologies and coatings*. 2020;16(6):256-259. (In Russ.).
20. Odintsov L. G. *Finishing machining of parts with diamond burnishing*. Moscow: Mashinostroenie; 1981, 160 p. (In Russ.).



**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ**

**Самуль Артём Геннадьевич,**  
ассистент кафедры технологии  
машиностроения,  
Новосибирский государственный  
технический университет,  
630073, г. Новосибирск, пр-т. К. Маркса, 20, Россия

**Заявленный вклад автора**

Автор выполнил исследовательскую работу, на основании полученных результатов провел обобщение, подготовил рукопись к печати.

**Конфликт интересов**

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.*

**Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 30.11.2021; одобрена после рецензирования 26.01.2022; принята к публикации 20.02.2022.

**INFORMATION ABOUT THE AUTHOR**

**Artyom G. Samul,**  
Assistant Professor of the Department  
of Mechanical Engineering Technology,  
Novosibirsk State Technical University,  
20, K. Marx pr., Novosibirsk 630073, Russia

**Contribution of the author**

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

**Conflict of interests**

The author declares no conflict of interests.

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

**Information about the article**

The article was submitted 30.11.2021; approved after reviewing 26.01.2022; accepted for publication 20.02.2022.



## Optimisation of the bore reaming process in hybrid stacks made of carbon fibre and metal alloys

Nikolay S. Chashchin<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

<sup>1</sup>ruffle54007@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6623-338X>

**Abstract.** The present work aims to improve the existing technology of reaming bores in hybrid stacks containing a composite material interlayered with titanium and aluminium alloys. The study was conducted using statistical approaches at the stages of experimental design and data processing in the Statistica 6 and Microsoft Excel 2010 software. The bore roughness was measured using a Taylor Hobson Form Talysurf i200 contact profilometer. The height of the tool build-up edge was investigated using a Bruker ContourGT-K1 optical profilometer. Bore diameters were determined using a Carl Zeiss Contura G2 coordinate measuring machine. An experimental study was carried out using an Atlas Copco PFD-1500 automatic feed drilling unit and a 14 mm MAPAL reamer with a replaceable head. A methodology for a comprehensive experimental study of boring and reaming processes in the “OT4 titanium alloy - VT6 titanium alloy - polymeric composite materials - VT6 titanium alloy - 1933 aluminium alloy” hybrid stack was developed and implemented. It was found that the most significant factors affecting the parameters of bore accuracy, in particular, the deviation from the true bore longitudinal section profile, include the cutting speed in the first and the second degree, as well as the feed. The optimum cutting modes are a cutting speed of 7.24 m/min, a feed of 0.27 mm/rev and a machining allowance of 0.5 mm. As a result, the time of reaming one bore is reduced by 4.6 times. The optimum cooling method, ensuring the increased accuracy and reduced roughness of the bore in the aluminium alloy layer, is cooling by carbon dioxide at a temperature of -56.5°C. As a result of experimental works, basic laws governing the boring and reaming processes in multicomponent hybrid stacks composed by carbon-fibre-reinforced plastics with titanium and aluminium alloys were investigated.

**Keywords:** reaming, reamer, carbon fiber, hybrid stack, titanium alloy, ANOVA

**For citation:** Chashchin N. S. Optimisation of the bore reaming process in hybrid stacks made of carbon fibre and metal alloys. *iPolytech Journal*. 2022;26(1):35-42. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-35-42>.

### МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Научная статья

УДК 621.951

## Оптимизация процесса чистовой обработки отверстий в многокомпонентных пакетах из углепластиков и металлических сплавов

Николай Сергеевич Чашин<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

<sup>1</sup>ruffle54007@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6623-338X>

**Резюме.** Цель – оптимизация технологии обработки отверстий в смешанных пакетах, содержащих слои композиционного материала, титанового и алюминиевого сплавов. Исследование проводилось с помощью статистических подходов к планированию экспериментов и обработке результатов в программе Statistica 6, а также в приложении Microsoft Excel 2010. Измерение шероховатости отверстий производилось на контактном профилометре Taylor Hobson Form Talysurf i200. Высота нароста на режущей кромке инструмента исследовалась с помощью оптического профилометра Bruker ContourGT-K1, снятие параметров диаметров отверстий – на координатно-измерительной машине Carl Zeiss CONTURA G2. Экспериментальное исследование производилось с помощью сверлильной машины с автоматической подачей Atlas Copco PFD-1500 и сборной развертки MAPAL диаметром 14 мм. Разработана и реализована методика комплексного экспериментального исследования процесса получе-



ния отверстий в СП структуры «титановый сплав ОТ4 – титановый сплав ВТ6 – полимерные композиционные материалы – титановый сплав ВТ6 – алюминиевый сплав 1933». Установлено, что наиболее значимыми факторами среди исследованных, влияющих на параметры точности отверстия, в частности на отклонение профиля продольного сечения отверстия, являются скорость резания в первой и второй степени, а также подача. Оптимальными режимами резания для поставленной цели являются скорость резания – 7,24 м/мин, подача – 0,27 мм/об и припуск на обработку – 0,5 мм. Таким образом, время обработки одного отверстия на операции развертывания снижено в 4,6 раза. Показано, что оптимальным способом охлаждения, обеспечивающим повышение точности и снижение шероховатости поверхности отверстия в слое из алюминиевого сплава, является охлаждение углекислым газом с температурой -56,5°С. Таким образом, в результате выполнения экспериментальных работ были исследованы основные закономерности процесса обработки точных отверстий в многокомпонентных смешанных пакетах из углепластиков, титановых и алюминиевых сплавов, реализуемого в технологической последовательности «сверление – развертывание».

**Ключевые слова:** развертывание, развертка, углепластик, смешанный пакет, титановый сплав, дисперсионный анализ

**Для цитирования:** Чашин Н. С. Оптимизация процесса чистовой обработки отверстий в многокомпонентных пакетах из углепластиков и металлических сплавов // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 1. С. 35–42. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-35-42>.

## INTRODUCTION

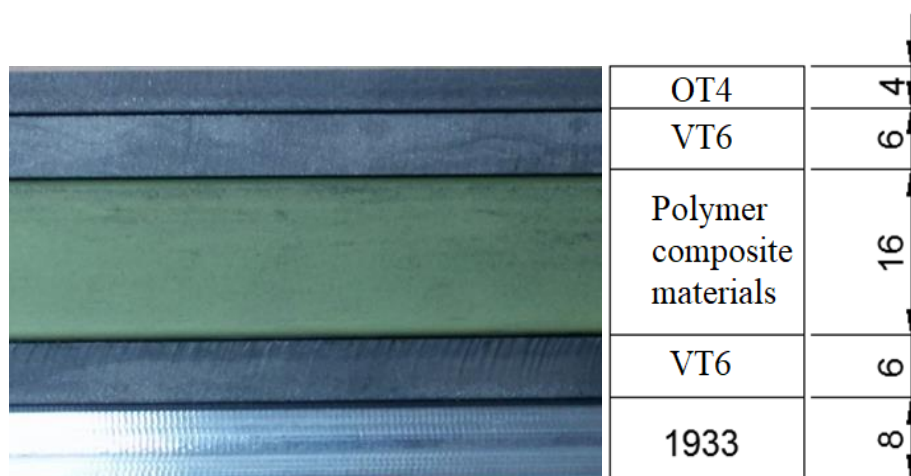
In modern mechanical engineering, existing materials begin to approach the limit of design possibilities. Therefore, it is important to search for and introduce materials with higher mechanical properties. In this study, we investigate polymeric composite materials (PCM) [1, 2]. The application of PCM allows the weight of the finished product to be reduced, which subsequently decrease the product operational costs. It is practically impossible to completely abandon classical materials in highly loaded assemblies; therefore, metal alloys are used for such purposes. The so-called hybrid stack (HS) is formed at the points of connecting dissimilar materials. HS represents a combination of composite materials with metal alloys. Bolted joints are typically used to connect dissimilar materials

[3–5]. Since the reliability of such joints depends on the bore quality [6–8], the achievement of accurate bores [9–11] in dissimilar materials appears to be a priority.

## MATERIALS AND METHODS

**The object of the study** was a five-layer HS (fig. 1) containing a composite material interlayered with titanium and aluminium alloys.

The HS machining [12, 13] was carried out from the OT4 side, which is determined by the presence of one-sided approach to the stack in the real product. Bore requirements: a diameter of 14 mm; a diameter allowance of IT9; the upper roughness allowance limit (Ra) for metal alloy and PCM layers of 1.6 and 6.3 µm, respectively [14–17].



**Fig. 1. Hybrid stack**  
**Рис. 1. Смешанный пакет**

**Study tool.** The cutting tool [18–20] used in the study was a 14 mm replaceable-head MAPAL reamer. The cutting part of the replaceable head consists of six brazed carbide tips. The cooling channel is directed to the front surface of each tip. The cutting tool is shown in fig. 2.

The use of a replaceable-head reamer is justified by the reduction in tool costs, as well as the need to remove the tool for investigating the built-up formation at the cutting edge. This design ensures quick installation and deinstallation and reduces the installation error.

**Measurement equipment.** In order to study the diameters of the reamed bores, a Carl Zeiss contoura G2 coordinate measuring machine was used. The bore roughness was measured by a Taylor Hobson Form Talysurf i200 contact profilometer. A FLIR SC7000 thermal camera was applied for recording the temperature in the cutting area.

**Testing procedure.** In order to determine cutting modes ensuring the highest reaming performance and required quality indicators of bores, multicriteria optimisation was applied to establish the degree of the effect caused by technological factors on the parameters of the bore in the considered HS. These factors include cutting modes, allowance, cooling method, and hybrid stack composition.

The study was conducted using the three-level composite design with two main and one

block factor. The main factors involve machining modes of feed and cutting speed with the reaming allowance selected in terms of a block factor. The choice of these factors is justified by their influence on the bore parameters, which is confirmed by the work performed in a related field.

The composite design is non-full factorial, which means using fewer experiments than necessary for testing all the studied modes. This approach appears to be relevant for machining studies, since an increase in the number of work cycles leads to an increase in the cutting tool wear, thus affecting the obtained results.

The allowance levels of the main factors in the regression model describing the effect of the cutting process parameters on the bore quality are provided in tab. 1.

**Table 1.** Allowance levels of the main factors

**Таблица 1.** Уровни варьирования главных факторов

Factor	Level -1	Level 0	Level +1
Cutting speed, V, m/min	6.1	11.8	17.5
Feed, S, mm/rev	0.16	0.27	0.38

The block factor characterises the reaming allowance Z. The values of the block factor are given in tab. 2.

**Table 2.** Allowance levels of the block factor

**Таблица 2.** Уровни варьирования блокового фактора

Block	Level 1	Level 2
Block: reaming allowance, Z, mm	0.1	0.5



**Fig. 2.** MAPAL replaceable-head reamer (Ø14 mm)

**Рис. 2.** Режущий инструмент MAPAL (Ø14 мм)

In order to investigate the influence of the cutting area cooling method and the composition of adjacent layers in the hybrid stack on the parameters of the bore in the aluminium alloy layer during reaming, a full Box-Behnken factorial design with two main factors was selected. In terms of these factors, discrete variables, represented by the method of cooling the cutting area and the hybrid stack composition, were used.

The allowance levels of the factors in the 3-level full Box-Behnken factorial design are provided in tab. 3.

**Table 3.** Factor allowance levels

**Таблица 3.** Уровни варьирования факторов

Factor	Level -1	Level 0	Level +1
Cutting area cooling method	no cooling	air cooling	-56.5°C carbon dioxide cooling
Composition of the studied object	Ti/Al	PCM/Al	Al

## RESULTS

Let us consider the expression for optimising the process of reaming the HS of the “OT4 titanium alloy – VT6 titanium alloy – PCM – VT6 titanium alloy – 1933 aluminium alloy” structure.

The optimisation task of the reaming process in terms of performance consists in the minimisation of the cutting time. The cutting time is calculated by the formula:

$$T_c = \frac{(l + l_p + l_o)\pi d}{1000sv},$$

where  $l$  – the thickness of the object, where the through bore is formed;  $l_p + l_o$  – the tool penetration length and overtravel at the end of cutting;  $d$  – the tool diameter;  $s$  – the feed;  $v$  – the cutting speed. In this study, the sum of the penetration length and overtravel is assumed to be 5 mm.

In this regard, it is necessary to select the advanced cutting modes providing the surface roughness within the range of allowed values. In order to solve this problem, let us determine the most efficient cutting modes by establishing the desirability levels of response functions. For the optimisation in terms of performance, the desirability for the lower and average values of the studied parameters is taken equal to one, while the upper value desirability is zero (except for

the “cutting time” parameter describing the process performance). Therefore, the desirability values linearly decreasing with the increase in the cutting time are selected. Using this method, the cutting modes both ensuring the optimum values of the bore accuracy and having high performance were determined.

The highest desirability value was established corresponding to the values of the  $V = 7.24$  m/min cutting speed,  $S = 0.27$  mm/rev feed, and the reaming allowance of  $z = 0.5$  mm. In the above modes, the correspondence of maximum performance (1.01 min cutting time) with the required parameters of the bore accuracy is achieved: the IT9 deviation of diameters from 14 mm is in the limits of  $43 \mu\text{m}$ , the roughness of the bore surface for metallic material layers is under  $1.6 \mu\text{m}$ ,  $R_a = 6.3$  is used for the composite material layers.

In order to increase the requirements for the parameters of the bore surface roughness, let us take the desirability equal to 0.5 for the average value levels. Since the optimisation in this case is aimed at improving the quality, the “cutting time” parameter is the exception and the desirability is set the same at all levels.

The highest desirability value was established corresponding to the values of the  $V = 6.1$  m/min cutting speed,  $S = 0.22$  mm/rev feed, and the reaming allowance of  $z = 0.5$  mm.

In these modes, the maximum bore quality is achieved, while the response value of roughness and deviation from the true longitudinal section profile are decreased (tab. 4). However, the performance decreases due to the increased to 1.5 min cutting time of the reaming operation.

During the optimisation of the cutting area cooling methods and the composition of the hybrid stack in terms of surface quality and bore reaming accuracy, the desirability of a response at the upper, average, and lower levels was set equal to 1, 0.5 and 0, respectively, for obtaining maximum accuracy. The maximum desirability corresponds to the lower levels of response values.

The greatest desirability value corresponds both to the method of cooling (cooling by carbon dioxide with the temperature of  $-56.5^\circ\text{C}$ ) and the PCM/1933 composition of the hybrid stack. Although the use of these machined material com-

binations is not always possible, they should be preferred in the case of possible changes in the product design.

Tab. 4 represents factor combinations ensuring the maximum quality of machined bores.

Fig. 3 shows a histogram of the desirability function.

**Table 4.** Combination of factors ensuring the maximum quality of machined bores

**Таблица 4.** Сочетание факторов, обеспечивающих максимум по качеству обработанных отверстий

Desirability	Factors and levels	Response	Response value
0.57	Cooling method: carbon dioxide (-56.5°C) Hybrid stack composition: PCM/1933	shape accuracy	10.47 µm
		Ra in 1933 layer	0.64 µm
		Rz in 1933 layer	3.42 µm
		Temperature	-15°C

Fig. 3 shows that the minimum level of desirability corresponds to the VT6/1933 combination during the machining both with and without air cooling. Therefore, this material combination should be avoided in the product design. When other material combinations are impossible, preference should be given to the selection of the most effective method of cooling the cutting area, i.e., the carbon dioxide cooling at a temperature of -56.5°C. The PCM/1933 combina-

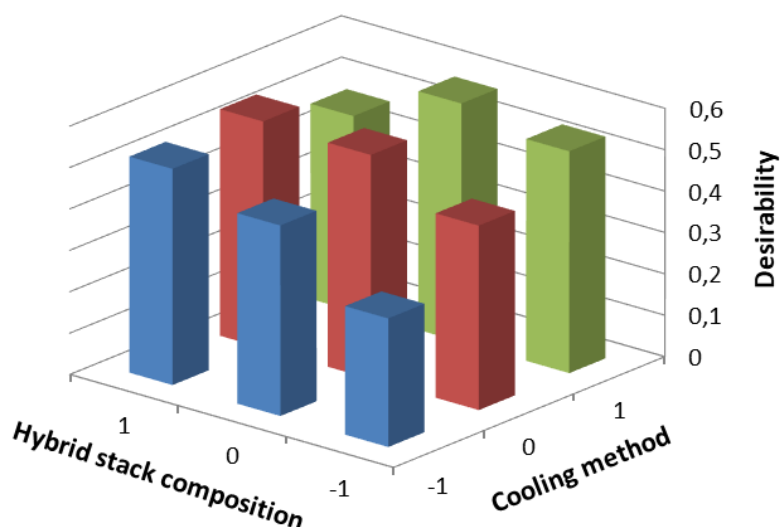
tions have desirability values insignificantly differing from those provided by cutting area cooling methods. A similar situation is observed during machining of the aluminium alloy layer only.

## CONCLUSION

As a result of experimental works, basic laws governing the process of precise boring and reaming in multicomponent hybrid stacks made of carbon-fibre-reinforced plastics with titanium and aluminium alloys were investigated. The following theoretical conclusions and practical results were obtained:

1. A methodology for a comprehensive experimental study of the boring process in the HS of the “OT4 titanium alloy – VT6 titanium alloy – PCM – VT6 titanium alloy – 1933 aluminium alloy” structure was developed and implemented. The developed methodology is aimed at elucidating the technological possibilities of the reaming operation.

2. In order to determine the optimum combination of technological parameters of the bore reaming in HS, including cutting modes and machining allowance ensuring the required values of the roughness and bore accuracy, a methodology for investigating the process using the probabilistic method was applied on the basis of design experiment and multifactorial variance analysis.



**Fig. 3.** Desirability function histogram (see tab. 4).

**Рис. 3.** Гистограмма функции желательности (см. табл. 4)



3. According to the obtained results, the task of increasing the performance, surface quality and bore accuracy in the studied stacks was solved by selecting the optimum cutting modes during reaming. The most significant factors, affecting the parameters of the bore accuracy, in particular the deviation of the bore longitudinal section profile, include the cutting speed in the first and the second degree, as well as the feed. The optimum cutting modes are a cutting speed of 7.24 m/min, a feed of 0.27 mm/rev, and a machining allowance of 0.5 mm. Thus, the time of reaming one bore is reduced by 4.6 times.

4. During the process of reaming the studied HS, the major technological problems arise during the machining of the aluminium alloy layer. These problems are related to the effect of the HS composition and the cooling method. These factors were investigated using the full factorial Box-Behnken design. The dependence of the roughness and accuracy of bores in the aluminium alloy layer on cutting area cooling methods

and the HS composition was determined.

5. On the basis of the obtained results, the task of optimising the surface quality and accuracy of bores in the aluminium alloy layer was solved by selecting the optimum methods of cooling the cutting area and HS composition. The best cooling method improving the accuracy and reducing the surface roughness of the bores in the aluminium alloy layer was established to be the cooling with carbon dioxide at a temperature of -56.5°C.

6. Recommendations are formulated for the design of hybrid stacks, containing carbon-fibre-reinforced plastics interlayered with aluminium and titanium alloys. In order to achieve optimal parameters of the obtained bores in terms of accuracy and surface roughness, the aluminium alloy layer should be located after the carbon-fibre-reinforced plastic layer (in the machining direction) and the location of this layer after the titanium layer should be avoided.

### References

1. Chashhin N. S., Pashkov A. E., Ivanov Y. N., Sturov A. A. Roughness of holes in metal and polymer composite bags. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2019;632:012089. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012089>.
2. Sturov A. A., Chashhin N. S., Ivanov Y. N. Service life testing of composite material. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2019;632(1):012110. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012110>.
3. Chashchin N. S. Hole finishing in mixed packages. In: *Aviakosmicheskie tekhnologii (AKT-2018): trudy XIX Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii i shkoly molodyh uchenykh, aspirantov i studentov = Aerospace technologies (AKT-2018): proceedings of 19th International scientific and technical conference and school of young scientists, graduate students and students*. 7–8 June 2018, Voronezh. Voronezh; 2018, p. 262–266. (In Russ.).
4. Ivanov Y. N., Pashkov A. E., Chashhin N. S. Optimization of hole generation in Ti/CFRP stacks. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2018;327(4):042043. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/4/042043>.
5. Chashhin N. S., Ivanov Y. N., Pashkov A. E., Sturov A. A. Precise holes machining in multicomponent stacks from metals and CFRP. In: *Aviamechanical engineering and transport: Proceedings of the International Conference*. 2018. <https://doi.org/10.2991/avent-18.2018.13>.
6. Abdelhafeez A. M., Soo S. L., Aspinwall D. K., Dowson A., Arnold D. Burr formation and hole quality when drilling titanium and aluminium alloys. *Procedia CIRP*. 2015;37:230-235. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.08.019>.
7. Pyatykh A. S., Savilov A. V., Timofeev S. A. Method of tool wear control when stainless steel end milling. *Trenie i iznos*. 2021;42(4):411-417. <https://doi.org/10.32864/0202-4977-2021-42-4-411-417>.
8. Timofeev S., Savilov A., Pyatykh A. Studies on the effect of cutter wear on cutting dynamics when turning. *Materials Today: Proceedings*. 2021;38(4):1367-1370. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.105>.
9. Savilov A., Pyatykh A., Nikitenko A. Axial contact points method for improving end-milling productivity. *Materials Today: Proceedings*. 2021;38(4):1505-1507. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.138>.
10. Nikitenko A. V., Savilov A. V., Pyatykh A. S. Study of the axial contact points method applied when end-milling titanium alloys. In: Radionov A. A., Gasiyarov V. R. (eds.). *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham: Springer; 2020, p. 436-444. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-54817-9\\_51](https://doi.org/10.1007/978-3-030-54817-9_51).
11. Ivanov Yu. N., Minaev N. V., Bayandin V. V., Shaglaeva N. S. Synthesis and properties of epoxy resin-based polymeric composite materials. *Izvestiya vuzov. Himiya i himicheskaya tekhnologiya = Proceedings of Universities. ChemChemTech*. 2021;64(7):89-95. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20216407.6379>.
12. Zitoun R., Krishnaraj V., Collombet F. Study

of drilling of composite material and aluminium stack. *Composite Structures*. 2010;92(5):1246-1255. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.10.010>.

13. Chigrinetz E. G. Titanium-reinforced glass fiber plastic main rotor blade beam drilling process optimization. *Vestnik Moskovskogo aviacionnogo instituta = Aerospace MAI Journal*. 2016;23(1):177-188. (In Russ.).

14. Starodubtseva D. A., Tri Vinh Le, Koltsov V. P. Formation of the surface roughness during grinding with flap wheels after shot peening. In: *International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTME 2018): MATEC Web Conference*. 2018;224:01070. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822401070>.

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

16. Koltsov V., Starodubtseva D. Investigation of traces of interaction between flap wheel and aluminum alloy plain surface. *Procedia Engineering*. 2017;206:473-478. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.503>.

17. Koltsov V. P., Starodubtseva D. A., Vinh Le Tri, Son Phung Xuan. Step-by-step surface roughness formation during shot peening and subsequent grinding with flap

wheels. In: *Advances in Engineering Research: Proceedings of the International Conference*. 2018;158:386-390. <https://doi.org/10.2991/avent-18.2018.75>.

18. Yanyushkin A. S., Rychkov D. A., Lobanov D. V. Improvement of quality of the pro-cessed surface of composite materials when milling. In: *Sovremennye tekhnologii v mashinostroenii i litejnom proizvodstve: materialy I Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Modern technologies in mechanical engineering and foundry: materials of the 1st international scientific and practical conference*. 22–24 October 2015, Cheboksary. Cheboksary: Chuvash State University named after I. N. Ulyanov; 2015, p. 277-285. (In Russ.).

19. Lobanov D. V., Yanyushkin A. S., Rychkov D. A. Technological manufacturing methods and selection of cutting tools for milling of composite materials based on polymers. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie = Bulletin of the South Ural State University. Series: Mechanical Engineering Industry*. 2015;15(1):35-46. (In Russ.).

20. Markov A. M. Technological features of machining of parts from composite materials. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2014;7:3-8. (In Russ.).

#### Список источников

1. Chashhin N. S., Pashkov A. E., Ivanov Y. N., Sturov A. A. Roughness of holes in metal and polymer composite bags // *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2019. Vol. 632. P. 012089. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012089>.

2. Sturov A. A., Chashhin N. S., Ivanov Y. N. Service life testing of composite material // *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2019. Vol. 632. Iss. 1. P. 012110. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012110>.

3. Чашин Н. С. Чистовая обработка отверстий в смешанных пакетах // *Авиакосмические технологии (АКТ-2018): тр. XIX Междунар. науч.-техн. конф. и шк. молодых ученых, аспирантов и студентов (г. Воронеж, 7–8 июня 2018 г.)*. Воронеж, 2018. С. 262–266.

4. Ivanov Y. N., Pashkov A. E., Chashhin N. S. Optimization of hole generation in TI/CFRP stacks // *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2018. Vol. 327. Iss. 4. P. 042043. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/4/042043>.

5. Chashhin N. S., Ivanov Y. N., Pashkov A. E., Sturov A. A. Precise holes machining in multicomponent stacks from metals and CFRP // *Aviamechanical engineering and transport: Proceedings of the International Conference*. 2018. <https://doi.org/10.2991/avent-18.2018.13>.

6. Abdelhafeez A. M., Soo S. L., Aspinwall D. K., Dowson A., Arnold D. Burr formation and hole quality when drilling titanium and aluminium alloys // *Procedia CIRP*. 2015. Vol. 37. P. 230–235. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.08.019>.

7. Пятых А. С., Савилов А. В., Тимофеев С. А. Метод

контроля износа режущего инструмента при концевом фрезеровании нержавеющей стали // *Трение и износ*. 2021. Т. 42. № 4. С. 411–417. <https://doi.org/10.32864/0202-4977-2021-42-4-411-417>.

8. Timofeev S., Savilov A., Pyatykh A. Studies on the effect of cutter wear on cutting dynamics when turning // *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 38. Part 4. P. 1367–1370. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.105>.

9. Savilov A., Pyatykh A., Nikitenko A. Axial contact points method for improving end-milling productivity // *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 38. Part 4. P. 1505–1507. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.138>.

10. Nikitenko A. V., Savilov A. V., Pyatykh A. S. Study of the axial contact points method applied when end-milling titanium alloys // *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering / eds. A. A. Radionov, V. R. Gasiyarov*. Cham: Springer, 2020. P. 436–444. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-54817-9\\_51](https://doi.org/10.1007/978-3-030-54817-9_51).

11. Иванов Ю. Н., Минаев Н. В., Баяндин В. В., Шаглаева Н. С. Синтез и свойства полимерных композиционных материалов на основе эпоксидной смолы // *Известия вузов. Химия и химическая технология*. 2021. Т. 64. № 7. С. 89–95. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20216407.6379>.

12. Zitoun R., Krishnaraj V., Collombet F. Study of drilling of composite material and aluminium stack // *Composite Structures*. 2010. Vol. 92. Iss. 5. P. 1246–1255. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.10.010>.

13. Чигринец Е. Г. Оптимизация процесса сверления армированного титаном стеклопластикового лонжерона лопасти несущего винта вертолета // *Вестник Мос-*

ковского авиационного института. 2016. Т. 23. № 1. С. 177–188.

14. Starodubtseva D. A., Tri Vinh Le, Koltsov V. P. Formation of the surface roughness during grinding with flap wheels after shot peening // International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018): MATEC Web Conference. 2018. Vol. 224. P. 01070. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822401070>.

15. Koltsov V. P., Starodubtseva D. A., Tri Vinh Le. Surface roughness formation during shot peen forming // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2018. Vol. 327. No. 4. P. 042125. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/4/042125>.

16. Koltsov V., Starodubtseva D. Investigation of traces of interaction between flap wheel and aluminum alloy plain surface // Procedia Engineering. 2017. Vol. 206. P. 473–478. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.503>.

17. Koltsov V. P., Starodubtseva D. A., Vinh Le Tri, Son Phung Xuan. Step-by-step surface roughness formation during shot peening and subsequent grinding with flap

wheels // Advances in Engineering Research: Proceedings of the International Conference. 2018. Vol. 158. P. 386–390. <https://doi.org/10.2991/avent-18.2018.75>.

18. Янюшкин А. С., Рычков Д. А., Лобанов Д. В. Качество обработанной поверхности композиционных материалов фрезерованием // Современные технологии в машиностроении и литейном производстве: матер. I Междунар. науч.-практ. конф. (г. Чебоксары, 22–24 декабря 2015 г.). Чебоксары: Изд-во Чувашского гос. ун-та им. И. Н. Ульянова, 2015. С. 277–285.

19. Лобанов Д. В., Янюшкин А. С., Рычков Д. А. Технологические методы изготовления и выбора режущего инструмента для фрезерования композиционных материалов на полимерной основе // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2015. Т. 15. № 1. С. 35–46.

20. Марков А. М. Технологические особенности механической обработки деталей из композиционных материалов // Научные технологии в машиностроении. 2014. № 7. С. 3–8.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Nikolay S. Chashchin,**

Junior Researcher,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia

#### Contribution of the author

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

#### Conflict of interests

The author declares no conflict of interests.

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

#### Information about the article

The article was submitted 18.11.2021; approved after reviewing 28.12.2021; accepted for publication 28.02.2022.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Чащин Николай Сергеевич,**

младший научный сотрудник,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

#### Заявленный вклад автора

Автор выполнил исследовательскую работу, на основании полученных результатов провел обобщение, подготовил рукопись к печати.

#### Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.*

#### Информация о статье

Статья поступила в редакцию 18.11.2021; одобрена после рецензирования 28.12.2021; принята к публикации 28.02.2022.



## ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 620.186.5:621.181

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-43-52>

## Повышение коррозионной стойкости внутренних поверхностей энергетического оборудования

Наталья Павловна Герасимова<sup>1✉</sup>, Татьяна Валерьевна Коваль<sup>2</sup><sup>1,2</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия<sup>1</sup>[gerasimova@istu.edu](mailto:gerasimova@istu.edu)<sup>2</sup>[kovaltv@istu.irk.ru](mailto:kovaltv@istu.irk.ru)

**Резюме.** Цель – изучение возможности влияния индукционных токов на повышение надежности работы оборудования тепловых электростанций путем увеличения коррозионной стойкости внутренних поверхностей энергооборудования (поверхностей нагрева котельных агрегатов). Стойкость к коррозии возрастает за счет повышения прочности оксидной пленки, образующейся при пассивировании (оксидировании). Для повышения прочности защитной пленки применен способ электрохимического пассивирования металлической поверхности, основанный на использовании индукционных токов. С помощью метода многомерного математического моделирования многопараметрических и многофункциональных процессов установлено, что для змеевикового экономайзера парового котла, состоящего из стальных труб с внутренним диаметром 32 мм (при параллельно включенных 24 змеевиках), обработка водным раствором окислителя (кислорода) должна осуществляться не менее 4 ч при пропуске по всей системе труб переменного тока 25 А. При этом дозирование кислорода в водный раствор должно производиться при температуре 130–450°C и концентрации кислорода 1 г/кг, со скоростью воды 0,5–5,0 м/с. Показано, что периодичность обработки зависит от условий эксплуатации оборудования: предпускового режима, останова или консервации. Эффективность способа также зависит от величины электрического тока, пропускаемого по металлической поверхности, продолжительности обработки, концентрации окислителя, типа и размеров обрабатываемой металлической поверхности. Предлагаемый способ пассивации можно применять как в барабанных, так и в прямоточных котлах. Например, пассивацию экранных поверхностей нагрева рекомендуется проводить в растопочном режиме при 30–40% нагрузке котла, также как и пассивацию пароперегревательных поверхностей котельных агрегатов и экономайзеров. Таким образом, применение способа электрохимического пассивирования позволит повысить коррозионную стойкость металлической поверхности оборудования тепловых электрических станций.

**Ключевые слова:** коррозионное разрушение, котельный агрегат, надежность работы энергооборудования, внутренняя коррозия, пассивация, оксидирование

**Для цитирования:** Герасимова Н. П., Коваль Т. В. Повышение коррозионной стойкости внутренних поверхностей энергетического оборудования // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 1. С. 43–52. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-43-52>.

## POWER ENGINEERING

Original article

## Improvement of corrosion resistance of internal surfaces in power-generating equipment

Natalia P. Gerasimova<sup>1✉</sup>, Tatyana V. Koval<sup>2</sup>

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

<sup>1</sup>[gerasimova@istu.edu](mailto:gerasimova@istu.edu)<sup>2</sup>[kovaltv@istu.irk.ru](mailto:kovaltv@istu.irk.ru)

**Abstract.** We investigate the possibility of using induction currents for improving the reliability of thermal power plants by increasing the corrosion resistance of internal surfaces of power-generating equipment, such as heating surfaces of boiler units. Corrosion resistance can be enhanced by improving the strength of an oxide film formed during

passivation (oxidation). In this work, the oxide film strength was increased by electrochemical passivation of metal surfaces with induction currents. Using the method of multidimensional mathematical modeling of multi-parametric and multi-functional processes, we established that, for a continuous-loop economizer of a steam boiler comprising steel pipes with an inner diameter of 32 mm (24 coils operated simultaneously), an aqueous oxidant (oxygen) solution should be passed through the entire system of pipes for 4 h at an alternating current of 25 A. Under this treatment, oxygen should be added into the aqueous solution at a temperature of 130–450°C, an oxygen concentration of 1 g/kg, and a water flow rate of 0.5–5.0 m/s. Treatment intervals should be determined depending on the operating conditions of the equipment: reset, shutdown, or preservation. The efficiency of the method depends on the electric current passed over metal surface, treatment duration, oxidant concentration, as well as the type and size of the treated metal surface. The proposed passivation method can be used in both drum boilers and single-pass boilers. For example, it is recommended that passivation of water walls be carried out during boiler warm-up operation at 30–40% of boiler load, as well as passivation of superheat surfaces of boiler units and economizers. Therefore, the use of electrochemical passivation can increase the corrosion resistance of metal surfaces of power-generating equipment at thermal power plants.

**Keywords:** corrosion destruction, boiler unit, reliability of power-generating equipment, internal corrosion, passivation, oxidation

**For citation:** Gerasimova N. P., Koval T. V. Improvement of corrosion resistance of internal surfaces in power-generating equipment. *iPolytech Journal*. 2022;26(1):43-52. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-43-52>.

## ВВЕДЕНИЕ

Коррозионное разрушение является причиной проблем надежности работы оборудования тепловых электрических станций (ТЭС). Важной задачей при эксплуатации основного и вспомогательного оборудования ТЭС является поиск возможностей, методов и разработок по сохранению ресурса и обеспечение их надежной работы. В связи с этим внедрение методов борьбы с коррозионным разрушением представляет собой одно из главных направлений обеспечения бесперебойной работы оборудования на ТЭС [1–3].

## АНАЛИЗ ПРИЧИН КОРРОЗИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА КОТЛОАГРЕГАТОВ И СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ ОТ НЕГО

Классификация и причины разрушений металлических поверхностей нагрева котельных агрегатов представлены на рис. 1 и 2, из которых очевидно, что совместное воздействие всех эксплуатационных факторов приводит к ухудшению оптимальных условий работы металла [4].

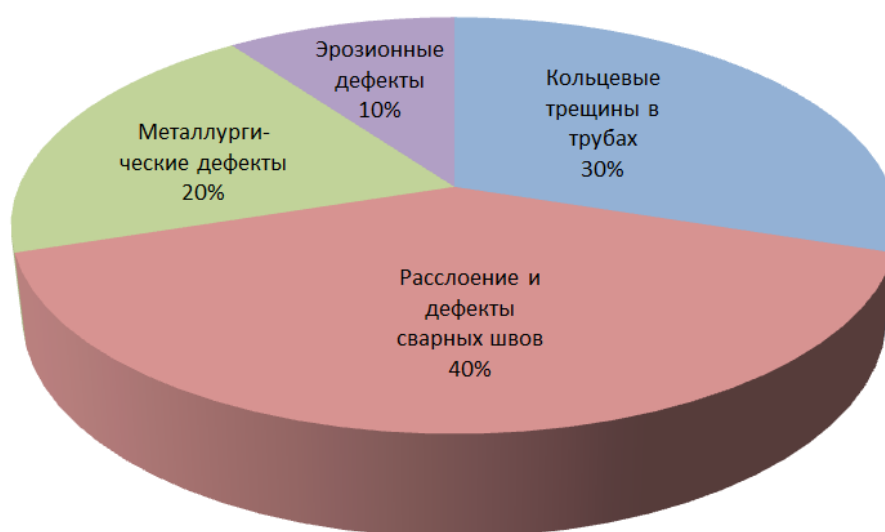
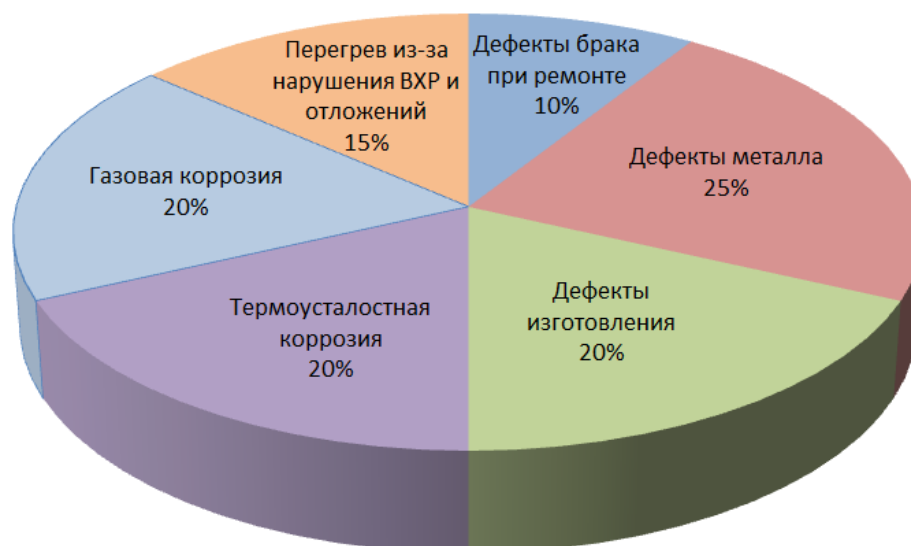


Рис. 1. Виды разрушений в микроструктуре металла энергетического оборудования  
Fig. 1. Types of metal microstructure destruction in power generating equipment



**Рис. 2. Эксплуатационные факторы, влияющие на разрушение поверхностей нагрева котельных агрегатов (ВХР – водно-химический режим)**  
**Fig. 2. Operational factors affecting the destruction of boiler unit heating surfaces (BXP – water-chemical regime)**

Из анализа данных, приведенных на рис. 2, видно, что основная причина повреждений поверхностей нагрева котельных агрегатов заключается в температурных отклонениях в структуре металла труб (термоусталостная коррозия) вследствие специфики их изготовления (дефекты изготовления и дефекты металла) и условий эксплуатации (перегрев из-за нарушения ВХР и отложений), которые в совокупности приводят к коррозионному разрушению теплоэнергетического оборудования.

Как известно, коррозия – самопроизвольная окислительно-восстановительная реакция, протекающая при взаимодействии металла с окружающей средой, вследствие которой происходит разрушение металла. Процесс коррозионного разрушения можно представить в виде стадий в следующей последовательности [5–7]:

- транспортировка компонентов агрессивной среды к металлической поверхности;
- химическая окислительно-восстановительная реакция ионов металла и компонентов коррозионной среды, продуктом которой является окисленная форма металла и восстановленная форма компонента среды;
- отвод продуктов химической реакции

(коррозии) от поверхности раздела фаз.

Вместе с тем разрушение металла вследствие коррозии может происходить равномерно по металлической поверхности и локально (в виде язв).

Если процесс коррозионного разрушения протекает равномерно, то поверхность энергетического оборудования при воздействии агрессивной среды подвергается утонению полностью с одновременным уменьшением толщины труб с внутренней и внешней сторон. При этом микроструктура металла не изменяется [8]. На поверхностях нагрева энергетического оборудования, прежде всего в котлоагрегатах, такой вид коррозионного разрушения происходит вследствие углекислотной, общей кислородной коррозии внутренней поверхности труб, а также высокотемпературной коррозии наружной их поверхности.

Теплоэнергетическое оборудование изготавливается, как правило, из перлитных сталей. В период эксплуатации поверхности находятся под постоянным воздействием растягивающих напряжений, близких к пределу текучести металла; при этом одновременное воздействие реагентов, способствующее интенсивному протеканию коррозии металлической поверхности, приводит к рас-

трескиванию под напряжением. Возникает локальная коррозия с характерным растрескиванием вследствие электрохимического растворения металла. Прогрессирование растрескивания металлической поверхности из-за коррозионного разрушения, осложненное воздействием растягивающих напряжений, приводит к ее разрыву, обеспечивая контакт агрессивной среды и анодной поверхности [9–11].

Опасным видом коррозии металлического оборудования является язвенная или локальная коррозия. В этом случае разрушению подвергаются небольшие участки поверхности с углублением в толщу металла. Такое сквозное повреждение металлической поверхности происходит при эксплуатации энергетического оборудования вследствие кислородной язвенной коррозии, из-за наличия в питательной воде нитритных ионов, а также из-за образования рыхлых продуктов коррозии, включающих в основном гидратированные трехвалентные окислы железа.

**Процесс коррозионного разрушения.** Механизм коррозионного процесса разрушения оборудования различен в зависимости от того, на внутренней или на внешней поверхности оснащения он протекает. В связи с этим коррозию оборудования классифицируют на внешнюю и внутреннюю.

Коррозия на внутренней поверхности оборудования теплоэнергетических систем является менее предсказуемой и трудно контролируемой, поэтому в настоящее время уделяется большое внимание поиску более совершенных методов защиты оборудования от коррозионного разрушения.

Повреждения от внутренней коррозии обычно имеют вид небольших сквозных отверстий, образующиеся при этом свищи имеют незначительные размеры, которые трудно обнаружить и своевременно устранить. В связи с этим на наружной поверхности трубы получают благоприятные условия для интенсивного развития наружной коррозии [12–15]. Известно, что внутренняя коррозия способствует утонению металла на большой площади и, как правило, при уменьшении толщины стенки трубы до критической величины приводит к ее разруше-

нию. Таким образом, внутренняя коррозия является причиной большого числа отказов оборудования на ТЭС, однако основной причиной указывается наружная (внешняя) коррозия [16].

Классифицируют способы уменьшения коррозионного разрушения: активные, пассивные и пассивно-активные.

К **активным** относят такие, в которых осуществляется интенсивное влияние на природу металла и электролита. К ним относят также способы, заменяющие механизм коррозионного разрушения и его кинетику. В качестве примера можно привести применение ингибиторов коррозии или изменение состава коррозионной среды за счет снижения ее агрессивности. Активными способами защиты от коррозии являются специальное легирование и устранение самих причин, вызывающих коррозионное разрушение.

**Пассивные** способы характеризуются непосредственным влиянием на природу металла и механизм процесса разрушения. К ним относят применение лакокрасочных и других неметаллических покрытий на металлической поверхности.

**Пассивно-активные** способы не включают влияние на природу металла, а отличаются тем, что металлическая поверхность изолируется от агрессивной среды специальными покрытиями, которые могут быть выполнены из другого металла или неметаллических неорганических материалов.

Одним из известных современных и несложных в применении способов защиты от электрохимического коррозионного разрушения теплоэнергетического оборудования на основе изменения характеристик микроструктуры его материала являются пассивация или оксидирование.

## ПАССИВАЦИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА КОТЛОАГРЕГАТОВ

Пассивация является способом защиты металлов от коррозионного разрушения вследствие применения специальных растворов или процессов, приводящих к образованию оксидной пленки на их поверхности.

При пассивации на металлической по-

верхности происходит образование адсорбционного слоя в виде микроскопической пленки, который образуется в результате реагирования металла и компонента раствора в конкретном диапазоне потенциалов. Сформированная таким образом плотная оксидная пленка представляет собой непроницаемый барьер для протекания коррозионных реакций, тормозя их, а в некоторых случаях полностью прекращая коррозионное разрушение.

Явлениями пассивности объясняется замедление скорости коррозии металлов, что приводит к образованию защитной оксидной металлической пленки на поверхности.

Известно много современных способов пассивирования (оксидирования) металлических поверхностей для повышения надежности работы теплоэнергетического оборудования.

Основными, используемыми в настоящее время, способами оксидирования являются жидкостные. Образование больших объемов отходов реагентов (октадециламин, различные ингибиторы коррозии) при применении жидкостных способов оксидирования приводит к высокой экологической опасности при низкой прочности защитной пассивной пленки, формирующейся на поверхности теплоэнергетического оборудования.

В качестве наиболее перспективного способа оксидирования можно привести метод очистки и пассивации внутренних поверхностей нагрева теплоэнергетического оборудования (котлоагрегатов и турбин) пароводокислородной обработкой, в основе которого лежит применение пароводяной смеси с кислородом в качестве окислителя. Сущность метода заключается в том, что при одновременном воздействии на загрязненную поверхность перегретого водяного пара и кислорода происходят интенсивное окисление отложений на стенке, уменьшение их сцепления с поверхностью металла, вынос их из очищаемого тракта и одновременное формирование пассивной оксидной пленки на металлической поверхности [17]. Увеличить прочность защитной оксидной пленки на внутренних поверхностях трубопроводов энергетического оборудования, предотвра-

щаящей их коррозионное разрушение во время эксплуатации или консервации оборудования котельных агрегатов, можно путем интенсификации процесса оксидирования за счет применения индукционных токов.

### **ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ИНДУКЦИОННЫХ ТОКОВ ПРИ ПАССИВИРОВАНИИ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЭНЕРГООБОРУДОВАНИЯ**

Раствор окислителя, обогащенный кислородом – это электролит, поэтому при наведении индукционных токов в нем можно получить эффект, который позволит активизировать электрохимические процессы.

В одном из законов Фарадея включена величина электродвижущей силы электромагнитной индукции ( $E$ ), которую можно выразить, заменив через переменные параметры величину силовой характеристики – магнитную напряженность, используемую в электродинамическом анализе [18].

Электродвижущая сила ( $\mathcal{E}$ ) индукции складывается из  $\mathcal{E}_1$ , возникающей из-за изменения силы тока  $I$  во времени, а также  $\mathcal{E}_2$ , образующейся вследствие токов – первичного  $I_1$  и вторичного  $I_2$  при варьировании расстояния между ними. Обратная пропорциональность  $\mathcal{E}$  индукции и квадрата расстояния до электрода с током свидетельствует об образовании сверхвысоких напряжений в непосредственной близости от первичных проводников с переменным током, то есть

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

где  $A$  – эмпирический коэффициент пропорциональности;  $r$  – расстояние до поверхности металла, м;  $t$  – время воздействия индукционных токов, с.

Таким образом, вследствие возникновения наибольшей величины электромагнитного поля в непосредственной близости от электрода создается область, где особенно интенсивно протекает ионизация. Следовательно, вблизи первичного тока интенсивно протекает ионизация всех компонентов рас-

твора в результате действия индукционных токов.

Это заключение можно использовать и для процессов электрохимического взаимодействия металлов и компонентов раствора, таким образом, прослеживается аналогичная закономерность по интенсификации процесса ионизации при протекании электрохимических реакций под влиянием индукционных токов [18].

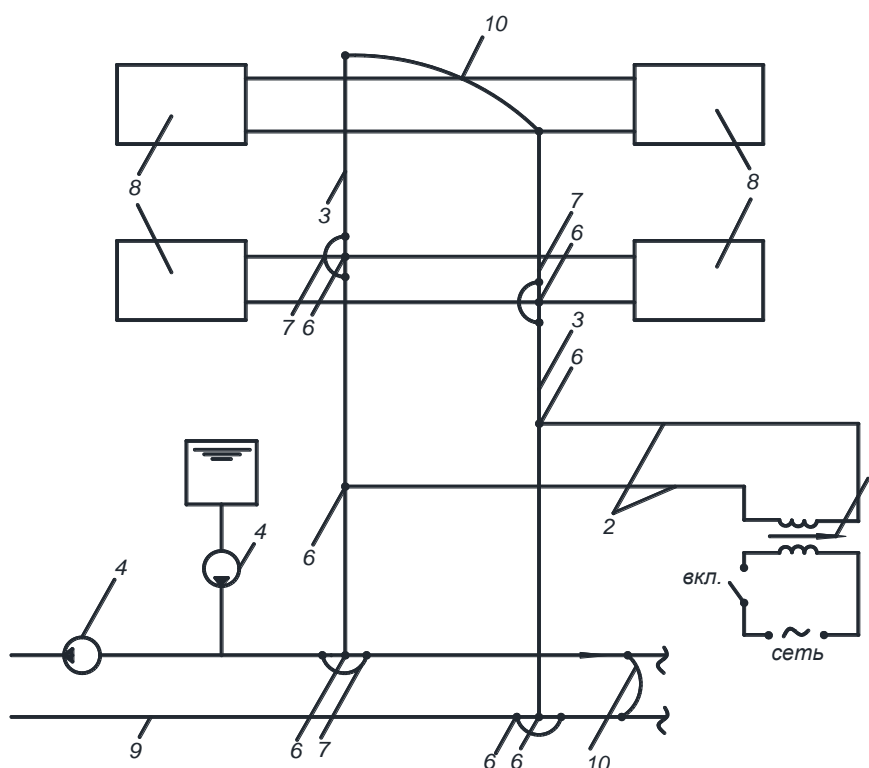
Вышеперечисленные выводы можно применить к решению проблемы интенсификации процесса пассивации металлической поверхности и увеличения прочностных характеристик образующейся при этом оксидной пленки, защищающей поверхность оборудования от коррозионного разрушения.

Способ электрохимической пассивации внутренней поверхности металлических труб

энергетического оборудования включает выдержку обрабатываемой поверхности в среде окислителя (например, применение пароводокислородной обработки) и одновременное пропускание переменного тока [19].

Индуктируемый вторичный ток возникает в результате образовавшегося переменного электромагнитного поля возле поверхности энергетического оборудования, по которому пропускается переменный ток. Вследствие этого в непосредственной близости от поверхности, находящейся под током, возникает область действия индукционных токов (рис. 3).

Предлагаемый способ осуществляется следующим образом: источник переменного тока подключают к обрабатываемой металлической поверхности, применяя электрическую схему (рис. 4).



**Рис. 3. Схема установки процесса электрохимической пассивации внутренней металлической поверхности энергетического оборудования на примере двухтрубной системы: 1 – источник переменного тока; 2 – электропровод; 3 – металлическая поверхность энергетического оборудования (например, труба), подвергаемого обработке индукционными токами; 4 – дозатор окислителя; 5 – емкость с раствором окислителя; 6 – электрические клеммы; 7 – шунтирующие перемычки; 8 – элементы энергетического оборудования; 9 – вспомогательный трубопровод для отвода отработанного раствора; 10 – перемычки**

**Fig. 3. Diagram of the installation designed to implement electrochemical passivation of the inner metal surface of power-generating equipment on the example of a two-pipe system: 1 – AC source; 2 – electric wires; 3 – metal surface of power equipment (for the case of a pipe) subjected to treatment with induction currents; 4 – oxidizer dispenser; 5 – container with oxidizer solution; 6 – electrical terminals; 7 – shunt jumpers; 8 – elements of power-generating equipment; 9 – auxiliary pipeline for disposal of waste solution disposal; 10 – jumpers**



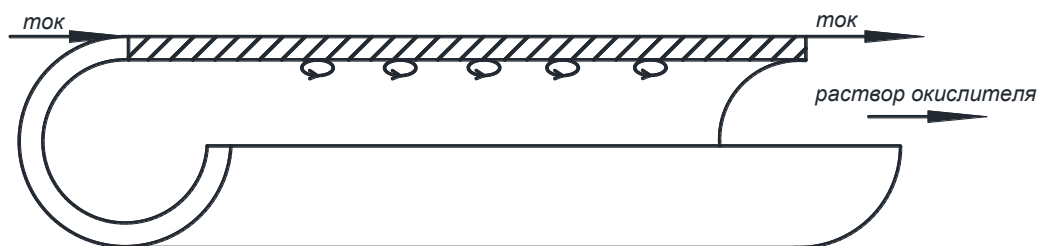


Рис. 4. Эскиз металлической поверхности (на примере трубы) с образованием индукционных токов в непосредственной близости от нее  
Fig. 4. A sketch of a metal surface (for the case of a pipe) with forming induction currents in its immediate vicinity

Переменный электрический ток протекает по металлической поверхности за счет включения источника переменного тока, при этом защита от коррозии внутренних поверхностей нагрева энергооборудования происходит в результате их обработки водным раствором окислителя. При движении переменного тока вокруг проводника, которым в данном случае является само оборудование, создается переменное магнитное поле, вследствие чего в растворе окислителя индуцируются вторичные короткозамкнутые токи, активизируя при этом ионизацию компонентов раствора. Водный раствор обогащен атомарным кислородом, поэтому вблизи металлической поверхности создается область с повышенной концентрацией ионизированного атомарного кислорода.

Итак, вблизи металлической поверхности, обработанной в среде окислителя, например, применяя пароводокислородную обработку, создается наиболее высокая величина ЭДС индукции в соответствии с закономерностью, в которой величина электродвижущей силы (ЭДС) индукции обратно пропорциональна квадрату расстояния до обмотки индуктора. Этим объясняется повышенная ионизация компонентов раствора в непосредственной близости от металлической поверхности и, как следствие, активизируется их взаимодействие с атомами металла. Очевидно, что при пропускании переменного тока по теплоэнергетическому оборудованию интенсивность процесса оксидирования увеличивается. Структура оксидного слоя, образовавшегося при пассивации, характеризуется повышенной прочностью, так как он сформирован в

условиях интенсификации процесса оксидирования индукционными токами, и в дальнейшем, в рабочих условиях или при консервации оборудования, защищает металлическую поверхность от коррозии, что и является достижением технического результата. С помощью метода многомерного математического моделирования многопараметрических и многофункциональных процессов [19] получено, что для змеевикового экономайзера парового котла, состоящего из стальных труб с внутренним диаметром 32 мм (при параллельно включенных 24 змеевиках), обработка водным раствором окислителя (кислорода) осуществляется не менее 4 ч при пропускании по всей системе труб переменного тока 25 А при дозировании кислорода в водный раствор при температуре 130–450°C и концентрации кислорода 1 г/кг при скорости воды 0,5–5,0 м/с. Периодичность обработки определяется в зависимости от условий эксплуатации оборудования: предпускового режима, останова или консервации.

Эффективность способа зависит от величины электрического тока, пропускаемого по металлической поверхности, времени обработки, концентрации окислителя, например, при пароводокислородной обработке, типа и размеров обрабатываемой металлической поверхности [20].

Предлагаемый способ пассивации поверхностей нагрева котельных агрегатов возможно применять как в барабанных, так и в прямоточных котлах, например, пассивацию экранных поверхностей нагрева рекомендуется проводить в растопочном режиме при 30–40% нагрузке котла, как и пассивацию

пароперегревательных поверхностей котельных агрегатов. Рассмотренный способ еще можно применить и для защиты от коррозии турбинного оборудования ТЭС, например, в период вывода турбины в резерв на срок 7 сут и более и при проведении мер консервации оборудования турбоустановок и т.п.

Таким образом, применение способа электрохимического пассивирования, который включает в себя обработку внутренних поверхностей нагрева энергетического оборудования окислителем, обогащенным атомарным кислородом, одновременно пропускаемая по ним переменный ток, позволит повысить коррозионную стойкость металлической поверхности оборудования ТЭС.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Поиск возможностей и методов сохранения ресурса и обеспечения надежной работы основного и вспомогательного оборудования при эксплуатации котельных агрегатов позволяет выделить среди многочисленных направлений повышения надежности теплоэнергетического оборудования перспективное и сравнительно простое воздействие на свойства углеродистых сталей с точки зрения совершенствования характеристик микроструктуры, а именно – пассивацию

металла.

2. Основными способами пассивации являются жидкостные с применением октадециламина и различных ингибиторов коррозии. Образование больших объемов отходов реагентов при применении жидкостных способов оксидирования приводит к высокой экологической опасности при низкой прочности защитной пассивной пленки, формирующейся на поверхности теплоэнергетического оборудования.

3. Увеличить прочность защитной оксидной пленки на внутренних поверхностях энергетического оборудования можно путем интенсификации процесса оксидирования за счет применения индукционных токов. Применение способа электрохимического пассивирования, включающего обработку внутренних поверхностей нагрева энергетического оборудования окислителем, обогащенным атомарным кислородом, например, применяя пароводокислородную обработку, и одновременно пропускаемая по ним переменный ток, позволяет увеличить коррозионную стойкость металлической поверхности за счет повышения прочности оксидной пленки в связи с интенсификацией процесса пассивации индукционными токами.

## Список источников

1. Воронин С. В. Влияние коррозии на оборудование топливно-энергетического комплекса // Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности: сб. науч. статей V Междунар. науч. конф. (г. Казань, 30–31 мая 2020 г.). Казань: ООО «Конверт», 2020. Ч. 1. С. 52–54.
2. Томаров Г. В., Шипков А. А. Применение программных средств прогнозирования скорости эрозии-коррозии для обеспечения целостности оборудования и трубопроводов энергоблоков АЭС // Теплоэнергетика. 2020. № 8. С. 101–112. <https://doi.org/10.1134/S0040363620080056>.
3. Maurice V., Marcus P. Progress in corrosion science at atomic and nanometric scales // Progress in Materials Science. 2018. Vol. 95. P. 132–171. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.03.001>.
4. Бухин В. Е. Предварительно изолированные трубопроводы для систем централизованного теплоснабжения // Теплоэнергетика. 2002. № 4. С. 24–29.
5. Томаров Г. В., Шипков А. А. Эрозионно-коррозионный износ энергетического оборудования: исследование, прогнозирование и предупреждение. Ч. 2. Прогнозирование и предупреждение общей и локальной эрозии-коррозии // Теплоэнергетика. 2018. № 8. С. 17–28. <https://doi.org/10.1134/S0040363618080076>.
6. Томаров Г. В., Шипков А. А., Афлитонов Д. В. Эрозионно-коррозионный износ энергетического оборудования: исследование, прогнозирование и предупреждение. Ч. 3. Управление эрозией-коррозией трубопроводов и оборудования // Теплоэнергетика. 2018. № 9. С. 84–93. <https://doi.org/10.1134/S0040363618090102>.
7. Томаров Г. В., Шипков А. А., Корешкова Н. С. Расчетно-экспериментальное обоснование режимов работы, обеспечивающих эрозионную стойкость арматуры энергоблоков АЭС // Теплоэнергетика. 2010. № 5. С. 19–25.
8. Томаров Г. В., Шипков А. А. Эрозионно-коррозионный износ энергетического оборудования: исследование, прогнозирование и предупреждение. Ч. 1. Процессы и закономерности эрозии-коррозии // Теплоэнергетика. 2018. № 8. С. 5–16. <https://doi.org/10.1134/S0040363618080064>.
9. Marcus P. Corrosion mechanisms in theory and practice. Boca Raton: CRC Press, 2012. 941 p.

10. Liu Xiaolong, Hwang Woonggi, Park Jaewoong, Van Donghyun, Chang Yunlong, Lee Seung Hwan, et al. Toward the multiscale nature of stress corrosion cracking // *Nuclear Engineering and Technology*. 2018. Vol. 50. Iss. 1. P. 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.net.2017.10.014>.
11. Fu Junwei, Li Feng, Sun Jiajun, Cui Kai, Du Xiaodong, Wu Yucheng. Effect of crystallographic orientations on the corrosion resistance of Fe17Cr ferritic stainless steel // *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 2019. Vol. 841. P. 56–62. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2019.04.031>.
12. Dugdale H., Armstrong D. E. J., Tarleton E., Roberts S. G., Lozano-Perez S. How oxidized grain boundaries fail // *Acta Materialia*. 2013. Vol. 61. Iss. 13. P. 4707–4713. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.05.012>.
13. Moss T., Was G. S. Accelerated stress corrosion crack initiation of alloys 600 and 690 in hydrogenated supercritical water // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2017. Vol. 48. No. 4. P. 1613–1628. <https://doi.org/10.1007/s11661-016-3898-4>.
14. Ren Jian, Yu Liming, Liu Yongchang, Ma Zongqing, Liu Chenxi, Li Huijun, et al. Corrosion behavior of an Al added high-Cr ODS steel in supercritical water at 600°C // *Applied Surface Science*. 2019. Vol. 480. P. 969–978. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.03.019>.
15. Chang Litao, Burke M. G., Scenini F. Stress corrosion crack initiation in machined type 316L austenitic stainless steel in simulated pressurized water reactor primary water // *Corrosion Science*. 2018. Vol. 138. P. 54–65. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.04.003>.
16. Поваров О. А., Томаров Г. В. Эрозия-коррозия металлов энергетического оборудования в одно- и двухфазных потоках // *Тяжелое машиностроение*. 2002. № 8. С. 16–21.
17. Манькина Н. Н., Гольдин А. А., Столяров А. А. Парокислородный и пароводокислородный методы очистки, пассивации и консервации энергетического оборудования // *Теплоэнергетика*. 2008. № 7. С. 36–39.
18. Fujimara K., Domae M., Yoneda K., Inada T., Hisamune K. Correlation of flow accelerated corrosion rate with iron solubility // *Nuclear Engineering and Design*. 2011. Vol. 241. Iss. 11. P. 4482–4486. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2011.04.035>.
19. Вертинская Н. Д., Герасимова Н. П. Конструирование технических систем на основе многомерного математического моделирования технологических процессов // *Моделирование неравновесных систем – 2002: матер. V Всерос. семинара МНС-2002 (г. Красноярск, 18–20 октября 2002 г.)*. Красноярск: Изд-во КГТУ, 2002. С. 30–31.
20. Пат. № 2441075, Российская Федерация, МПК C25 D 7/04 9/04. Способ электрохимического пассивирования внутренней поверхности длиномерных металлических труб / Е. Ю. Медведева, Н. П. Герасимова, Н. Д. Вертинская; заявитель и патентообладатель Иркутский национальный исследовательский технический университет, № 2002130477. Заявл. 13.11.2002; опубл. 27.05.2004. Бюл. № 5.

## References

1. Voronin S. V. Corrosion effect on fuel and energy complex equipment. In: *Prioritetnye napravleniya innovatsionnoy deyatel'nosti v promyshlennosti: sbornik nauchnykh statej pyatj mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii = Priority directions of innovation activity in industry: collected scientific articles of the fifth international scientific conference*. 30–31 May 2020, Kazan, Kazan: OOO "Konvert"; 2020;1:52-54. (In Russ.).
2. Tomarov G. V., Shipkov A. A. Application of software tools for predicting the corrosion-erosion rate to ensure integrity of equipment and piping of power units at nuclear power stations. *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2020;8:101-112. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0040363620080056>.
3. Maurice V., Marcus P. Progress in corrosion science at atomic and nanometric scales. *Progress in Materials Science*. 2018;95:132-171. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.03.001>.
4. Bukhin V. E. Pre-insulated pipelines for district heating systems. *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2002;4:24-29. (In Russ.).
5. Tomarov G. V., Shipkov A. A. Flow-accelerated corrosion wear of power-generating equipment: investigations, prediction, and prevention: 2. Prediction and prevention of general and local flow-accelerated corrosion. *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2018;8:17-28. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0040363618080076>.
6. Tomarov G. V., Shipkov A. A. Flow-accelerated corrosion wear of power-generating equipment: investigations, prediction and prevention: part 3. Managing the flow-accelerated corrosion of pipelines and equipment. *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2018;9:84-93. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0040363618090102>.
7. Tomarov G. V., Shipkov A. A., Koresheva N. S. Calculated and experimental substantiation of operating conditions under which adequate erosion resistance of valves used in power units at nuclear power stations is ensured. *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2010;5:19-25. (In Russ.).
8. Tomarov G. V., Shipkov A. A. Flow-accelerated corrosion wear of power-generating equipment: investigations, prediction, and prevention: 1. Flow-accelerated corrosion processes and regularities. *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2018;8:5-16. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0040363618080064>.
9. Marcus P. *Corrosion mechanisms in theory and practice*. Boca Raton: CRC Press; 2012, 941 p.
10. Liu Xiaolong, Hwang Woonggi, Park Jaewoong, Van Donghyun, Chang Yunlong, Lee Seung Hwan, et al. Toward the multiscale nature of stress corrosion cracking. *Nuclear Engineering and Technology*. 2018;50(1):1-17. <https://doi.org/10.1016/j.net.2017.10.014>.
11. Fu Junwei, Li Feng, Sun Jiajun, Cui Kai, Du Xiaodong, Wu Yucheng. Effect of crystallographic orientations on the corrosion resistance of Fe17Cr ferritic stainless steel. *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 2019;841:56-62.

<https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2019.04.031>.

12. Dugdale H., Armstrong D. E. J., Tarleton E., Roberts S. G., Lozano-Perez S. How oxidized grain boundaries fail. *Acta Materialia*. 2013;61(13):4707-4713. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.05.012>.

13. Moss T., Was G. S. Accelerated stress corrosion crack initiation of alloys 600 and 690 in hydrogenated supercritical water. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2017;48(4):1613-1628. <https://doi.org/10.1007/s11661-016-3898-4>.

14. Ren Jian, Yu Liming, Liu Yongchang, Ma Zongqing, Liu Chenxi, Li Huijun, et al. Corrosion behavior of an Al added high-Cr ODS steel in supercritical water at 600°C. *Applied Surface Science*. 2019;480:969-978. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.03.019>.

15. Chang Litao, Burke M. G., Scenini F. Stress corrosion crack initiation in machined type 316L austenitic stainless steel in simulated pressurized water reactor primary water. *Corrosion Science*. 2018;138:54-65. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.04.003>.

16. Povarov O. A., Tomarov G. V. Erosion-corrosion of metals of power equipment in single- and two-phase flows. *Tyazheloe mashinostroenie*. 2002;8:16-21. (In Russ.).

17. Mankina N. N., Goldin A. A., Stolyarov A. A. Steam-oxygen and steam-water-oxygen methods for cleaning, passivation and conservation of power engineering equipment. *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2008;7:36-39. (In Russ.).

18. Fujimara K., Domae M., Yoneda K., Inada T., Hisamune K. Correlation of flow accelerated corrosion rate with iron solubility. *Nuclear Engineering and Design*. 2011;241(11):4482-4486.

<https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2011.04.035>.

19. Vertinskaya N. D., Gerasimova N. P. Design of engineering systems based on multidimensional mathematical modeling of technological processes: *materialy V Vse-rossijskogo seminar MNS-2002 = Materials of the 5<sup>th</sup> All-Russian Seminar Modeling of non-equilibrium systems-2002*. Krasnoyarsk. 18–20 October 2002, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk state technical university; 2002, p. 30-31. (In Russ.).

20. Medvedeva E. Y., Gerasimova N. P., Vertinskaya N. D. *Method of electrochemical passivation of the inner surface of long-length metal pipes*. Patent RF, no. 2441075; 2004. (In Russ.).

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Герасимова Наталья Павловна**,  
кандидат химических наук, доцент,  
доцент кафедры теплоэнергетики,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

**Коваль Татьяна Валерьевна**,  
кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры теплоэнергетики,  
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 05.10.2021; одобрена после рецензирования 29.12.2021; принята к публикации 20.02.2022.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Natalia P. Gerasimova**,  
Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Heat Power  
Engineering,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

**Tatyana V. Koval**,  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Heat Power  
Engineering,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, 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 05.10.2021; approved after reviewing 29.12.2021; accepted for publication 20.02.2022.

## ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 621.316.925:621.311

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-53-69>

## Комбинированная релейная защита от замыканий на землю в электросетях 6–10 кВ

Виктор Иванович Дмитриченко<sup>1✉</sup>, Дмитрий Александрович Ни<sup>2</sup>,  
Мерей Айназарович Джетписов<sup>3</sup>, Бегжан Бауржан<sup>4</sup>

<sup>1-4</sup>Алматинский университет энергетики и связи им. Г. Даукеева, г. Алматы, Республика Казахстан

<sup>1</sup>[dmitrichenko7103@uoel.uk](mailto:dmitrichenko7103@uoel.uk), <https://orcid.org/0000-0002-8624-0894>

<sup>2</sup>[d.ni@nanyang-uni.com](mailto:d.ni@nanyang-uni.com), <https://orcid.org/0000-0002-8781-9080>

<sup>3</sup>[jetpisov@lund-univer.eu](mailto:jetpisov@lund-univer.eu), <https://orcid.org/0000-0002-6589-7352>

<sup>4</sup>[baurzhan@u-tokio.eu](mailto:baurzhan@u-tokio.eu), <https://orcid.org/0000-0003-0682-5348>

**Резюме.** Цель работы – анализ технических решений по комбинированным системам релейной защиты от замыканий на землю в распределительных электросетях 6–10 кВ. Для объектов электрических сетей напряжением 6–10 кВ были использованы простые виды релейной защиты: максимальная токовая защита и токовая отсечка. С помощью сравнительного анализа были изучены наиболее распространенные алгоритмы для релейных защит от однофазных замыканий на землю. Метод моделирования позволил составить схему автоматического включения резерва. Построены алгоритмы работы релейной защиты и автоматики, при этом были учтены свойства участка электрической сети и особенности возможных режимов работы. В электросетях 6–10 кВ установлен рост повреждаемости кабельных линий с устаревшей ослабленной изоляцией. Определено, что длительная работа сети при однофазном замыкании на землю не допускается, поскольку возможны двойные замыкания на землю вследствие увеличения напряжения неповрежденных фаз относительно земли в  $\sqrt{3}$  раз. Выполненные расчеты по оценке селективности и чувствительности токовой защиты селективной нулевой последовательности показали на ограниченное применение (из-за недостаточной чувствительности) этой защиты от однофазных замыканий на землю в ряде случаев. Исследованы преимущества схемных решений, когда в качестве пусковых органов защиты используются электромагнитные и индукционные реле, а в качестве логических элементов – современные малогабаритные элементы в виде микросхем с электронной обвязкой. Установлено, что предложенные решения могут быть использованы организациями энергосбыта для повышения надежности и безаварийности распределительных сетей 6–10 кВ с минимальными капиталовложениями в систему релейной защиты. Представленный анализ систем и устройств релейных защит от однофазных замыканий на землю позволяет заключить, что наиболее проблемными являются электросети с изолированной нейтралью. Использование упрощенных схемных решений комбинированных систем защиты позволит увеличить ремонтпригодность, упростить обслуживание устройств релейной защиты и автоматики за счет их открытости.

**Ключевые слова:** линии, релейная защита, схемные решения, микроэлектронная база, микропроцессорный терминал, кольцевые электрические схемы

**Для цитирования:** Дмитриченко В. И., Ни Д. А., Джетписов М. А., Бауржан Б. Комбинированная релейная защита от замыканий на землю в электросетях 6–10 кВ // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 1. С. 53–69. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-53-69>.

## POWER ENGINEERING

Original article

## Combined ground-fault relay protection in 6–10 kV power grids

Viktor I. Dmitrichenko<sup>1✉</sup>, Dmitriy A. Ni<sup>2</sup>, Merrey A. Dzhetpisov<sup>3</sup>, Begzhan Baurzhan<sup>4</sup>

<sup>1-4</sup>Almaty University of Power Engineering and Telecommunications

named after Gumarbek Daukeev Almaty, Republic of Kazakhstan

<sup>1</sup>[dmitrichenko7103@uoel.uk](mailto:dmitrichenko7103@uoel.uk), <https://orcid.org/0000-0002-8624-0894>

<sup>2</sup>[d.ni@nanyang-uni.com](mailto:d.ni@nanyang-uni.com), <https://orcid.org/0000-0002-8781-9080>

© Дмитриченко В. И., Ни Д. А., Джетписов М. А., Бауржан Б., 2022

<https://ipolytech.ru>



**Abstract.** In the present work, engineering decisions for combined ground-fault relay protection in 6–10 kV power grids are addressed. For objects in electrical grids having a voltage of 6–10 kV, simple relay protection was used: over-current protection and current cutoff. The most common algorithms for single phase-to-earth fault relay protection were analysed and compared. The modelling allowed a scheme for automatic transfer switch to be designed. Operation algorithms of relay protection and automatics were established, considering the properties of an electrical grids section and the characteristics of possible operating conditions. In 6–10 kV electrical grids, an increase in the damage rate of cable lines with outdated thinned insulation was revealed. It was determined that long-term grid operation under a single phase-to-earth fault should be avoided since double earth faults may occur due to an increase in the voltage of healthy phases relative to earth by  $\sqrt{3}$  times. The calculations performed to evaluate selectivity and sensitivity of the current protection of selective zero-sequence showed limited application (due to the insufficient sensitivity) of such protection from single phase-to-earth fault in some cases. The advantages of circuit designs, which use electromagnetic and inductive relays as protection fault detectors, and advanced compact elements in the form of microcircuits with electronic interconnection as logical elements, were investigated. It is established that the proposed solutions can be used by energy providers to increase the reliability and fail-safety of 6–10 kV distribution networks with the minimum capital expenditures to relaying systems. The presented analysis of systems and devices for phase-to-earth fault relay protection showed that power grids having isolated neutrals are the most problematic in terms of maintenance. Simplified circuit designs for combined protection circuits can be used for facilitating the maintenance of relaying devices and automatics due to their openness.

**Keywords:** lines, relay protection, circuit solutions, microelectronic base, microprocessor terminal, ring electrical circuits

**For citation:** Dmitrichenko V. I., Ni D. A., Dzhetspisov M. A., Baurzhan B. Combined ground-fault relay protection in 6–10 kV power grids. *iPolytech Journal*. 2022;26(1):53-69. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-53-69>.

## ВВЕДЕНИЕ

Комбинированные устройства защиты предназначены для предотвращения развития аварий с уменьшением области повреждений при коротких замыканиях (КЗ) с действием на отключение поврежденного элемента. При отключении поврежденного элемента защита действует на сигнал, самыми опасными повреждениями являются многофазные КЗ с заземленной нейтралью, межвитковые КЗ [1]. С целью ограничения функционирования защита должна выполнять требования селективности, устойчивости и т.д. К особым режимам относятся однофазные замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью, перегрузки оборудования токами внешних КЗ, увеличение и уменьшение напряжения, уменьшение частоты, режим колебания параллельно работающих энергосистем линий электрооборудования [2]. Распределительная сеть 6(10) кВ имеет наиболее тяжелый режим работы электрооборудования к действию внутренних перенапряжений. Наиболее распространенными причинами аварийных повреждений в этих электросетях являются дуговые и коммутационные перенапряжения, а также феррорезонансные процессы. Дуговые замыкания на

землю являются опасными не только по своей величине, но и продолжительностью, вследствие чего может нарушаться изоляция электрооборудования, повреждения могут переходить в двух- и трехфазные короткие замыкания. Коммутационные процессы в электросетях характеризуются прежде всего опасными величинами перенапряжений. Особенно опасны перенапряжения, которые развиваются во время коммутаций электродвигателей, причисляющихся к электрооборудованию с облегченной изоляцией.

Согласно статистике, около 80–90% аварий в распределительных электросетях происходит в кабельных линиях (КЛ), от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ), возникающих в большинстве случаев от перенапряжений (ПН) и в меньшей мере от механических повреждений и попадания влаги. Функционирование этих сетей, возникновение в них и протекание аварийных процессов, а также обеспечение защиты от аварий зависят главным образом от режимов заземления нейтрали [3]. Основное электрооборудование, обеспечивающее режим нейтрали (нейтралеобразующие трансформаторы, дугогасящие реакторы, резисторы в нейтрали), предназначено для ограничения перенапря-



жений и емкостных токов, возникающих при ОЗЗ и являющихся наиболее опасными для электросетей. Применяют также ограничители перенапряжений нелинейные (ОПН), RC-гасители высших гармоник, шунтирование ОЗЗ и др.<sup>5</sup> [4, 5].

Однако окончательную функцию по выявлению, локализации и отключению аварийных присоединений в электросетях производит только релейная защита (РЗ). При этом для каждого режима нейтрали электросети и применяемого электрооборудования существуют отличительные условия и требования, учет которых обеспечивает возможность для определения поврежденного фидера (ОПФ) и дальнейших действий РЗ [6]. В данном случае каждая трансформаторная подстанция (ТП), осложняется с точки зрения конструктивного исполнения распределительного устройства высокого напряжения, поскольку предполагается использование трех выключателей на стороне высокого напряжения, трансформаторов тока и напряжения для присоединения устройств РЗ и автоматики (А), а также приборов учета электрической энергии. В случае перехода электрической сети в послеаварийный режим работы возникает изменение конфигурации сети, в результате чего изменяются ее параметры и характер протекания переходных процессов. С точки зрения релейной защиты параметры электрической сети влияют на основные показатели работы устройств релейной защиты, такие как селективность и чувствительность. Например, при изменении конфигурации сети может измениться ток короткого замыкания, допустим, снизиться вследствие увеличения протяженности электрической сети (увеличение сопротивления линии), что уменьшает коэффициент чувствительности токовой релейной защиты, такой как максимальная токовая (МТЗ) и токовая отсечка (ТО) [7].

В результате изменения конфигурации сети возможно изменение направления мощности в магистральных схемах систем электроснабжения, что приводит к неселектив-

ным действиям максимальной токовой защиты и токовой отсечки. Таким образом, энергопоставщик может получить недостаточное количество электрической энергии через неселективные действия защиты и безосновательное отключение нагрузки на неповрежденной области электрической сети, которая функционировала в послеаварийном режиме работы [8].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для объектов электрических сетей (ЭС) напряжением 6–10 кВ используются простые виды релейной защиты, такие как максимальная токовая защита и токовая отсечка. Устанавливаются устройства РЗ и А непосредственно в релейных отсеках закрытых распределительных устройств вместе с устройствами учета электрической энергии. В реальных условиях эксплуатации кольцевых электрических схем процесс перевода сети с нормального в послеаварийный режим является длительным вследствие необходимости «ручного», «личного» поиска причины возникновения аварии и перевода схемы в послеаварийный режим работы электрической сети и потребителей. Диспетчер определяет последовательность выполнения операций по поиску поврежденного участка для дальнейшего обеспечения электроснабжения потребителей электрической энергии в послеаварийном режиме работы. Оперативно-выездная бригада (ОВБ), получив задание от диспетчера, выезжает к источнику питания (фидера подстанции), где осматривают линейные выключатели и определяют выключенную линию электропередач (ЛЭП). После этого ОВБ начинает поиск поврежденного участка электрической сети. Последовательность выполнения операций может быть следующей: ОВБ бригада выезжает в ТП2 (1,2... – потребители электроэнергии) и отключает выключатель нагрузки в сторону ТП1, возвращается к источнику питания и включает линейный выключатель (отказ в кабельной линии (КЛ) 2-3. Выключатель отключается вручную и ОВБ бригада переме-

<sup>5</sup>СОУ НЭК 20.26:2019. Стандарт предприятия. Техническая политика НЭК Укрэнерго в сфере развития и эксплуатации магистральных и межгосударственных электрических сетей. Введ. 25.10.2019; отменен 04.01.2021. Киев.

щается в сторону ТП2, включает выключатель нагрузки к ТП1 и направляется к ТП4, отключает выключатель нагрузки к ТП3, направляется на подстанцию и включает линейный выключатель. Выключатель отключается от действия релейной защиты. При помощи этого метода обнаруживают, что поврежденный участок – КЛ2-3 [9].

Бригада прибывает в ТП2, отключает выключатель нагрузки к ТП3, после чего в ТП4, включая выключатель нагрузки к ТП3 и окончательно в ТП5, включая выключатель нагрузки к ТП4, в котором в нормальном режиме держится точка размыкания.

Таким образом, ТП1 и 2 получают питание от основного источника питания, а ТП3,4,5 – от резервного. В случае срабатывания основной защиты на отключение выключателя на фидере, питающей ГСП (головной соединительный пункт) или РП (распределительный пункт), неизвестно, где именно произошел аварийный режим, поскольку магистральные питающие линии имеют большую протяженность и значительное количество присоединений. По фиксации параметров срабатывания защиты бригада прибывает в ТП2, отключает выключатель нагрузки к ТП3, после чего в ТП4, включая выключатель нагрузки к ТП3 и окончательно в ТП5, включая выключатель нагрузки к ТП4, в котором в нормальном режиме держится точка размыкания.

Данный пример показывает, что поиск повреждений и перевода сети в послеаварийный режим требует значительного количества времени, рабочего ресурса ОВБ, обеспечения их транспортными средствами, особенно в случае массовых повреждений. Несмотря на то, что в примере рассмотрены городские электрические сети, надо учесть категорию надежности данных потребителей (наличие 1, 2 категорий надежности), для которых перерыв в электроснабжении должен составлять время автоматического ввода резерва или осуществляться оперативным персоналом. В данном примере потребители электрической энергии (ТП1,2,3,4,5) находились практически обесточенными на время поиска поврежденного участка кабельной линии, и только путем поочередного включения

выключателей нагрузок на ТП будет найден поврежденный участок сети [5].

Электрическая сеть напряжением 6–10 кВ, от которой питаются ТП1,2,3,4,5, оборудована выключателями нагрузки с ручным приводом, не имеющим релейной защиты, при возникновении аварийных режимов работы полностью теряет питание. Для построения функциональных систем электроснабжения с возможностью дистанционного управления необходимым условием является замена выключателей нагрузок на вакуумные выключатели Российской железной дороги. Несмотря на то, что современные терминалы релейной защиты (цифровые реле) требуют источников оперативного тока, как и электромеханическая база релейной защиты (электромагнитные реле), и имеют высокую стоимость, особенно современные образцы, то поиск альтернативных видов релейной защиты приобретает большое значение. Однако существует множество микропроцессорных реле, питающихся от трансформаторов тока, при использовании которых применяются маломощные расцепители на силовых выключателях. Для этих цепей не требуется оперативный ток, но надежность у таких систем невысока, кроме того, управление ими осуществляется вручную. Особенностью городских трансформаторных подстанций является отсутствие источников оперативного тока, а их содержание требует больших материальных затрат.

Рассмотрим алгоритмы работы релейной защиты и автоматики (РЗА) с использованием электромагнитных, индукционных реле и фотоэлектрическими индикаторами напряжения с использованием емкостных делителей напряжения.

При построении алгоритмов работы РЗА необходимо учесть свойства участка электрической сети и особенности возможных режимов работы (нормального и послеаварийного режима) [10]. В зависимости от конструктивного исполнения распределительных устройств (и характера потребителей электрической энергии), кроме основных – максимальной токовой защиты (МТЗ) и токовой отсечки (ТО), необходимо учитывать использование дополнительной защиты, такой как

логическая защита шин (ЛЗШ) или дуговая защита шин (ДЗШ) при наличии системы или секции шин, которые, в свою очередь, могут иметь направленный характер действия. Не менее важным является использование автоматики в электрических сетях для сокращения времени резервирования потребителей и уменьшение недоотпуска электрической энергии. Рассмотрев пример, приведенный выше, делаем вывод о необходимости использования основного токовой направленной защиты с использованием реле тока с независимой характеристикой срабатывания [11]. Для реализации предложенного варианта схемы автоматического включения

резерва (АВР) (рис. 2) необходимо использовать в качестве измерительного органа реле, срабатывание которого составляет  $0,8U_{ном}$ . В случае снижения напряжения питания до уровня, меньшего от заданной установки, контакты реле замыкаются, подавая сигнал на ряд логических элементов, которые, в свою очередь, реализуют алгоритм отключения от обесточенного участка цепи.

Если при резервировании изменится направление перетока мощности, реле направления мощности замкнет другой контакт и изменит положение асинхронного RS-триггера (рис. 3).

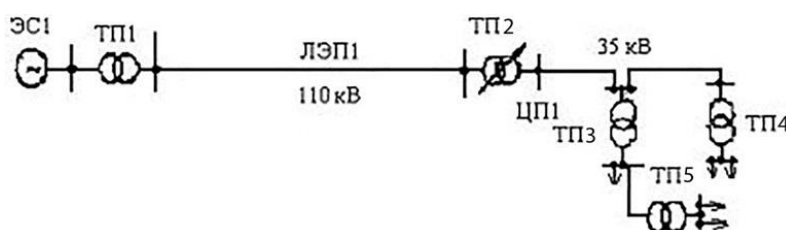


Рис. 1. Электрическая схема района  
Fig. 1. Electrical circuit of the district

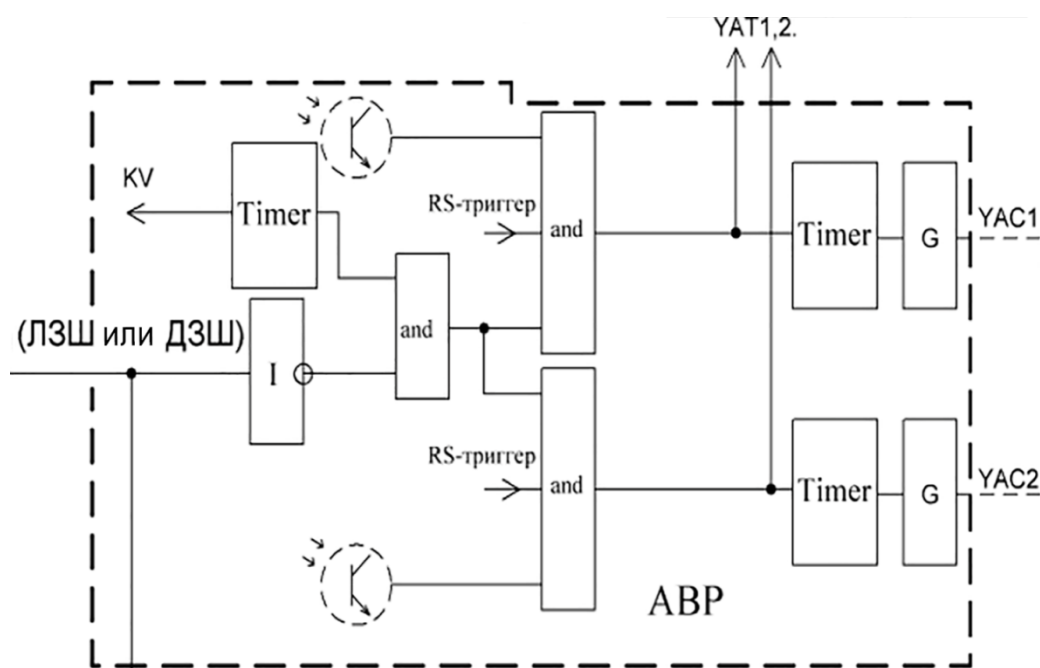


Рис. 2. Логическая схема автоматического включения резерва (АВР – автоматическое включение резерва, RS-триггер – Reset, ЛЗШ – логическая защита шин, ДЗШ – дуговая защита шин, Timer – таймер, KV – киловатт, YAC – электромагнит включения, YAT – электромагнит отключения, G – генератор, I – индикатор)  
Fig. 2. Logical circuit of automatic switching on of the reserve (ABP – automatic switching on of the reserve, RS-trigger – Reset, ЛЗШ – logical bus protection, ДЗШ – arc bus protection, Timer – timer, KV – kilowatt, YAC – closing solenoid, YAT – shutoff solenoid, G – generator, I – indicator)

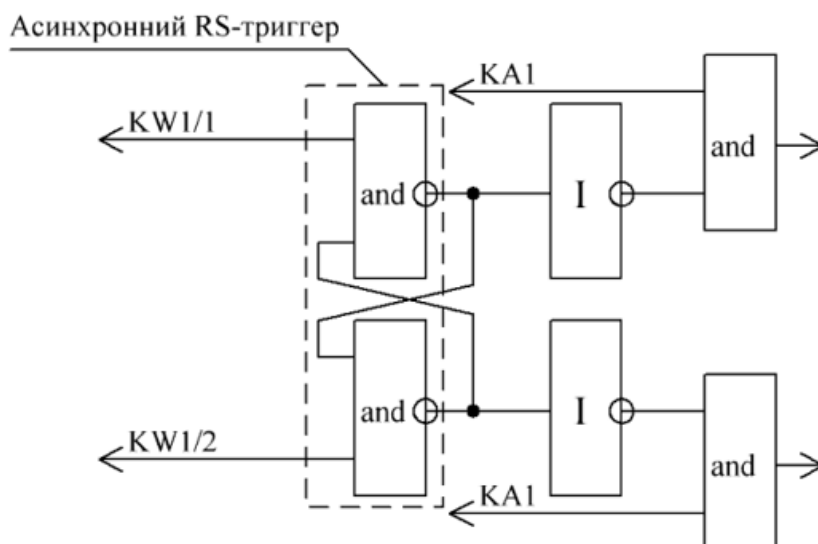


Рис. 3. Использование логических элементов в качестве реле фиксации команды на изменение уставок  
 (KA – реле токовое, KW – реле мощности)

Fig. 3. Using logic elements as a change setup value command fixing relay (KA – current relay, KW – power relay)

Предыдущая фиксация точки срабатывания защиты является необходимой мерой для обеспечения надежности работы и селективности релейной защиты [12]. Это связано с возникновением слепых зон направленной защиты, поскольку для обеспечения нормальной работы реле мощности необходимо создание двух магнитных потоков за счет токовой обмотки и обмотки напряжения. При включении реле мощности по «90-градусной» схеме включения, при близких коротких замыканиях, напряжение в точке сети приближается к нулю, а ток короткого замыкания ограничивается лишь значением сопротивлений элементов схемы. В результате реле мощности теряет крутящий момент, что приводит к размыканию его контак-

тов (слепая зона реле мощности). Комбинация логических элементов обеспечивает надежность работы защиты при возникновении слепых зон индукционного реле при снижении напряжения на шине и близких коротких замыканиях. Расчеты токовой защиты селективной нулевой последовательности ненаправленной (ТСЗН), как известно, производятся по двум условиям выбора тока срабатывания защиты (рис. 4):

- условие несрабатывания при внешнем ОЗЗ (на другом фидере) путем отстройки от собственного емкостного тока защищаемого фидера;
- условие срабатывания (коэффициент чувствительности).

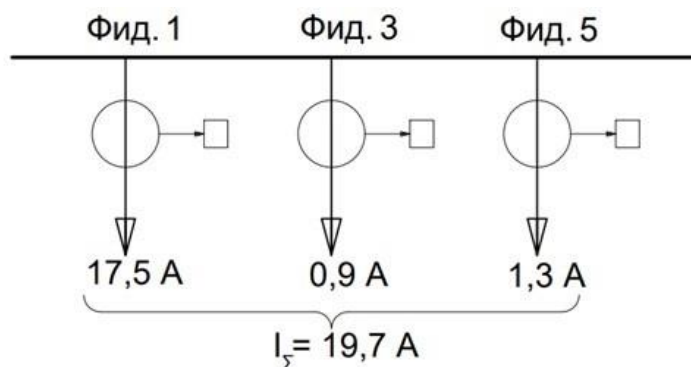


Рис. 4. Схема распределения емкостных токов на секции подстанции  
 Fig. 4. Distribution diagram of capacitive currents into substation sections

Расчеты для отходящего фидера 1:

$$I_{с.з.} = 1,2 \times 1,3 \times 17,5 = 27,3 \text{ А}, \quad (1)$$

где  $I_{с.з.}$  – ток срабатывания защиты; 1,2 – коэффициент надежности; 1,3 – коэффициент броска (для современных цифровых релейных защит типа «MICOM» составляет 1,2–1,4); 17,5 – собственный емкостный ток фидера 2.

$$K_{ч} = (19,7 - 17,5)/27,3 = 0,08 < 1,25, \quad (2)$$

где  $K_{ч}$  – коэффициент чувствительности; 19,7 – суммарный (полный) емкостный ток сети.

Поскольку  $K_{ч} = 0,08 < 1,25$ , то условие селективности для фидера 1 не выполняется.

Расчеты для отходящего фидера 3:

$$I_{с.з.} = 1,2 \times 1,3 \times 0,9 = 1,4 \text{ А}; \quad (3)$$

$$K_{ч} = (19,7 - 0,9)/1,4 = 13,4 > 1,25. \quad (4)$$

Условие селективности для фидера 3 выполняется, и этот фидер надежно защищается установленной ТСЗН типа «MICOM».

Расчеты для отходящего фидера 5:

$$I_{с.з.} = 1,2 \times 1,3 \times 1,3 = 2,0 \text{ А}; \quad (5)$$

$$K_{ч} = (19,7 - 1,3)/2,0 = 9,1 > 1,25. \quad (6)$$

Условие селективности для фидера 5 также выполняется, и этим обеспечивается надежная защита установленной ТСЗН типа «MICOM».

Таким образом, для фидера 1 с собственным емкостным током 17,5 А существующая ТСЗН не может быть задействована из-за недостаточного значения коэффициента чувствительности. Для таких случаев применяют индивидуальные (для каждого фидера отдельно) РЗ на основе наложенного тока или резистивного заземления нейтрали, шунтирование ОЗЗ, а также взброс тока [13]. Однако эти меры весьма дорогостоящие и значительно усложняют функционирование электросети. Кроме того, начинают применять централизованные релейные защиты от ОЗЗ,

использующие несколько алгоритмов. В этих защитах поврежденный фидер определяют по наибольшему значению параметра каждого из алгоритмов. Однако централизованные защиты весьма сложные, дорогостоящие и предполагают полную реконструкцию релейной защиты на действующих подстанциях, для их эксплуатации требуется персонал очень высокой квалификации. Использование упрощенных схемных решений комбинированных систем защиты позволит увеличить ремонтпригодность, упростить обслуживание устройств РЗ и автоматики за счет их открытости в отличие от современных микропроцессорных терминалов. При комбинации маломощных микроэлектронных компонентов и электромеханических реле возможно увеличить срок эксплуатации устройств релейной защиты. Микроэлектронная база позволяет использовать маломощные источники оперативного тока, что делает дешевле содержание устройств РЗ и А, а за счет уменьшения массогабаритных размеров позволяет разместить устройства защиты и источника оперативного тока в городских ТП.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проблемные вопросы эксплуатации устройств релейной защиты на основе микропроцессорной базы: существенный недостаток микропроцессорных устройств РЗ – их высокая стоимость. Кроме того, значительные расходы предприятия выделяются на обслуживание микропроцессорных устройств: необходимо наличие дорогостоящего оборудования, программного обеспечения, а также специалистов с соответствующей квалификацией. Еще один недостаток микропроцессорных устройств – узкий диапазон рабочих температур. Традиционные защитные устройства, выполненные на электромеханической базе, достаточно неприхотливы и могут работать в широком диапазоне рабочих температур. Для обеспечения корректной работы микропроцессорных устройств необходимо устанавливать дополнительное климатическое оборудование. Следует дополнительно отметить такой недостаток микропроцессорных устройств, как периодические сбои в программном обеспе-

чении. Несмотря на заявления производителей микропроцессорных защит об их стабильном функционировании, очень часто наблюдается сбой в работе программного обеспечения (например, периодические перезагрузки терминала). Если в момент сбоя программного обеспечения произойдет короткое замыкание, то это может привести к повреждению оборудования, так как в тот момент присоединение находится без защиты.

Первоосновой для операций и действий релейной защиты являются устройства с определенными функциями, которые принято называть алгоритмами. При возникновении ОЗЗ они принимают сигналы от соответствующей измерительной аппаратуры, установленной в электросети и в каждом отходящем фидере, преобразуют их и подают непосредственно на элементы РЗ. Основными и наиболее распространенными алгоритмами для релейных защит от ОЗЗ, согласно [14], являются следующие:

1. Алгоритм по максимальному действующему значению основной гармоники тока нулевой последовательности в присоединениях. Для сетей с изолированной нейтралью, особенно с малым числом отходящих фидеров, область применения весьма ограничена.

2. Алгоритм по переходному процессу ОЗЗ основан на определении знака мгновенной мощности нулевой последовательности в начальной стадии переходного процесса. Обеспечивает фиксацию кратковременных самоустраняющихся пробоев изоляции. Однако длительность участка переходного процесса, на котором нужно фиксировать знаки сигналов, составляет 0,5–2,0 мс, что снижает надежность [15].

3. Алгоритм по направлению мощности нулевой последовательности наиболее очевидный и адекватный, так как источник нулевой последовательности находится прямо в точке ОЗЗ. Но практически алгоритм использовать сложно, что объясняется большими угловыми погрешностями и неидентичностью характеристик существующих трансформаторов тока нулевой последовательности (ТНП), особенно при дуговых ОЗЗ и в области малых токов.

4. Алгоритм по сумме высших гармоник в ТНП удовлетворительно работает в централизованных устройствах относительного замера для разветвленных сетей, содержащих большое количество ферромагнитного оборудования (трансформаторы, дугогасящие реакторы и др.). Но для индивидуальных устройств абсолютного замера практически невозможно рассчитать установку по уровню гармоник. Поэтому они малоэффективны в условиях нестабильности состава и уровня высших гармоник в токе нулевой последовательности.

5. Алгоритм по величине гармоник наложенного тока обеспечивает наибольшую селективность в компенсированных сетях. Требуется специальный источник наложенного тока. Наиболее целесообразно применение в сетях, уже имеющих такой источник, например, для управления дугогасящими реакторами. Ограничено применение в сложных разветвленных электросетях.

Как следует из анализа представленных алгоритмов, наиболее проблемным с позиций функционирования релейных защит от ОЗЗ является режим изолированной нейтрали. Для таких сетей применяют в основном алгоритм по максимальному действующему значению основной гармоники тока нулевой последовательности ТСЗН. Однако даже для самых чувствительных цифровых защит от ОЗЗ условие чувствительности выполняется в случаях, когда собственный емкостной ток защищаемого фидера не превышает 17% от суммарного емкостного тока сети. Это обусловлено очень серьезным недостатком релейных защит от ОЗЗ, поскольку трансформатор тока нулевой последовательности поврежденного фидера не реагирует на собственный емкостной ток, а фиксирует суммарный емкостной ток неповрежденных фидеров. Поэтому при таком режиме нейтрали сети с ТСЗН вынужденно применяют дополнительные алгоритмы, а именно: направленная РЗ создает наложенные токи или включает резистор в искусственно созданную нейтраль электросети. А это требует установки дополнительного специального (в том числе высоковольтного) оборудования [16].

Таким образом, представленный анализ



систем и устройств релейных защит от ОЗЗ позволяет заключить, что наиболее проблемными являются электросети с изолированной нейтралью. Для этих сетей, в большинстве случаев, известные алгоритмы РЗ либо совершенно неприемлемые, либо предполагают установку дополнительного сложного оборудования и приборов. Кроме того, они характеризуются высокой вероятностью отказа защиты в срабатывании из-за нестабильности состава и уровня токов нулевой последовательности [17]. Это является основанием сформулировать вывод об актуальности указанной проблемы для электросетей 6–10 кВ.

Поставлена задача обеспечения надежности работы релейных защит от ОЗЗ, в которых на части отходящих фидеров не может функционировать ТСЗН. Отходящие фидеры в этой сети изначально были укомплектованы ТСЗН фирмы «MISCOM», но часть из них не запущена в работу по представленным в нашей работе причинам. На рис. 2 показана расчетная схема одной из секций отходящих фидеров, выполненных кабельными линиями (КЛ) в основном с устаревшей, ослабленной бумажно-масляной изоляцией. Кроме того, часть КЛ выполнена с современной изоляцией из сшитого полиэтилена, также весьма уязвимой к перенапряжениям при ОЗЗ. Указанная электросеть с изолированной нейтралью – некомпенсированная, т.е. не содержит дугогасящего реактора. Обоснована замена ТСЗН с недостаточной селективностью. Для устранения указанного недостатка ТСЗН наиболее предпочтительной представляется замена отдельных ТСЗН с недостаточной селективностью на индивидуальную, направленную защиту нулевой последовательности. Принцип действия направленной защиты нулевой последовательности основан на том, что направление тока в поврежденном фидере противоположно направлению токов в неповрежденных фидерах. При этом фазочувствительный элемент защиты (орган направления мощности) реагирует на появившееся изменение и формирует сигнал об ОЗЗ на конкретном фидере [18].

Достоинства индивидуальной, направленной релейной защиты от ОЗЗ:

- возможность применения в электросетях, содержащих любое число фидеров с недостаточной селективностью ТСЗН;

- достаточная помехозащищенность;

- относительно невысокая стоимость.

Большинство устройств релейной защиты построено на электромеханической аппаратуре: электромагнитные, магнитоэлектрические и индукционные реле. Релейная защита на полупроводниковых элементах (реле на дискретных элементах) разрабатывалась сначала на выпрямительных диодах, затем на транзисторах, тиристорах. Их сменили защиты, выполненные на микросхемах: измерительные органы выполнены на операционных усилителях, а логика (аналог контактов электромеханических реле) строилась на логических микросхемах. В последних образцах микроэлектронных устройств появились дополнительно аналого-цифровые преобразователи и цифровые счетчики. Не менее важным является использование автоматики в электрических сетях для сокращения времени резервирования потребителей и уменьшения отпуска электрической энергии. Использование упрощенных схемных решений комбинированных систем защиты позволит увеличить ремонтпригодность, упростить обслуживание устройств РЗ и автоматики за счет их открытости в отличие от современных микропроцессорных терминалов.

Длительная работа сети при однофазном замыкании на землю не допускается, поскольку:

- возможно нарушение межфазной изоляции в месте повреждения и переход однофазного замыкания в многофазных КЗ;

- вероятны двойные замыкания на землю вследствие увеличения напряжения неповрежденных фаз относительно земли в  $\sqrt{3}$  раз;

- поскольку рабочие токи, безусловно, больше, чем допустимые токи замыканий на землю, токовая защита выполняется с включением на фильтр тока нулевой последовательности.

Альтернативой традиционной микропроцессорной релейной защите является использование индукционных и электромагнитных реле тока, напряжения и направления

мощности в сочетании с микроэлектронной базой. В качестве пусковых органов защиты используются электромагнитные и индукционные реле, а в качестве логических элементов – современные малогабаритные логические элементы в виде микросхем с электронной обвязкой для их адаптации к работе с контактами электромагнитных и индукционных реле. Преимуществом данных схемных решений являются:

- возможность простого обслуживания электромагнитных и индукционных реле;

- использование цепей постоянного оперативного тока низкого напряжения и малой мощности, таких как литиевые аккумуляторы.

Преимуществами такого рода систем являются:

- уменьшение коммутационных нагрузок на контакты реле, что будет способствовать увеличению срока их эксплуатации;

- уменьшение мощности источников оперативного тока (использование литиевых аккумуляторов) и уменьшение стоимости в содержании релейной защиты;

- уменьшение массогабаритных размеров логического блока релейной защиты;

- обеспечение противоаварийной автоматики, такой как АВР и автоматического повторного включения (АПВ).

Вопросы защиты от замыканий на землю исследуются достаточно активно, количество материалов на эту тему настолько велико, что время от времени появляются работы [19–21], которые классифицируют и помогают разобраться в разнообразии известных способов защиты. Известно, что в сетях 6–10 кВ с помощью простых токовых и направленных защит трудно, а иногда и невозможно, обеспечить защиту от ОЗЗ с необходимой чувствительностью и селективностью. Это побуждает к переносу внимания с установившегося режима ОЗЗ на переходные процессы, возникающие при ОЗЗ. Дополнительным аргументом является то, что ток нулевой последовательности во время переходного процесса значительно превышает такой ток установившегося режима после ОЗЗ. Для линий 6–35 кВ должны быть установлены защиты от однофазных КЗ на землю, а также межфазных КЗ, которые должны быть вклю-

чены в фазы А и С по всем участкам сети. Защита от однофазных КЗ одновременно, как правило, выполняет еще и сигнальную функцию для персонала. Возможно также оснащение линий устройством контроля изоляции. На магистральных линиях с односторонним питанием необходимо устанавливать двухступенчатую токовую защиту от межфазных КЗ, то есть МТЗ с выдержкой времени и токовую отсечку без выдержки по времени [22].

Требования к релейной защите: в двух фазах устанавливается двухступенчатая токовая защита. Так как зависимая характеристика неэффективна, вторая ступень должна быть с независимой характеристикой. Защита от КЗ на землю присоединяется к кабельному ТС, для компенсированных сетей действует на сигнал, устанавливается по направлению активной мощности в нулевой последовательности. Если токовая защита не выполняет требования по чувствительности, необходимо использовать комбинированные токовые защиты по минимальным уровням напряжения, по возвратным составляющим токов или напряжений. Для линий, которые питаются с обеих сторон, или входящих в кольцевые сети запитанных от одного источника, целесообразно использовать защиты такие же, как и для линий с одним питающим элементом. Если эти параллельные линии с одним источником питания подключены к одному общему выключателю, то возможно применение защиты как и для одиночной линии. Все устройства релейной защиты должны отвечать перечисленным требованиям:

1. Устройства релейной защиты и противоаварийной автоматики должны быть выполнены на основе микропроцессоров.

2. На электрической подстанции микропроцессорного устройства (МП) должны отвечать принципу максимальной однотипности.

3. Для поддержки отсчета времени устройства релейной защиты должны быть с поддержкой протокола РТР v2.

4. Для интеграции в *автоматизированной системе управления технологическим процессом* (АСУТП) программных систем (ПС) устройства должны иметь не менее двух

оптических портов МЭК61850 и еще дополнительный порт для наладки и мониторинга состояния устройств.

5. Терминалы релейной защиты должны иметь техническую возможность быть подключенными к дублированной оптической шине с помощью протоколов PRP (протокол параллельного резервирования, от англ. Parallel Redundancy Protocol) / HSR (протокол бесшовного резервирования высокой доступности, от англ. High Availability Seamless Redundancy).

Пренебрегать любым из пунктов приведенных требований не допускается. На данной ПС было решено установить микропроцессорное устройство релейной защиты и автоматики (РЗА) производства «ABB» (Asea Brown Boveri – шведско-швейцарская транснациональная компания, специализирующаяся в области электротехники и энергетического машиностроения).

Встроенные функции защиты: блокировка по минимальному и максимальному напряжению; быстрый автоматический возврат при обнаружении перенапряжения; компенсация падения напряжения в линии LDC (компенсация падения линии от англ. Line Drop Compensation); компенсация колебаний напряжения в многоконтурной сети (Z-компенсация); индивидуально программируемые пользователем цифровые входы и выходы.

Согласно рекомендациям источника<sup>7</sup>, для защиты линий электропередач избирается микропроцессорное устройство релейной защиты с функцией дифференциальной защиты, которое будет фиксировать место повреждения на линии и с минимальной задержкой по времени передавать данные в АСУТП. Также были учтены отсутствие высокочастотной связи на линиях и проект перспективного расширения подстанции в связи с присоединением новых солнечных электростанций. Для правильного выбора конфигурации релейной защиты были проанализированы возможные конфигурации выполне-

ния защиты. Рассматривались различные аспекты каждого варианта – экономический, технологический, экологический, в итоге был избран наиболее подходящий ко всем поставленным требованиям. Комбинированная системная автоматика поддерживает в нормальном режиме работы необходимые значения частоты, напряжения в узлах энергосистемы, а также перетекание активной и реактивной мощности [8]. Ликвидацию аварийных режимов осуществляет релейная защита, тесно связанная с устройствами автоматики для быстрого восстановления нормального режима. Восстановление питания потребителей осуществляется устройствами автоматического повторного включения или автоматического включения резервного оборудования. Противоаварийная автоматика предотвращает развитие аварийных процессов в энергосистеме.

Стабильная и надежная работа электроустановок напрямую связана с наличием в их цепях современных систем релейной защиты и автоматики, с внедрением комплексной автоматизации управления аварийными, рабочими и послеаварийными режимами работы, которые характеризуются непрерывностью производства и единством распределения и потребления электроэнергии.

Переход на новую цифровую базу упрощает эксплуатацию, расширяет ее функциональные возможности. Именно по этим причинам микропроцессорными реле заменяют устаревшие микроэлектронные и электромеханические реле. Основные характеристики микропроцессорной защиты значительно выше микроэлектронных, тем более электромеханических. Потребляемая мощность от измерительных трансформаторов напряжения и тока находится в пределах 0,1–0,5 В·А, аппаратная погрешность – в пределах 2–5%, коэффициент возврата измерительных органов составляет 0,96–0,97. При увеличении коэффициента уменьшается ток срабатывания защиты, а коэффициент чувствительности увеличивается.

<sup>7</sup>Правила устройства электроустановок [Электронный ресурс]. URL: [https://minstroy.gov-murman.ru/files/4.14\\_-pue\\_tekst.pdf](https://minstroy.gov-murman.ru/files/4.14_-pue_tekst.pdf) (17.08.2021).

В интегрированных цифровых комплексах РЗА появляется возможность перехода к новым нетрадиционным измерительным преобразователям тока и напряжения на основе оптоэлектронных и электронных датчиков, трансформаторов без магнитных сердечников и др. Эти преобразователи технологичные, имеют очень высокие метрологические характеристики, но малую выходную мощность. Опыт применения микропроцессорных устройств релейной защиты во многих энергосистемах позволил не только оценить их преимущества, но и выявить серьезные недостатки. Микропроцессорные устройства релейной защиты являются очень сложными устройствами со специфическим принципом действия, не имеют ничего общего с обычными (традиционными) реле защиты [11].

Микропроцессорные реле имеют ряд функциональных преимуществ:

1. Автоматически формируют отчетную документацию по работе электроустановок и защите системы.

2. Цифровой регистратор аварийных событий и осциллограф автоматически выделяют активную и реактивную составляющие электрических параметров, фиксируют активное и реактивное сопротивление, не требуют затрат на обслуживание, замену бумаги и др., не имеют частей [1].

3. Контролируют и измеряют значения токов, напряжения, мощности и частоты. Цифровой вид информации позволяет отстроиться от гармоник разложением функции в ряд Фурье и выделением первой гармоники.

4. Отличаются простотой наращивания и изменения ранее введенных функций без изменения технических средств.

5. Имеют более гибкую структуру защиты, возможность введения – вывода защиты или любой его части на выключение или сигнал с сохранением регистрации работы, возможность в перспективе изменения параметров «на ходу» в зависимости от режимов работы системы и нагрузок.

6. Производят быструю смену параметров защиты, имеют возможность сохранять в памяти наборы параметров защиты.

7. Могут определять места повреждения, что значительно сокращает время и трудоза-

траты на проведение данной работы, поскольку при этом не нужно вызывать квалифицированный персонал и расшифровывать осциллограммы для поиска по таблицам места повреждения [11, 15].

Эксплуатационные преимущества: простота дистанционного контроля и изменение параметров защиты; простой интерфейс контроля и управления; постоянный автоматический самоконтроль; снижение трудоемкости эксплуатации; высокая степень заводской готовности. Экономические преимущества: уменьшение затрат на проводниковую продукцию; возможность наращивать функции устройств без замены или введение нового оборудования; минимум рабочей площади. Минусы микропроцессорной защиты: внезапные потери оперативного источника напряжения во время работы реле, вызванные перегрузкой или коротким замыканием в сети и срабатыванием автоматических выключателей в цепи оперативного питания, попадание молнии в линии электропередачи, влияние на работу реле электромагнитных возмущений со стороны питающей сети; обрыв проводов и т.п. В итоге возможны такие неполадки: сбои в работе оперативной памяти, затрудненная работа самого процессора, потеря данных и др. [18]. Логическим завершением процесса развития стал перевод устройств релейной защиты на комбинированную микропроцессорную базу. В настоящее время производится уже четвертое поколение защит на микропроцессорах. Функциональные особенности микропроцессорных систем релейной защиты следует рассматривать в сравнении с устройствами релейной защиты предыдущих поколений – электромеханических и микроэлектронных. Можно выделить следующие основные особенности:

1. Многофункциональность – возможность объединить в одном устройстве несколько функций защиты и автоматики. Одно цифровое реле – функциональная замена нескольких традиционных однофункциональных. Например, для линии 10 кВ: отсечка по току, максимальная защита по току, защита от несимметричных режимов, защита от замыканий на землю и АПВ.

2. Информативность – благодаря встроенному дисплею и кнопкам, на лицевой панели оператор имеет возможность считывать и визуально наблюдать значение вставок, параметров измеряемых токов и напряжений и вычисление частоты, мощности, энергии, аварийные параметры (пуски, срабатывания защит, вид короткого замыкания, расстояние до места повреждения и т.д.).

3. Связь с высшим иерархическим уровнем – по локальной сети оператор имеет возможность с подстанционного компьютера или диспетчерского пункта дистанционно считывать и изменять значения вставок устройства, измеренные параметры нормального и аварийного режимов, последовательности срабатывания защит и комплектов автоматики во время протекания аварии, а также до и после нее и др.

4. Самодиагностика – МП РЗА сами по себе имеют ряд эксплуатационных преимуществ по сравнению с традиционными. Являясь системами, диагностируются, постоянно контролируют свою готовность к работе. Исключаются достаточно распространенные случаи, когда действующая система защиты неработоспособна, а персонал не имеет об этом никакой информации. МП РЗА постоянно информируют о своей готовности, а, определив неисправность, принимают меры по ее устранению программным или аппаратным способами и дают указания персоналу для принятия необходимых мер. Реальная глубина самодиагностики позволяет охватить 80–90% узлов устройства. В цифровых реле при самотестировании часто используются следующие приемы: системы релейной защиты на базе электромеханических и микроэлектронных реле за счет невысокой стоимости будут находить применение еще долгий период времени, в первую очередь при реализации относительно простых алгоритмов выявления повреждений [16]. Они могут использоваться в комбинированном варианте устройства защиты наряду с микропроцессорами. При этом следует учитывать, что дальнейшее развитие подобных устройств релейной защиты (повышение технического совершенства, надежности, совершенствования организации контроля и диагностики тех-

нического состояния) может осуществляться только наращиванием дополнительных аппаратных средств, что приведет к увеличению стоимостных показателей и снижению эксплуатационной надежности [23].

Подавляющее большинство устройств комбинированной релейной защиты выполнено на электромеханическом и микроэлектронном принципах. Такие устройства имеют по сравнению с микропроцессорными ряд преимуществ: меньшую стоимость; накоплен значительный опыт их использования и обслуживания; существует достаточно большой объем запасных частей для ремонта и есть возможность проведения ремонта собственными силами персонала; существуют специальные инструменты для ремонта и регулировки характеристик таких устройств [24]. Но устройствам на традиционной элементной базе присущи и достаточно существенные недостатки, которые препятствуют или затрудняют комплексную автоматизацию электрических сетей: значительные выдержки времени отключения межфазных КЗ, особенно вблизи источников питания из-за больших степеней селективности, отсутствия в большинстве электроустановок и т.п.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенные схмотехнические решения могут быть использованы энергоснабжающими организациями для повышения надежности и безаварийности распределительных сетей 6–10 кВ с минимальными капиталовложениями в систему релейной защиты. По результатам анализа статистики повреждений в электросетях 6–10 кВ установлен рост повреждаемости кабельных линий с устаревшей ослабленной изоляцией. Отмечены низкая эффективность защиты от перенапряжений, а также недостатки релейных защит от ОЗЗ в указанных электросетях. Выполнены и представлены расчеты по оценке селективности и чувствительности ТСЗН, показывающие на ограниченное применение этой защиты от ОЗЗ в ряде случаев из-за недостаточной чувствительности. Обоснована необходимость повышения селективности и надежности релейных защит от ОЗЗ с недостаточной чувствительностью

путем замены на индивидуальную направленную релейную защиту.

Альтернативой традиционной микропроцессорной релейной защите является использование индукционных и электромагнитных реле тока, напряжения и направления мощности в сочетании с микроэлектронной базой. В качестве пусковых органов защиты используются электромагнитные и индукционные реле, а в качестве логических элементов – современные малогабаритные логические элементы в виде микросхем с электронной обвязкой для их адаптации к работе с контактами электромагнитных и индукционных реле. Преимуществом данных схемных решений являются возможность простого обслуживания электромагнитных и индукционных реле, использование цепей постоянного оперативного тока низкого напряжения и малой мощности, таких как литиевые аккумуляторы.

Электрические сети напряжением 6–10 кВ с заземленной через индуктивную катушку (реактор) нейтралью называют «компенсированными». Они достаточно распространены в

электрических системах. Резонансно настроенная реактор, можно уменьшить токи замыкания на землю, перенапряжения и вероятность возникновения междуфазных коротких замыканий, что в целом повышает надежность электроснабжения потребителей. Существенным недостатком таких электрических сетей является то, что традиционные системы релейной защиты от ОЗЗ не обеспечивают необходимой селективности и чувствительности. Это связано с настройкой реактора, в поврежденном присоединении направление реактивной мощности, контролируют устройства защиты, может быть таким, как в неповрежденном.

Для решения этой проблемы предлагают различные методы, но в целом она еще не решена. Вопросы защиты от однофазных замыканий на землю исследуются достаточно активно, количество материалов на эту тему настолько велико, что время от времени появляются работы, которые классифицируют и помогают разобраться в разнообразии известных способов защиты.

#### Список источников

1. Abdelaziz A. Y., Ibrahim A. M., Mansour M. M., Talaat H. E. Modern approaches for protection of series compensated transmission lines // *Electrical Power Systems Research*. 2005. Vol. 75. Iss. 1. P. 85–98. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2004.10.016>.
2. Hewitson L., Brown M., Balakrishnan R. *Practical power systems protection*. Oxford: Burlington, 2018. 288 p.
3. Prévé C. *Protection of electrical networks*. Chippingham: Antony Rowe Ltd, 2006. 276 p.
4. Brahma S. M., Girgis A. A. Fault location on a transmission line using synchronized voltage measurements // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2004. Vol. 19. Iss. 4. P. 1619–1622. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2003.822532>.
5. Das B., Reddy J. V. Fuzzy-Logic-Based fault classification scheme for digital distance protection // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2005. Vol. 20. Iss. 2. P. 609–616. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.834294>.
6. Babu K. V., Tripathy M., Singh A. K. Recent techniques used in transmission line protection: a review // *International Journal of Engineering, Science and Technology*. 2011. Vol. 3. No. 3. P. 73–80. <https://doi.org/10.4314/ijest.v3i3.68416>.
7. Blackburn J. L., Domin T. J. *Protective relaying: principles and applications*. Paris: CRC Press, 2016. 647 p.
8. Илюшин П. В. Особенности реализации делительной автоматики на генерирующих установках объектов распределенной генерации // *Релейная защита и автоматика энергосистем* 2017: матер. междунар. выставки и конф. (г. Санкт-Петербург, 25–28 апреля 2017 г.). СПб., 2017. С. 18–25.
9. Barsali S., Ceraolo M., Pelacchi P., Poli D. Control techniques of dispersed generators to improve the continuity of electricity supply // *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting: Conference Proceedings* (New York, 27–31 January 2002). New York: IEEE, 2002. Vol. 2. P. 789–794. <https://doi.org/10.1109/PESW.2002.985115>.
10. Илюшин П. В., Королев Я. М., Симонов А. В. Комплексный подход к моделированию устройств РЗ и ПА, расчету уставок и анализу правильности их работы // *Релейная защита и автоматизация*. 2017. № 3. С. 13–19.
11. Sachdev M. S., Das R., Apostolov A., Holbach J., Sidhu T., Appleyard J. C., et al. Understanding microprocessor-based technology applied to relaying // *IEEE PES Power System Relaying Committee*. 2004. Vol. 2. P. 54–60.
12. Coury D. V., Oleskovicz M., Aggarwal R. K. An ANN routine for fault detection, classification, and location in transmission lines // *Electric Power Components and Systems*. 2002. Vol. 30. Iss. 11. P. 1137–1149. <https://doi.org/10.1080/15325000290085433>.
13. Silva K. M., Neves W. L. A., Souza B. A. Distance protection using a wavelet-based filtering algorithm // *Electrical Power Systems Research*. 2010. Vol. 80. Iss. 1. P. 84–90. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2009.08.012>.



14. Pradhan A. K. Intelligent techniques for transmission line fault classification // *Computational Intelligence in Power Engineering. Studies in Computational Intelligence* / eds. B. K. Panigrahi, A. Abraham, S. Das. Vol. 302. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-14013-6\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-14013-6_3).
15. Martin F., Aguado J. A. Wavelet-based ANN approach for transmission line protection // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2003. Vol. 18. Iss. 4. P. 1572–1574. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2003.817523>.
16. Novosel D., Bachmann B., Hart D., Hu Yi, Saha M. M. Algorithms for locating faults on series compensated lines using neural network and deterministic methods // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1996. Vol. 11. Iss. 4. P. 1728–1736. <https://doi.org/10.1109/61.544250>.
17. Kezunović M., Rikalo I., Šobajić D. J. High-speed fault detection and classification with neural nets // *Electric Power Systems Research*. 1995. Vol. 34. Iss. 2. P. 109–116. [https://doi.org/10.1016/0378-7796\(95\)00962-X](https://doi.org/10.1016/0378-7796(95)00962-X).
18. Gurevich V. T. Technological advance in relay protection: dangerous tendencies // *Електротехніка і Електромеханіка*. 2012. No. 2. P. 33–37.
19. Coury D. V., Jorge D. C. Artificial neural network approach to distance protection of transmission lines // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1998. Vol. 13. Iss. 1. P. 102–108. <https://doi.org/10.1109/61.660861>.
20. Bansal B. R. Power system protection in smart grid environment / 1st Edition. Boca Raton: CRC Press, 2019. 636 p. <https://doi.org/10.1201/9780429401756>.
21. Eissa M. M., Masoud M. A novel digital distance relaying technique for transmission line protection // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2001. Vol. 16. Iss. 3. P. 380–384. <https://doi.org/10.1109/61.924814>.
22. Варганов П. Г., Паршиков Н. В., Иванов Н. А., Юрнова А. К. Система непрерывной диагностики электромеханических панелей РЖД для обеспечения наблюдаемости и повышения надежности их работы // Релейная защита и автоматика энергосистем 2017: матер. междунар. выставки и конф. (г. Санкт-Петербург, 25–28 апреля 2017 г.). СПб., 2017. С. 850–853.
23. Дунаев В. Ю. Новый способ надежной защиты шин среднего напряжения // Релейная защита и автоматика энергосистем 2017: матер. междунар. выставки и конф. (г. Санкт-Петербург, 25–28 апреля 2017 г.). СПб., 2017. С. 142–152.
24. Gurevich V. Electronic devices on discrete components for industrial and power engineering. Boca Raton: CRC Press, 2008. 432 p.

## References

1. Abdelaziz A. Y., Ibrahim A. M., Mansour M. M., Talaat H. E. Modern approaches for protection of series compensated transmission lines. *Electrical Power Systems Research*. 2005;75(1):85-98. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2004.10.016>.
2. Hewitson L., Brown M., Balakrishnan R. *Practical power systems protection*. Oxford: Burlington, 2018. 288 p.
3. Prévé C. *Protection of electrical networks*. Chippenham: Antony Rowe Ltd; 2006, 276 p.
4. Brahma S. M., Girgis A. A. Fault location on a transmission line using synchronized voltage measurements. In: *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2004;19(4):1619-1622. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2003.822532>.
5. Das B., Reddy J. V. Fuzzy-logic-based fault classification scheme for digital distance protection. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2005;20(2):609-616. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.834294>.
6. Babu K. V., Tripathy M., Singh A. K. Recent techniques used in transmission line protection: a review. *International Journal of Engineering, Science and Technology*. 2011;3(3):73-80. <https://doi.org/10.4314/ijest.v3i3.68416>.
7. Blackburn J. L., Domin T. J. *Protective relaying: principles and applications*. Paris: CRC Press; 2016, 647 p.
8. Ilyushin P. V. Implementation features of out-of-step automatics on generating installations of distributed generation facilities. In: *Relejnaya zashchita i avtomatika energosistem: materiali mejdunarodnoi vistavki i konferencii = Relay Protection and Automation for Electric Power Systems: materials of the International exhibition and conference*. St. Petersburg; 2017, p. 18-25. (In Russ.).
9. Barsali S., Ceraolo M., Pelacchi P., Poli D. Control techniques of dispersed generators to improve the continuity of electricity supply. In: *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting: Conference Proceedings*. 27–31 January 2002, New York. New York: IEEE; 2002, vol. 2, p. 789-794. <https://doi.org/10.1109/PESW.2002.985115>.
10. Ilyushin P., Korolev Y., Simonov A. Comprehensive approach of simultaneous analysis of relay protection and emergency automatics: threshold calculation and performance assessment. *Relejnaya zashchita i avtomatizaciya*. 2017;3:13-19. (In Russ.).
11. Sachdev M. S., Das R., Apostolov A., Holbach J., Sidhu T., Appleyard J. C., et al. Understanding microprocessor-based technology applied to relaying. *IEEE PES Power System Relaying Committee*. 2004;2:54-60.
12. Coury D. V., Oleskovicz M., Aggarwal R. K. An ANN routine for fault detection, classification, and location in transmission lines. *Electric Power Components and Systems*. 2002;30(11):1137-1149. <https://doi.org/10.1080/15325000290085433>.
13. Silva K. M., Neves W. L. A., Souza B. A. Distance protection using a wavelet-based filtering algorithm. *Electrical Power Systems Research*. 2010;80(1):84-90. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2009.08.012>.
14. Pradhan A. K. Intelligent techniques for transmission line fault classification. In: Panigrahi B. K., Abraham A., Das S. (eds.). *Computational Intelligence in Power Engineering. Studies in Computational Intelligence*. Vol. 302. Berlin, Heidelberg: Springer; 2010. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-14013-6\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-14013-6_3).
15. Martin F., Aguado J. A. Wavelet-based ANN approach for transmission line protection. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2003;18(4):1572-1574. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2003.817523>.
16. Novosel D., Bachmann B., Hart D., Hu Yi, Saha M. M. Algorithms for locating faults on series compensated lines

using neural network and deterministic methods. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1996;11(4):1728-1736. <https://doi.org/10.1109/61.544250>.  
17. Kezunović M., Rikalo I., Šobajić D. J. High-speed fault detection and classification with neural nets. *Electric Power Systems Research*. 1995;34(2):109-116. [https://doi.org/10.1016/0378-7796\(95\)00962-X](https://doi.org/10.1016/0378-7796(95)00962-X).  
18. Gurevich V. T. Technological advance in relay protection: dangerous tendencies. *Elektrotehnika i Elektromehanika*. 2012;2:33-37.  
19. Coury D. V., Jorge D. C. Artificial neural network approach to distance protection of transmission lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1998;13(1):102-108. <https://doi.org/10.1109/61.660861>.  
20. Bansal B. R. *Power system protection in smart grid environment*. Boca Raton: CRC Press; 2019, 636 p. <https://doi.org/10.1201/9780429401756>.  
21. Eissa M. M., Masoud M. A novel digital distance relaying technique for transmission line protection. In: *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2001;16(3):380-384.

<https://doi.org/10.1109/61.924814>.

22. Varganov P. G., Parshikov N. V., Ivanov N. A., Yurnova A. K. Continuous diagnostics system for Russian Railways electromechanical panels to ensure observability and improve their operation reliability. In: *Releynaya zaschita i avtomatika energosistem: materialy mezhdunarodnoi vystavki i konferencii = Relay Protection and Automation for Electric Power Systems: materials of the International exhibition and conference*. St. Petersburg; 2017, p. 850-853. (In Russ.).  
23. Dunaev V. Yu. A new method of reliable protection of medium voltage buses In: *Releynaya zaschita i avtomatika energosistem: materialy mezhdunarodnoi vystavki i konferencii = Relay Protection and Automation for Electric Power Systems: materials of the International exhibition and conference*. St. Petersburg; 2017, p. 142-152. (In Russ.).  
24. Gurevich V. *Electronic devices on discrete components for industrial and power engineering*. Boca Raton: CRC Press; 2008, 432 p.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Дмитриченко Виктор Иванович**,  
кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры электроснабжения  
и возобновляемых источников энергии  
Алматинский университет энергетики и связи  
им. Г. Дукеева,  
050013, г. Алматы, ул. Байтурсынулы 126/1,  
Республика Казахстан

**Ни Дмитрий Александрович**,  
магистрант,  
Алматинский университет энергетики и связи  
им. Г. Дукеева,  
050013, г. Алматы, ул. Байтурсынулы 126/1,  
Республика Казахстан

**Джетписов Мерей Айназарович**,  
магистрант,  
Алматинский университет энергетики и связи  
им. Г. Дукеева,  
050013, г. Алматы, ул. Байтурсынулы 126/1,  
Республика Казахстан

**Бауржан Бегжан**,  
магистрант,  
Алматинский университет энергетики и связи  
им. Г. Дукеева,  
050013, г. Алматы, ул. Байтурсынулы 126/1,  
Республика Казахстан

#### Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Viktor I. Dmitrichenko**,  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Power  
Supply and Renewable Energy Sources,  
Almaty University of Power Engineering and  
Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev,  
126/1 Baytursynuli St., Almaty 050013, Republic  
of Kazakhstan

**Dmitriy A. Ni**,  
Master's Degree Student,  
Almaty University of Power Engineering and  
Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev,  
126/1 Baytursynuli St., Almaty 050013, Republic  
of Kazakhstan

**Merey A. Dzhetspisov**,  
Master's Degree Student,  
Almaty University of Power Engineering  
and Telecommunications named after Gumarbek  
Daukeyev,  
126/1 Baytursynuli St., Almaty 050013, Republic  
of Kazakhstan

**Begzhan Baurzhan**,  
Master's Degree Student,  
Almaty University of Power Engineering and  
Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev,  
126/1 Baytursynuli St., Almaty 050013, Republic  
of Kazakhstan

#### Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

**Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 07.10.2021; одобрена после рецензирования 30.11.2021; принята к публикации 18.02.2022.

**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 07.10.2021; approved after reviewing 30.11.2021; accepted for publication 18.02.2022.

## ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 004.891.2:504.054

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-70-80>

## Оценка влияния выбросов от объектов энергетики на Байкальскую природную территорию

Владимир Русланович Кузьмин<sup>1✉</sup>, Максим Сергеевич Зароднюк<sup>2</sup>,  
Людмила Васильевна Массель<sup>3</sup>

<sup>1-3</sup>Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Россия

<sup>1</sup>[rulis@vigo.su](mailto:rulis@vigo.su), <https://orcid.org/0000-0001-5749-4441>

<sup>2</sup>[mx@isem.irk.ru](mailto:mx@isem.irk.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7920-5583>

<sup>3</sup>[massel@isem.irk.ru](mailto:massel@isem.irk.ru), <https://orcid.org/0000-0002-9088-9012>

**Резюме.** Цель работы – создание технологии для проведения комплексных исследований по оценке влияния объектов энергетики на окружающую среду. Предлагаемая технология интегрирует нормативные методики для расчета выбросов загрязняющих веществ, методики расчета рассеивания загрязняющих веществ, а также результаты лабораторного анализа проб снега на содержание загрязняющих веществ. Для поддержки технологии был разработан научный прототип интеллектуальной системы поддержки принятия решений WIAIS (Web-oriented Impact Assessment Information System). Созданная технология включает три основных этапа: этап расчета количественных показателей выбросов загрязняющих веществ, этап расчета рассеивания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе и этап оценки проб снега на содержание в них загрязняющих веществ и сравнение их с полученными результатами. Для апробации предложенной технологии был проведен вычислительный эксперимент, в рамках которого была произведена оценка влияния выбросов от котельных, расположенных на Байкальской природной территории и работающих на различных видах угля. Апробация производилась на основе сведений о 48 котельных, использующих разнообразное оборудование с разной установленной мощностью и находящихся в различных местах в пределах Байкальской природной территории. В результате апробации были получены сведения об основных загрязняющих веществах, выбрасываемых объектами энергетики (сульфаты, оксиды азота, твердые вещества). Установлены количественные показатели выбросов загрязняющих веществ: так, общий объем загрязняющих веществ в окружающую среду составляет 18,33 тыс. т/год. Также установлены наиболее крупные источники загрязняющих веществ – это котельные, работающие в г. Слюдянка, п. Еланцы, г. Северобайкальск и пгт. Нижнеангарск. Технология может использоваться для проведения экологических оценок как существующих энергетических предприятий, так и при планировании строительства новых объектов энергетики. Также технология может быть применена при разработке рекомендаций по снижению выбросов загрязняющих веществ от энергетических предприятий.

**Ключевые слова:** выбросы вредных веществ, Байкальская природная территория, экология, энергетические системы и комплексы, оценка влияния

**Финансирование:** Данное исследование было выполнено в рамках проекта по госзаданию ИСЭМ СО РАН № FWEU-2021-0007 AAAA-A21-121012090007-7, отдельные аспекты прорабатывались при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-07-00351.

**Для цитирования:** Кузьмин В. Р., Зароднюк М. С., Массель Л. В. Оценка влияния выбросов от объектов энергетики на Байкальскую природную территорию // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 1. С. 70–80. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-70-80>.

## Impact assessment of emissions from energy facilities on the Baikal natural area

Vladimir R. Kuzmin<sup>1✉</sup>, Maksim S. Zarodnyuk<sup>2</sup>, Lyudmila V. Massel<sup>3</sup>

<sup>1-3</sup>Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

<sup>1</sup>rulisp@vigo.su, <https://orcid.org/0000-0001-5749-4441>

<sup>2</sup>max@isem.irk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7920-5583>

<sup>3</sup>massel@isem.irk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9088-9012>

**Abstract.** This work aims to establish a technology for conducting a comprehensive assessment of the impact of energy facilities on the environment. The proposed strategy combines regulatory methods for calculating pollutant emissions and dispersion, as well as the laboratory findings on pollutant content in snow samples. To assist the technology, a scientific prototype of an intelligent decision-making support system known as WIAIS (Web-oriented Impact Assessment Information System) was developed. The proposed technology includes three principal stages: calculating the quantitative indicators of pollutant emissions, calculating the pollutant dispersion in the atmosphere, examining snow samples for the pollutant content and comparing them with the obtained results. For practical evaluation of the proposed technology, a computational experiment was performed, which assessed the impact of emissions from the boiler plants located in the Baikal natural area and powered by different types of coal. The testing was performed using the data on 48 boiler plants of various installed capacities having different equipment and located all over the Baikal nature area. Data on the main pollutants emitted by energy facilities (sulfates, nitrogen oxides, solids) were obtained. Quantitative indicators of pollutant emissions were established; thus, the total volume of pollutants amounts to 18.33 thousand tons/year. Furthermore, the largest sources of pollutants were identified, including boiler plants in Slyudyanka, Elantsy settlement, Severobaikalsk, and Nizhneangarsk settlement. Therefore, the proposed methodology can be used for environmental assessments of the existing power plants, as well as for designing new power facilities and developing recommendations for reducing pollutant emissions.

**Keywords:** pollutant emission, Baikal natural territory, ecology, energy systems and complexes, impact assessment

**Funding:** The research was carried out under the State Assignment Project of the Melentiev Energy Systems Institute SB RAS No. FWEU-2021-0007 AAAA-A21-121012090007-7, some aspects were developed with the partial financial support of the RFBR grant No. 19-07-00351.

**For citation:** Kuzmin V. R., Zarodnyuk M. S., Massel L. V. Impact assessment of emissions from energy facilities on the Baikal natural area. *iPolytech Journal*. 2022;26(1):70-80. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-70-80>

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время проблемы оценки воздействия выбросов и снижения влияния от промышленных объектов, в число которых входят объекты электроэнергетики, становятся все более актуальными и обсуждаются как на российском, так и на международном уровнях. Так, согласно директиве ЕС 2016/2284<sup>4</sup>, к 2030 г. страны ЕС должны снизить выбросы вредных веществ в атмосферу,

в том числе оксидов серы, в среднем на 70%, а выбросы оксидов азота – на 60% по сравнению с 2005 г. [1]. Поправка<sup>5</sup> ужесточает требования по снижению выбросов парниковых газов к 2030 г. с 50% до 55% по сравнению с 1990 г. В Российской Федерации с 2018 г. действует национальный проект «Экология», согласно паспорту которого до 2024 г. предусмотрены ликвидация наиболее опасных объектов накопленного вреда окружаю-

<sup>4</sup>Directive (EU) 2016/2284 of the European Parliament and of the Council of 14 December 2016 on the reduction of national emissions of certain atmospheric pollutants, amending Directive 2003/35/EC and repealing Directive 2001/81/EC. [Электронный ресурс]. URL: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L\\_.2016.344.01.0001.01.ENG&toc=OJ:L:2016:344:TOC](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2016.344.01.0001.01.ENG&toc=OJ:L:2016:344:TOC) (25.06.2021).

<sup>5</sup>Amended proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulation (EU) 2018/1999 (European Climate Law). COM/2020/563 final [Электронный ресурс]. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020PC0563> (25.06.2021).

щей среде и экологическое оздоровление водных объектов (в число которых входит и оз. Байкал) и снижение выбросов опасных загрязняющих веществ, оказывающих наибольшее негативное воздействие на окружающую среду и здоровье человека, в два раза [2, 3]. Также стоит отметить, что, согласно Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 г. [4, 5], одними из приоритетов являются: переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, а также рациональное природопользование и энергетическая эффективность.

Основными источниками информации для экологических оценок деятельности объектов энергетики являются замеры и мониторинг выбросов загрязняющих веществ в природную среду, а также Государственные отчеты и отчеты конкретных предприятий. Однако в том случае, если подобная информация отсутствует, то оценка влияния энергетических объектов может быть проведена по результатам вычислительного эксперимента с использованием утвержденных методик. Существующие методики, используемые для оценки влияния объектов энергетики, применяются по отдельности, что усложняет проведение подобных исследований. Авторам не удалось найти сведения о попытках интеграции этих методик.

В статье рассматриваются результаты оценки деятельности энергетических объектов, расположенных на Байкальской природной территории, а именно: количественные показатели выбросов загрязняющих веществ и расчеты рассеивания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе. Оценка производилась при помощи разработанной технологии для оценки влияния объектов энергетики на окружающую среду с применением утвержденных правительством РФ методик и авторской интеллектуальной системы поддержки принятия решений «WIS», которые будут рассмотрены в статье.

## ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

Как отмечалось выше, проблемы оценки воздействия выбросов привлекают все большее внимание.

В России для определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании топлива в котлах электростанций применяется ряд утвержденных нормативных методик, например, «Методика для определения валовых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от котельных установок ТЭС»<sup>6</sup> и «Методика определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании топлива в котлах производительностью менее 30 т пара в ч или менее 20 Гкал/ч»<sup>7</sup>. Область их применения включает в себя:

- установление предельно допустимых и временно согласованных выбросов;
- планирование мероприятий по снижению выбросов;
- контроль выбросов вредных веществ в атмосферный воздух.

Указанные методики позволяют определить объемы выбросов газообразных вредных загрязняющих веществ (ЗВ) (таких, как оксиды углерода, серы и азота) по данным инструментальных замеров и результатов расчетов, объемы выбросов твердых ЗВ. Эти методы универсальны и их можно использовать как для оценки деятельности электростанций [6, 7], так и других промышленных предприятий [8].

Для оценки рассеивания ЗВ в атмосферном воздухе, а также для прогнозирования рассеивания ЗВ с учетом планируемых природоохранных мероприятий, в настоящее время используются «Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе» (МРР-2017<sup>8</sup>) и [9]. МРР-2017 применяется для расчетов в случаях:

- определения нормативов выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух и разработки мероприятий по защите окружающей среды и мероприятий, которые ока-

<sup>6</sup>РД 34.02.305-98. Методика определения валовых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от котельных установок ТЭС. Введ. 01.07.1998. М.: ПМБ ВТИ, 1998.

<sup>7</sup>Методика определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании топлива в котлах производительностью менее 30 тонн пара в час или менее 20 Гкал в час. Введ. 01.01.2000. Спб.: Фирма «Интеграл».



зывают влияние на уровень загрязнения воздуха, а также оценку их результатов;

- обоснования размеров санитарно-защитных зон;

- оценки воздействия планируемой деятельности на качество атмосферного воздуха, а также оценки краткосрочных и долгосрочных уровней загрязненности воздуха и соответствующих концентраций загрязняющих атмосферу веществ.

Однако у МРР-2017 существует недостаток, связанный с небольшой дальностью расчетов – 100 км. Подобного расстояния может быть достаточно для небольших энергетических объектов, однако для крупных электростанций дальность обнаружения выбросов вредных веществ может достигать 200–250 км.

Также применяются методы, описанные М. Е. Берляндом в [9], где приводятся различные методы и сведения для проведения исследований, связанных с оценкой рассеивания загрязняющих веществ. Приведены критерии опасности загрязнения атмосферы и примеры их использования при прогнозе. Описаны физические основы прогноза загрязнения воздуха – прогностические уравнения, осреднение концентраций, учет туманов и смогов, а также влияние, оказываемое рельефом. Описанные методы прогноза загрязнения воздуха можно разделить на две группы: численные и статистические. Численные методы помогают оценить максимальные разовые концентрации примеси от отдельных источников и интегральные от площадных и совокупных источников, а также прогноз смогов. Статистические методы позволяют оценить годовой и суточный ход загрязнения воздуха, оценить концентрацию примесей, рассчитать интегральные показатели загрязнения воздуха в городе. Изложенные методы также позволяют спрогнози-

ровать неблагоприятные метеорологические условия и провести регулирование выбросов в атмосферу. Применение указанных методов оценки рассеивания ЗВ было описано в [10–13].

За рубежом для проведения подобных исследований используются модель HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) [14] и модель AERMOD<sup>9</sup>. HYSPLIT позволяет производить вычисления траекторий переноса, распространение химических преобразований и симуляцию оседания веществ на поверхности. Одной из основных областей ее применения является анализ обратной траектории (back trajectory analysis) с целью выявления источника определенных воздушных масс и установления взаимосвязей «источник-реципиент» [15–17]. Однако, несмотря на широкое применение HYSPLIT, агентство по защите окружающей среды США (U.S. Environmental Protection Agency, U.S. EPA) не рекомендует использовать эту модель при разработке законодательных и регулирующих документов, указывая на тот факт, что HYSPLIT не в состоянии учесть вторичные химические реакции и сильно зависит от метеорологических данных, а именно: от частоты получения этих данных и их географической привязки, и предлагает использовать вместо этого систему AERMOD, состоящую из 3 компонентов<sup>10</sup>:

- стационарная модель краткосрочного рассеивания выбросов загрязняющих веществ в атмосферу;

- препроцессор метеорологических сведений AERMET;

- препроцессор ландшафта AERMAP.

В настоящий момент AERMOD применяется в различных исследованиях, связанных с оценкой рассеивания и идентификацией источников выбросов [18–20]. В [20] было по-

<sup>8</sup>Приказ Минприроды России от 06.06.2017 № 273 «Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе» (Зарегистрировано в Минюсте России 10.08.2017 № 47734) [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456074826> (28.06.2021).

<sup>9</sup>AERMOD: DESCRIPTION OF MODEL FORMULATION [Электронный ресурс]. URL: [http://www.eng.utoledo.edu/aprg/courses/dm/aermod/aermod\\_mfd.pdf](http://www.eng.utoledo.edu/aprg/courses/dm/aermod/aermod_mfd.pdf) (28.06.2021).

<sup>10</sup>U.S. Environmental Protection Agency, 2015. Guidance on the use of models for assessing the impacts of emissions from single sources on the secondarily formed pollutants ozone and PM<sub>2.5</sub> [Электронный ресурс]. URL: [https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-09/documents/epa-454\\_r-16-005.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-09/documents/epa-454_r-16-005.pdf) (28.06.2021).

казано, что система с высокой точностью определяет местоположение источника выброса – средняя ошибка составила 25 м, причем максимальные и минимальные ошибки составили 57 и 10 м, соответственно. Исследование модели также показало, что применение различных наборов данных по «сложному» ландшафту незначительно влияет на точность работы [21].

В результате анализа источников авторам не удалось найти информацию о попытках интеграции различных нормативных методик для проведения расчетов.

## ОПИСАНИЕ ПРИМЕНЯЕМЫХ МЕТОДОВ, ПОДХОДОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ

Для оценки влияния энергетических систем и комплексов на окружающую среду была предложена следующая технология, включающая три этапа:

1. Расчет количественных показателей выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании топлива в котлах электростанций – для расчетов применяются «Методика для определения валовых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от котельных установок»<sup>6</sup> и «Методика определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании топлива в котлах производительностью менее 30 тонн пара в час или менее 20 Гкал/ч»<sup>7</sup>.

2. Расчет рассеивания выбросов вредных веществ в атмосферном воздухе – для расчетов используются «Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе»<sup>11</sup> (МРР-2017) и методы, описанные в [9].

3. Сравнение результатов расчетов с результатами снегосъемов – используем результаты о концентрациях загрязняющих веществ (например,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{HCO}_3^-$  и др.) полученных путем лабораторного анализа проб снега, взятых в точках исследования.

Технология может использоваться для проведения экологических оценок, как существующих энергетических предприятий, так и при планировании строительства новых объ-

ектов энергетики. Также технология может быть применена при разработке рекомендаций по снижению выбросов загрязняющих веществ от энергетических предприятий. Выбор указанных методик для проведения расчетов обуславливается их большим соответствием поставленным целям, так, например, в МРР-2017 приведены сведения о ряде показателей для расчетов, специфичных для различных регионов Российской Федерации.

Для поддержки предлагаемой технологии был разработан научный прототип интеллектуальной системы поддержки принятия решений (ИСППР) «WIAIS» (Web-oriented Impact Assessment Information System), архитектура и основные компоненты которой были рассмотрены в предыдущих работах авторов [22, 23].

Для апробации предложенной технологии и разработанной ИСППР был проведен вычислительный эксперимент, в рамках которого выполнялась оценка влияния выбросов от котельных, расположенных на Байкальской природной территории (БПТ) и работающих на различных видах угля. Апробация производилась на основе сведений о 48 котельных, использующих различное оборудование, имеющих различную установленную мощность и находящихся в различных местах в пределах БПТ.

На первом этапе был выполнен расчет количественных показателей выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферу. Для проведения этого расчета требуются сведения об энергетических объектах и их технических характеристиках (таких, как количество и типы котлоагрегатов, объем и тип сжигаемого топлива, установленная мощность, степень фильтрации (пылеочистки)). В качестве источника информации о технических характеристиках топлив в вычислительном эксперименте использовался справочник марочного состава и потребительских свойств российских углей, издаваемый независимым аналитическим агентством «Росинформуголь».

По результатам выполнения расчета бы-

<sup>11</sup>Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе. Введ. 01.01.2018. М., 2018.

ли получены сведения о количественных показателях выбросов от выбранных объектов энергетики, согласно которым:

– общий объем загрязняющих веществ в окружающую среду составляет 18,33 тыс. т/год, из которых 11,27 тыс. т/год выбрасывается объектами, расположенными в Республике Бурятия, и 7,06 тыс. т/год выбрасывается объектами, расположенными на территории Иркутской области;

– основной вклад в выбросы загрязняющих веществ, поступающих в атмосферу, вносят выбросы пыли – 14,3 тыс. т/год или 78% от общего объема выбросов загрязняющих веществ;

– основными источниками выбросов загрязняющих веществ в атмосферу являются котельные, работающие в г. Слюдянка, п. Еланцы, г. Северобайкальск и пгт. Нижнеангарск.

В таблице приведены результаты расчета в табличном виде, на рис. 1 – представление полученных результатов с помощью геоинформационной системы.

На втором этапе был выполнен расчет рассеивания выбросов вредных веществ в атмосферном воздухе. Перед выполнением расчетов необходимо внести дополнительные сведения о котельных, а именно: высоту

и диаметр дымовых труб, температуру уходящей газовоздушной смеси (ГВС) (в °С), а также указать для электростанции максимальную дальность расчета в километрах. В качестве источника сведений о количественных показателях выбросов были использованы результаты, полученные на предыдущем этапе. Метеорологические сведения (такие, как температура воздуха, направление ветра), требуемые для расчета, загружаются системой автоматически из открытых источников (проекты Gismeteo и RP5).

При выполнении вычислительного эксперимента по расчету рассеивания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе были получены следующие результаты:

1. Установлены основные направления распространения рассеивания загрязняющих веществ.

2. Основная часть загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферу, оседает преимущественно в радиусе 150–250 м от источника выброса. Это связано, во-первых, с низкой высотой труб у рассматриваемых объектов, во-вторых, с низкой температурой уходящей ГВС.

На рис. 2 показано представление полученных результатов при помощи геоинформационной системы.

Пример результатов расчета в табличном виде  
 Example of calculation results in a tabular form

Объект	Топливо	Выбросы всего, тыс. т/год	Твердые вещества, тыс. т/год	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , тыс. т/год	NO <sub>x</sub> , тыс. т/год	Очистка, %	Установленная мощность, МВт
Ольхонский р-н	–	0,704	0,498	0,206	0,0003	–	9,51
с. Еланцы	–	0,671	0,468	0,109	0,0001	–	8,35
Центральная котельная	–	0,364	0,252	0,112	0,0001	–	4,06
Котел 1	уголь (черемховский)	0,052	0,036	0,016	0,00002	0	0,58
Котел 2	уголь (черемховский)	0,052	0,036	0,016	0,00002	0	0,58
Котел 3	уголь (черемховский)	0,052	0,036	0,016	0,00002	0	0,58
Котел 4	уголь (черемховский)	0,052	0,036	0,016	0,00002	0	0,58
Котел 5	уголь (черемховский)	0,052	0,036	0,016	0,00002	0	0,58
Котел 6	уголь (черемховский)	0,052	0,036	0,016	0,00002	0	0,58
Котел 7	уголь (черемховский)	0,052	0,036	0,016	0,00002	0	0,58



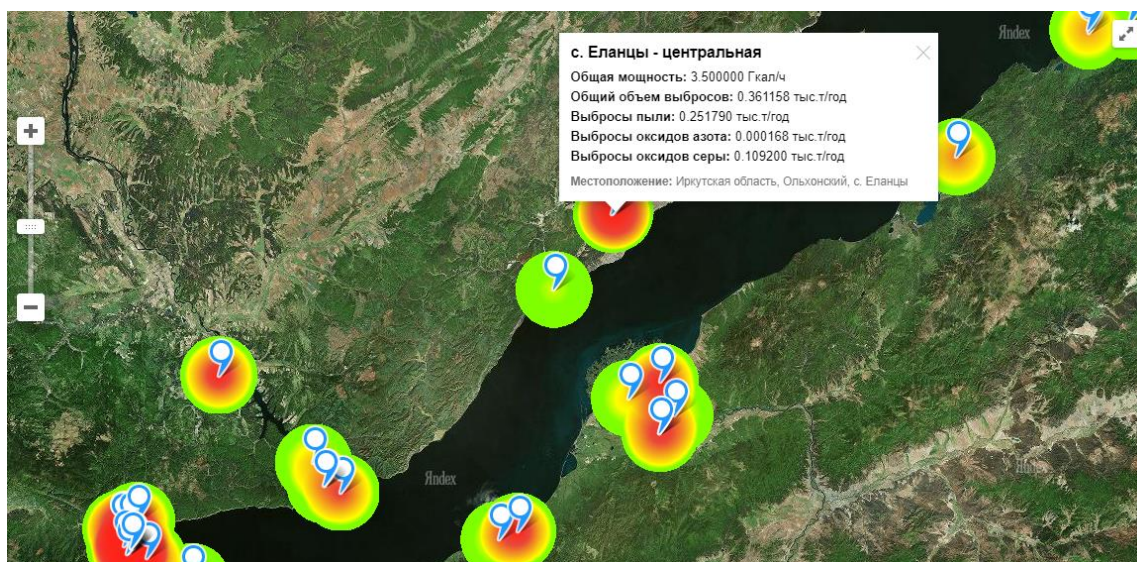


Рис. 1. Геовизуализация результатов количественного расчета выбросов  
Fig. 1. Geovisualization of the results of quantitative calculation of emissions

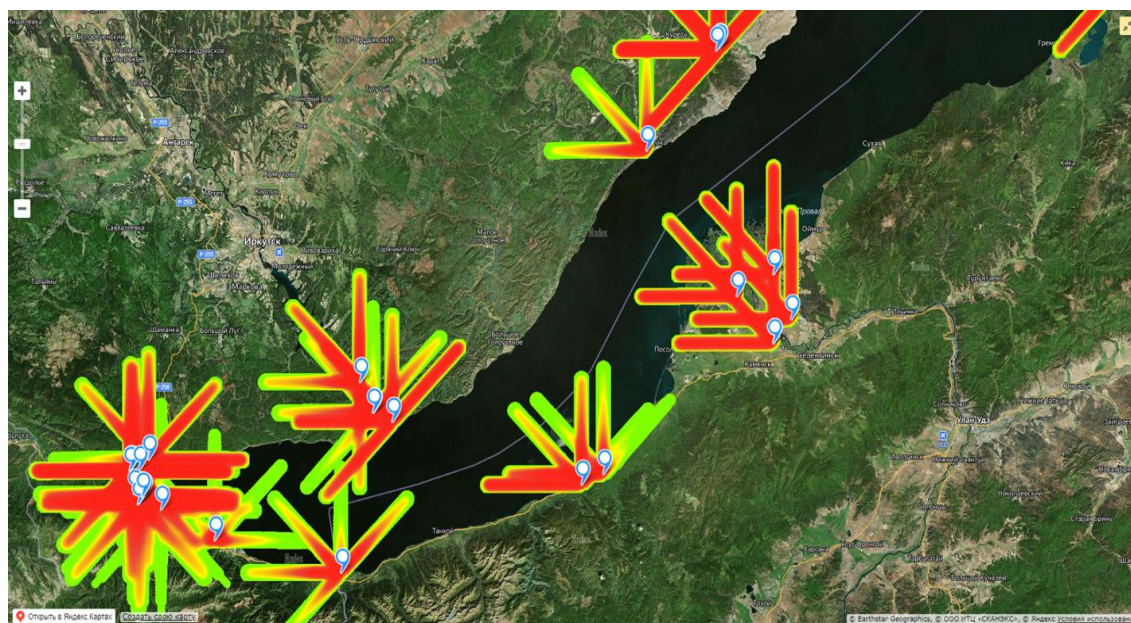


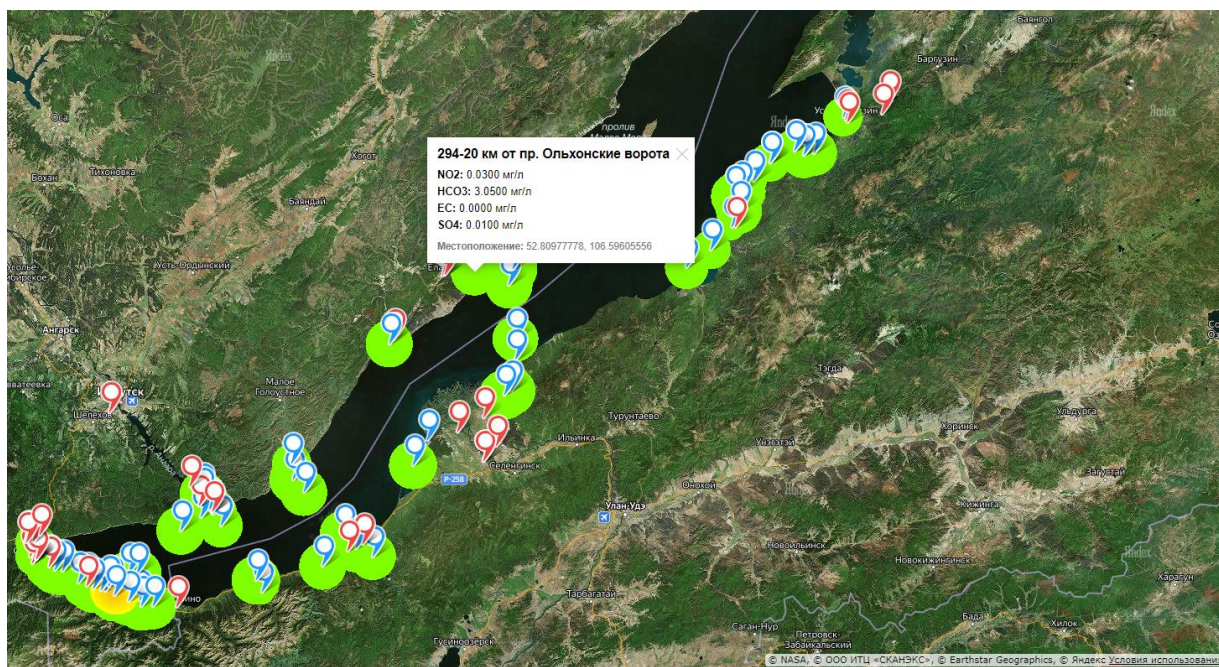
Рис. 2. Геовизуализация результатов расчета рассеивания выбросов  
Fig. 2. Geovisualization of the results of emission dispersion calculation

Результаты расчета рассеивания вредных веществ являются предварительными, так как в расчетах не учитывается рельеф местности, что можно видеть на рис. 2. Так, например, г. Слюдянка (на рис. 2 расположен в нижнем левом углу) окружен сопками, что приводит к тому, что загрязняющие вещества, выбрасываемые в атмосферный воздух, будут преимущественно оседать на небольшом расстоянии от населенного пункта.

На третьем этапе была произведена загрузка результатов анализа проб снега, взятых в БПТ. Результаты содержат количественные показатели загрязняющих веществ по 12 параметрам (например, таким как  $\text{NO}_x$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  и другим), полученным из 157 точек замера.

Геовизуализация полученных результатов показана на рис. 3.





**Рис. 3. Гевизуализация результатов анализа проб снега**  
**Fig. 3. Geovisualization of the analysis results of snow samples**

Красными маркерами на карте обозначены объекты энергетики, участвовавшие в расчетах, описанных выше; синими – точки, в которых производилось взятие проб снега.

Загруженные результаты анализа проб снега могут быть использованы как при исследовании локального рассеивания загрязняющих веществ от малых объектов энергетики, так и при исследовании дальнего (регионального) переноса загрязняющих веществ в атмосферном воздухе от крупных электростанций. В настоящий момент корректное сравнение результатов анализа проб снега с результатами расчетов рассеивания затруднительно в связи с тем, что при расчете рассеивания не учитывается рельеф местности. Однако загруженные результаты могут быть использованы для анализа концентрации загрязняющих веществ на временном промежутке в течение нескольких лет.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В статье была рассмотрена предлагаемая технология для оценки влияния энергетических систем и комплексов на окружающую среду, приведены ее основные этапы и при-

меняемые методики. Этапы предлагаемой технологии могут быть использованы как для проведения комплексных исследований, описанных в статье, так и по отдельности: например, для организации хранения результатов анализа проб снега и сравнения их на определенном временном промежутке или только для оценки объемов загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферный воздух.

Показаны результаты проведенных вычислительных экспериментов, которые позволили установить загрязняющие вещества, выбрасываемые объектами энергетики в атмосферный воздух и их количественные показатели, а также основные источники этих выбросов. В будущем планируется интегрировать в систему сведения о предельно допустимых концентрациях (ПДК) загрязняющих веществ для проведения автоматизированной оценки о превышении ПДК, а также сведения о рельефе вокруг объектов, для которых производится расчет рассеивания, что позволит корректно рассчитывать перенос загрязняющих веществ на дальние расстояния.

## Список источников

1. Serrano H. C., Oliveira M. A., Barros C., Augusto A. S., Pereira M. J., Pinho P., et al. Measuring and mapping the effectiveness of the European air quality directive in reducing N and S deposition at the ecosystem level // *Science of The Total Environment*. 2019. Vol. 647. P. 1531–1538. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.059>.
2. Semenova G. Global environmental problems in Russia // *Key Trends in Transportation Innovation (KTTI-2019): E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 157. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015702023>.
3. Egorchenkov A. V., Egorchenkov D. A. Social aspects of environmental issues in the context of the national project «Ecology» // *Earth and Environmental Science: IOP Conference Series*. 2020. Vol. 579. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/579/1/012099>.
4. Моисеев Н. А., Трындына Н. С., Ахмадеев Б. А. Анализ энергетической стратегии России // *Наука и практика Российского экономического университета им. Г. В. Плеханова*. 2019. Т. 11. № 3. С. 49–55.
5. Alekseev A. N., Bogoviz A. V., Goncharenko L. P., Sybachin S. A. A critical review of Russia's energy strategy in the period until 2035 // *International Journal of Energy Economics and Policy*. 2019. Vol. 9. № 6. P. 95–102. <https://doi.org/10.32479/ijeep.8263>.
6. Децук В. С. Методы снижения выбросов загрязняющих веществ при сжигании органических топлив в котлах ТЭС // *Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт*. 2017. № 2. С. 27–29.
7. Созаева Л. Т., Шунгаров И. Х., Хегай А. Г. Загрязнение атмосферного воздуха теплоснабжающими предприятиями города Нальчика // *Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова*. 2018. № 590. С. 190–198.
8. Березуцкий А. Ю., Катин В. Д. Анализ выбросов вредных веществ нефтеперерабатывающими предприятиями и механизмов их образования при горении топлива // *Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке науч.-практ. конф.: тр. Всерос. творческой конф. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС*, 2011. Т. 2. С. 315–322.
9. Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 272 с.
10. Кормина Л. А., Сукач О. О. Внедрение ресурсосберегающих технологий в энергетике // *Химия. Экология. Урбанистика*. 2020. Т. 2020-1. С. 120–123.
11. Семакина А. В., Платунова Г. Р., Мансуров А. Р. Состояние атмосферного воздуха на территории Республики Башкортостан // *Вестник Удмуртского университета. Серия: Биология. Науки о Земле*. 2020. Т. 30. № 3. С. 278–284. <https://doi.org/10.35634/2412-9518-2020-30-3-278-284>.
12. Литвинова Н. А., Азаров В. Н. О модели вертикального распределения концентраций загрязняющих веществ по высоте зданий с учетом типа локальной застройки // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2021. № 3. С. 108–121.
13. Беляев Н. Н., Славинская Е. С., Кириченко Р. В. Численные модели для прогноза загрязнения атмосферного воздуха выбросами автотранспорта // *Наука та прогрес транспорту // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. 2016. № 6. С. 25–32. <https://doi.org/10.15802/stp2016/90457>.
14. Stein A. F., Draxler R. R., Rolph G. D., Stunder B. J. B., Cohen M. D., Ngan F. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2015. Vol. 96. Iss. 12. P. 2059–2077. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>.
15. Fleming Z. L., Monks P. S., Manning A. J. Review: untangling the influence of air-mass history in interpreting observed atmospheric composition // *Atmospheric Research*. 2012. Vol. 104-105. P. 1–39. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.09.009>.
16. Ma Yunfeng, Wang Maibo, Wang Shuai, Wang Yue, Feng Lei, Wu Kaiyu. Air pollutant emission characteristics and HYSPLIT model analysis during heating period in Shenyang, China // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2021. Vol. 193. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08767-4>.
17. Chang Lisa Tzu-Chi, Barthelemy Xavier, Watt Sean, Jiang Ningbo, Riley Matthew, Azzi Merched. The use of 'HYSPLIT in NSW' in air quality management and forecasting // *CASANZ 2021: the 25th International Clean Air and Environment Conference*. 2021. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.researchgate.net/publication/351803192\\_THE\\_USE\\_OF\\_%27HYSPLIT\\_IN\\_NSW%27\\_IN\\_AIR\\_QUALITY\\_MANAGEMENT\\_AND\\_FORECASTING](https://www.researchgate.net/publication/351803192_THE_USE_OF_%27HYSPLIT_IN_NSW%27_IN_AIR_QUALITY_MANAGEMENT_AND_FORECASTING) (16.09.2021).
18. Cerqueira J. S., Albuquerque H. N., Sousa F. A. S. Atmospheric pollutants: modeling with Aermid software // *Air Quality, Atmosphere & Health*. 2019. Vol. 12. P. 21–32. <https://doi.org/10.1007/s11869-018-0626-9>.
19. Gopi R., Saravanakumar R., Elango K. S., Chandrasekar A., Navaneethan K. S., Gopal N. Construction emission management using wind rose plot and AERMOD application // *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2021. Vol. 1145. P. 012106. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1145/1/012106>.
20. Pandey G., Sharan M. Application of AERMOD for the identification of a point-source release in the FFT-07 experiment // *Air Quality, Atmosphere & Health*. 2021. Vol. 14. P. 679–690. <https://doi.org/10.1007/s11869-020-00971-y>.
21. Rzeszutek M., Szulecka A. Assessment of the AERMOD dispersion model in complex terrain with different types of digital elevation data // *Earth and Environmental Science: IOP Conference Series*. 2021. Vol. 642. P. 012014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/642/1/012014>.
22. Massel L. V., Kuzmin V. R. Typal intelligent DSS for making strategic decisions in the energy sector and examples of application based on agent-service approach // *Proceedings of the 21st Workshop on Computer Science and Information Technologies*. 2019. P. 273–278.



<https://doi.org/10.2991/csit-19.2019.48>.

23. Кузьмин В. Р. Разработка информационной подсистемы для расчета и визуализации вредных выбросов

от объектов энергетики // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2020. № 1. С. 142–155. <https://doi.org/38028/ESI.2020.17.1.011>.

## References

1. Serrano H. C., Oliveira M. A., Barros C., Augusto A. S., Pereira M. J., Pinho P., et al. Measuring and mapping the effectiveness of the European air quality directive in reducing N and S deposition at the ecosystem level. *Science of the Total Environment*. 2019;647:1531-1538. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.059>.
2. Semenova G. Global environmental problems in Russia. In: *Key trends in transportation innovation (KTTI-2019): E3S Web of Conferences*. 2020;157. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015702023>.
3. Egorchenkov A. V., Egorchenkov D. A. Social aspects of environmental issues in the context of the national project "Ecology". In: *Earth and Environmental Science: IOP Conference Series*. 2020;579. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/579/1/012099>.
4. Moiseev N. A., Tryndina N. S., Akhmadeev B. A. Analysis of Russian energy strategy. *Nauka i praktika Rossijskogo ekonomicheskogo universiteta imeni G. V. Plehanova = Science and Practice of the Plekhanov Russian University of Economics*. 2019;11(3):49-55. (In Russ.).
5. Alekseev A. N., Bogoviz A. V., Goncharenko L. P., Sybachin S. A. A critical review of Russia's energy strategy in the period until 2035. *International Journal of Energy Economics and Policy*. 2019;9(6)95-102. <https://doi.org/10.32479/ijee.8263>.
6. Detsuk V. S. Methods of reducing pollutant emissions when burning fossil fuels in the boilers of TPP. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta: nauka i transport = Bulletin of BSUT: science and transport*. 2017;2:27-29. (In Russ.).
7. Sozaeva L. T., Shungarov I. H., Hegaj A. G. The pollution of atmosphere air by heating enterprises of Nalchik town. *Trudy Glavnoj geofizicheskoy observatorii imeni A.I. Voejkova*. 2018;590:190-198. (In Russ.).
8. Berezuckij A. Yu., Katin V. D. Analysis of harmful emissions by oil refineries and their formation mechanisms during fuel combustion. In: *Nauchno-tekhnicheskoe i ekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke: trudy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy tvorcheskoj konferencii = Scientific-technical and economic cooperation of the Asia-Pacific countries in the XXI century: proceedings of All-Russian scientific and practical creative conference*. Khabarovsk: Far Eastern State Transport University; 2011, vol. 2, p. 315-322. (In Russ.).
9. Berlyand M. E. *Prediction and regulation of air pollution*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1985. 272 p. (In Russ.).
10. Kormina L. A., Sukach O. O. Introduction of resource-saving technologies in the energy sector. *Himiya. Ekologiya. Urbanistika*. 2020;2020-1:120-123. (In Russ.).
11. Semakina A. V., Platunova G. R., Mansurov A. R. Condition of the atmospheric air in the territory of the republic of Bashkortostan. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya Biologiya. Nauki o Zemle = Bulletin of Udmurt University. Series: Biology. Earth Sciences*. 2020;30-3;278-284. <https://doi.org/10.35634/2412-9518-2020-30-3-278-284>. (In Russ.).
12. Litvinova N. A., Azarov V. N. On the model of the vertical distribution of pollutant concentrations along the height of buildings taking into account the type of local development. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta: Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura = Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture*. 2021;3:108-121. (In Russ.).
13. Biliaiev M. M., Slavinska O. S., Kyrychenko R. V. Numerical prediction models for air pollution by motor vehicle emissions. *Nauka ta progres transportu. Visnik Dnipropetrovskogo natsional'nogo universitetu zaliznynoho transport = Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*. 2016;(6):25-32. <https://doi.org/10.15802/stp2016/90457>. (In Russ.).
14. Stein A. F., Draxler R. R., Rolph G. D., Stunder B. J. B., Cohen M. D., Ngan F. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2015;96(12):2059-2077. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>.
15. Fleming Z. L., Monks P. S., Manning A. J. Review: untangling the influence of air-mass history in interpreting observed atmospheric composition. *Atmospheric Research*. 2012;104-105:1-39. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.09.009>.
16. Ma Yunfeng, Wang Maibo, Wang Shuai, Wang Yue, Feng Lei, Wu Kaiyu. Air pollutant emission characteristics and HYSPLIT model analysis during heating period in Shenyang, China. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2021;193. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08767-4>.
17. Chang Lisa Tzu-Chi, Barthelemy Xavier, Watt Sean, Jiang Ningbo, Riley Matthew, Azzi Merched. The use of 'HYSPLIT in NSW' in air quality management and forecasting. *CASANZ 2021: the 25th International Clean Air and Environment Conference*. 2021. Available from: [https://www.researchgate.net/publication/351803192\\_THE\\_USE\\_OF\\_%27HYSPLIT\\_IN\\_NSW%27\\_IN\\_AIR\\_QUALITY\\_MANAGEMENT\\_AND\\_FORECASTING](https://www.researchgate.net/publication/351803192_THE_USE_OF_%27HYSPLIT_IN_NSW%27_IN_AIR_QUALITY_MANAGEMENT_AND_FORECASTING) [Accessed 16th September 2021]. (In Russ.).
18. Cerqueira J. S., Albuquerque H. N., Sousa F. A. S. Atmospheric pollutants: modeling with AERMOD software. *Air Quality, Atmosphere & Health*. 2019;12:21-32. <https://doi.org/10.1007/s11869-018-0626-9>.
19. Gopi R., Saravanakumar R., Elango K. S., Chandrasekar A., Navaneethan K. S., Gopal N. Construction emission management using wind rose plot and AERMOD application. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1145:012106. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1145/1/012106>.

20. Pandey G., Sharan M. Application of AERMOD for the identification of a point-source release in the FFT-07 experiment. *Air Quality, Atmosphere & Health*. 2021;14:679-690. <https://doi.org/10.1007/s11869-020-00971-y>.
21. Rzesutek M., Szulecka A. Assessment of the AERMOD dispersion model in complex terrain with different types of digital elevation data. In: *Earth and Environmental Science: IOP Conference Series*. 2021;642:012014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/642/1/012014>.
22. Massel L. V., Kuzmin V. R. Typal intelligent DSS for making strategic decisions in the energy sector and ex-

- amples of application based on agent-service approach. In: *Proceedings of the 21st Workshop on Computer Science and Information Technologies (CSIT 2019)*. 2019;273-278. <https://doi.org/10.2991/csit-19.2019.48>.
23. Kuzmin V. R. Development of information subsystem for calculation and visualization of harmful emissions from energy objects. *Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management*. 2020;1:142-155. <https://doi.org/38028/ESI.2020.17.1.011>.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Кузьмин Владимир Русланович**,  
младший научный сотрудник,  
Отдел систем искусственного интеллекта  
в энергетике,  
Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева  
СО РАН,  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия

**Зароднюк Максим Сергеевич**,  
кандидат физико-математических наук,  
научный сотрудник Отдела теплосиловых систем,  
Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева  
СО РАН,  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия

**Массель Людмила Васильевна**,  
доктор технических наук, профессор,  
заведующая Отделом систем искусственного  
интеллекта в энергетике,  
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 14.10.2021; одобрена после рецензирования 09.12.2021; принята к публикации 15.02.2022.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Vladimir R. Kuzmin**,  
Junior Researcher,  
Department of Artificial Intelligence Systems  
in the Energy Sector,  
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,  
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia

**Maksim S. Zarodnyuk**,  
Cand. Sci. (Phys.- Math.),  
Researcher of the Department of Heat Power Systems,  
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,  
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia

**Lyudmila V. Massel**,  
Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Head of the Department of Artificial Intelligence Systems  
in the Energy Sector,  
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 14.10.2021; approved after reviewing 09.12.2021; accepted for publication 15.02.2022.

## ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 620.91

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-81-91>

## Исследование функционирования фотоэлектрической установки в условиях облачной погоды на территории Севера

Николай Петрович Местников<sup>1,2✉</sup>, Павел Филиппович Васильев<sup>1,2</sup>,  
Геннадий Иванович Давыдов<sup>2</sup>, Александр Михайлович Хоютанов<sup>2</sup>,  
Ахмад Мухаммед-Насер Альзаккар<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова, г. Якутск, Россия

<sup>2</sup>Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, г. Якутск, Россия

<sup>3</sup>Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

<sup>1</sup>sakhacase@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7090-4839>

<sup>2</sup>kb-8@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4108-176X>

<sup>3</sup>dav\_gen@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8543-0867>

<sup>4</sup>shuriklater@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1917-6976>

<sup>5</sup>ahmadalzakkar86@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8355-189X>

**Резюме.** Цель – определение влияния различных видов облачности на функционирование фотоэлектрической установки на территории центральной части Республики Саха (Якутия). В работе использован метод определения электроэнергетической эффективности фотоэлектрической установки при различных видах облачности с приведением графических интерпретаций, с применением различных измерительных и регистрирующих устройств и описанием порядка проведения экспериментальных работ. Используются закономерности определения среднестатистических показателей снижения электроэнергетической эффективности фотоэлектрической установки для определенного вида облачности. Конкретный вид облачности идентифицирован посредством проведения замеров и вычисления диапазонов освещенности при учете граничных условий. Данные исследования проведены в течение летнего периода 2021 года на базе мобильного полигона ИФТПС им. В. П. Ларионова СО РАН на территории центральной части Республики Саха (Якутия). Получены контрольные параметры изменения величины генерирующей мощности фотоэлектрической установки для 10 видов облачности, которые могут применяться при моделировании эксплуатационных процессов и инженерных расчетах режимов работы солнечных электростанций. Установлено, что в случае эксплуатации фотоэлектрических установок при различных видах облачности снижение генерирующей мощности установки варьируется в пределах 8–95% относительно показателя генерирующей мощности при безоблачной погоде. Полученные показатели изменения генерирующей мощности фотоэлектрической установки при различных видах облачности могут быть применены при разработке методики по оценке влияния облачности и ее видов на пропускную способность солнечных лучей, падающих на поверхность фотоэлектрических панелей, для более точного определения энергетического потенциала солнечной генерации в определенной местности.

**Ключевые слова:** фотоэлектрическая установка, мониторинг работы, облачность, генерирующая мощность, электроэнергетическая эффективность

**Благодарности:** Результаты исследований, описанные в настоящей статье, подготовлены в рамках выполнения государственного задания на проект «Исследования путей повышения эксплуатационной надежности и эффективности интеллектуальных электроэнергетических систем в условиях Севера и Арктики» ФНИ в РФ на 2021–2030 гг. по приоритетному направлению «Основы эффективного развития и функционирования энергетических систем на новой технологической основе в условиях глобализации, включая проблемы энергобезопасности, энергосбережения и рационального освоения природных энергоресурсов».

**Для цитирования:** Местников Н. П., Васильев П. Ф., Давыдов Г. И., Хоютанов А. М., Альзаккар А. М.-Н. Исследование функционирования фотоэлектрической установки в условиях облачной погоды на территории Севера // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 1. С. 81–91. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-81-91>.

## POWER ENGINEERING

Original article

## Operation of a photovoltaic installation in the North under various cloudiness conditions

Nikolay P. Mestnikov<sup>1,2✉</sup>, Pavel F. Vasilyev<sup>1,2</sup>, Gennadiy I. Davydov<sup>2</sup>,  
Aleksandr M. Khoyutanov<sup>2</sup>, Ahmad M.-N. Alzakkar<sup>3</sup>

<sup>1</sup>North-Eastern Federal University in Yakutsk,

<sup>2</sup>Institute of Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch  
of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia

<sup>3</sup>Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

<sup>1</sup>sakhacase@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7090-4839>

<sup>2</sup>kb-8@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4108-176X>

<sup>3</sup>dav\_gen@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8543-0867>

<sup>4</sup>shuriklater@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1917-6976>

<sup>5</sup>ahmadalzakkar86@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8355-189X>

**Abstract.** This study investigates the effect produced by various types of cloudiness on the functioning of a photovoltaic system in the central part of the Republic of Sakha (Yakutia). The electric power efficiency of the photovoltaic system under various cloudiness conditions was assessed using graphical interpretations, measuring and recording devices, as well as a description of the procedure for conducting experimental work. The average indicators of a decrease in the electric power efficiency of the photovoltaic system were determined using patterns for a certain type of cloudiness. A specific cloudiness type was identified by performing measurements and calculating illumination ranges, taking boundary conditions into account. These studies were carried out during the summer period of 2021 using the facilities of the mobile test site of the V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences located in the central part of the Republic of Sakha (Yakutia). Control parameters of alterations in the generating capacity of the photovoltaic system were obtained for 10 types of cloudiness. The obtained parameters can be used when modeling operational processes and performing engineering calculations of the operating modes for solar power plants. According to the results, during the operation of photovoltaic systems under various types of cloudiness, the decrease in the generating capacity of the installation can vary within 8–95% relative to the generating capacity indicator under clear weather. The obtained indicators of alterations in the generating capacity of a photovoltaic system under various cloudiness conditions can be applied for developing a methodology for assessing the effect of cloudiness and its types on the carrying capacity of solar beams falling on the photovoltaic panel surface, as well as to more accurately determine the energy potential of solar generation in a certain area.

**Keywords:** photoelectric unit, operation monitoring, cloud cover, generating capacity, power efficiency

**Acknowledgements:** The research results described in the article were prepared as a part of the state assignment for the project "Research on ways to improve the operational reliability and efficiency of intelligent electric power systems in the North and the Arctic" of the Fundamental Scientific Research in the Russian Federation for the period from 2021 till 2030 in the priority direction "Fundamentals of the effective development and operation of energy systems on a new technological basis in the conditions of globalization including the problems of energy security, energy conservation and rational development of natural energy resources".

**For citation:** Mestnikov N. P., Vasilyev P. F., Davydov G. I., Khoyutanov A. M., Alzakkar A. M.-N. Operation of a photovoltaic installation in the North under various cloudiness conditions. *iPolytech Journal*. 2022;26(1):81-91. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-81-91>.

### ВВЕДЕНИЕ

Развитие солнечной энергетики имеет большое значение для электроэнергетических систем множества стран. По данным Европейской ассоциации солнечной энергетики, на 2020 г. суммарная выработка электроэнергии от солнечных электростанций составляет порядка 2,6% [1]. Основной целью эксплуатации солнечных электростанций яв-

ляется снижение выбросов вредных веществ вследствие сгорания топлива, в том числе CO<sub>2</sub>, в рамках функционирования централизованных электроэнергетических систем и экономии дорогостоящего топлива для автономных энергетических систем, в особенности в удаленных и труднодоступных зонах Севера и Арктики.

В автономных электроэнергетических си-

стемах преимущественно применяются традиционные источники энергии, которые функционируют посредством сгорания различных видов топлива. К примеру, в северных районах Дальнего Востока активно эксплуатируются автоматизированные дизель-генераторные и газотурбинные установки.

Объекты генерации электроэнергии в автономных электроэнергетических системах вследствие сгорания топлива значительно повышают выбросы  $\text{CO}_2$  в атмосферу, где на 1 т дизельного топлива приходится 2,172 т  $\text{CO}_2$ .

По Северному энергетическому району Республики Саха (Якутия) за 2020 г. израсходовано более 64 тыс. т дизельного топлива, что эквивалентно 139 тыс. т  $\text{CO}_2$ . Кроме того, на фоне низкого развития транспортной инфраструктуры Севера и Арктики, удельная стоимость горюче-смазочных материалов и комплектующих дизельных электростанций повышается до 200% при сроках доставки до 2,5 лет.

Известно, что устойчивое функционирование солнечных электростанций и фотоэлектрических установок зависит от следующих условий:

- продолжительность солнечного сияния не менее 1800 ч/г, то есть преобладание количества дней с безоблачным небом;
- малая степень загрязненности окружающей воздушной среды;
- применение комплектующих фотоэлектрической установки высокого качества;
- другие условия.

При проектировании солнечных электростанций учитываются показатели эффективных солнечных часов, продолжительности солнечного сияния, соотношения дождливых и облачных дней, климатических условий и др. Однако в существующих нормативно-технических требованиях, применяемых в источниках [1–3], не учитываются факторы влияния различных видов облачности на работу солнечных электростанций и фотоэлек-

трических установок, что создает разницу между фактическим и прогнозным показателями выработки электроэнергии объектов.

Вследствие вышеуказанных факторов исследование методов повышения энергетической эффективности при проектировании и эксплуатации солнечных электростанций и фотоэлектрических установок микромощности в автономных электроэнергетических системах Севера и Арктики является актуальной и востребованной задачей.

## АНАЛИЗ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В солнечных электростанциях Бурятии и Омской области зафиксирован низкий коэффициент использования установленной мощности, который составил 14% при значительных отклонениях генерирующей мощности 15–26% вследствие влияния климатических условий и различных видов облачности<sup>6</sup>. Снижение данных электроэнергетических параметров обосновывается в значительной мере влиянием различных видов облачности.

На примере использования программных комплексов при оценке энергетического потенциала объектов гелиоэнергетики применяются определенные закономерности, где учитывается коэффициент доли прохода солнечной радиации на наклонную площадку в условиях облачности только в трех случаях (пасмурно, небо полностью покрыто облаками, без единого голубого просвета) без учета существующих различных видов облачности с различными показателями пропускной способности солнечной радиации [4–7].

В работах [8–10] представлены и описаны методики определения влияния облачности на эффективность работы солнечных электростанций. В методике<sup>7</sup> предлагается размещение объектов гелиоэнергетики в определенном виде на большой площади для снижения влияния облачности, вследствие которой обеспечивается стабильность генерирующей мощности электростанции. С по-

<sup>6</sup>Global market outlook for solar power / 2020–2024. Электронный ресурс. URL: <https://now.solar/2021/04/14/global-market-outlook-for-solar-power-2020-2024/> (15.06.2021).

<sup>7</sup>Виссарионов В. И., Дерюгина Г. В., Кузнецова В. А., Малинин Н. К. Солнечная энергетика: учеб. пособ. М.: ИД МЭИ, 2008. 276 с.



мощью данной методики достигается постоянная выработка электроэнергии в необходимом количестве в условиях переменной облачности.

Влияние различных видов облачности на работу солнечных электростанций имеет мгновенный характер с краткосрочными провалами генерирующей мощности. Эффект облачного покрова проявляется немедленно, с уменьшением глобального солнечного излучения, с последующим провалом генерирующей мощности на короткое время [11–14].

Неустойчивый характер облачности затрудняет долгосрочное прогнозирование выработки электроэнергии от объектов гелиоэнергетики с погрешностью до 22% в сравнении с расчетными показателями работы данных объектов в случае применения программных комплексов [15–18]. Необходимо отметить, что долгосрочное прогнозирование выработки электроэнергии от объектов гелиоэнергетики имеет сложную специфику в виде необходимости учета всех возможных природных явлений, в том числе облачности.

Анализ показал, что существующие исследования направлены на изучение применения программных комплексов при расчете выработки электроэнергии от солнечных электростанций, где облачность учитывается в виде 3 усредненных категорий облачности со средней разницей в 22% при сравнении с фактическими показателями выработки элек-

троэнергии существующих объектов гелиоэнергетики.

Таким образом, целью исследования является изучение и выявление влияния различных видов облачности на эффективность функционирования солнечной фотоэлектрической установки на примере территории центральной части Якутии.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Натурные исследования проводились в летний период (июнь–август) 2021 г. на территории Центральной Якутии, в рамках которых применялась экспериментальная установка, состоящая из: фотоэлектрической панели, контроллера заряда, аккумуляторной батареи, вспомогательной нагрузки, стационарного порта и инструментального обеспечения для сбора данных, программного обеспечения для обработки данных. Внешний вид экспериментальной установки представлен на рис. 1.

Место проведения экспериментальных работ имеет следующие показатели: продолжительность солнечного сияния – более 1800 ч в год; абсолютный температурный минимум составляет  $-62^{\circ}\text{C}$ ; абсолютный температурный максимум составляет  $+41^{\circ}\text{C}$ ; среднегодовые осадки – менее 250 мм в год; тип почвы – глинистая; наличие многолетней вечной мерзлоты.



Рис. 1. Внешний вид экспериментальной установки  
Fig. 1. Exterior view of an experimental installation



Методика проведения натурных экспериментов имеет следующий порядок: проведение замеров освещенности для вычисления среднего показателя при определенных видах облачности; регистрация электрических параметров работы установки (в соответствии с показателями освещенности и визуальным сопоставлением характеров облачности); учет уровня заряда аккумуляторной батареи (уровень заряда составляет не менее 30% в целях обеспечения работоспособности оборудования и не более 55% – в целях предотвращения быстрого заряда батареи, недопущения холостой работы установки); обработка данных натурных исследований; оформление результатов натурных исследований в виде графических интерпретаций.

В ходе изучения параметров освещенности в условиях различных видов облачности проведены сопоставления результатов замеров освещенности со средними показателями освещенности, представленными в [19]. Результаты сопоставления представлены в табл. 1.

Среднее отклонение результатов замеров освещенности в сравнении с показателями освещенности, указанными в [19], при различных видах облачности составило 7,95%, что объясняется значительной сложностью визуального определения вида облачности и(или) ее переходных состояний.

На рис. 2 представлен график среднестатистических показателей генерирующей мощности фотоэлектрической установки при определенных видах облачности (в соответствии с табл. 1).

Мониторинг функционирования фотоэлектрической установки производился в течение летнего периода (июнь-август). График (см. рис. 2), зафиксированный синим цветом, показывает, что среднестатистический максимум удельной мощности составляет 0,4 Вт/Вт при безоблачном (ясном) небе. Среднестатистические удельные мощности при облачной погоде находятся в пределах 0,03–0,38 Вт/Вт в зависимости от вида облачности.

Регистрация показателей производилась во временных промежутках 09:00–20:00. Данный промежуток времени обосновывает-

ся среднестатистическими показателями периода светового дня и движением солнца по направлению «восток–юг–запад–север», в то время как поверхность фотоэлектрической панели направлена строго на «юг» в соответствии с действующими методиками размещения. Во время периода белых ночей фиксируется практически 24-часовое наличие солнечных лучей, но в ночной период (20:00–06:00) солнце направляется в северное направление и, следовательно, прямое попадание световых лучей на поверхность фотоэлектрической панели не представляется возможным.

В соответствии с выражением (1), производился расчет показателя снижения среднестатистической генерирующей мощности фотоэлектрической установки при каждом виде облачности на основе данных предыдущего графика (см. рис. 2).

$$\Delta_j = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n P_{j\text{обл}}}{\sum_{i=1}^n P_{\text{ясн}}}\right) \cdot 100\%, \quad (1)$$

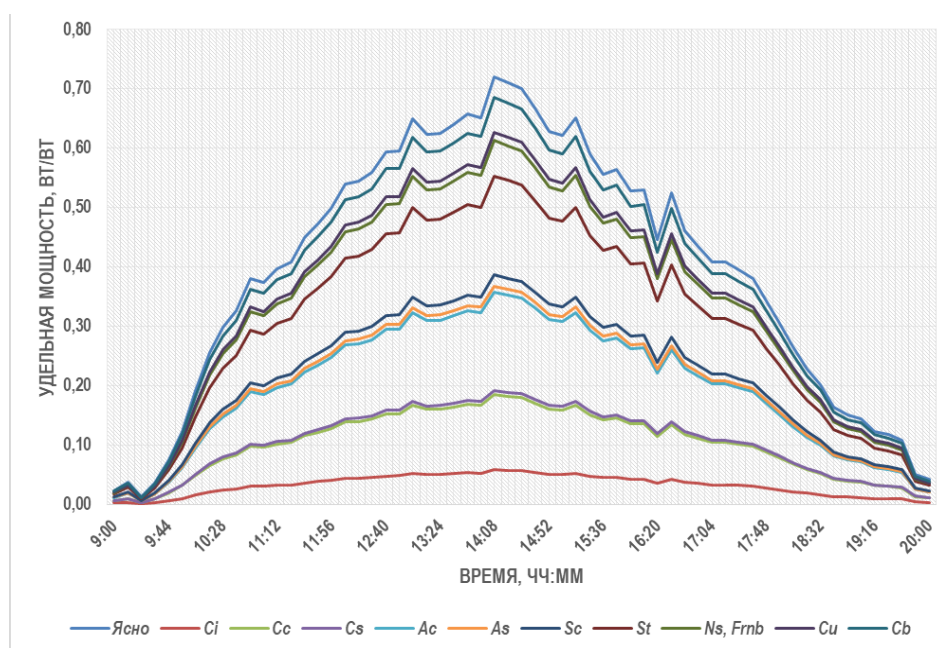
где  $\Delta_j$  – показатель снижения среднестатистической генерирующей мощности фотоэлектрической установки при определенном виде облачности, о.е.;  $P_{j\text{обл}}$  – среднестатистическая генерирующая мощность фотоэлектрической установки при определенном виде облачности, Вт/Вт;  $P_{\text{ясн}}$  – среднестатистическая генерирующая мощность фотоэлектрической установки при безоблачном небе, Вт/Вт;  $j$  – номер вида облачности в соответствии с табл. 1;  $n$  – временной период мониторинга, в котором фиксировался определенный вид облачности, ед. [20–22].

В табл. 2 представлены результаты расчета показателя снижения генерирующей мощности фотоэлектрической установки при различных видах облачности.

На основании полученных и обработанных экспериментальных данных проводится анализ о влиянии различных видов облачности на эффективность функционирования фотоэлектрической установки.

**Таблица 1.** Сопоставление показателей освещенности  
**Table 1.** Comparison of illumination indicators

№	Вид облачности	Краткое обозначение	Средняя освещенность, лк [19]	Средняя освещенность замеров, лк	Разница, %
1	Перистые облака	<i>Ci</i>	33 000	36 200	8,8
2	Перисто-кучевые облака	<i>Cc</i>	30 400	33 138	9,0
3	Перисто-слоистые облака	<i>Cs</i>	29 800	32 377	8,6
4	Высококучевые облака	<i>Ac</i>	26 600	29 220	9,8
5	Высокослоистые облака	<i>As</i>	22 400	20 401	9,7
6	Слоисто-кучевые	<i>Sc</i>	18 200	19 396	6,5
7	Слоистые облака	<i>St</i>	17 800	18 864	5,9
8	Слоисто-дождевые облака	<i>Ns, Frnb</i>	11 100	10 105	9,8
9	Кучевые облака	<i>Cu</i>	9 500	9 736	2,4
10	Кучево-дождевые облака	<i>Cb</i>	2 800	3 054	9,0
Среднее отклонение, %					7,95

**Рис. 2.** График среднестатистических показателей генерирующей мощности фотоэлектрической установки при различных видах облачности в определенном промежутке времени в течение летнего периода  
**Fig. 2.** Graph of statistical average indicators of photovoltaic installation generating capacity under different types of cloud cover in a certain period of time during the summer period

В расчете параметров и показателей энергетического потенциала технико-экономического обоснования проектирования и строительства солнечных электростанций облачность как внешняя среда учитывается лишь в усредненном порядке в виде учета годовой продолжительности солнечного сияния и трех категорий облачности (пасмурно, небо полностью покрыто облаками, без единого голубого просвета). При применении

существующих методов точность расчетов искажается ввиду отсутствия учета влияния облачности. В отчетах региональных управлений по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды регистрируются все виды облачности, а также параметры солнечных лучей, которые могут быть применены в проведении расчетов прогноза выработки электроэнергии от объектов гелиоэнергетики.

**Таблица 2.** Показатели снижения генерирующей мощности фотоэлектрической установки при различных видах облачности относительно показателя при ясном небе

**Table 2.** Indicators of a decreasing generating capacity of a photovoltaic installation under various types of cloud cover relative to the clear sky indicator

№	Вид облачности	Краткое обозначение	Снижение мощности, %
1	Перистые облака	<i>Ci</i>	8,03
2	Перисто-кучевые облака	<i>Cc</i>	25,60
3	Перисто-слоистые облака	<i>Cs</i>	26,57
4	Высококучевые облака	<i>Ac</i>	49,60
5	Высокослоистые облака	<i>As</i>	51,00
6	Слоисто-кучевые	<i>Sc</i>	53,64
7	Слоистые облака	<i>St</i>	76,83
8	Слоисто-дождевые облака	<i>Ns, Frnb</i>	85,13
9	Кучевые облака	<i>Cu</i>	87,13
10	Кучево-дождевые облака	<i>Cb</i>	95,18

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Малая изученность влияния облачности и применения существующей методики оценки эффективности функционирования солнечных электростанций приводит к разнице фактических и расчетных (прогнозных) данных выработки электроэнергии солнечной электростанции на 22%.

В результате проведения экспериментальных исследований определены среднестатистические показатели освещенности, которые коррелируются с показателями освещенности по видам облачности (с разницей 7,95%). Погрешность объясняется расхождениями в визуальном определении вида облачности, а также возможностью уче-

та межвидовых граничных состояний облаков.

Показатели генерирующей мощности фотоэлектрической установки по степеням освещенности, соответствующие определенным видам облачности, составили от 8 до 95% в сравнении с мощностью установки во время ясного неба. Данное обстоятельство приводит к необходимости проведения дальнейших исследований и разработке методики по оценке влияния облачности и ее видов на пропускную способность солнечных лучей, падающих на поверхность фотоэлектрических панелей для более точного определения энергетического потенциала солнечной генерации в определенной местности.

## Список источников

1. Дмитриенко В. Н., Лукутин Б. В. Методика оценки энергии солнечного излучения для фотоэлектростанции // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 5. С. 49–55. <http://izvestiya.tpu.ru/archive/article/view/1881>.
2. Тулегенова А. А. Потенциал энергообеспечения областей Казахстана с использованием возобновляемых источников Энергии // Альтернативная энергетика и экология. 2020. № 31-33. С. 72–80. <https://doi.org/10.15518/isaee.2020.11.008>.
3. Дебрин А. С., Семенов А. Ф., Бастрон А. В., Кузьмин П. Н. Проектирование энергоэффективных ФЭС для автономных систем электроснабжения сельскохозяйственных потребителей Красноярского края путем использования графо-семантической базы данных энергии солнечного излучения // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2020. № 3. С. 216–221.
4. Местников Н. П., Васильев П. Ф., Давыдов Г. И., Хоютанов А. М., Альзаккар А. М. Исследование возможности применения фотоэлектрических солнечных

- установок внутри купольного строения в условиях Севера // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2021. Т. 25. № 4. С. 435–449. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-435-449>.
5. Шакиров В. А., Яковкина Т. Н., Курбацкий В. Г. Методика оценки выработки электроэнергии солнечными электростанциями с использованием данных многолетних наблюдений метеостанций // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. №. 4. С. 858–875. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-4-858-875>.
6. Бабаев Б. Д. Расчет выработки электроэнергии местной солнечной электростанцией при оптимальных параметрах // Вестник Дагестанского государственного университета. Серия 1: Естественные науки. 2021. Т. 36. Вып. 3. С. 21–28. <https://doi.org/10.21779/2542-0321-2021-36-3-21-28>.
7. Бабаев Б. Д. Программа расчета поступления возобновляемых энергоресурсов и оптимизации режимов эксплуатации энергокомплексов по динамике нагрузки потребителя // Проблемы совершенствования топлив-

но-энергетического комплекса: матер. XIV Междунар. науч.-техн. конф. (г. Саратов, 30 октября – 1 ноября 2018 г.). Саратов: Изд-во СГТУ им. Ю. А. Гагарина, 2018. С. 55–60.

8. Торговкин Н. В., Макаров В. Н. Влияние современных климатических изменений на геохимические особенности мерзлотных почв г. Якутск // Устойчивость природных и технических систем в криолитозоне: матер. Всерос. конф. с междунар. участием, посвященной 60-летию образования Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН (г. Якутск, 28–30 сентября 2020 г.). Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, 2020. С. 182–184.

9. Perez R., Cebecauer T., Šúri M. Semi-empirical satellite models. Chapter 2 // Solar Energy Forecasting and Resource Assessment. Academic press, 2013. P. 21–48. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-397177-7.00002-4>.

10. Šúri M., Cebecauer T., Skoczek A. Solargis: solar data and online applications for pv planning and performance assessment // 26th European Photovoltaics Solar Energy Conference. Hamburg, 2011. <https://solargis2-web-assets.s3.eu-west-1.amazonaws.com/public/publication/2011/5514f381d4/Suri-Cebecauer-Skoczek-EUPVSEC2011-Solargis-solar-data-and-online-applications-for-PV-planning-and-performance-assessment.pdf>

11. Suri M., Cebecauer T., Skoczek A., Marais R., Mushwana C., Reinecke J., et al. Cloud cover impact on photovoltaic power production in South Africa // South African Solar Energy Conference: Proceedings of the 2nd. Port Elizabeth, 2014. <https://solargis2-web-assets.s3.eu-west-1.amazonaws.com/public/publication/2014/7e83f59297/Suri-et-al-SASEC2014-Cloud-cover-impact-on-PV-power-production-in-South-Africa.pdf>

12. Bonkaney A., Madougou S., Adamou R. Impacts of cloud cover and dust on the performance of photovoltaic module in Niamey // Journal of Renewable Energy. 2017. Vol. 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/9107502>.

13. Kern E. C., Gulachenski E. M., Kern G. A. Cloud effects on distributed photovoltaic generation: low transients at the Gardner, Massachusetts photovoltaic experiment // IEEE Transactions on Energy Conversion. 1989. Vol. 4. Iss. 2. P. 184–190. <https://doi.org/10.1109/60.17910>.

14. Mestnikov N., Vasiliev P., Alzakkar A. Development of method of protection of solar panels against dust pollution in the Northern part of the Russian Far East // International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). 2021. <https://doi.org/10.1109/UralCon52005.2021.9559596>.

15. Mahalakshmi R., Aswin Kumar A., Kumar A. Design of fuzzy logic based maximum power point tracking controller for solar array for cloudy weather conditions // Power and energy systems: towards sustainable energy. 2014. <https://doi.org/10.1109/PESTSE.2014.6805308>.

16. Detyniecki M., Marsala C., Krishnan A., Siegel M. Weather-based solar energy prediction // IEEE International Conference on Fuzzy Systems. 2012. <https://doi.org/10.1109/FUZZ-IEEE.2012.6251145>.

17. Lofthouse J., Simmons R. T., Yonk R. M. Reliability of renewable energy: solar. Электронный ресурс. URL: <https://www.usu.edu/ipe/wp-content/uploads/2015/11/Reliability-Solar-Full-Report.pdf> (12.06.2021).

18. Sowa S. Improving the energy efficiency of lighting systems by the use of solar radiation // 17th International Conference Heat Transfer and Renewable Sources of Energy (HTRSE-2018): E3S Web Conference. 2018. Vol. 70. P. 01013. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20187001013>.

19. Шиловцева О. А. Световые ресурсы Москвы // Альтернативная энергетика и экология. 2013. № 6-2. С. 88–96.

20. Местников Н. П., Альзаккар А. М.-Н. Исследование влияния холодного климата Якутии на функционирование монокристаллической солнечной системы генерации электроэнергии // Тинчуринские чтения – 2021 «Энергетика и цифровая трансформация»: матер. Междунар. молодежной науч. конф. (г. Казань, 28–30 апреля 2021 г.). Казань: ООО Полиграфическая компания «Астор и Я», 2021. С. 256–260.

21. Васильев П. Ф., Местников Н. П. Исследование влияния резко-континентального климата Якутии на функционирование солнечных панелей // Международный технико-экономический журнал. 2021. № 1. С. 57–64. <https://doi.org/10.34286/1995-4646-2021-76-1-57-64>.

22. Нуруллин Э. Г., Зайнутдинова Э. Э., Салахутдинов И. А. Методические предпосылки по разработке комбинированной системы электроснабжения сельскохозяйственного предприятия с применением нетрадиционных источников энергии // Сельское хозяйство и продовольственная безопасность: технологии, инновации, рынки, кадры: научн. тр. II Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 70-летию Института механизации и технического сервиса и 90-летию Казанской зоотехнической школы (г. Казань, 28–30 мая 2020 г.). Казань: Казанский государственный аграрный университет, 2020. С. 26–32.

## References

1. Dmitrienko V. N., Lukutin B. V. Method for estimating solar radiation energy for photovoltaic plants. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2017;328(5):49-55. (In Russ.). <http://izvestiya.tpu.ru/archive/article/view/1881>.

2. Tulegenova A. A. Energy supply potential of the Ka-

zakhstan regions with the use of renewable energy sources. *Alternativnaya energetika i ekologiya = Alternative Energy and Ecology*. 2020;31-33:72-80. (In Russ.). <https://doi.org/10.15518/isjaee.2020.11.008>.

3. Debrin A. S., Semenov A. F., Bastron A. V., Kuz'min P. N. The design of energy efficient FSES for autonomous power supply systems to agricultural consumers of Kras-

noyarsk Krai by using the grapho-semantic database of solar radiation energy. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2020;3:216-221. (In Russ.).

4. Mestnikov N. P., Vasilyev P. F., Davydov G. I., Khoyutanov A. M., Alzakkar A. M. Applicability of photoelectrical solar units inside domical structures in northern conditions. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(4):435-449. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-435-449>.

5. Shakirov V. A., Yakovkina T. N., Kurbatsky V. G. Methodology for assessing electricity generation by solar power plants using data from long-term observations of meteorological stations. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(4):858-875. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-4-858-875>.

6. Babaev B. D. Calculation of electricity generation by a local solar power plant with optimal parameters. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 1: Estestvennye nauki = Herald of Dagestan State University*. 2021;36(3):21-28. (In Russ.). <https://doi.org/10.21779/2542-0321-2021-36-3-21-28>.

7. Babaev B. D. Program for calculating the influx of renewable energy resources and optimizing the operation modes of power complexes according to consumer load dynamics. In: *Problemy sovershenstvovaniya toplivno-energeticheskogo kompleksa: materialy XIV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferencii = Problems of fuel and energy complex improvement: proceedings of the 14th International Scientific and Technical Conference*. 30 October – 1 November 2018, Saratov. Saratov: Yuri Gagarin State Technical University of Saratov; 2018, p. 55-60. (In Russ.).

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

9. Perez R., Cebecauer T., Šuri M. Semi-empirical satellite models. Chapter 2. In: *Solar Energy Forecasting and Resource Assessment*. Academic press; 2013, p. 21-48. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-397177-7.00002-4>.

10. Šuri M., Cebecauer T., Skoczek A. Solargis: solar data and online applications for pv planning and performance assessment. In: *26th European Photovoltaics Solar Energy Conference*. Hamburg; 2011. <https://solargis2-web-assets.s3.eu-west-1.amazonaws.com/public/publication/2011/5514f381d4/Suri-Cebecauer-Skoczek>

EUPVSEC2011-Solargis-solar-data-and-online-applications-for-PV-planning-and-performance-assessment.pdf

11. Suri M., Cebecauer T., Skoczek A., Marais R., Mushwana C., Reinecke J., et al. Cloud cover impact on photovoltaic power production in South Africa. In: *South African Solar Energy Conference: Proceedings of the 2nd*. Port Elizabeth; 2014. <https://solargis2-web-assets.s3.eu-west-1.amazonaws.com/public/publication/2014/7e83f59297/Suri-et-al-SASEC2014-Cloud-cover-impact-on-PV-power-production-in-South-Africa.pdf>

12. Bonkaney A., Madougou S., Adamou R. Impacts of cloud cover and dust on the performance of photovoltaic module in Niamey. *Journal of Renewable Energy*. 2017;2017. <https://doi.org/10.1155/2017/9107502>.

13. Kern E. C., Gulachenski E. M., Kern G. A. Cloud effects on distributed photovoltaic generation: slow transients at the Gardner, Massachusetts photovoltaic experiment. In: *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 1989;4(2):184-190. <https://doi.org/10.1109/60.17910>.

14. Mestnikov N., Vasiliev P., Alzakkar A. Development of method of protection of solar panels against dust pollution in the Northern part of the Russian Far East. In: *International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*. 2021. <https://doi.org/10.1109/UralCon52005.2021.9559596>.

15. Mahalakshmi R., Aswin Kumar A., Kumar A. Design of fuzzy logic based maximum power point tracking controller for solar array for cloudy weather conditions. In: *Power and energy systems: towards sustainable energy*. 2014. <https://doi.org/10.1109/PESTSE.2014.6805308>.

16. Detyniecki M., Marsala C., Krishnan A., Siegel M. Weather-based solar energy prediction. In: *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*. 2012. <https://doi.org/10.1109/FUZZ-IEEE.2012.6251145>.

17. Lofthouse J., Simmons R. T., Yonk R. M. Reliability of renewable energy: solar. Available from: <https://www.usu.edu/ipe/wp-content/uploads/2015/11/Reliability-Solar-Full-Report.pdf> [Accessed 12th June 2021].

18. Sowa S. Improving the energy efficiency of lighting systems by the use of solar radiation. In: *17th International Conference Heat Transfer and Renewable Sources of Energy (HTRSE-2018): E3S Web Conference*. 2018;70:01013. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20187001013>.

19. Shilovtseva O. A. Light resources of Moscow. *Alternativnaya energetika i ekologiya = Alternative Energy and Ecology*. 2013;6-2:88-96. (In Russ.).

20. Mestnikov N. P., Al'zakkar A. M.-N. Studying the influence of cold climate of Yakutia on operation of a monocrystalline solar power generation system. *Tinchurinskie chteniya – 2021 «Energetika i cifrovaya transformatsiya»: materialy Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferencii = Tinchurinskie readings - 2021 "Energy and digital transformation": materials of the International youth scientific conference*. 28–30 April 2021, Kazan'. Kazan': Astor i Ya; 2021, p. 256-260. (In Russ.).

21. Vasilyev P. F., Mestnikov N. P. Research of the effect of the sharply continental climate of Yakutia on the func-



tioning of solar panels. *Mezhdunarodnyy tekhniko-ekonomicheskij zhurnal*. 2021;1:57-64. <https://doi.org/10.34286/1995-4646-2021-76-1-57-64>.

22. Nurullin E. G., Zajnutdinova E. E., Salahutdinov I. A. Methodological basis for the development of a combined power supply system for an agricultural enterprise using unconventional energy sources. In: *Sel'skoe hozyajstvo i prodovol'stvennaya bezopasnost': tekhnologii, innovacii, rynki, kadry: nauchnye trudy II Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj 70-letiyu Insti-*

*tuta mekhanizacii i tekhnicheskogo servisa i 90-letiyu Kazanskoy zootekhnicheskoy shkoly = Agriculture and food security: technologies, innovations, markets, personnel: scientific works of the 2<sup>nd</sup> International scientific and practical conference dedicated to the 70<sup>th</sup> anniversary of the Institute of Mechanization and Technical Service and the 90<sup>th</sup> anniversary of the Kazan Zootechnical School*. 28–30 May 2020, Kazan'. Kazan': Kazanskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet; 2020, p. 26-32. (In Russ.).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Местников Николай Петрович,

аспирант,  
ассистент кафедры электроснабжения,  
Северо-Восточный федеральный университет  
им. М.К. Аммосова,  
677000, г. Якутск, ул. Белинского, 58,  
Республика Саха (Якутия);  
ведущий инженер Отдела электроэнергетики,  
Институт физико-технических проблем Севера  
СО РАН,  
677007, г. Якутск, ул. Кулаковского, 42,  
Республика Саха (Якутия)

### Васильев Павел Филиппович,

кандидат технических наук,  
заведующий кафедрой электроснабжения,  
Северо-Восточный федеральный университет  
им. М.К. Аммосова,  
677000, г. Якутск, ул. Белинского, 58,  
Республика Саха (Якутия);  
заведующий Отделом электроэнергетики,  
Институт физико-технических проблем Севера  
СО РАН,  
677007, г. Якутск, ул. Кулаковского, 42,  
Республика Саха (Якутия)

### Давыдов Геннадий Иванович,

научный сотрудник Отдела электроэнергетики,  
Институт физико-технических проблем Севера  
СО РАН,  
677027, г. Якутск, ул. Октябрьская, 1,  
Республика Саха  
(Якутия)

### Хоютанов Александр Михайлович,

научный сотрудник Отдела электроэнергетики,  
Институт физико-технических проблем Севера  
СО РАН,  
677027, г. Якутск, ул. Октябрьская, 1,  
Республика Саха  
(Якутия)

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Nikolay P. Mestnikov,

Postgraduate student,  
Assistant Professor of the Department of Power Supply,  
M.K. Ammosov North-Eastern Federal University,  
58 Belinsky St., Yakutsk 677000,  
Republic of Sakha  
(Yakutia);  
Leading Engineer of the Department of Electric Power,  
Institute of Physical-Technical Problems of the North  
of the Siberian Branch of the Russian Academy  
of Sciences,  
42 Kulakovskiy St., Yakutsk 677007,  
Republic of Sakha (Yakutia)

### Pavel F. Vasilyev,

Cand. Sci. (Eng.),  
Head of the Department of Power Supply,  
M.K. Ammosov North-Eastern Federal University,  
58 Belinsky St., Yakutsk 677000, Republic of Sakha  
(Yakutia);  
Head of the Electric Power Engineering Department,  
Institute of Physical-Technical Problems of the North of  
the Siberian Branch of the Russian Academy  
of Sciences,  
42 Kulakovskiy St., Yakutsk 677007,  
Republic of Sakha (Yakutia)

### Gennadiy I. Davydov,

Researcher of the Department of Electric Power  
Engineering,  
Institute of Physical-Technical Problems of the North of  
the Siberian Branch of the Russian Academy  
of Sciences,  
1 Oktyabrskaya St., Yakutsk 677027, Republic of Sakha  
(Yakutia)

### Aleksandr M. Khoyutanov,

Researcher of the Department of Electric Power  
Engineering,  
Institute of Physical-Technical Problems of the North of  
the Siberian Branch of the Russian Academy of  
Sciences,  
1 Oktyabrskaya St., Yakutsk 677027, Republic  
of Sakha (Yakutia)



**Альзаккар Ахмад Мухаммед-Насер,**  
аспирант,  
Казанский государственный энергетический  
университет,  
420066, г. Казань, ул. Яруллина, 6, Россия

**Ahmad M.-N. Alzakkar,**  
Postgraduate student,  
Kazan State Power Engineering University,  
6 Yarullin St., Kazan 420066, 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 29.07.2021; одобрена после рецензирования 14.12.2021; принята к публикации 08.02.2022.

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

The article was submitted 29.07.2021; approved after reviewing 14.12.2021; accepted for publication 08.02.2022.

## ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 530.1

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-92-101>

## Классификация форм энергии в соответствии с уровнями организации материи

Владимир Владимирович Папин<sup>1✉</sup>, Николай Николаевич Ефимов<sup>2</sup>,  
Евгений Михайлович Дьяконов<sup>3</sup>, Роман Владимирович Безуглов<sup>4</sup>,  
Денис Владимирович Добрыдnev<sup>5</sup>, Анатолий Сергеевич Шмаков<sup>6</sup>

<sup>1-6</sup>Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)

им. М. И. Платова, г. Новочеркасск, Россия

<sup>1</sup>[vladimir\\_papin@bk.ru](mailto:vladimir_papin@bk.ru), <https://orcid.org/0000-0002-3277-9413>

<sup>2</sup>[efimovnn40@mail.ru](mailto:efimovnn40@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-5010-6773>

<sup>3</sup>[emdyakonov@yandex.ru](mailto:emdyakonov@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-0289-2976>

<sup>4</sup>[bezuglov@npi-tu.ru](mailto:bezuglov@npi-tu.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7142-5207>

<sup>5</sup>[d.v.dobrydnev@gmail.com](mailto:d.v.dobrydnev@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-4702-6211>

<sup>6</sup>[tolikshmakov.1998@rambler.ru](mailto:tolikshmakov.1998@rambler.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2260-8389>

**Резюме.** Цель – рассмотреть виды энергии: механическая, тепловая, химическая, электромагнитная, ядерная с точки зрения организации материи и установить жесткую связь между ними; провести сравнение энергетических потенциалов различных уровней организации вещества, для определения энергетических потенциалов произвести их расчеты. В механической энергии рассмотрены потенциальная энергия и энергия стального диска при частоте вращения 100000 об/мин. Потенциал тепловой энергии рассмотрен на примере нагрева стального образца с температуры 20°C до температуры 1400°C. В химической энергии рассмотрен самый распространенный в технике горючий элемент – углерод. Для оценки энергетического потенциала электромагнитной энергии определен суммарный заряд всех электронов в 1 кг железа. Для ядерной энергии произведен расчет энергии, выделяющейся при распаде 1 кг  $U^{235}$ . Установлена зависимость степени энергетического потенциала от уровня организации вещества. Рассмотрена возможность использования энергетического потенциала следующего уровня организации вещества. Выявлены закономерности уровней организации материи. Материал, приведенный в данной статье, носит фундаментальный характер, но нацелен на конкретное практическое применение в устройстве, разрабатываемом в рамках докторской диссертации одного из авторов на тему «Когенерационный теплоэнергетический комплекс, объединяющий принципы трансформации энергий». Классификация форм энергии, в соответствии с уровнями организации материи, производится в рамках выявления общих принципов и закономерностей использования низкопотенциальных источников различных форм энергии, которая позволяет создать новый трансформатор теплоты и теплоэнергетический комплекс на его основе. Выполненные авторами начальные теоретические исследования впоследствии будут базой для создания различных трансформаторов энергии, способных работать с несколькими видами энергии в одном устройстве.

**Ключевые слова:** механическая энергия, тепловая энергия, химическая энергия, электромагнитная энергия, ядерная энергия, организация материи

**Финансирование:** Статья подготовлена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК-2369.2020.8.

**Для цитирования:** Папин В. В., Ефимов Н. Н., Дьяконов Е. М., Безуглов Р. В., Добрыдnev Д. В., Шмаков А. С. Классификация форм энергии в соответствии с уровнями организации материи // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 1. С. 92–101. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-92-101>.

## A classification of energy forms according to the levels of organization of matter

Vladimir V. Papin<sup>1✉</sup>, Nikolay N. Efimov<sup>2</sup>, Evgeny M. Dyakonov<sup>3</sup>,  
Roman V. Bezuglov<sup>4</sup>, Denis V. Dobrydnev<sup>5</sup>, Anatoly S. Shmakov<sup>6</sup>

<sup>1-6</sup>Platov South-Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Russia

<sup>1</sup>vladimir\_papin@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3277-9413>

<sup>2</sup>efimovnn40@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5010-6773>

<sup>3</sup>emdyakonov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0289-2976>

<sup>4</sup>bezuglov@npi-tu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7142-5207>

<sup>5</sup>d.v.dobrydnev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4702-6211>

<sup>6</sup>tolikshmakov.1998@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2260-8389>

**Abstract.** The study investigates mechanical, thermal, chemical, electromagnetic, and nuclear types of energy from the standpoint of organization of matter in order to establish a connection between them. In this regard, a calculation and comparison of the energy potentials for various levels of matter organization were performed. For mechanical energy, the potential energy and the energy of a steel disk at a rotation frequency of 100,000 rpm were considered. The potential of thermal energy was discussed using the example of a steel sample heated from 20 to 1,400°C. For chemical energy, the most common combustible element in technology – carbon – was considered. The energy potential of electromagnetic energy was estimated by determining the total charge of all electrons in 1 kg of iron. For nuclear energy, a calculation of the energy released during the decay of 1 kg of  $U^{235}$  was carried out. A dependence of the energy potential degree on the level of matter organization was established. The possibility of using the energy potential of the next level of matter organization was considered. Patterns of the levels of matter organization were revealed. Despite the fundamental nature of the material presented in this article, it is aimed at a specific practical application in a device developed as part of a doctoral dissertation by one of the authors on the topic “Cogeneration thermal and power complex combining the principles of energy transformation”. A classification of energy forms in accordance with the levels of matter organization was carried out in the framework of identifying the general principles and patterns of using low-potential sources of various energy forms. This classification allows a new thermal transformer and a thermal and power complex to be created. The initial theoretical studies carried out by the authors will subsequently form a basis for the creation of various energy transformers capable of operating with several types of energy in one device.

**Keywords:** mechanical energy, thermal energy, chemical energy, electromagnetic energy, nuclear energy, organization of matter

**Funding:** The article was prepared with the financial support of a grant from the President of the Russian Federation MK-2369.2020.8 for state support of young Russian scientists – candidates of sciences.

**For citation:** Papin V. V., Efimov N. N., Dyakonov E. M., Bezuglov R. V., Dobrydnev D. V., Shmakov A. S. A classification of energy forms according to the levels of organization of matter. *iPolytech Journal*. 2022;26(1):92-101. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-92-101>.

### ВВЕДЕНИЕ

Энергетические проявления в природе разнообразны, энергия проявляет себя на различных уровнях – от макрообъектов до квантового уровня и глубже, причем чем глубже уровень организации энергии, тем наблюдается большая ее концентрация. Эту закономерность можно проследить в ходе развития технического прогресса на каждом уровне использования энергии. Самый примитивный вид – это механическая энергия, свойственная макрообъектам (взяли камень, совершили работу). Следующим уровнем организации материи выступают составные ча-

сти макрообъектов – молекулы, которые обладают собственной энергией Броуновского движения, характерной для рассматриваемого уровня, что обуславливает тепловую энергию, и ее объем возрастает на полтора порядка по отношению к механической. Следующим уровнем является энергия взаимодействия частиц молекул, атомов или химическая энергия (третий уровень организации). Далее рассматривается атом, первой на пути предстает его электронная оболочка, обуславливающая электромагнитные взаимодействия (четвертый уровень организации), затем ядро и взаимодействие между нукло-

нами – ядерная энергия (пятый уровень организации).

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Первоначально человечество освоило самый примитивный, с точки зрения авторов, уровень энергии – механическую энергию, а также способы ее применения для производства орудий быта<sup>7,8</sup> [1–3]. Эта энергия отражает взаимодействие макроскопических объектов [4, 5]. В качестве единицы массы вещества примем 1 кг.

Для примера оценки механической энергии возьмем высоту, потенциально возможную для использования в примитивных механических устройствах  $h = 100$  м.

Потенциальная энергия рассматриваемой единицы вещества составит:

$$E_{\text{п}} = m \cdot g \cdot h = 1 \cdot 9,8 \cdot 100 = 980 \text{ Дж},$$

где  $g$  – ускорение свободного падения на Земле.

Потенциальная энергия зависит от высоты располагаемого над поверхностью земли объекта и, безусловно, ограничивается рациональными условиями использования данного вида энергии.

Также можно рассмотреть энергетический потенциал рассматриваемого объекта с точки зрения использования кинетической энергии вращающейся массы (супермаховик). Ее предел может ограничиваться возможностями подшипников и магнитной подвески, а также прочностью материала на разрыв от действующих на него центробежных сил. На сегодняшний день наиболее передовые технологии позволяют обеспечить механическое вращение с частотой до 100 000 об/мин [6].

В качестве примера рассмотрим 1 кг стали цилиндрической формы с плотностью  $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$ , с частотами вращения от 10 об/с до 1666,6 об/с (100000 об/мин – технический предел).

Объем стального цилиндра определится:

$$V = m/\rho = 1/7800 = 1,28 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3.$$

Придадим цилиндру форму диска, задав его высоту 1 см (0,01 м), тогда его радиус определится:

$$R = \left(\frac{V}{\pi \cdot h}\right)^{0,5} = \left(\frac{0,000128}{3,14 \cdot 0,01}\right)^{0,5} = 0,0639 \text{ м} = 6,39 \text{ см}.$$

Момент инерции стального диска составит:

$$I = 0,5 \cdot m \cdot R^2 = 0,5 \cdot 1 \cdot 0,0639^2 = 0,0319 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Угловая скорость определится как

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot \nu = 2 \cdot 3,14 \cdot 1666,6 = 10466,2 \text{ рад/с}.$$

Энергия стального диска при частоте вращения 100000 об/мин ( $1666,6 \text{ с}^{-1}$ ):

$$E = \frac{I \cdot \omega^2}{2} = \frac{0,0319 \cdot 10466,2^2}{2} = 1,7 \text{ МДж}.$$

**Таблица 1.** Зависимость энергии вращения килограммового стального диска от частоты вращения

**Table 1.** Dependence of the 1 kg steel disk rotational energy on the rotational speed

№	Частота вращения диска, об/с	Кинетическая энергия вращения, Дж
1	10	62,9
2	50	1572,6
3	100	6290,4
4	500	157 260,6
5	1 000	629 042,5
6	1 666,6	1 747 200,4

Следующий более глубокий уровень энергии – тепловая энергия, она отражает состояние молекул в целом (скорость их Броуновского движения) и открывает более широкие возможности для человечества. Данный уровень характеризуется большими плотностями энергии по отношению к предыдущему [7, 8]. Тепловая энергия может рас-

<sup>7</sup>Энергия. Виды энергии и их особенности // Энергетика. История, настоящее и будущее [Электронный ресурс]. URL: <http://energetika.in.ua/ru/books/book-2/part-2/section-1/1-3> (25.02.2021).

<sup>8</sup>Юдаев И. В., Гамага В. В., Даус Ю. В. Возобновляемые источники энергии: учеб. для вузов. СПб.: Изд-во «Лань», 2020. 328 с.

смагиваться как явная теплота, отражающая температуру или меру Броуновского движения частиц тела (их кинетическую энергию), либо скрытую теплоту фазового перехода [9, 10], данная энергия характеризует состояние энергоносителя, т.е. является потенциальной.

Для примера исследуем стальной образец массой 1 кг. Явная теплота, определяемая теплоемкостью, для стали равна:

$$c = 460 \text{ Дж/кг} \cdot ^\circ\text{C}.$$

Рассмотрим максимально возможную для твердой стали температуру (температуру плавления):

$$t_2 = 1400^\circ\text{C}.$$

Предположим, что нагрев осуществлялся от температуры  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ , тогда тепловая энергия рассматриваемого образца определится следующим образом:

$$E = m \cdot c \cdot \Delta t = 1 \cdot 460 \cdot (1400 - 20) \\ = 634800 \text{ Дж} = 638,8 \text{ кДж}.$$

При углублении в структуру вещества видно, что следующим уровнем является внутримолекулярный уровень, а энергия взаимодействия частиц на этом уровне характеризуется как химическая энергия [11, 12], она раскрывает более широкие возможности для ее аккумулирования и использования по сравнению с предыдущими [13, 14]. Химическая энергия отражает энергию связей между атомами в молекуле, т.е. является энергией состояния или потенциальной. Для примера рассмотрим самый распространенный в технике горючий элемент – углерод, который в аллотропном состоянии представляет собой графит. В соответствии с<sup>9</sup> [15], теплота сгорания графита составляет  $q = 33\,000 \text{ кДж/кг}$ .

При рассмотрении такой же массы вещества энергия, содержащаяся на уровне химического взаимодействия, составит:

$$E_x = m \cdot q = 1 \cdot 33000 = 33000 \text{ кДж}.$$

Следующим уровнем организации вещества является структура атома. Углубляясь в него, первоначально встречаемся с электронной оболочкой, которая участвует как в химических реакциях, так и самостоятельно обуславливает следующий вид энергии – электромагнитный [16]. Плотность данного вида энергии может определяться зарядом электронов и их концентрацией [17]. В сбалансированном состоянии общий потенциал атомов нулевой, поскольку заряд электронной оболочки равен заряду ядра. Однако имеется потенциал электрической энергии, теоретически равный сумме зарядов всех электронов в единице рассматриваемого вещества. Рассмотрим энергетический потенциал уровня организации вещества – электронную оболочку атома. При движении атомов их энергия является энергией действия. В качестве примера возьмем 1 кг железа. Важно понимать, что в зависимости от вида приложенного напряжения в процессе переноса электрического заряда могут участвовать не все электроны в металле, а только те, которые расположены ближе к периферии проводника, и чем выше частота, тем тоньше этот слой и ближе к границам проводника.

Первоначально определяем молекулярную массу по таблице Менделеева<sup>10</sup> [18]:

$$M(\text{Fe}) = 56 \text{ г/моль}.$$

Определяем количество вещества:

$$\nu = \frac{m}{M} = \frac{1000}{56} = 17,85 \text{ моль}.$$

Количество атомов определится:

$$n_A = \nu \cdot A = 17,85 \cdot 6,022 \cdot 10^{23} = 1,07 \cdot 10^{25},$$

где  $A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$  – число Авогадро.

В одном атоме железа, в соответствии с таблицей Менделеева, 26 протонов, соответственно, ядро окружают 26 электронов, по-

<sup>9</sup>Теплота сгорания графита // Справочник химика 21. Химия и химическая технология [Электронный ресурс]. URL: <https://chem21.info/info/764369/> (01.04.2021).

<sup>10</sup>Ким А. М. Органическая химия: учеб. пособ. Новосибирск: Сибирское университетское изд-во, 2004. 844 с.

этому количество электронов в 1 кг железа будет следующим:

$$n_E = n_A \cdot 26 = 27,96 \cdot 10^{25}.$$

Заряд одного электрона составляет  $q_E = e$ ,  $q_E = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл, поэтому суммарный заряд всех электронов в 1 кг железа составит:

$$Q = n_E \cdot q_E = 27,96 \cdot 10^{25} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = 44\,736\,000 \text{ Кл}.$$

Энергия, которую может нести данный заряд, зависит от напряжения, и при напряжении только в один В составит:

$$E = Q \cdot U = 44\,736\,000 \cdot 1 = 44\,736\,000 \text{ Дж} = 44,7 \text{ МДж}.$$

**Таблица 2.** Энергетический потенциал суммарного заряда электронов в 1 кг железа

**Table 2.** Energy potential of the electrons total charge in 1 kg of iron

№	Напряжение, В	Энергетический потенциал, МДж
1	1	44,7
2	220	9834
3	380	16986
4	1000	44700

Наиболее глубоким уровнем организации энергии, используемым современным обществом, является энергия взаимодействия нуклонов внутри ядра [19, 20], что обуславливает энергию состояния энергоносителя и определяется следующим образом: произведем расчет энергии, выделяющейся при распаде 1 кг  $U^{235}$ , в соответствии с [21]. При делении одного атома  $U^{235}$  выделяется 200 МэВ или:

$$E_0 = 200 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = 3,2 \cdot 10^{-11} \text{ Дж}.$$

Молярная масса  $U^{235}$ , в соответствии с таблицей Менделеева:

$$M(U^{235}) = 235 \text{ г/моль} = 0,235 \text{ кг/моль}.$$

Число атомов в 1 кг урана:

$$N = \frac{A \cdot m}{M(U^{235})} = \frac{6,022 \cdot 10^{23} \cdot 1}{0,235} = 2,56 \cdot 10^{24}.$$

Энергия деления всех атомов в 1 кг  $U^{235}$ :

$$E = E_0 \cdot N = 3,2 \cdot 10^{-11} \cdot 2,56 \cdot 10^{24} = 8,2 \cdot 10^{13} \text{ Дж}.$$

Расчет подтверждается данными, приведенными в <sup>11</sup> [21], ядерное топливо по сравнению с органическим отличается очень высокой потенциальной энергоемкостью (~ в  $2,5 \cdot 10^6$  раз больше).

### СРАВНЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТЕНЦИАЛОВ РАЗЛИЧНЫХ УРОВНЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ ВЕЩЕСТВА

Для корректного сравнения энергетических потенциалов различных уровней организации вещества необходимо использовать критерий, который обеспечит приемлемую точность сравнения, т.к., например, материал можно нагревать до сверхвысоких температур или разгонять до космических скоростей и так далее. Общим критерием для приемлемой оценки энергетических потенциалов можно назвать нормальные условия, то есть те условия, которые характерны для нашей планеты и для нормального природного состояния веществ. Этот критерий необходим для приблизительной оценки (с точностью одного-двух порядков) динамики изменения энергетического потенциала в зависимости от уровня организации вещества.

Если построить график изменения порядка энергетического потенциала, основываясь на средних значениях порядка, приведенных в табл. 3, получится график, представленный на рис. 1.

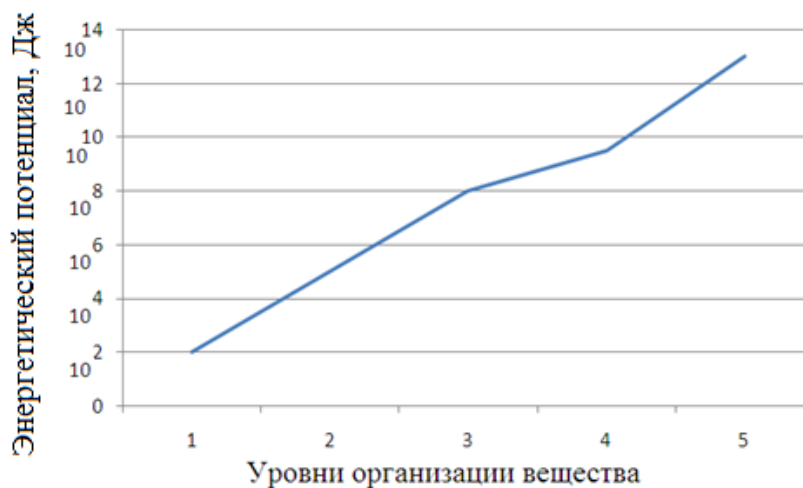
Анализируя тенденцию повышения плотности энергии с углублением уровня организации вещества, можно предположить, что она будет сохраняться и далее, и следующим этапом станет использование энергии взаимодействия составляющих нуклонов и так далее.

<sup>11</sup> Озеров А. Н. Паропроизводящие установки атомных электрических станций: учеб. пособ. Новочеркасск: Изд-во ЮРГТУ, 2008. 227 с.



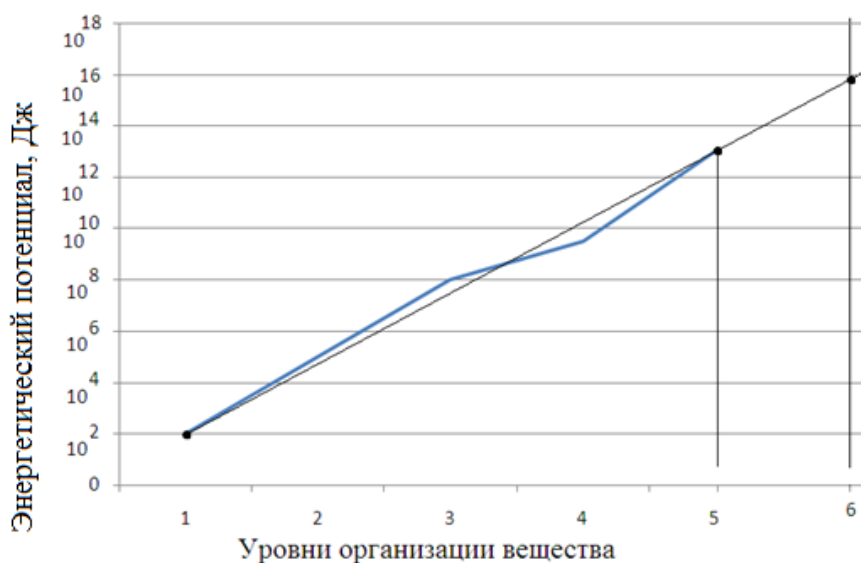
**Таблица 3.** Зависимость степени энергетического потенциала от уровня организации вещества  
**Table 3.** Dependence of the energy potential degree on the level of matter organization

№	Уровень организации вещества	Вид энергии	Потенциальное количество энергии уровня организации (энергетический потенциал), Дж
1	Макрообъект	механическая	$10^{-10}$ – $10^3$
2	Молекулы	тепловая явная	$10^5$
		тепловая скрытая	–
3	Межатомный уровень	химическая	$10^8$
4	Электронная оболочка	электромагнитная	$10^8$ – $10^{11}$
5	Межнуклонный	ядерная	$10^{13}$



**Рис. 1.** Графическая иллюстрация зависимости степени энергетического потенциала от уровня организации вещества (см. табл. 3)

**Fig. 1.** Graph of energy potential degree dependence on the level of matter organization (See Table 3)



**Рис. 2.** Анализ возможности использования энергетического потенциала следующего уровня организации вещества

**Fig. 2.** Analysis of the application possibility of the energy potential of the next level of matter organization

Согласно данным анализа, представленного на рис. 2, можно предположить, что энергетический потенциал взаимодействия частиц (кварков) внутри нуклонов составит порядка  $10^{16}$  Дж. Как видно из данных рис. 2, тенденция по увеличению энергетического потенциала 1 кг вещества при углублении на уровень организации вещества или, другими словами, потенциального количества энергии, характерного для рассматриваемого уровня, сохраняется практически линейная зависимость. Если провести усредненную сохраняющуюся, то получаем следующий уровень (точку 6) и прогнозируемое потенциальное количество энергии, содержащееся в нем или его энергетический потенциал.

Какую же практическую пользу можно получить для решения задачи использования низкопотенциальных источников энергии, используя данное наблюдение. Это позволит более правильно систематизировать процессы трансформации потенциала различных видов энергии для более наглядного их рассмотрения и определения подобных процессов и, в итоге, более точного составления модели общего преобразователя (трансформатора), концептуально подходящего под все рассматриваемые виды энергии.

Например, потенциал внутриядерной энергии можно рассмотреть как готовность данного вещества к ядерной реакции, например,  $U^{235}$  является ядерным топливом (высокий потенциал),  $U^{238}$  – сырьем (средний потенциал), а  $C^{12}$  – нерадиоактивен (низкий потенциал).

С углублением уровня растет энергоемкость и функциональность применения энергетического потенциала.

Материал, приведенный в данной статье, носит фундаментальный характер, но нацелен на конкретное практическое применение в устройстве, разрабатываемом в рамках докторской диссертации одного из авторов «Когенерационный теплоэнергетический комплекс, объединяющий принципы транс-

формации энергий». Первые главы посвящены выявлению общих принципов и закономерностям использования низкопотенциальных источников различных форм энергий, начинающихся с приведенной в данной статье классификации форм энергии в соответствии с уровнями организации материи. Данные закономерности ложатся в основу модели нового трансформатора теплоты с новыми свойствами, отличающимися от абсорбционных и парокомпрессионных трансформаторов эффективностью использования первичной энергии. На базе нового трансформатора теплоты предлагается высокоэффективный теплоэнергетический комплекс, работающий на органическом топливе и позволяющий его экономить вплоть до 400% за счет эффективного использования низкопотенциальных источников. В данный момент ведется изготовление прототипа теплоэнергетического комплекса.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного анализа просматривается закономерность: различные уровни организации материи (макрообъекты, молекулы, атомы и так далее) обладают различным энергетическим потенциалом. Причем при переходе на предыдущий, более глубокий, уровень объемы энергий увеличиваются в среднем на два порядка. Это позволяет считать, что чем глубже в материю углубляемся, тем больше получаем возможностей почерпнуть и трансформировать энергию. При переходе на уровень ниже сохраняется постоянная тенденция увеличения объема энергии на полтора-два порядка. Таким образом, выделены основные формы энергий, используемые человечеством, в энергетике и привязаны к уровню организации материи, для которых они характерны. Данное наблюдение является теоретическим и позволяет взглянуть на классификацию энергий более системно, что в дальнейшем может быть полезно для практического применения.

## Список источников

1. Li Tao, Yao Shuai, He Limin, Yu Xiyun, Shan Siwei. Compositional study of household ceramic assemblages from a Late Neolithic (5300-4500 cal BP) earthen walled-

town in the middle Yangtze River valley of China // Journal of Archaeological Science: Reports. 2021. Vol. 39. P. 103159. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2021.103159>.

2. Ardren T., Miller S. Household garden plant agency in the creation of Classic Maya social identities // *Journal of Anthropological Archaeology*. 2020. Vol. 60. P. 101212. <https://doi.org/10.1016/j.jaa.2020.101212>.
3. Amirante R., Cassone E., Distaso E., Tamburrano P. Overview on recent developments in energy storage: mechanical, electrochemical and hydrogen technologies // *Energy Conversion and Management*. 2017. Vol. 132. P. 372–387. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.046>.
4. Congedo P. M., Baglivo C., Carrieri L. Hypothesis of thermal and mechanical energy storage with unconventional methods // *Energy Conversion and Management*. 2020. Vol. 218. P. 372–387. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113014>.
5. Maamer B., Boughamoura A., Fath El-Bab A. M. R., Francis L. A., Tounsi F. A review on design improvements and techniques for mechanical energy harvesting using piezoelectric and electromagnetic schemes // *Energy Conversion and Management*. 2019. Vol. 199. P. 111973. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111973>.
6. Singh K. K., Singh R. Process mechanics based uncertainty modeling for cutting force prediction in high speed micromilling of Ti6Al4V // *Procedia Manufacturing*. 2020. Vol. 48. P. 273–282. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.05.048>.
7. Bezuglov R., Papin V., Dyakonov E., Veselovskaya E., Filimonov V. waste co-combustion with a conventional fossil fuel on power plants // *Mechanical Engineering and Materials Science: MATEC Web of Conferences*. 2020. Vol. 329. P. 03081. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202032903081>.
8. Efimov N. N., Parshukov V. I., Kopitsa V. V., Papin V. V., Bezuglov R. V., Lagutin A. Y. Studying possibilities of seasonal cold for application in multifunctional heat supply units // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018. Vol. 13. Iss. 7. P. 2623–2631.
9. Shaposhnikov V. V., Biryukov B. V. Increasing efficiency of CCP-based TPP with injection of dry saturated steam from recovery boiler into regenerator // *Journal of physics: Conference series*. 2017. No. 891. P. 012185. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/891/1/012185>.
10. Shaposhnikov V. V., Dyakonov E. M., Mihalko Ya. O., Batko D. N. Study of TGM-94 boiler with variable feed water temperature using a calculation model // *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020. Vol. 862. Iss. 6. P. 062096. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/862/6/062096>.
11. Боровков В. М., Зысин Л. В., Сергеев В. В. Технологии энергетического использования растительной биомассы и органосодержащих отходов в энергетике // *Известия Российской академии наук. Энергетика*. 2002. № 6. С. 13–24.
12. Зысин Л. В., Кошкин Н. Л., Орлов Е. И., Сергеев В. В., Стешенков Л. П. Исследование совместной работы дизеля и газогенератора, перерабатывающего растительную биомассу // *Теплоэнергетика*. 2002. Т. 49. № 1. С. 14–19.
13. Cramer C. J., Truhlar D. G. Density functional theory for transition metals and transition metal chemistry // *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2009. Iss. 46. P. 10757–10816. <https://doi.org/10.1039/B907148B>.
14. Hapka M., Żuchowski P. S. Interactions of atoms and molecules in cold chemistry // *Cold Chemistry: Molecular Scattering and Reactivity Near Absolute Zero*. 2017. Vol. 5. P. 203–275. <https://doi.org/10.1039/9781782626800-00203>.
15. Ротинян А. Л., Филатов В. П., Цибилов Г. В. Оптимизация производства хлора (диафрагменный метод). М.: Химия, 1980. 272 с.
16. Gür T. M. Review of electrical energy storage technologies, materials and systems: challenges and prospects for large-scale grid storage // *Energy & Environmental Science*. 2018. Iss. 10. P. 2696–2767. <https://doi.org/10.1039/C8EE01419A>.
17. Contino F., Moret S., Limpens G., Jeanmart H. Whole-energy system models: the advisors for the energy transition // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2020. Vol. 81. P. 100872. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2020.100872>.
18. Niaz M. Mendeleev and the periodic table: a response to Scerri // *Educación Química*. 2013. Vol. 24. Iss. 3. P. 285–287. [https://doi.org/10.1016/S0187-893X\(13\)72477-7](https://doi.org/10.1016/S0187-893X(13)72477-7).
19. Zhu Can, Yuan Jun, Cai Fangfang, Meng Lei, Zhang Huotian, Chen Honggang. Tuning the electron-deficient core of a non-fullerene acceptor to achieve over 17% efficiency in a single-junction organic solar cell // *Energy & Environmental Science*. 2020. Iss. 13. P. 2459–2466. <https://doi.org/10.1039/D0EE00862A>.
20. Tabatabaei M., Aghbashlo M., Dehghani M., Panahi H. K. S., Mollahosseini A., Hosseini M., et al. Reactor technologies for biodiesel production and processing: A review // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2019. Vol. 74. P. 239–303. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2019.06.001>.
21. Lee Yong Deok, Ahn Seong-Kyu, Choi Woo-Seok. Sensitivity simulation on isotopic fissile measurement using neutron resonances // *Nuclear Engineering and Technology*. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.net.2021.08.017>.

## References

1. Li Tao, Yao Shuai, He Limin, Yu Xiyun, Shan Siwei. Compositional study of household ceramic assemblages from a Late Neolithic (5300–4500 cal BP) earthen walled-town in the middle Yangtze River valley of China. *Journal of Archaeological Science: Reports*. 2021;39:103159. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2021.103159>.
2. Ardren T., Miller S. Household garden plant agency in the creation of Classic Maya social identities. *Journal of Anthropological Archaeology*. 2020;60:101212. <https://doi.org/10.1016/j.jaa.2020.101212>.
3. Amirante R., Cassone E., Distaso E., Tamburrano P. Overview on recent developments in energy storage: mechanical, electrochemical and hydrogen technologies. *Energy Conversion and Management*. 2017;132:372–387.

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.046>.

4. Congedo P. M., Baglivo C., Carrieri L., Hypothesis of thermal and mechanical energy storage with unconventional methods. *Energy Conversion and Management*. 2020;218:372-387.

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113014>.

5. Maamer B., Boughamouira A., Fath El-Bab A. M. R., Francis L. A., Tounsi F. A review on design improvements and techniques for mechanical energy harvesting using piezoelectric and electromagnetic schemes. *Energy Conversion and Management*. 2019;199:111973. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111973>.

6. Singh K. K., Singh R. Process mechanics based uncertainty modeling for cutting force prediction in high speed micromilling of Ti6Al4V. *Procedia Manufacturing*. 2020;48:273-282.

<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.05.048>.

7. Bezuglov R., Papin V., Dyakonov E., Veselovskaya E., Filimonov V. Waste co-combustion with a conventional fossil fuel on power plants. In: *Mechanical Engineering and Materials Science: MATEC Web of Conferences*. 2020;329:03081.

<https://doi.org/10.1051/mateconf/202032903081>.

8. Efimov N. N., Parshukov V. I., Kopitsa V. V., Papin V. V., Bezuglov R. V., Lagutin A. Y. Studying possibilities of seasonal cold for application in multifunctional heat supply units. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018;13(7):2623-2631.

9. Shaposhnikov V. V., Biryukov B. V. Increasing efficiency of CCP-based TPP with injection of dry saturated steam from recovery boiler into regenerator. *Journal of physics: Conference series*. 2017;891:012185. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/891/1/012185>.

10. Shaposhnikov V. V., Dyakonov E. M., Mihalko Ya. O., Batko D. N. Study of TGM-94 boiler with variable feed water temperature using a calculation model. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020;862(6):062096. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/862/6/062096>.

11. Borovkov V. M., Zysin L. V., Sergeev V. V. Technologies for the energy use of plant biomass and organic waste in the energy sector. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Energetika = Thermal Engineering*. 2002;6:13-24. (In Russ.).

12. Zysin L. V., Koshkin N. L., Orlov E. I., Sergeev V. V.,

Steshenkov L. P. Research of the combined operation of a diesel engine and plant biomass processing gas generator. *Teploenergetika*. 2002;49(1):14-19. (In Russ.).

13. Cramer C. J., Truhlar D. G. Density functional theory for transition metals and transition metal chemistry. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2009;46:10757-10816. <https://doi.org/10.1039/B907148B>.

14. Hapka M., Żuchowski P. S. Interactions of atoms and molecules in cold chemistry. *Cold Chemistry: Molecular Scattering and Reactivity Near Absolute Zero*. 2017;5:203-275. <https://doi.org/10.1039/9781782626800-00203>.

15. Rotinyan A. L., Filatov V. P., Cibizov G. V. *Optimization of chlorine production (diaphragm method)*. Moscow: Himiya; 1980, 272 p. (In Russ.).

16. Gür T. M. Review of electrical energy storage technologies, materials and systems: challenges and prospects for large-scale grid storage. *Energy & Environmental Science*. 2018;10: 2696-2767. <https://doi.org/10.1039/C8EE01419A>.

17. Contino F., Moret S., Limpens G., Jeanmart H. Whole-energy system models: the advisors for the energy transition. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2020;81:100872.

<https://doi.org/10.1016/j.pecs.2020.100872>.

18. Niaz M. Mendeleev and the periodic table: a response to Scerri. *Educación Química*. 2013;24(3):285-287. [https://doi.org/10.1016/S0187-893X\(13\)72477-7](https://doi.org/10.1016/S0187-893X(13)72477-7).

19. Zhu Can, Yuan Jun, Cai, Fangfang, Meng Lei, Zhang Huotian, Chen Honggang. Tuning the electron-deficient core of a non-fullerene acceptor to achieve over 17% efficiency in a single-junction organic solar cell. *Energy & Environmental Science*. 2020;13:2459-2466. <https://doi.org/10.1039/D0EE00862A>.

20. Tabatabaei M., Aghbashlo M., Dehghani M., Panahi H. K. S., Mollahosseini A., Hosseini M., et al. Reactor technologies for biodiesel production and processing: A review. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2019;74:239-303.

<https://doi.org/10.1016/j.pecs.2019.06.001>.

21. Lee Yong Deok, Ahn Seong-Kyu, Choi Woo-Seok. Sensitivity simulation on isotopic fissile measurement using neutron resonances. *Nuclear Engineering and Technology*. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.net.2021.08.017>.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Папин Владимир Владимирович,**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры «Тепловые электрические станции  
и теплотехника»,

Южно-Российский государственный политехнический  
университет (НПИ) им. М. И. Платова,  
346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения,  
132, Россия

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Vladimir V. Papin,**

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Thermal Power  
Plants and  
Thermal Engineering,  
Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI),  
132, Prosveshcheniya St., Novocherkassk 346428,  
Russia

**Ефимов Николай Николаевич,**  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Тепловые электрические  
станции и теплотехника»,  
Южно-Российский государственный политехнический  
университет (НПИ) им. М. И. Платова,  
346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132,  
Россия

**Дьяконов Евгений Михайлович,**  
кандидат технических наук, доцент,  
проректор по образовательной деятельности,  
заведующий кафедрой «Тепловые электрические  
станции и теплотехника»,  
Южно-Российский государственный политехнический  
университет (НПИ) им. М. И. Платова,  
346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132,  
Россия

**Безуглов Роман Владимирович,**  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Тепловые электрические станции и  
теплотехника»,  
помощник ректора,  
Южно-Российский государственный политехнический  
университет (НПИ) им. М. И. Платова,  
346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132,  
Россия

**Добрыдnev Денис Владимирович,**  
аспирант,  
Южно-Российский государственный политехнический  
университет (НПИ) им. М. И. Платова,  
346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132,  
Россия

**Шмаков Анатолий Сергеевич,**  
магистрант,  
Южно-Российский государственный политехнический  
университет (НПИ) им. М. И. Платова,  
346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132,  
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 18.10.2021; одобрена после рецензирования 10.12.2021; принята к публикации 01.03.2022.

**Nikolay N. Efimov,**  
Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Professor of the Department of Thermal Power Plants and  
Thermal Engineering,  
Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI),  
132, Prosveshcheniya St., Novocherkassk 346428,  
Russia

**Evgeny M. Dyakonov,**  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Vice-Rector for Educational Activities,  
Head of the Department of Thermal Power Plants and  
Thermal Engineering,  
Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI),  
132, Prosveshcheniya St., Novocherkassk 346428,  
Russia

**Roman V. Bezuglov,**  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department  
of Thermal Power Plants and Thermal Engineering,  
Rector's assistant,  
Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI),  
132, Prosveshcheniya St., Novocherkassk 346428,  
Russia

**Denis V. Dobrydnev,**  
Postgraduate Student,  
Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI),  
132, Prosveshcheniya St., Novocherkassk 346428,  
Russia

**Anatoly S. Shmakov,**  
Master's Degree Student,  
Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI),  
132, Prosveshcheniya St., Novocherkassk 346428,  
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 18.10.2021; approved after reviewing 10.12.2021; accepted for publication 01.03.2022.



## ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 621.311.001.57:621.314

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-102-116>

## Автоматическая настройка регуляторов частоты и обменной мощности в энергосистемах малой мощности

Александр Георгиевич Фишов<sup>1✉</sup>, Анатолий Анатольевич Осинцев<sup>2</sup>,  
Михаил Юрьевич Фролов<sup>3</sup>, Денис Владимирович Армеев<sup>4</sup>,  
Инна Сергеевна Мурашкина<sup>5</sup>

<sup>1-5</sup>Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

<sup>1</sup>[fishov@ngs.ru](mailto:fishov@ngs.ru), <https://orcid.org/0000-0000-0002-5712-064X>

<sup>2</sup>[osincev@corp.nstu.ru](mailto:osincev@corp.nstu.ru), <https://orcid.org/0000-0000-0001-8373-3493>

<sup>3</sup>[myu.frolov@gmail.com](mailto:myu.frolov@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0000-0003-4408-0316>

<sup>4</sup>[armeev@yandex.ru](mailto:armeev@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0000-0002-2128-9590>

<sup>5</sup>[murashkinainna@yandex.ru](mailto:murashkinainna@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-0124-1071>

**Резюме.** Цель – разработка алгоритмов самонастройки регулятора мощности в режиме нормальной эксплуатации энергоблоков локальных энергосистем с малой синхронной генерацией, способных работать как в автономном режиме, так и в параллельном режиме с внешней электрической сетью. Настройка регулятора мощности энергоблока происходит в ходе нормальной эксплуатации по показателям качества регистрируемых переходных процессов при нескольких коммутациях нагрузок с вариацией коэффициента усиления. Корректировка коэффициентов усиления по каждому из каналов регулирования осуществляется в результате его оптимизации по функции, аппроксимирующей зависимость показателя качества переходного процесса от значения коэффициента усиления с учетом разнохарактерности процессов и разномасштабности возмущений режима при набросе/сбросе мощности. В качестве показателя качества процесса используется сумма взвешенных значений переключения и продолжительности процесса. Благодаря адаптации, с течением времени регулятор автоматически настраивается и качество регулирования повышается. Представлены алгоритмы самонастройки регулятора мощности при регулировании частоты в режиме изолированной работы и для регулирования обменного перетока в режиме параллельной работы MiniGrid. В отличие от самонастройки регулятора частоты, при самонастройке регулятора обменного перетока мощности по переходным функциям, связанным с коммутациями нагрузок, алгоритмом производится фильтрация высокочастотных изменений мощности в результате электромеханических колебаний. Приводятся результаты моделирования процессов самонастройки регулятора мощности для простейшей схемы с одним генератором, подтверждающие работоспособность и эффективность представленных метода и алгоритмов. Предложенный метод самонастройки регуляторов частоты и обменного перетока является перспективным для технологической доработки и использования в системах регулирования мощности MiniGrid.

**Ключевые слова:** малая генерация, энергосистемы малой мощности, настройка регуляторов частоты и мощности, энергосистема, синхронные генераторы

**Для цитирования:** Фишов А. Г., Осинцев А. А., Фролов М. Ю., Армеев Д. В., Мурашкина И. С. Автоматическая настройка регуляторов частоты и обменной мощности в энергосистемах малой мощности // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 1. С. 102–116. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-102-116>.

## Automatic tuning of frequency and interchange power controllers in low-power energy systems

Alexander G. Fishov<sup>1✉</sup>, Anatoly A. Osintsev<sup>2</sup>, Mikhail Yu. Frolov<sup>3</sup>,  
Denis V. Armeev<sup>4</sup>, Inna S. Murashkina<sup>5</sup>

<sup>1-5</sup>Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>1</sup>fishov@ngs.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0002-5712-064X>

<sup>2</sup>osintsev@corp.nstu.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0001-8373-3493>

<sup>3</sup>myu.frolov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0000-0003-4408-0316>

<sup>4</sup>armeev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0002-2128-9590>

<sup>5</sup>murashkinainna@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0124-1071>

**Abstract.** The present work discusses the development of algorithms for power controller autotuning under normal operation in power units of local energy systems having low synchronous generation, which can operate in stand-alone and parallel mode with the external power grid. The power controller of a power unit is tuned in the course of routine operation following the quality indicators of recorded transients under several load commutations upon a varying amplification factor. The amplification factor for each control channel is optimised by a function that approximates the dependence of the transient characteristics on the value of this factor, including the diversity of processes and mode disturbances during power surge/shedding. The sum of weighted overshoot and process duration values is used as a process quality indicator. Owing to adaptation, the controller automatically tunes itself over time, and the control quality improves. This article presents algorithms for autotuning the power controller when regulating frequency and interchange overcurrent under isolated and parallel operation mode of the MiniGrid, respectively. Unlike frequency controller, when the interchange overcurrent controller is autotuned by transient functions associated with load commutations, the algorithm filters out high-frequency power variations resulting from electromechanical oscillations. The simulation results of autotuning the power controller for an elementary scheme, having one generator, confirm the efficiency of the presented method and algorithms. The proposed method of autotuning frequency and interchange overcurrent controllers appears promising for technological enhancement and use in MiniGrid power control systems.

**Keywords:** small generation, MiniGrid, adjustment of frequency and power controllers, power system, synchronous generators

**For citation:** Fishov A. G., Osintsev A. A., Frolov M. Yu., Armeev D. V., Murashkina I. S. Automatic tuning of frequency and interchange power controllers in low-power energy systems. *iPolytech Journal*. 2022;26(1):102-116. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-102-116>.

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных трендов развития электроэнергетики являются децентрализация производства электроэнергии и, соответственно, управления режимами электрических сетей с распределенной малой генерацией. На передний план выходят в целом сбалансированные энергосистемы малой мощности (MiniGrid)<sup>6</sup> [1–3], способные работать как параллельно с внешней энергосистемой в составе распределительных электрических сетей, так и автономно, что позволяет значительно повысить экономичность

режимов электростанций малой мощности и надежность энергосистемы в целом, особенно за счет ее живучести при системных авариях.

Для электростанций малой мощности существует множество причин, определяющих необходимость автоматической настройки их регуляторов частоты и обменного перетока:

– проектирование и определение настроек автоматики, в т.ч. регуляторов, осуществляются в условиях большей неопределенности по отношению к обычным электростанциям;

<sup>6</sup>Разработка целевой модели (прототипа) Mini/MicroGrid // Вести в электроэнергетике. 2021. № 3. С. 2–11. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.eriras.ru/files/razrabotka\\_tselevoy\\_modeli\\_prototipa\\_minimicrogrid.pdf](https://www.eriras.ru/files/razrabotka_tselevoy_modeli_prototipa_minimicrogrid.pdf) (15.09.2021).

– в процессе эксплуатации оперативно могут меняться точки присоединения к внешней сети для режима параллельной работы;

– собственные нагрузки MiniGrid изменяются по составу и в широком диапазоне мощности;

– состав и структура включенных генерирующих мощностей также меняются в широком диапазоне;

– квалификация персонала электростанций не позволяет самостоятельно выбирать и изменять настройки регуляторов.

Среди первых работ по автоматической настройке регуляторов следует выделить [4], где Дж. Г. Циглером и Н. Б. Никольсом в 1942 г. была предложена простая методика расчета параметров пропорционально-интегрально-дифференцирующих (ПИД) регуляторов, которая, безусловно, дает не самые лучшие результаты. Несмотря на это, она до сих пор часто используется на практике, хотя в последующем появилось множество более эффективных методов. Дж. Г. Циглер и Н. Б. Никольс предложили два метода настройки ПИД-регуляторов. Один из них основан на параметрах отклика объекта на единичный скачок, второй – на частотных характеристиках объекта управления.

Существующие аналитические методы настройки регуляторов, как правило, основаны на аппроксимации динамики объекта моделью первого или второго порядка с задержкой. Причиной этого является невозможность аналитического решения систем уравнений при использовании моделей более высокого порядка. В последние годы, в связи с появлением мощных контроллеров и персональных компьютеров, получили развитие и популярность численные методы оптимизации. Они являются гибким инструментом для настройки параметров регулятора для моделей любой сложности и позволяют учитывать нелинейности объекта управления и требования к робастности [6–21].

В отличие от классических систем регулирования, где, как правило, стремятся добиться высокой статической и динамической точности регулирования, быстродействия, поддержание баланса активной мощности в MiniGrid в автономном режиме осуществля-

ется за счет регулирования частоты, а при параллельной работе с внешней сетью – посредством регулирования обменного перетока. При этом в регуляторах частоты и мощности электростанций приходится учитывать негативное влияние указанных параметров на экономичность выработки электроэнергии и ресурс генерирующего оборудования. Можно говорить о необходимости достаточного и мягкого регулирования. Для этого специально вводятся «мертвые полосы» по частоте и обменной мощности, требуемое время регулирования исчисляется десятками секунд, а, например, допустимое динамическое отклонение частоты при работе в автономном режиме достигает нескольких Гц.

Примером системы регулирования мощности электростанции MiniGrid может служить ее реализация в пилотном проекте, представленная в [5], где:

1. В автономном режиме частота контролируется регуляторами скорости по пропорционально-интегральному (PI) закону, обеспечивающему полное восстановление номинальной частоты после восстановления баланса мощности регулятором.

2. В режиме параллельной работы регулятор частоты использует только пропорциональное регулирование, т.к. обеспечить стабилизацию частоты в Единой энергетической системе России энергоблоками малой мощности не получится, а работа PI-регулятора за счет интегрального канала будет приводить к полной загрузке или разгрузке энергоблока при отклонениях частоты.

3. Регулирование перетока по PI-закону, как уже отмечалось, нецелесообразно, однако такой режим может использоваться в некоторых специальных случаях, и автоматическая настройка регуляторов для этого режима вполне возможна. Более целесообразна коррекция загрузки энергоблоков при выходе обменной мощности из диапазона заданного коридора («мертвой полосы»), представляющая собой ступенчатую загрузку или разгрузку энергоблоков, причем регулированием в полном понимании этого слова она не является, а также не несет угрозы возникновения самораскачивания режима из-за неудачных коэффициентов регулирования обмен-

ной мощности.

4. При нескольких включенных на параллельную работу генераторах осуществляется групповое регулирование мощности с назначением ведущего и прочих ведомых генераторов.

5. При аварийном отключении или отказе регуляторов ведущего генератора осуществляется автоматическое переназначение ведущего генератора.

6. При автонастройке регуляторов мощности контролируется возникновение самораскачивания с его прерыванием путем снижения коэффициентов усиления регуляторов.

### **ОБОСНОВАНИЕ ЗАКОНА РЕГУЛИРОВАНИЯ ДЛЯ САМОНАСТРАИВАЮЩИХСЯ РЕГУЛЯТОРОВ ЧАСТОТЫ И ОБМЕННОГО ПЕРЕТОКА И ОБЩАЯ ИДЕЯ МЕТОДА**

Рассмотрим требования к регулированию частоты в автономном режиме MiniGrid и при ее параллельной работе с внешней энергосистемой.

Для автономного режима MiniGrid существуют требования по ширине зоны нечувствительности регуляторов скорости вращения ( $50 \pm 0,075$  Гц), астатичности характеристики регулирования и быстродействия, определяемого динамическими характеристиками двигателей энергоблоков и ресурсными ограничениями их работоспособности. Соответственно этим требованиям, регуляторы могут не участвовать в регулировании при малых колебаниях частоты, должны ограничивать ее колебания при набросах/сбросах мощности генераторов, восстанавливать частоту после возмущений, ограничивать увеличение частоты (скорости вращения вала) при отключении нагруженного энергоблока.

В режиме параллельной работы система регулирования частоты и мощности MiniGrid должна обеспечивать выполнение требований [5] по участию энергоблоков в общем первичном регулировании. Соответственно этим требованиям, регулирование перетока по внешним связям должно обеспечиваться при выходе частоты из мертвой полосы регулирования частоты ( $50 \pm 0,075$  Гц) с требуемыми статизмом и динамическими характе-

ристиками во всем диапазоне располагаемой мощности энергоблоков.

Рассмотрим два основных способа использования обменного перетока мощности с внешней энергосистемой по связям в режиме параллельной работы:

1) регулирование перетока для поддержания заданного значения;

2) работа без регулирования с удержанием перетока внутри допустимого коридора его значений (использование корректировок мощности генерирующего оборудования только при выходе обменного перетока за разрешенные границы).

Сразу следует отметить, что работа MiniGrid в режиме регулирования перетока обменной мощности с поддержанием заданного значения практически нивелирует основные положительные эффекты от параллельной работы, т.к. поддержание динамического баланса генерации и потребления требует интенсивной работы регуляторов мощности. Интенсивность этого регулирования, в отличие от работы регуляторов частоты в автономном режиме, значительно выше, т.к. в последнем случае небалансы мощности, имеющиеся при колебаниях частоты, частично демпфируются вращающимися массами генерирующего оборудования. В результате генераторы работают в режимах переменной нагрузки, что снижает их экономические и ресурсные показатели.

Работа в коридоре при его достаточной ширине позволяет реализовать основные преимущества параллельной работы.

Для удовлетворения требований к качеству регулирования частоты и перетоков мощности MiniGrid достаточно использовать закон PI-регулирования, в котором канал по отклонению способен обеспечить требуемое быстродействие регулирования, а по интегралу – его астатический характер. При этом требуемое качество регулирования может обеспечиваться оптимальным соотношением коэффициентов по отклонению и интегралу отклонения выходного параметра.

В данной работе предлагается и исследуется способ самонастройки регуляторов частоты и обменного перетока мощности MiniGrid путем минимизации компромиссной

целевой функции  $F$  из взвешенных нормализованных значений перерегулирования и продолжительности регулирования выходного параметра для нескольких ординарных возмущений баланса мощности коммутационного характера, т.е. на основе показателей их переходных характеристик:

$$F = C_1 \times \Delta X + C_2 \times T_{\text{рег}} \rightarrow \min,$$

где  $C_1$ ,  $C_2$  – весовые коэффициенты, задаваемые технологом;  $\Delta X$  – нормализованное перерегулирование выходного параметра;  $T_{\text{рег}}$  – нормализованная длительность регулирования выходного параметра.

Нарушение баланса мощности вследствие включения/отключения нагрузки, отключения нагруженных генераторов является для MiniGrid частыми событиями, поэтому получение переходных характеристик при эксплуатации не вызывает сложностей, однако следует иметь в виду, что нелинейность объекта вызывает несимметрию переходных характеристик при набросах/сбросах мощности, а также их разномасштабность, зависящую от величины наброса/сброса мощности.

На рис. 1, 2 представлены переходные характеристики (переходные процессы изменения частоты в MiniGrid с PI-регулированием частоты) для одномашинной MiniGrid при ее моделировании в Simulink.

На рис. 1 можно увидеть несимметрию процессов (отличие в характере и параметрах, в т.ч. величине клевка, перерегулирования, времени его максимального возникновения) при набросе мощности (на интервале 0–30 с) и ее сбросе (на интервале 30–60 с).

Сравнение рис. 1 и 2, процессы которых отличаются величиной возмущения, позволяет увидеть и сделать вывод об их качественном подобии и количественном отличии (разномасштабности).

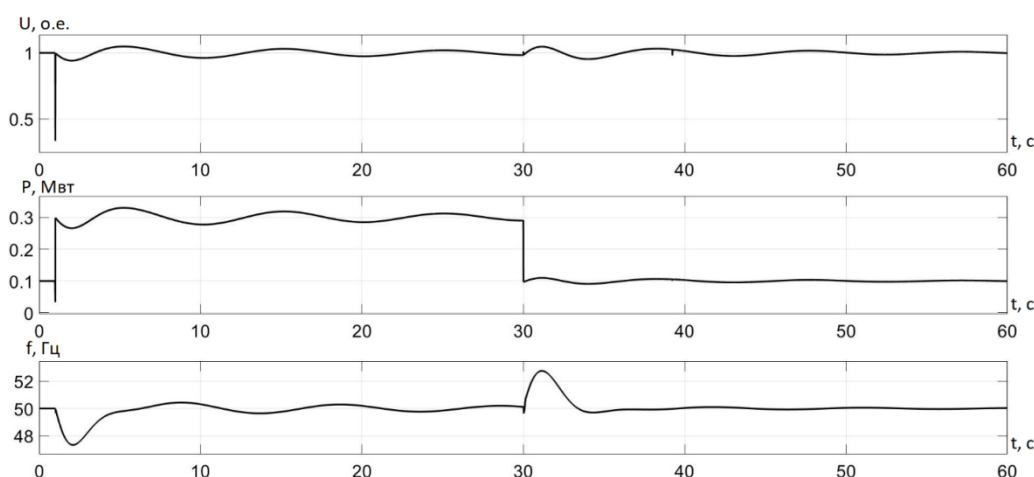
Учет разномасштабности процессов может быть произведен приведением характерных параметров процесса при набросе/сбросе мощности  $\Delta P_i$  к принятому базовому процессу при набросе/сбросе мощности  $\Delta P_0$ :

$$\Delta X_{i \text{ прив}} = \Delta X_i \times \Delta P_0 / \Delta P_i.$$

Учет разнохарактерности процессов может быть произведен дополнительным приведением характерных параметров процесса к принятому базовому процессу при отличии типа процесса от базового, причем приведение осуществляется индивидуально к каждому из параметров (клевков, перерегулирование, длительность процесса):

$$\Delta X_{i \text{ прив}} = \Delta X_{i \text{ прив}} \times \Delta X_0 / \Delta X_{i \text{ прив}},$$

где  $\Delta X_0$  – параметр базового процесса.



**Рис. 1. Переходные процессы в автономном режиме MiniGrid при набросе/сбросе мощности нагрузки 200 кВт (верхний процесс – напряжение, средний – мощность, нижний – частота)**

**Fig. 1. Transients in the off-line mode of the MiniGrid under the load power surge/shedding of 200 kW (the upper process is voltage, the middle one is power, the lower one is frequency)**



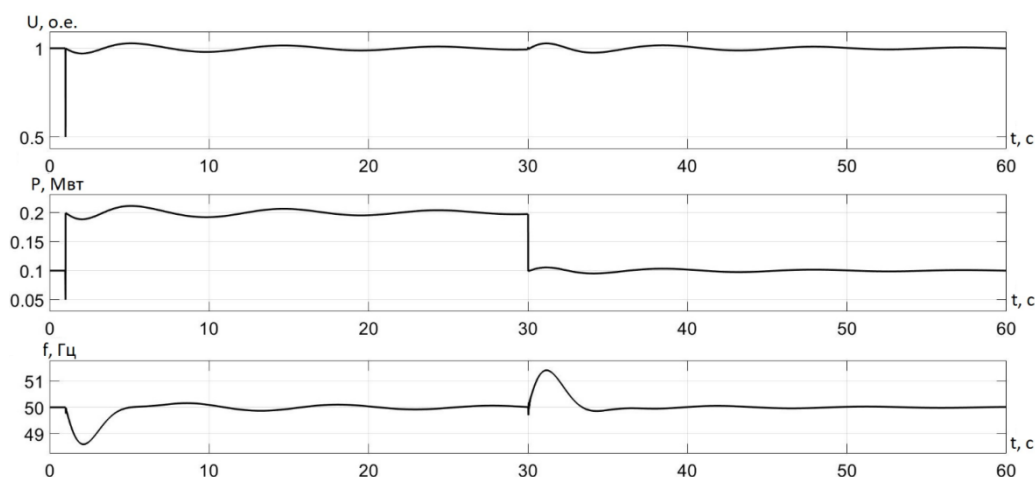


Рис. 2. Переходные процессы в автономном режиме MiniGrid при набросе/сбросе мощности нагрузки 100 кВт (верхний процесс – напряжение, средний – мощность, нижний – частота)  
 Fig. 2. Transients in the off-line mode of the MiniGrid under the load power surge/shedding of 100 kW (the upper process is voltage, the middle one is power, the lower one is frequency)

## АЛГОРИТМЫ АВТОНАСТРОЙКИ PI-РЕГУЛЯТОРОВ

### Алгоритм автонастройки регулятора частоты в автономном режиме:

1. Инициализация (задание) начальных коэффициентов усиления по отклонению (K1) и интегралу отклонения (K2) частоты от уставки регулятора.

2. Определение коэффициентов приведения параметров по трем ординарным процессам для:

а) коэффициента разномасштабности d1 процессов при вариации мощности возмущения ( $d1 = \Delta P_0 / \Delta P_i$ );

б) коэффициентов разнохарактерности процессов d2 при включении/отключении нагрузки ( $d2 = \Delta X_0 / \Delta X_i \text{ прив.}$ ).

Для этого для а):

- фиксируется процесс включения нагрузки мощностью, существенно отличной от базовой  $\Delta P_0$ ;

- определяется  $\Delta X_i$ ;

- определяется коэффициент различия масштабов процессов  $d1 = \Delta P_0 / \Delta P_i$ .

Для б):

- фиксируется процесс включения и отключения нагрузки одинаковой мощности;

- определяется  $\Delta X_{1,2}$  и  $T_{\text{пер } 1,2}$ ;

- определяется коэффициент различия параметров включения/отключения  $d2 = \Delta X_0 / \Delta X_i \text{ прив.}$

В последующих циклических процессах

все  $\Delta X_i$  по мере получения масштабируются с учетом показателей характерности и масштабности процессов:

$$\Delta X_{i \text{ прив}} = \Delta X_i \times d1 \times d2.$$

3. Циклическая часть алгоритма:

- фиксируется значимый ординарный процесс, рассчитывается  $F_i$ ;

- коэффициент K1 уменьшается до K1/2;

- фиксируется значимый ординарный процесс, осуществляется приведение параметров, рассчитывается  $F_{i+1}$ ;

- если  $|(F_{i+1} - F_i)| \leq \Delta F_{\text{значим}}$  настройка K1 регулятора не производится, то K1 увеличивается до 1,5 K1, т.е. до 3 K1 текущего;

- фиксируется ординарный процесс, осуществляется приведение параметров, в процессе контролируется затухание колебаний;

- при незатухающих колебаниях K1 восстанавливается, K1 принимается равным K1/4, осуществляется приведение параметров, фиксируется ординарный процесс. По  $F(K1/2)$ ,  $F(K1)$ ,  $F(K1/4)$  производится расчет оптимального K1 с учетом приведения к базовому процессу и ограничений на зону поиска;

- при затухающих колебаниях по  $F(K1/2)$ ,  $F(K1)$ ,  $F(1,5 K1)$  производится расчет оптимального K1 с учетом приведений к базовому процессу и ограничений на зону поиска;

- фиксируется ординарный процесс и

проверяется условие повышения качества регулирования:

$$F(K_{\text{опт}}) \leq F_i;$$

– при выполнении верхнего условия  $K_1$  принимается равным  $K_{\text{опт}}$ .

Далее аналогичный цикл (3) выполняется для  $K_2$ .

**Алгоритм автонастройки регулятора перетока мощности в режиме параллельной работы.** Переходный процесс изменений перетока мощности имеет две составляющие (рис. 3):

1) достаточно высокочастотных изменений, связанных с возникновением электромеханических колебаний роторов генераторов при набросах/сбросах (для малой генерации ввиду малой электромеханической инерционности энергоблоков частота таких колебаний составляет 0,5–1 Гц);

2) довольно медленных изменений под действием регуляторов мощности (время регулирования десятки с).

При использовании переходной функции для самонастройки регуляторов необходимо отстроиться от изменений мощности в результате электромеханических колебаний, т.е. осуществлять регулирование по средней мощности при наличии высокочастотного электромеханического колебательного процесса.

Алгоритм:

1. Инициализация (задание) начальных коэффициентов усиления  $K_1$ ,  $K_2$  регулятора перетока.

2. Определение коэффициентов приведения параметров по трем ординарным процессам для:

с) коэффициента разномасштабности процессов при вариации мощности возмущения ( $d1 = \Delta P_0 / \Delta P_i$ );

д) коэффициентов разнохарактерности процессов при включении/отключении нагрузки ( $d2 = \Delta X_0 / \Delta X_{i \text{ прив}}$ ).

Для этого для а):

– фиксируется процесс включения нагрузки мощностью, существенно отличной от базовой  $\Delta P_0$ ;

– определяется  $\Delta X_i$ ;

– определяется коэффициент различия масштабов процессов:

$$d1 = \Delta P_0 / \Delta P_i.$$

Для б):

– фиксируется процесс включения и отключения нагрузки одинаковой мощности;

– определяется  $\Delta X_{1,2}$  и  $T_{\text{пер } 1,2}$ ;

– определяется коэффициент различия параметров включения/отключения:

$$d2 = \Delta X_0 / \Delta X_{i \text{ прив}}.$$

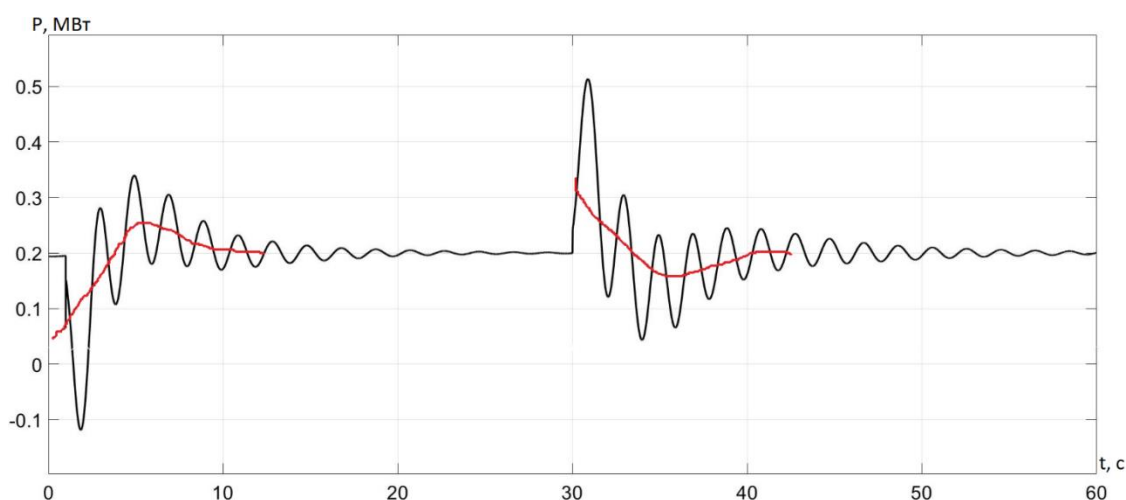


Рис. 3. Переходный процесс для перетока мощности при включении и отключении части нагрузки в MiniGrid и работе PI-регулятора мощности

Fig. 3. Transient process for power flow when switching on and off a part of the load in the MiniGrid and the operation of the PI power controller

В последующих циклических процессах все  $\Delta X_i$  по мере получения масштабируются с учетом показателей характерности и масштабности процессов:

$$\Delta X_{i \text{ прив}} = \Delta X_i \times d1 \times d2.$$

3. Циклическая часть алгоритма:

- фиксируется значимый ординарный процесс, рассчитывается  $F_i$ ;
- коэффициент  $K1$  уменьшается до  $K1/2$ ;
- фиксируется значимый ординарный процесс, осуществляется приведение параметров, рассчитывается  $F_{i+1}$ ;
- если  $|(F_{i+1} - F_i)| \leq \Delta F_{\text{значим}}$  настройка  $K1$  регулятора не производится, иначе  $K1$  увеличивается до  $1,5 K1$ , т.е. до  $3 K1$  текущего;
- фиксируется ординарный процесс, осуществляется приведение параметров, в процессе контролируется затухание колебаний;
- при незатухающих колебаниях  $K1$  восстанавливается,  $K1$  принимается равным  $K1/4$ , осуществляется приведение параметров, фиксируется ординарный процесс. По  $F(K1/2)$ ,  $F(K1)$ ,  $F(K1/4)$  производится расчет оптимального  $K1$  с учетом приведения к базовому процессу и с учетом ограничений на зону поиска;
- при затухающих колебаниях по  $F(K1/2)$ ,  $F(K1)$ ,  $F(1,5 K1)$  производится расчет оптимального  $K1$  с учетом приведений к базовому процессу и ограничений на зону поиска;
- фиксируется ординарный процесс и проверяется условие повышения качества

регулирования:

$$F(K_{\text{опт}}) \leq F_i;$$

– при выполнении верхнего условия  $K1$  принимается равным  $K_{\text{опт}}$ .

Далее аналогичный цикл (3) выполняется для  $K2$ .

**Пример 1. Фрагмент автонастройки регулятора частоты MiniGrid с одним эквивалентным генератором (моделирование процессов на Simulink).**

На рис. 4–7 представлены переходные характеристики для частоты в процессе оптимизации коэффициента усиления по отклонению частоты ( $K1$ ).

По характеристикам процессов при трех значениях  $K1$  в результате оптимизации целевой функции ( $F(K1/2)$ ,  $F(K1)$ ,  $F(2 K1)$ ) получено оптимальное значение  $K1 = 4,1$ . В табл. 1 приведены характеристики процессов, представленных на рис. 4–7.

**Пример 2. Фрагмент автонастройки регулятора перетока MiniGrid с одним эквивалентным генератором (моделирование процессов на Simulink).**

На рис. 8–11 представлены переходные характеристики для перетока в процессе оптимизации коэффициентов усиления по отклонению перетока  $K1$ .

На рис. 12–14 представлены переходные характеристики для перетока в процессе оптимизации коэффициента усиления по интегралу отклонения перетока  $K2$ .

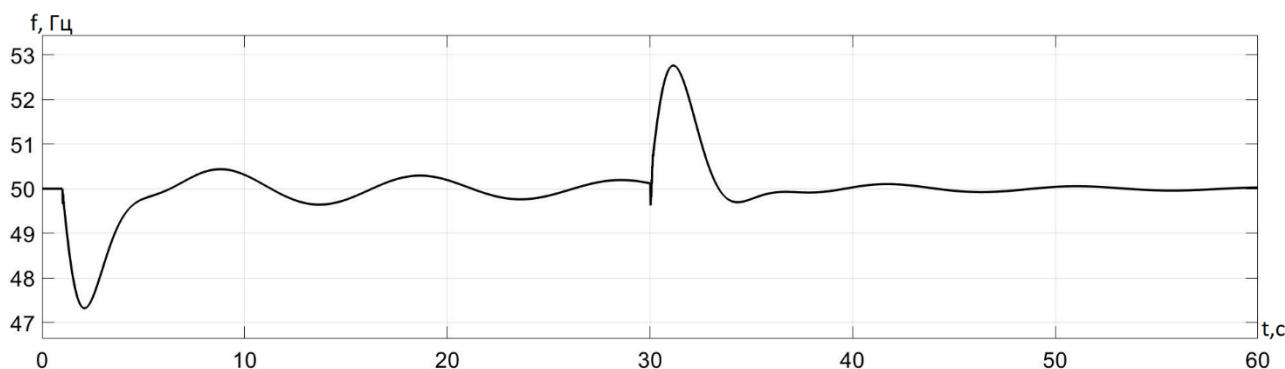
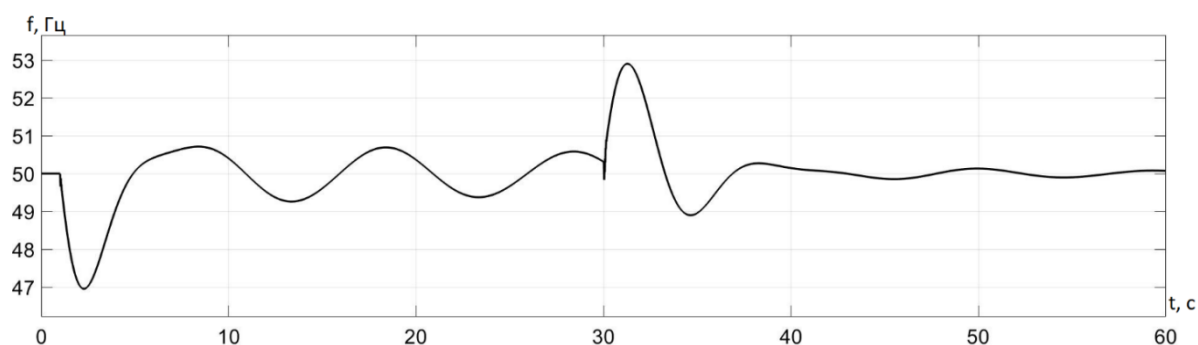


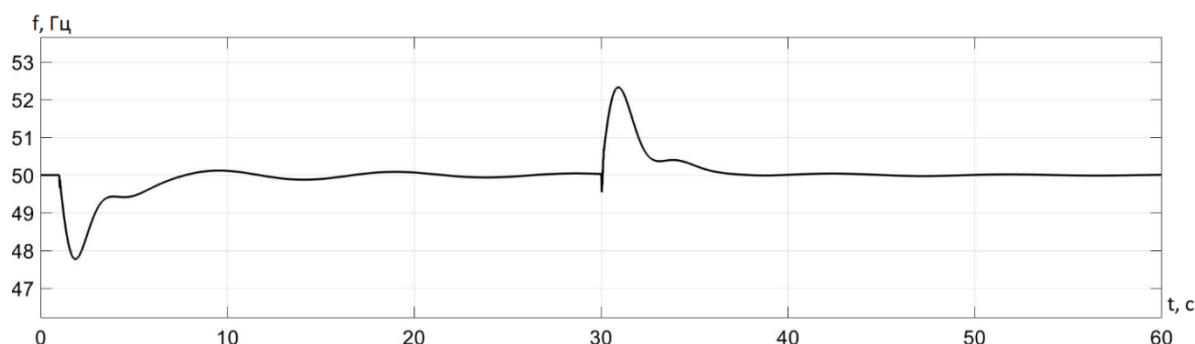
Рис. 4. Изменение частоты при включении (на интервале 0–30 с) и отключении (на интервале 30–60 с) нагрузки 200 кВт при исходных коэффициентах PI-регулятора ( $K1 = 1$ ,  $K2 = 2$ )

Fig. 4. Frequency change when switching on (at an interval of 0–30 s) and off (at an interval of 30–60 s) the load of 200 kW at the initial PI coefficients of the controller ( $K1 = 1$ ,  $K2 = 2$ )



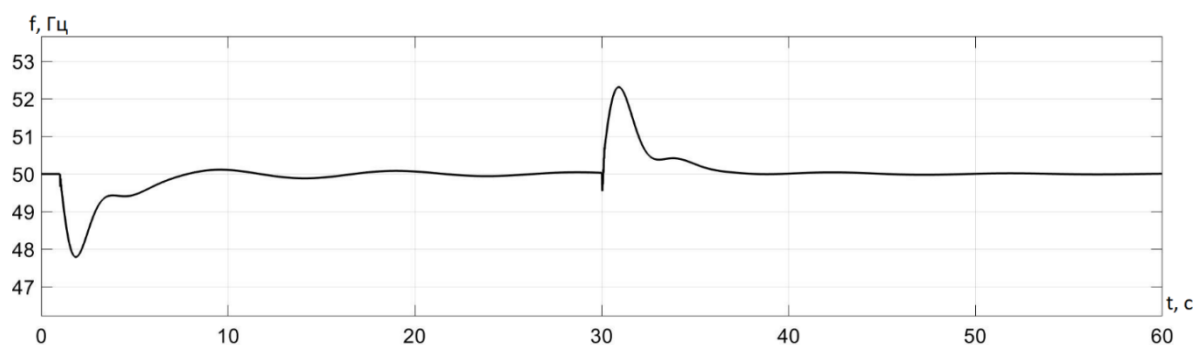
**Рис. 5.** Изменение частоты при включении (на интервале 0–30 с) и отключении (на интервале 30–60 с) нагрузки 200 кВт при уменьшении коэффициента  $K_1$  PI-регулятора ( $K_1 = 0,5$ ,  $K_2 = 2$ )

**Fig. 5.** Frequency change when switching on (at an interval of 0-30 s) and off (at an interval of 30-60 s) the load of 200 kW with a decrease in the coefficient  $K_1$  of the PI controller ( $K_1 = 0.5$ ,  $K_2 = 2$ )



**Рис. 6.** Изменение частоты при включении (на интервале 0–30 с) и отключении (на интервале 30–60 с) нагрузки 200 кВт при увеличении коэффициента  $K_1$  PI-регулятора ( $K_1 = 4$ ,  $K_2 = 2$ )

**Fig. 6.** Frequency change when switching on (at an interval of 0-30 s) and off (at an interval of 30-60 s) the load of 200 kW with an increase in the coefficient  $K_1$  of the PI controller ( $K_1 = 4$ ,  $K_2 = 2$ )



**Рис. 7.** Изменение частоты при включении (на интервале 0–30 с) и отключении (на интервале 30–60 с) нагрузки 200 кВт при оптимальном коэффициенте  $K_1$  PI-регулятора на шаге покоординатного спуска ( $K_1 = 4,1$ ,  $K_2 = 2$ )

**Fig. 7.** Frequency change when switching on (at an interval of 0-30 s) and off (at an interval of 30-60 s) the load of 200 kW at the optimal coefficient  $K_1$  of the PI controller per step of the coordinate descent ( $K_1 = 4.1$ ,  $K_2 = 2$ )

**Таблица 1.** Характеристики процессов при включении/отключении нагрузки

**Table 1.** Characteristics of the processes when switching on/off the load

№ рисунка	Включение нагрузки			Отключение нагрузки		
	клевов, Гц	перерегулирование, Гц	время регулирования, с	клевов, Гц	перерегулирование, Гц	время регулирования, с
4	2,7	0,4	> 30	2,8	0,3	> 30
5	3	0,7	> 30	2,95	1	> 30
6	2,3	0,2	27	2,3	0,05	16
7	2,3	0,2	25	2,3	0,02	15

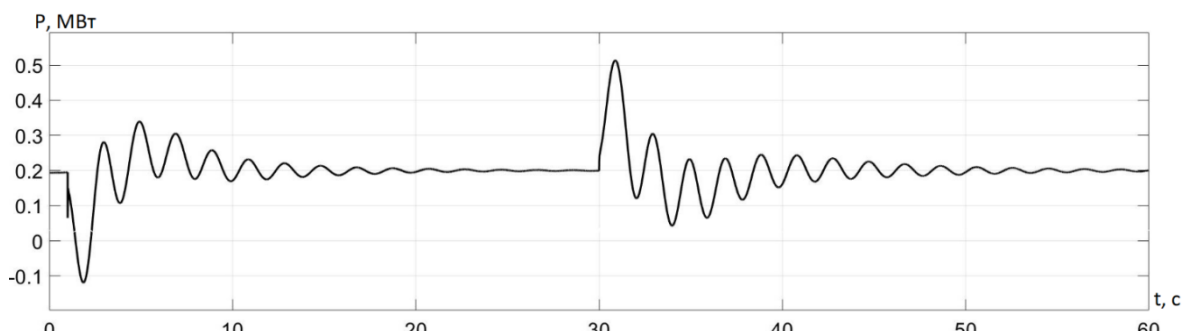


Рис. 8. Изменение перетока при включении (на интервале 0–30 с) и отключении (на интервале 30–60 с) нагрузки 200 кВт при начальных коэффициентах PI-регулятора ( $K_1 = 5$ ,  $K_2 = 2$ )

Fig. 8. Change in the flow when switching on (at the interval of 0–30 s) and off (at the interval of 30–60 s) the load of 200 kW at the initial coefficients of the PI controller ( $K_1 = 5$ ,  $K_2 = 2$ )

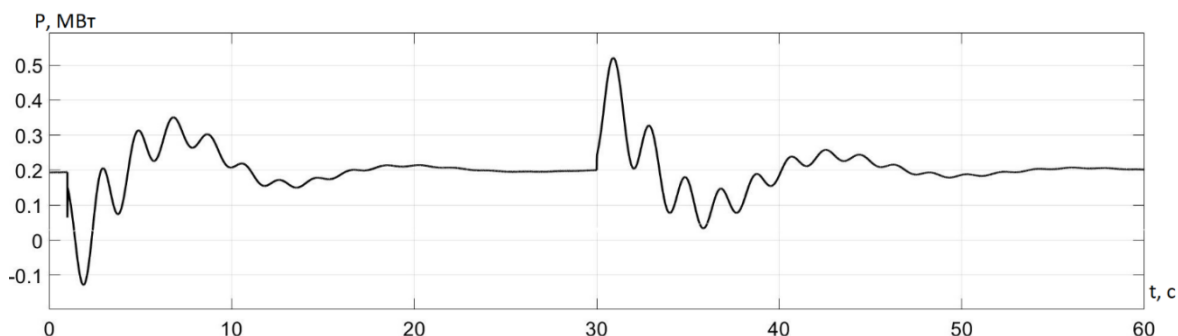


Рис. 9. Изменение перетока при включении (на интервале 0–30 с) и отключении (на интервале 30–60 с) нагрузки 200 кВт при уменьшении коэффициента  $K_1$  PI-регулятора ( $K_1 = 2.5$ ,  $K_2 = 2$ )

Fig. 9. Change in the flow when switching on (at an interval of 0–30 s) and off (at an interval of 30–60 s) the load of 200 kW with a decrease in the coefficient  $K_1$  of the PI controller ( $K_1 = 2.5$ ,  $K_2 = 2$ )

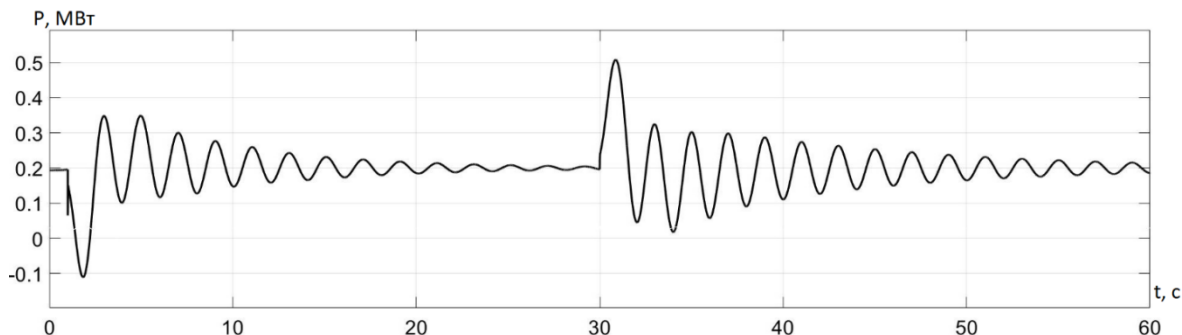


Рис. 10. Изменение перетока при включении (на интервале 0–30 с) и отключении (на интервале 30–60 с) нагрузки 200 кВт при увеличении коэффициента  $K_1$  PI-регулятора ( $K_1 = 7.5$ ,  $K_2 = 2$ )

Fig. 10. Change in the flow when switching on (at the interval of 0–30 s) and off (at the interval of 30–60 s) the load of 200 kW with an increase in the coefficient  $K_1$  of the PI controller ( $K_1 = 7.5$ ,  $K_2 = 2$ )

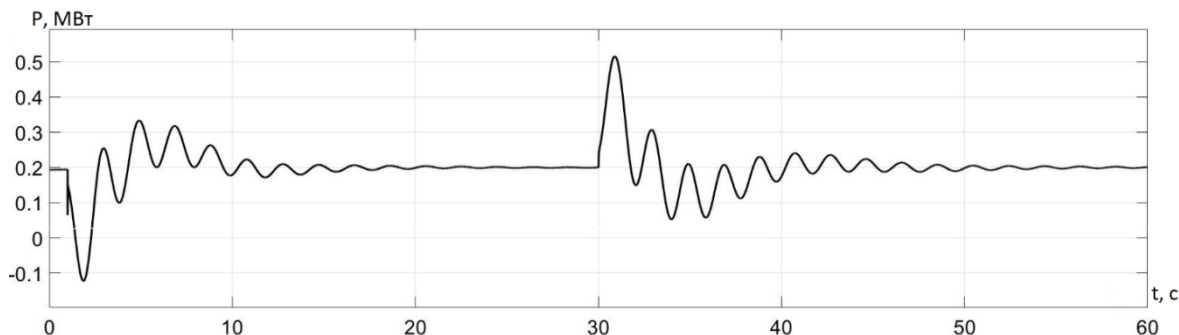
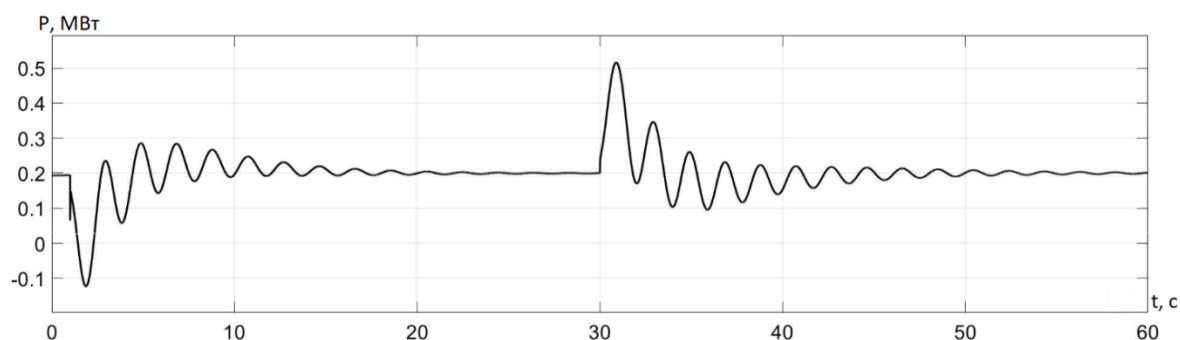


Рис. 11. Изменение перетока при включении (на интервале 0–30 с) и отключении (на интервале 30–60 с) нагрузки 200 кВт при коэффициентах PI-регулятора ( $K_1 = 4.1$ ,  $K_2 = 2$ )

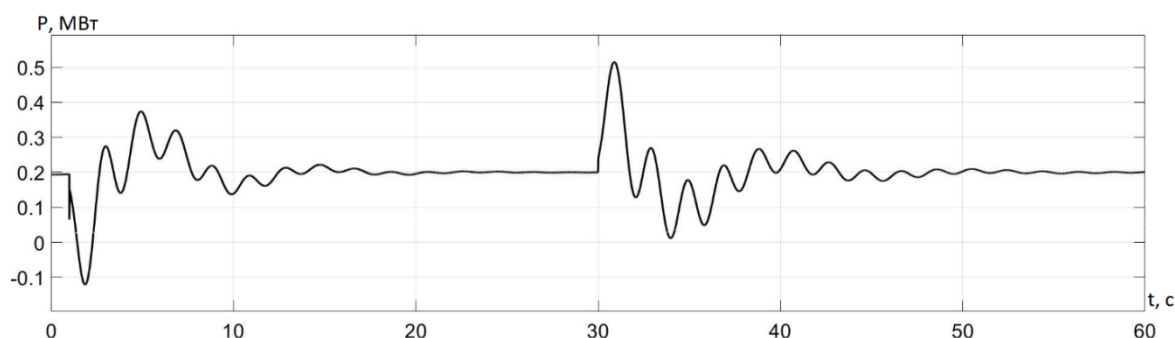
Fig. 11. Change in the flow when switching on (at the interval of 0–30 s) and off (at the interval of 30–60 s) the load of 200 kW at the coefficients of the PI controller ( $K_1 = 4.1$ ,  $K_2 = 2$ )





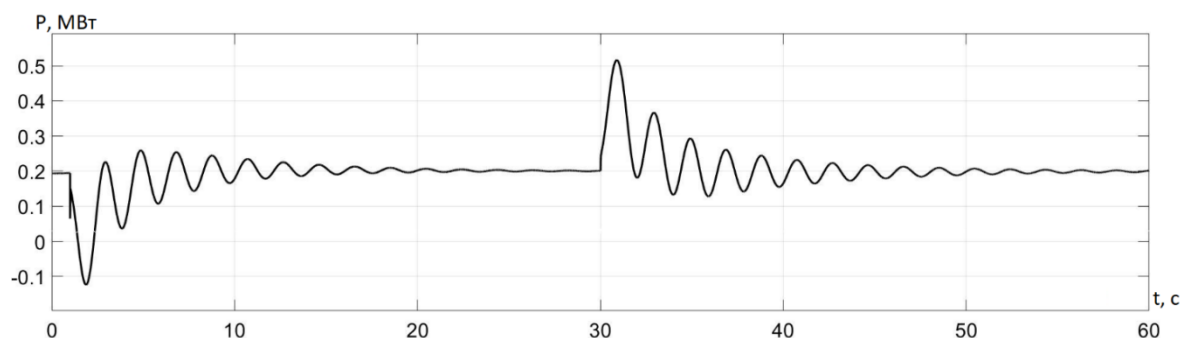
**Рис. 12. Изменение перетока при включении (на интервале 0–30 с) и отключении (на интервале 30–60 с) нагрузки 200 кВт при коэффициентах PI-регулятора ( $K_1 = 4,1$ ,  $K_2 = 1$ )**

**Fig. 12. Change in the flow when switching on (at the interval of 0-30 s) and off (at the interval of 30-60 s) the load of 200 kW at the coefficients of the PI controller ( $K_1 = 4.1$ ,  $K_2 = 1$ )**



**Рис. 13. Изменение перетока при включении (на интервале 0–30 с) и отключении (на интервале 30–60 с) нагрузки 200 кВт при коэффициентах PI-регулятора ( $K_1 = 4,1$ ,  $K_2 = 3$ )**

**Fig. 13. Change in the flow when switching on (at the interval of 0-30 s) and off (at the interval of 30-60 s) the load of 200 kW at the coefficients of the PI controller ( $K_1 = 4.1$ ,  $K_2 = 3$ )**



**Рис. 14. Изменение перетока при включении (на интервале 0–30 с) и отключении (на интервале 30–60 с) нагрузки 200 кВт при оптимальных коэффициентах PI-регулятора ( $K_1 = 4,1$ ,  $K_2 = 0,5$ )**

**Fig. 14. Change in the flow when switching on (at the interval of 0-30 s) and off (at the interval of 30-60 s) the load of 200 kW at optimal coefficients of the PI controller ( $K_1 = 4.1$ ,  $K_2 = 0.5$ )**

**Таблица 2. Характеристики процессов при включении/отключении нагрузки**

**Table 2. Characteristics of the processes when switching on/off the load**

№ рисунка	Включение нагрузки			Отключение нагрузки		
	клевов, кВт	перерегулирование, кВт	время регулирования, с	клевов, кВт	перерегулирование, кВт	время регулирования, с
8	200	65	18	160	65	25
9	200	135	25	170	100	>30
10	150	30	20	160	30	25
11	150	30	15	160	30	25
12	150	20	17	150	22	25
13	150	20	15	150	20	25
14	150	3	15	150	3	23

Графики на рисунках приведены в относительных номинальных единицах. В табл. 2 приведены характеристики процессов, представленных на рис. 9–14.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основой представленного способа самонастройки регуляторов мощности по группе переходных характеристик являются использование показателей качества переходного затухающего процесса в энергосистеме при коммутациях (набросах/сбросах) мощности, скаляризация двух показателей качества пе-

реходного процесса в целевой функции оптимизации, оптимизация коэффициентов каждого PI-регулятора мощности (по отклонению и интегралу от отклонения) методом покоординатного спуска, учет разнохарактерности процессов и разномасштабности возмущений режима при набросе/сбросе мощности MiniGrid.

Результаты проведенных исследований подтверждают работоспособность и эффективность способа для самонастройки регуляторов скорости и перетока мощности MiniGrid.

## Список источников

1. Chen Liuyang, Chen Qing, Zhang Zhiming, Xie Ranran. Cable fault characteristics of energy storage in DC microgrids // 5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering. 2020. <https://doi.org/10.1109/ACPEE48638.2020.9136207>.
2. Zhou Xuesong, Guo Tie, Ma Youjie. An overview on microgrid technology // International Conference on Mechatronics and Automation (Beijing, 2–5 August 2015). Beijing: IEEE, 2015. P. 76–81. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2015.7237460>.
3. Баринов В. А. Перспективы развития электроэнергетики России на период до 2030 г. // Анализ и прогноз. Журнал ИМЭМО РАН. 2010. № 3. С. 13–20.
4. Коломыцев В. Г., Рустамханова Г. И. Модификация временного метода Зиглера–Никольса и оптимизация параметров ПИД-регуляторов средствами Matlab // Фундаментальные исследования. 2016. № 11-3. С. 526–531.
5. Фишов А. Г., Ивкин Е. С., Гилев О. В., Какоша Ю. В. Режимы и автоматика Минигрид, работающих в составе распределительных электрических сетей ЕЭС // Релейная защита и автоматизация. 2021. № 3. С. 22–37.
6. Пат. № 2065067, Российская Федерация, F02D 31/00. Устройство для настройки регулятора частоты вращения дизель генератора / Б. А. Усик, В. Ф. Терехов; заявитель и патентообладатель Серпуховское высшее военное командно-инженерное училище ракетных войск. Заявл. 30.07.1991; опублик. 10.08.1996.
7. Пат. № 2714567, Российская Федерация, G05B 13/00. Способ автоматической настройки регулятора / С. В. Тарарыкин, А. А. Анисимов, А. И. Терехов, К. Е. Соколов; заявитель и патентообладатель Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина. Заявл. 06.05.2019; опублик. 18.02.2020.
8. Datta A., Konar S., Singa L. J., Singh K. M., Lalfakzuala A. A study on load frequency control for a hybrid power plant // Second International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies. 2017. <https://doi.org/10.1109/ICECCT.2017.8117975>.
9. Shaker H. K., Zoghby H. E., Bahgat M. E., Abdel-
10. Ghany A. M. Advanced control techniques for an interconnected multi area power system for load frequency control // 21st International Middle East Power Systems Conference (Cairo, 17–19 December 2019). Cairo: IEEE, 2019. P. 710–715. <https://doi.org/10.1109/MEPCON47431.2019.9008158>.
11. Karimi H., Beheshti M. T. H., Ramezani A. Decentralized voltage and frequency control in an autonomous ac microgrid using gain scheduling tuning approach // 24th Iranian Conference on Electrical Engineering (Shiraz, 10–12 May 2016). Shiraz: IEEE, 2016. P. 1597–1602. <https://doi.org/10.1109/IranianCEE.2016.7585776>.
12. Satapathy P., Debnath M. K., Singh M. B., Mohanty P. K. Design of FPI controller for load frequency control of a nonlinear power system // Technologies for Smart-City Energy Security and Power. 2018. <https://doi.org/10.1109/ICSESP.2018.8376681>.
13. Abubakr H., Mohamed T. H., Hussein M. M., Shabib G. ESO-based selftuning frequency control design for isolated microgrid system // 21st International Middle East Power Systems Conference (Cairo, 17–19 December 2019). Cairo: IEEE, 2019. P. 589–593. <https://doi.org/10.1109/MEPCON47431.2019.9008042>.
14. Tripathy S., Debnath M. K., Kar S. K. Jaya algorithm tuned FO-PID controller with first order filter for optimum frequency control // 1st Odisha International Conference on Electrical Power Engineering, Communication and Computing Technology. 2021. <https://doi.org/10.1109/ODICON50556.2021.9428959>.
15. Patel N. C., Debnath M. K., Bagarty D. P., Das P. Load frequency control of a non-linear power system with optimal PID controller with derivative filter // IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (Chennai, 21–22 September 2017). Chennai: IEEE, 2017. P. 1515–1520. <https://doi.org/10.1109/ICPSCI.2017.8391964>.
16. Mishra S., Nayak P. C., Prusty U. C., Prusty R. C. Model predictive controller based load frequency control of isolated microgrid system integrated to plugged-in electric vehicle // 1st Odisha International Conference on Electrical Power Engineering, Communication

and Computing Technology. 2021. <https://doi.org/10.1109/ODICON50556.2021.9428956>.

16. Zaidi A., Cheng Qi. Online and offline load frequency controller design // IEEE Texas Power and Energy Conference. 2017. <https://doi.org/10.1109/TPEC.2017.7868283>.

17. Mohamed T. H., Hussein M. M. Online gain tuning of conventional load frequency controller for Microgrid power system // Twentieth International Middle East Power Systems Conference (Cairo, 18–20 December 2018). Cairo: IEEE, 2018. P. 424–428. <https://doi.org/10.1109/MEPCON.2018.8635107>.

18. Ali M., Djalal M. R., Fakhrurozi M., Kadaryono, Budiman. Optimal design capacitive energy storage (CES) for load frequency control in micro hydro power plant using flower pollination algorithm // Electrical Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar (Batu, 9–11 October 2018). Batu: IEEE, 2018. P. 21–26.

<https://doi.org/10.1109/EECCIS.2018.8692997>.

19. Седойкин Д. Н., Юрганов А. А. Адаптивный автоматический регулятор возбуждения на основе нечеткого аппроксиматора в режиме недовозбуждения синхронной машины // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского политехнического университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 2. С. 22–29. <https://doi.org/10.18721/JEST.240202>.

20. Булатов Ю. Н., Игнатъев И. В., Попик В. А. Методика выбора оптимальных настроек систем АРЧВ генераторов электростанций // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2011. № 1. С. 192–198.

21. Булатов Ю. Н., Крюков А. В., Чан Зюй Хынг. Интеллектуальные регуляторы для установок распределенной генерации // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 2. С. 83–95.

## References

1. Chen Liuyang, Chen Qing, Zhang Zhiming, Xie Ranran. Cable fault characteristics of energy storage in DC microgrids. In: *5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering*. 2020. <https://doi.org/10.1109/ACPEE48638.2020.9136207>.

2. Zhou Xuesong, Guo Tie, Ma Youjie. An overview on microgrid technology. In: *International Conference on Mechatronics and Automation*. 2–5 August 2015, Beijing. Beijing: IEEE; 2015, p. 76–81. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2015.7237460>.

3. Barinov V. A. Development prospects of the electric power industry in Russia for the period up to 2030. *Nacional'nyj issledovatel'skij institut mirovoj ekonomiki i mezhdunarodnyh otnoshenij im. E. M. Primakova Rossijskoj akademii nauk = Analysis and Forecasting. IMEMO Journal*. 2010;3:13–20. (In Russ.).

4. Kolomishev V. G. Rustamhanova G. I. Modification of the Ziegler-Nichols time method and optimization of PID-regulator parameters by means of Matlab. *Fundamental'nie issledovaniya = Fundamental research*. 2016;11-3:526–531. (In Russ.).

5. Fishov A. G., Ivkin E. S., Gilev O. V., Kakosha Yu. V. Modes and automation of minigrid operating as part of the UPS distribution electric networks. *Relejnaya zashchita i avtomatizaciya*. 2021;3:22–37. (In Russ.).

6. Usik V. A., Terekhov V. F. *Device for tuning diesel-generator speed controller*. Patent RF, no 2065067; 1991. (In Russ.).

7. Tararykin S. V., Anisimov A. A., Terekhov A. I., Sokolov K. E. *Method of automatic tuning of controller*. Patent RF, no 2714567; 2019. (In Russ.).

8. Datta A., Konar S., Singa L. J., Singh K. M., Lalfakzuala A. A study on load frequency control for a hybrid power plant. In: *Second International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies*. 2017. <https://doi.org/10.1109/ICECCT.2017.8117975>.

9. Shaker H. K., Zoghby H. E., Bahgat M. E., Abdel-Ghany A. M. Advanced control techniques for an interconnected multi area power system for load frequency

control. In: *21st International Middle East Power Systems Conference*. 17–19 December 2019, Cairo. Cairo: IEEE; 2019, p. 710–715. <https://doi.org/10.1109/MEPCON47431.2019.9008158>.

10. Karimi H., Beheshti M. T. H., Ramezani A. Decentralized voltage and frequency control in an autonomous ac microgrid using gain scheduling tuning approach. In: *24th Iranian Conference on Electrical Engineering*. 10–12 May 2016, Shiraz. Shiraz: IEEE; 2016, p. 1597–1602. <https://doi.org/10.1109/IranianCEE.2016.7585776>.

11. Satapathy P., Debnath M. K., Singh M. B., Mohanty P. K. Design of FPI controller for load frequency control of a nonlinear power system. In: *Technologies for Smart-City Energy Security and Power*. 2018. <https://doi.org/10.1109/ICSESP.2018.8376681>.

12. Abubakr H., Mohamed T. H., Hussein M. M., Shabib G. ESO-based self tuning frequency control design for isolated microgrid system. In: *21st International Middle East Power Systems Conference*. 17–19 December 2019, Cairo. Cairo: IEEE; 2019, p. 589–593. <https://doi.org/10.1109/MEPCON47431.2019.9008042>.

13. Tripathy S., Debnath M. K., Kar S. K. Jaya algorithm tuned FO-PID controller with first order filter for optimum frequency control. In: *1st Odisha International Conference on Electrical Power Engineering, Communication and Computing Technology*. 2021. <https://doi.org/10.1109/ODICON50556.2021.9428959>.

14. Patel N. C., Debnath M. K., Bagarty D. P., Das P. Load frequency control of a non-linear power system with optimal PID controller with derivative filter. In: *IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering*. 21–22 September 2017, Chennai. Chennai: IEEE; 2017, p. 1515–1520. <https://doi.org/10.1109/ICPSI.2017.8391964>.

15. Mishra S., Nayak P. C., Prusty U. C., Prusty R. C. Model predictive controller based load frequency control of isolated microgrid system integrated to plugged-in electric vehicle. In: *1st Odisha International*

*Conference on Electrical Power Engineering, Communication and Computing Technology*. 2021. <https://doi.org/10.1109/ODICON50556.2021.9428956>.

16. Zaidi A., Cheng Qi. Online and offline load frequency controller design. In: *IEEE Texas Power and Energy Conference*. 2017. <https://doi.org/10.1109/TPEC.2017.7868283>.

17. Mohamed T. H., Hussein M. M. Online gain tuning of conventional load frequency controller for Microgrid power system. In: *Twentieth International Middle East Power Systems Conference*. 18–20 December 2018, Cairo. Cairo: IEEE; 2018, p. 424-428. <https://doi.org/10.1109/MEPCON.2018.8635107>.

18. Ali M., Djalal M. R., Fakhrurrozi M., Kadaryono, Budiman. Optimal design capacitive energy storage (CES) for load frequency control in micro hydro power plant using flower pollination algorithm. In: *Electrical Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar*. 9–11 October 2018, Batu. Batu: IEEE; 2018, p. 21-26.

<https://doi.org/10.1109/EECCIS.2018.8692997>.

19. Sedoykin D. N., Yurganov A. A. An adaptive automatic excitation regulator based on fuzzy approximation operating with an under-excited generator. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo politekhnicheskogo universiteta. Estestvennye i inzhenernye nauki = St. Petersburg Polytechnic University. Series: Journal of engineering sciences and technology*. 2018;24(2):22-29. <https://doi.org/10.18721/JEST.240202>.

20. Bulatov U. N., Ignatyev I. V., Popik V. A. Technique of sampling optimal settings of power stations generators ARRF systems. *Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie = Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2011;1:192-198. (In Russ.).

21. Bulatov U. N., Krukov A. V., Hyng Chan Zyuj. Intelligent controllers for distributed generation plants. *Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie = Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2015;2:83-95. (In Russ.).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### **Фишов Александр Георгиевич,**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры автоматизированных  
электроэнергетических систем,  
Новосибирский государственный технический  
университет,  
630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20, Россия

### **Осинцев Анатолий Анатольевич,**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры электрических станций,  
Новосибирский государственный технический  
университет,  
630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20, Россия

### **Фролов Михаил Юрьевич,**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры автоматизированных  
электроэнергетических систем,  
Новосибирский государственный технический  
университет,  
630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20, Россия

### **Армеев Денис Владимирович,**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры автоматизированных  
электроэнергетических систем,  
Новосибирский государственный технический  
университет,  
630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20, Россия

### **Мурашкина Инна Сергеевна,**

аспирант,  
Новосибирский государственный технический  
университет,  
630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20, Россия

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### **Alexander G. Fishov,**

Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Professor of the Department of Automated Electric Power  
Systems,  
Novosibirsk State Technical University,  
20, K. Marx pr., Novosibirsk 630073, Russia

### **Anatoly A. Osintsev,**

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Electric Power  
Plants,  
Novosibirsk State Technical University,  
20, K. Marx pr., Novosibirsk 630073, Russia

### **Mikhail Yu. Frolov,**

Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor of the Department of Automated  
Electric Power Systems,  
Novosibirsk State Technical University,  
20, K. Marx pr., Novosibirsk 630073, Russia

### **Denis V. Armeev,**

Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor of the Department of Automated  
Electric Power Systems,  
Novosibirsk State Technical University,  
20, K. Marx pr., Novosibirsk 630073, Russia

### **Inna S. Murashkina,**

Postgraduate Student,  
Novosibirsk State Technical University,  
20, K. Marx pr., Novosibirsk 630073, Russia

**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 18.01.2021; одобрена после рецензирования 18.02.2021; принята к публикации 26.02.2022.

**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 18.01.2021; approved after reviewing 18.02.2021; accepted for publication 26.02.2022.





## Fault section location in urban distribution network based on fault marking

Ren Zhang<sup>1</sup>, Haoming Liu<sup>2</sup>✉

<sup>1,2</sup> Hohai University, Nanjing, People's Republic of China

<sup>1</sup> zhangren@hhu.edu.cn, <https://orcid.org/0000-0002-1941-1331>

<sup>2</sup> liuhaom@hhu.edu.cn, <https://orcid.org/0000-0003-3401-0330>

**Abstract.** The goal is to propose an effective method for locating a fault segment in urban power distribution networks. Urban distribution networks have multiple outgoing lines, switches with multiple connections and have variable topology characteristics. It is found that the fault location method based on matrix algorithm has low adaptive capability and fault tolerance when dealing with complex and variable topology. Therefore, this paper proposes an efficient fault segment location method based on special fault indicators, which can significantly improve the accuracy and reliability of fault location. Accordingly, to improve the accuracy and reliability of fault location, a fault segment location method based on fault marking is proposed. The approach proposed in the paper relies on the analysis of the incident matrix, which describes the relationship between nodes and branches, and allows the use of graph theory. The branch state vector is added to obtain the adjacency matrix, which allows to describe the state of change in the dynamics of the distribution network topology. In the next step, a set of nodes and branches, which reflect the incoming and outgoing interconnections of the nodes, is established based on the selected direction of the network binding. According to the direction of the node fault current, the suspicious branches are identified and labeled to indicate the fault. By cumulative calculation and analysis of the labels, the target branches are screened out and the faulty sections of the city power supply network are identified. The results of the case study conducted in the paper show that the proposed method has good adaptability to the variable topology and increases the fault tolerance and accuracy of the developed matrix algorithm. The topological operating state of the network can be changed by controlling the switches to optimize the operation and improve the reliability of the power supply. Thus, the algorithm for fast and accurate fault location is of great importance for improving the safety and quality of urban power supply.

**Keywords:** fault section location, graph theory, matrix algorithm, urban distribution network, feeder terminal unit

**For citation:** Zhang Ren, Liu Haoming. Fault section location in urban distribution network based on fault marking. *iPolytech Journal*. 2022;26(1):117-127. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-117-127>.

### ЭНЕРГЕТИКА

УДК 62-50

Научная статья

## Локализация поврежденного участка в городской распределительной сети на основе маркировки повреждения

Жэнь Чжан<sup>1</sup>, Хаомин Лю<sup>2</sup>✉

<sup>1,2</sup> Университет Хохай, Нанкин, Китайская Народная Республика

<sup>1</sup> zhangren@hhu.edu.cn, <https://orcid.org/0000-0002-1941-1331>

<sup>2</sup> liuhaom@hhu.edu.cn, <https://orcid.org/0000-0003-3401-0330>

**Резюме.** Цель – предложить эффективный метод определения местоположения сегмента неисправности в распределительные сети городского электроснабжения. Городские распределительные сети имеют несколько исходящих линий, коммутаторы с несколькими соединениями и обладают характеристиками переменной топологии. Выявлено, что метод определения местоположения неисправности, основанный на матричном алгоритме, обладает низкой адаптивной способностью и способностью к отказоустойчивости при работе со сложной и изменяемой топологией. Поэтому в данной статье предлагается эффективный метод определения местоположения

сегмента неисправности, основанный на специальных индикаторах неисправности, позволяющий существенно повысить точность и надежность определения местоположения неисправности. Соответственно, для повышения точности и надежности определения местоположения неисправности предлагается метод определения местоположения участка неисправности, основанный на маркировке неисправности. Предлагаемый в работе подход опирается на анализ матрицы инцидентности, описывающей связь между узлами и ветвями, и позволяющий использовать теорию графов. Вектор состояния ветвей добавляется для получения матрицы смежности, которая позволяет описывать состояние изменения динамики топологии распределительной сети. На следующем этапе набор узлов и ветвей, которые отражают входящие и исходящие взаимосвязи узлов, устанавливается на основе выбранного направления привязки сети. В соответствии с направлением тока неисправности узла определяются подозрительные ветви и маркируются для обозначения неисправности. Путем кумулятивного вычисления и анализа меток отсеиваются целевые ветви и определяются неисправные участки сети городского электроснабжения. Результаты проведенного в работе тематического исследования показывают, что предлагаемый метод обладает хорошей адаптивностью к переменной топологии и повышает отказоустойчивость и точность разработанного матричного алгоритма. Топологическое рабочее состояние сети может быть изменено путем управления переключателями для оптимизации работы и повышения надежности электроснабжения. Таким образом, алгоритм быстрого и точного определения места повреждения имеет большое значение для повышения безопасности и качества городского электроснабжения.

**Ключевые слова:** местоположение участка повреждения, теория графов, матричный алгоритм, городская распределительная сеть, фидерный терминальный узел

**Для цитирования:** Чжан Жэнь, Лю Хаомин. Локализация поврежденного участка в городской распределительной сети на основе маркировки повреждения // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 1. С. 117–127. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-117-127>.

## INTRODUCTION

The urban distribution network (UDN) has the characteristics of high load density and high demand for power supply reliability. UDN generally adopts closed-loop, multi-outgoing lines design and open-loop operation mode. The topological operation state of UDN can be changed by controlling switches to optimize operation and improve power supply reliability. Thus, the quickly and accurately fault section location algorithm is of great significance to improve the safety and quality of power supply [1–3]. The feeder terminal unit (FTU) is popularized to provide real-time and complete fault information. The fault section location method of distribution network combined with FTU has become one of the research hotspots [4–6].

Presently, the fault location methods based on FTU mainly include matrix algorithm-based direct methods and intelligent optimization-based indirect methods [7]. The topology description matrix of distribution network needs to be established, and the detected information is used at both ends of the line section to determine the fault. This causes the fault tolerance of matrix algorithm quite weak [8, 9]. To solve the problems of low fault tolerance of matrix algorithm and slow solution speed of optimization algorithm, a distribution network fault location method combining these two algorithms is proposed to make complementary advantages in

[5]. Ref. [10] takes matrix algorithm to describe the topology of distribution network, and implement fault section identification and fault isolation, according to multiple detection data provided by FTU. In [7], the location relationship between nodes and distributed generations is integrated into the description matrix, and the information uploaded by FTU is analyzed and corrected. Ref. [11] combines the advantages of matrix algorithm, exhaustive method and optimization algorithm, and then the suspected fault sections are screened by matrix algorithm.

Intelligent optimization algorithms finds the optimal solution through approximation and optimization theory. In [12–14], a global optimization search method for suspicious sections is proposed based on fitting degree. Ref. [15] uses the enumeration method of linear integer programming to solve the algebraic positioning model of FTU remote signaling data. In [16], the switch function of each section switch is introduced into the constructed fitness function, and finally genetic algorithm is used to screen and search the fitness function results. In [17], the upstream and downstream branches are marked according to the different states of fault indicators at different positions. The fault section is the one with the largest fault index value. In [18], the one-dimensional convolutional neural network is used to extract the fault features and locate the fault sections. In [19], fuzzy Petri algo-

rithm is used to analyze multi-source heterogeneous data in the network, and the fault sections are determined through the minimum deviation index. The aforementioned researches improve the fault location algorithm in terms of fault tolerance, accuracy, applicability and operation speed. However, the amount of calculation is quite large and it is easy to fall into the suboptimal solution [20]. Moreover, the operation optimization of distribution network needs flexible topology management to improve power supply reliability [21]. Therefore, the impact of network topology changes on the effectiveness of fault location algorithm should be taken into consideration.

To fill the research gaps in the aforementioned research, a fault location method based on fault marking is proposed for UDN. The main contributions are summarized as follow:

1. The state of branch switches are introduced into the distribution network incidence matrix to enhance the adaptability of adjacency matrix, when the topology of distribution network is changed.

2. The suspicious branch set of nodes is established according to the fault current direction of nodes. Then, the fault indexes of branches are obtained by accumulative calculation of the mark value of suspicious branches. The target branches are screened according to the fault index of branches. The fault criterion is used to analyze the screened target branch and determine the fault branch.

3. A typical UDN with two outgoing lines and multiple interconnection switches is selected for example analysis to verify the accuracy and effectiveness of proposed fault section algorithm under different fault scenarios of single fault, multiple faults and FTU information distortion.

## DYNAMIC DESCRIPTION OF DISTRIBUTION NETWORK TOPOLOGY

The distribution network can be described as an undirected graph according to the graph theory. If the distribution network has  $m$  nodes and  $n$  branches, the vertex set and edge set are respectively expressed as:

$$V = \{v_i | i = 1, 2, \dots, m\} \quad (1)$$

$$E = \{e_{ij} = (v_i, v_j) | j = 1, 2, \dots, n\} \quad (2)$$

The connection relationship between nodes and branches of distribution network can be described by the incidence matrix  $\mathbf{A} = [a_{ij}]_{m \times n}$ . The elements  $a_{ij}$  can be described as:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & v_i \in e_{ij} \\ 0, & v_i \notin e_{ij} \end{cases} \quad (3)$$

The UDN adjusts the network topology through the control of switches to optimize operation, so that the connection relationship between nodes and branches has changed. In order to describe the real-time operation state of the network topology, a branch state vector of  $n$  dimensions  $\beta = (t_{ij})$  is defined.  $t_{ij}$  represents the on-off state variable of branch:

$$t_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{on} \\ 0, & \text{off} \end{cases} \quad (4)$$

The electrical incidence matrix  $\mathbf{B}$  is describing the electrical connection relationship between branches and nodes. It can be obtained by the logical bit operation of the row vector of the incidence matrix  $\mathbf{A}$  and the branch state vector  $\beta$ :

$$\mathbf{B}_{m \times n} = [\text{diag}(\beta) \mathbf{A}^T]^T \quad (5)$$

The adjacency matrix  $\mathbf{D}$  describing the topology of distribution network is calculated by equation (6):

$$\mathbf{D}_{m \times m} = (\mathbf{B}\mathbf{B}^T) \cap \bar{\mathbf{I}} \quad (6)$$

where,  $\mathbf{I}$  is the unit Boolean matrix; the element  $d_{ij}$  of adjacency matrix  $\mathbf{D}$  represents the connection relationship of each node. It has adaptive ability to the topology variability of distribution network. Meanwhile, it takes the power outflow direction of the main power supply as the reference positive direction. This direction has no physical significance and is only used as the position reference direction of the node.

## THE DETERMINATION OF FAULT SECTIONS

The FTU equipped at each node is used to detect the fault current. The node fault current code is defined as follows:

$$F_i = \begin{cases} 1, & I_{if} \geq I_{set} \text{ and positive direction} \\ 0, & I_{if} = 0 \\ -1, & I_{if} \geq I_{set} \text{ and opposite direction} \end{cases}, \quad (7)$$

where  $F_i$  represents the code of node  $i$ ,  $I_{if}$  represents the fault current of node  $i$ ,  $I_{set}$  represents the setting current value. The fault information matrix  $F$  is generated from FTU detection information. The fault judgment matrix  $P$  can be obtained from the operation of matrix  $F$  and  $D$ :

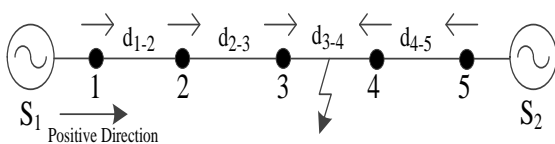
$$P = D + \text{diag}(F). \quad (8)$$

The positional relationship between nodes, that is the upstream and downstream relationship, can be obtained through the directed adjacency matrix  $D$ , and the definition is as follows:

$$\begin{cases} d_{ij} = (v_i, v_j) = 1, & i \rightarrow j \\ d_{jx} = (v_j, v_x) = 1, & j \rightarrow x \\ D_{i-down} = \{(v_j, v_x) | v_x \in V\} \\ D_{i-up} = D_C - D_{i-down} \end{cases}. \quad (9)$$

When  $d_{ij}$  equals to "1", it indicates that the branch between node  $v_i$  and  $v_j$  is connected in the forward direction;  $d_{jx}$  represents other branch electrically connected with the node  $v_j$ .  $D_C$  is the set of network branches;  $D_{i-down}$  is the set of downstream nodes;  $D_{i-up}$  is the set of upstream nodes.

In case of single-phase grounding fault in distribution network, the flow direction of fault current will be consistent with or opposite to the reference positive direction, as shown in the fig. 1:



**Fig. 1. Single-phase grounding fault of distribution network**  
**Рис. 1. Однофазное замыкание на землю**  
**распределительной сети**

In fig. 1, a single-phase grounding fault occurs between node 3 and 4. According to equation (7),  $F_1$ ,  $F_2$  and  $F_3$  are coded as "1", indicating that the fault occurs in the downstream branch of node 1, 2 and 3.  $F_4$  and  $F_5$  are coded as "-1", indicating that the fault occurs in the upstream branch of node 4 and 5. Therefore, the suspicious branch set can be determined by the FTU coding value of the nodes. According to the definition of the nodes' upstream and downstream relationship in equation (9), the suspicious branch set is defined as follows:

$$C_i = \begin{cases} \{d_{ij} | F_i = 1, d_{ij} = (v_i, v_j) \in D_{i-down}\} \\ \{d_{ij} | F_i = -1, d_{ij} = (v_i, v_j) \in D_{i-up}\} \\ \{\emptyset | F_i = 0\} \end{cases}. \quad (10)$$

The suspicious branches of node 1, 2 and 3 are located downstream, while those of node 4 and 5 are located upstream. The upstream and downstream suspicious branches will be marked, and the branch marking formula is as follows:

$$\text{TagValue}(d_{ij-x}) = \begin{cases} 1, & d_{ij} \in C_x \\ -1, & d_{ij} \notin C_x \\ 0, & C_x = \emptyset \end{cases}, \quad (11)$$

where  $\text{TagValue}(d_{ij-x})$  represents the mark of node  $x$  to branch  $d_{ij}$ , abbreviated as  $T-V$ . The total marking value  $\text{MarkValue}(d_{ij})$ , abbreviated as  $M-V$ , of all nodes to one branch is expressed as:

$$\text{MarkValue}(d_{ij}) = \sum_{x=1}^m \text{TagValue}(d_{ij-x}). \quad (12)$$

The fault mark values of each branch in fig. 1 are shown in tab. 1.

**Table 1. Branch fault mark values**

**Таблица 1. Значения метки неисправности ответвления**

Node code value	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$	$M-V$
	1	1	1	-1	-1	
Suspicious branch set	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	
Branch	$d_{12}$	1	-1	-1	1	1
	$d_{23}$	1	1	-1	1	3
	$d_{34}$	1	1	1	1	5
	$d_{45}$	1	1	1	-1	3

Tab. 1 shows that the value of  $M-V$  tends to the maximum near the fault branch. And the larger the mark value of the suspicious branch is, the greater probability of failure of the branch is. Therefore, the fault index of each suspicious branch is calculated according to the normalized  $M-V$  value. The suspicious fault branch is screened from the suspicious branch. The fault index is defined as follows:

$$FaultIndex(d_{ij}) = \frac{M-V(d_{ij}) - \min\{M-V\}}{\max\{M-V\} - \min\{M-V\}} \geq \varepsilon, \quad (13)$$

where  $\varepsilon$  is the threshold value, ranging (0, 1). When  $FaultIndex(d_{ij})$ , abbreviated as  $F-I$ , is greater than or equal to  $\varepsilon$ , the corresponding branch will be a suspicious fault branch for further fault analysis. The fault judgment formula is:

$$|F_i - F_j| > 0, \quad (14)$$

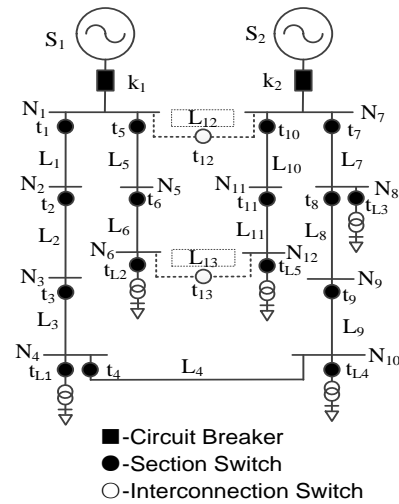
where,  $F_i$  and  $F_j$  are the code values of FTUs at both ends of the suspicious fault branch respectively. Its physical meaning is that if the fault signals at both ends are different from each other, the fault is determined.

## CASE STUDIES

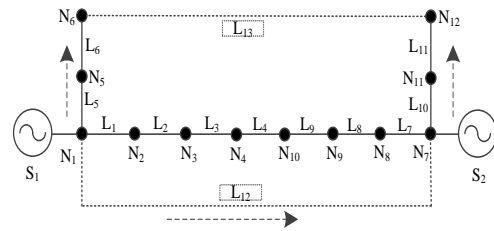
**Dynamic description of distribution network topology.** This paper modifies the distribution network topology in [17] and takes it for case studies, as shown in fig. 2. Node  $N_1 \sim N_{12}$  are equipped with FTUs.  $S_1$  and  $S_2$  represent the power supply from different bus lines.  $S_1$  is set as the main power supply and  $S_2$  as the auxiliary power supply, which are connected to power grid through circuit breakers  $K_1$  and  $K_2$  respectively. The interconnection switches  $t_{12}$  and  $t_{13}$  are equipped to improve power supply reliability. The interconnection switches are taken equivalently as virtual branches.

There are nodes connected to the distribution network with secondary voltage level, such as node  $N_4$  is connected to the low-voltage distribution network through the section switch  $t_{11}$ . The low-voltage network is not considered in the fault location analysis. Fig. 2 is transformed into a directed topology diagram with the power outflow direction of the main power supply  $S_1$  as the ref-

erence positive direction, as shown in fig. 3.



**Fig. 2. Schematic diagram of distribution network topology**  
**Рис. 2. Принципиальная схема топологии распределительной сети**



**Fig. 3. Directed topology of distribution network**  
**Рис. 3. Направленная топология распределительной сети**

The incidence matrix  $A$  in fig. 3 is expressed as:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

In equation (15), the line number represents the network node number ( $N_1 \sim N_{12}$ ), and the column number represents the branch number ( $L_1 \sim L_{18}$ ). The state of each branch can be represented by the on-off state of branch switches ( $t_1 \sim t_{13}$ ), so the branch state vector  $\beta$  is:



$$\beta = [t_1 \ t_2 \ \dots \ t_{13}]^T. \quad (16)$$

This paper takes switches  $t_{12} = t_{13} = 0$  and other switch states as “1” for the first topology state of distribution network. And the second state of distribution network topology is taking switches  $t_{13} = 1$ ,  $t_4 = t_{12} = 0$  and other switch states as “1”. The accuracy and reliability of dynamic description matrix are analyzed respectively. The branch state vector  $\beta_1$  in the first state and the branch state vector  $\beta_2$  in the second state of distribution network topology are as follows:

$$\beta_1 = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0]^T. \quad (17)$$

$$\beta_2 = [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1]^T. \quad (18)$$

Through the calculation of equation (5), multiply the “0” elements in  $\beta_1$  and  $\beta_2$  is multiplied by the corresponding elements in the matrix  $A$ , and the connection relation between nodes and branches is changed to obtain the electrical correlation matrix  $B_1$  and  $B_2$ . Through the calculation of equation (6), the adjacency matrixes in two topological states of distribution network are obtained:

$$D_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

$$D_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (20)$$

In equation (19),  $d_{1-7}$  and  $d_{6-12}$  are “0”, indi-

cating that the switches  $t_{17}$  and  $t_{13}$  are disconnected. In equation (20),  $d_{6-12}$  is “1” and  $d_{4-10}$  is “0”, showing that the switch  $t_{13}$  is on and the switch  $t_4$  is off. The above calculation results are consistent with the two distribution network topology states. The adjacency matrix describing topological structure has the ability to adapt to topological change.

**Fault section location of distribution network.** Fig. 4 is the schematic diagram of single-phase grounding fault of distribution network based on fig. 3.  $f_1$  and  $f_2$  are the single-phase grounding faults on branch  $L_3$  and  $L_8$  respectively. The accuracy and reliability of the algorithm are verified under two fault scenarios of single fault and multiple faults.

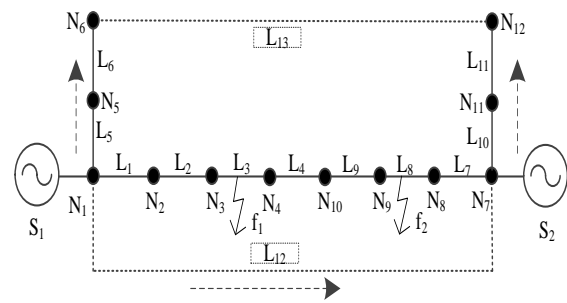


Fig. 4. Single-phase grounding faults of distribution network  
Рис. 4. Однофазные замыкания на землю распределительной сети

(1) Fault section determination in the scenario of single fault. When fault  $f_1$  occurs in the distribution network, the fault information matrix  $F$  and fault judgment matrix  $P$  obtained from equation (7) and (8) are as follows:

$$\text{diag}(F) = [1 \ 1 \ 1 \ -1 \ 0 \ 0 \ -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ 0 \ 0]. \quad (21)$$

$$P = D_1 + F = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (22)$$

The suspicious branch sets of nodes are analyzed in the fault decision matrix  $P$  according to equation (9) and (10):

$$\begin{cases}
 d_{11} = 1, C_{1-down} = \begin{cases} d_{12}, d_{15}, d_{23}, d_{34}, \\ d_{56}, d_{98}, d_{87}, d_{4-10}, \\ d_{10-9}, d_{7-11}, d_{7-12}, \end{cases} \\
 d_{22} = 1, C_{2-down} = \begin{cases} d_{23}, d_{34}, d_{4-10}, d_{10-9}, \\ d_{98}, d_{87}, d_{7-11}, d_{11-12} \end{cases} \\
 d_{33} = 1, C_{3-down} = \begin{cases} d_{34}, d_{10-9}, d_{87}, d_{98}, \\ d_{4-10}, d_{7-11}, d_{11-12} \end{cases} \\
 d_{44} = -1, C_{4-up} = \{d_{12}, d_{15}, d_{23}, d_{34}, d_{56}\} \\
 d_{55} = 0, C_5 = \{\emptyset\} \\
 d_{66} = 0, C_6 = \{\emptyset\} \\
 d_{77} = -1, C_{7-up} = \begin{cases} d_{12}, d_{15}, d_{23}, d_{34}, \\ d_{98}, d_{87}, d_{56}, \\ d_{4-10}, d_{10-9}, \end{cases} \\
 d_{88} = -1, C_{8-up} = \begin{cases} d_{12}, d_{15}, d_{23}, d_{34}, \\ d_{98}, d_{56}, d_{4-10}, d_{10-9}, \end{cases} \\
 d_{99} = -1, C_{9-up} = \begin{cases} d_{12}, d_{15}, d_{23}, d_{34}, \\ d_{4-10}, d_{10-9}, d_{56} \end{cases} \\
 d_{10-10} = -1, C_{10-up} = \begin{cases} d_{12}, d_{15}, d_{23}, \\ d_{34}, d_{4-10}, d_{56} \end{cases} \\
 d_{11-11} = 0, C_{11} = \{\emptyset\} \\
 d_{12-12} = 0, C_{12} = \{\emptyset\}
 \end{cases} \quad (23)$$

The marking value of each node to the branch by using equation (11) and (12), are shown in tab. 2.

Tab. 2 shows that the larger the value is, the greater failure probability there is. When the value of a branch is less than 0, it is indicated that no failure occurred in the branch. Therefore, when analyze the failure probability of a suspected branch, it is necessary to add a con-

straint  $M-V(d_{ij}) \geq 0$  to equation (13). The fault index of each suspicious branch in tab. 2 are depicted in tab. 3.

When  $\varepsilon$  is set to 0.8, branch  $L_3$  ( $d_{34}$ ) is screened out. According to equation (14), it can be obtained that  $|F_3 - F_4| = 2 > 0$ . Then, branch  $L_3$  occurs fault, which is consistent with the assumed fault scenario.

(2) Fault section location in the scenario of FTU information distortion

When  $F_5$  took "1" by mistake and  $F_7$  took "0" by omission, the fault index of branches are obtained as follows.

Tab. 4 shows that the branch with fault index greater than or equal to 0.8 is still  $L_3$ , and the fault determination result is correct. Since the fault index is determined by the nodes' judgment to all the branches, the influence of the FTU information distortion is diluted. It does not affect the correctness of the fault determination result.

(3) Fault section location in the scenario of multiple faults. When faults  $f_1$  and  $f_2$  occurred simultaneously, the fault information matrix  $F$  is:

$$diag(F) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (24)$$

The corresponding fault index of branches are shown in tab. 5.

**Table 2.** Marking values of suspicious branches

**Таблица 2.** Значения маркировки подозрительных ветвей

Node code		F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>	F <sub>5</sub>	F <sub>6</sub>	F <sub>7</sub>	F <sub>8</sub>	F <sub>9</sub>	F <sub>10</sub>	F <sub>11</sub>	F <sub>12</sub>	M-V
		1	1	1	-1	0	0	-1	-1	-1	-1	0	0	
Suspicious branch set		C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7</sub>	C <sub>8</sub>	C <sub>9</sub>	C <sub>10</sub>	C <sub>11</sub>	C <sub>12</sub>	
Branch	L <sub>1</sub> (d <sub>12</sub> )	1	-1	-1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	4
	L <sub>2</sub> (d <sub>23</sub> )	1	1	-1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	6
	L <sub>3</sub> (d <sub>34</sub> )	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	8
	L <sub>4</sub> (d <sub>4-10</sub> )	1	1	1	-1	0	0	1	1	1	1	0	0	6
	L <sub>5</sub> (d <sub>15</sub> )	1	-1	-1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	4
	L <sub>6</sub> (d <sub>56</sub> )	1	-1	-1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	4
	L <sub>7</sub> (d <sub>87</sub> )	1	1	1	-1	0	0	1	-1	-1	-1	0	0	0
	L <sub>8</sub> (d <sub>98</sub> )	1	1	1	-1	0	0	1	1	-1	-1	0	0	2
	L <sub>9</sub> (d <sub>10-9</sub> )	1	1	1	-1	0	0	1	1	1	-1	0	0	4
	L <sub>10</sub> (d <sub>7-11</sub> )	1	1	1	-1	0	0	-1	-1	-1	-1	0	0	-2
	L <sub>11</sub> (d <sub>11-12</sub> )	1	1	1	-1	0	0	-1	-1	-1	-1	0	0	-2

**Table 3.** Branch fault indexes in the scenario of single fault**Таблица 3.** Индексы отказов ветвей в сценарии единичной неисправности

Suspicious branches	<i>M-V</i>	<i>F-I</i>
L <sub>1</sub>	4	0.5
L <sub>2</sub>	6	0.75
L <sub>3</sub>	8	1
L <sub>4</sub>	6	0.75
L <sub>5</sub>	4	0.5
L <sub>6</sub>	4	0.5
L <sub>7</sub>	0	0
L <sub>8</sub>	2	0.25
L <sub>9</sub>	4	0.5

**Table 4.** Branch fault indexes in the scenario of Feeder terminal unit information distortion**Таблица 4.** Индексы отказов ветвей в сценарии искажения информации о фидерном терминале

Suspicious branches	<i>M-V</i>	<i>F-I</i>
L <sub>1</sub>	4	0.5
L <sub>2</sub>	6	0.75
L <sub>3</sub>	8	1
L <sub>4</sub>	6	0.75
L <sub>5</sub>	5	0.625
L <sub>6</sub>	2	0.25
L <sub>7</sub>	0	0
L <sub>8</sub>	1	0.125
L <sub>9</sub>	4	0.5
L <sub>10</sub>	0	0
L <sub>11</sub>	0	0

**Table 5.** Branch fault indexes in the scenario of multiple faults**Таблица 5.** Индексы отказа ветвей в сценарии множественных отказов

Suspicious branches	<i>M-V</i>	<i>F-I</i>
L <sub>1</sub>	1	0
L <sub>2</sub>	3	0.5
L <sub>3</sub>	5	1
L <sub>4</sub>	5	1
L <sub>5</sub>	1	0
L <sub>6</sub>	1	0
L <sub>7</sub>	3	0.5
L <sub>8</sub>	5	1
L <sub>9</sub>	5	1
L <sub>10</sub>	1	0
L <sub>11</sub>	1	0

According to equation (13), the target branches are screened out as follows: L<sub>3</sub> (d<sub>34</sub>), L<sub>4</sub> (d<sub>4-10</sub>), L<sub>8</sub> (d<sub>98</sub>) and L<sub>9</sub> (d<sub>10-9</sub>). And these target

branches are calculated respectively by the fault criterion:

$$\begin{cases} |F_3 - F_4| = |1 - 0| = 1 > 0 \\ |F_4 - F_{10}| = |0 - 0| = 0 \\ |F_9 - F_8| = |0 + 1| = 1 > 0 \\ |F_{10} - F_9| = |0 - 0| = 0 \end{cases} \quad (25)$$

According to equation (25), the faults occur in branches L<sub>3</sub> and L<sub>8</sub>, and the determination result is consistent with the assumed fault scenario.

From the results analysis of the above examples, the fault section location algorithm proposed in this paper can accurately determine the fault section and has good fault tolerance. It can adapt to the characteristics of UDN.

## CONCLUSION

In order to improve the accuracy and reliability of fault location of UDN, a fault section location method based on fault marking is proposed in this paper. It solves the problems of low adaptive ability and fault tolerance of matrix algorithm in UDN. The conclusions are drawn through the case studies:

1. By adding the branch state vector into the adjacency matrix, the connection relation between nodes and branches in the adjacent matrix changes with the operation state of branches. The adaptive ability of adjacency matrix to describe topology changes is enhanced.

2. By calculating the mark value of the branch, we can get the number of times that the branch appears in the suspicious branch sets of all nodes. The larger the fault index of the branch is, the more times it appears in the suspicious branch sets, and the greater the probability of the branch failure. In addition, the influence of node information distortion on fault determination results is diluted in the process of mark value calculation. Therefore, the fault tolerance of matrix algorithm is enhanced.

3. The fault criterion is used to analyze and judge the screened target branches, which can accurately identify multiple fault branches. It can be used to locate faults in multiple fault scenarios.

## References

1. Salehi M., Namdari F. Fault location on branched networks using mathematical morphology. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2018;12(1):207-216. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.0598>.
2. Teng Jen-Hao, Huang Wei-Hao, Luan Shang-Wen. Automatic and fast faulted line-section location method for distribution systems based on fault indicators. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2014;29(4):1653-1662. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2013.2294338>.
3. Jiang Yazhou, Liu Chen-Ching, Diedesch M., Lee Erik, Srivastava A. K. Outage management of distribution systems incorporating information from smart meters. *IEEE Transactions Power System*. 2016;31(5):4144-4154. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2015.2503341>.
4. Gu Jyh-Cherng, Huang Zih-Jhe, Wang Jing-Min, Hsu Lin-Chen, Yang Ming-Ta. High impedance fault detection in overhead distribution feeders using a DSP-based feeder terminal unit. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2021;57(1):179-186. <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.3029760>.
5. Xu Biao, Yin Xianggen, Zhang Zhe, Pang Shuai, Li Xusheng. Fault location for distribution network based on matrix algorithm and optimization algorithm. *Automation of Electric Power System*. 2019;43(5):152-158. <https://doi.org/10.7500/AEPS20180115002>.
6. Sun Kongming, Chen Qing, Gao Zhanjun. An automatic faulted line section location method for electric power distribution systems based on multisource information. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2016;31(4):1542-1551. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2015.2473681>.
7. Kong Pei, Liu Jianfeng, Zhou Jian, Zhou Yongliang, Song Ziheng. Fault-tolerant algorithm for fault location in distribution network based on integer linear programming. *Power System Protection and Control*. 2020;48(24):27-35. <https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.200073>.
8. Zheng Tao, Ma Wenlong, Li Wenbo. Fault section location of active distribution network based on feeder terminal unit information distortion correction. *Power System*. 2021;45(10):3926-3935. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2020.1991>.
9. Li Wenbo, Su Jianjun, Wang Xin, Li Jiamei, Ai Qian. Fault location of distribution networks based on multi-source information. *Global Energy Interconnection*. 2020;3(1):77-85. <https://doi.org/10.14171/j.2096-5117.gei.2020.01.009>.
10. Sun Kongming, Chen Qing, Zhao Pu. Automatic faulted feeder section location and isolation method for power distribution systems considering the change of topology. *Energies*. 2017;10(8):1081. <https://doi.org/10.3390/en10081081>.
11. Zheng Tao, Ma Long, Zhang Bo. Fault tolerant fast fault section location method for active distribution network. *Journal of North China Electric Power University*. 2022;49(1):12-21.
12. Ding Yi, Zhang Xin, Wang Xudong. A New Method for Fault Section Location of Feeder Based on Peak-Combination. *Proceedings of the CSU-EPSA*. 2021;33(9):26-31. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.000789>.
13. Jiang Yazhou. Toward detection of distribution system faulted line sections in real time: a mixed integer linear programming approach. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2019;34(3):1039-1048. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2019.2893315>.
14. Ji Xingquan, Zhang Shuo, Zhang Yumin, Han Xueshan, Xiao Yundong, Zeng Ruomei. Fault section location for distribution network based on improved electromagnetism-like mechanism algorithm. *Automation of Electric Power Systems*. 2021;45(22):157-166. <https://doi.org/10.7500/AEPS20210121007>.
15. Guo Zhuangzhi, Xu Qixing, Hong Junjie, Mao Xiaoming. Integer linear programming based fault section diagnosis method with high fault-tolerance and fast performance for distribution network. *Proceedings of the CSEE*. 2017;37(3):786-794. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.152361>.
16. Gong Xuan, Ren Xinxu, Wang Qiujie, Chen Ting, Wang Ling. A section location method with high fault tolerance stability for distribution network with distributed generation. *High Voltage Engineering*. 2021;47(11):3992-4006. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20201665>.
17. Liu Pengcheng, Li Xinli. Fault-section location of distribution network containing distributed generation based on the multiple-population genetic algorithm. *Power System Protection and Control*. 2016;44(2):36-41.
18. Džafić R. A. Jabr S. Henselmeyer, Đonlagić. T. Fault location in distribution networks through graph marking. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2018;9(2):1345-1353. <https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2587583>.
19. Guo Mou-Fa, Gao Jian-Hong, Shao Xiang, Chen Duan-Yu. Location of single-line-to-ground fault using 1-d convolutional neural network and waveform concatenation in resonant grounding distribution systems. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2021;70. <https://doi.org/10.1109/TIM.2020.3014006>.
20. Kiaei I., Lotfifard S. Fault section identification in smart distribution systems using multi-source data based on fuzzy Petri nets. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2020;11(1):74-83. <https://doi.org/10.1109/TSG.2019.2917506>.
21. Zhang Guangxiao, Tong Xiaoyang, Hong Qiteng, Lu Xuemin, Booth C. D. A novel fault isolation scheme in power system with dynamic topology using wide-area information. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2022;18(4):2399-2410. <https://doi.org/10.1109/TII.2021.3095254>.

## Список источников

1. Salehi M., Namdari F. Fault location on branched networks using mathematical morphology // IET Generation, Transmission & Distribution. 2018. Vol. 12. Iss. 1. P. 207–216. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.0598>.
2. Teng Jen-Hao, Huang Wei-Hao, Luan Shang-Wen. Automatic and fast faulted line-section location method for distribution systems based on fault indicators // IEEE Transactions on Power Systems. 2014. Vol. 29. Iss. 4. P. 1653–1662. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2013.2294338>.
3. Jiang Yazhou, Liu Chen-Ching, Diederich M., Lee Erik, Srivastava A. K. Outage management of distribution systems incorporating information from smart meters // IEEE Transactions Power System. 2016. Vol. 31. Iss. 5. P. 4144–4154. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2015.2503341>.
4. Gu Jyh-Cherng, Huang Zih-Jhe, Wang Jing-Min, Hsu Lin-Chen, Yang Ming-Ta. High impedance fault detection in overhead distribution feeders using a DSP-based feeder terminal unit // IEEE Transactions on Industry Applications. 2021. Vol. 57. Iss. 1. P. 179–186. <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.3029760>.
5. Xu Biao, Yin Xianggen, Zhang Zhe, Pang Shuai, Li Xusheng. Fault location for distribution network based on matrix algorithm and optimization algorithm // Automation of Electric Power System. 2019. Vol. 43. Iss. 5. P. 152–158. <https://doi.org/10.7500/AEPS20180115002>.
6. Sun Kongming, Chen Qing, Gao Zhanjun. An automatic faulted line section location method for electric power distribution systems based on multisource information // IEEE Transactions on Power Delivery. 2016. Vol. 31. Iss. 4. P. 1542–1551. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2015.2473681>.
7. Kong Pei, Liu Jianfeng, Zhou Jian, Zhou Yongliang, Song Ziheng. Fault-tolerant algorithm for fault location in distribution network based on integer linear programming // Power System Protection and Control. 2020. Vol. 48. Iss. 24. P. 27–35. <https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.200073>.
8. Zheng Tao, Ma Wenlong, Li Wenbo. Fault section location of active distribution network based on feeder terminal unit information distortion correction // Power System. 2021. Vol. 45. Iss. 10. P. 3926–3935. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2020.1991>.
9. Li Wenbo, Su Jianjun, Wang Xin, Li Jiamei, Ai Qian. Fault location of distribution networks based on multi-source information // Global Energy Interconnection. 2020. Vol. 3. Iss. 1. P. 77–85. <https://doi.org/10.14171/j.2096-5117.gei.2020.01.009>.
10. Sun Kongming, Chen Qing, Zhao Pu. Automatic faulted feeder section location and isolation method for power distribution systems considering the change of topology // Energies. 2017. Vol. 10. Iss. 8. P. 1081. <https://doi.org/10.3390/en10081081>.
11. Zheng Tao, Ma Long, Zhang Bo. Fault tolerant fast fault section location method for active distribution network // Journal of North China Electric Power University. 2022. Vol. 49. Iss. 1. P. 12–21.
12. Ding Yi, Zhang Xin, Wang Xudong. A New Method for Fault Section Location of Feeder Based on Peak-Combination // Proceedings of the CSU-EPSCA. 2021. Vol. 33. Iss. 9. P. 26–31. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.000789>.
13. Jiang Yazhou. Toward detection of distribution system faulted line sections in real time: a mixed integer linear programming approach // IEEE Transactions on Power Delivery. 2019. Vol. 34. Iss. 3. P. 1039–1048. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2019.2893315>.
14. Ji Xingquan, Zhang Shuo, Zhang Yumin, Han Xueshan, Xiao Yundong, Zeng Ruomei. Fault section location for distribution network based on improved electromagnetism-like mechanism algorithm // Automation of Electric Power Systems. 2021. Vol. 45. Iss. 22. P. 157–166. <https://doi.org/10.7500/AEPS20210121007>.
15. Guo Zhuangzhi, Xu Qixing, Hong Junjie, Mao Xiaoming. Integer linear programming based fault section diagnosis method with high fault-tolerance and fast performance for distribution network. // Proceedings of the CSEE. 2017. Vol. 37. Iss. 3. P. 786–794. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.152361>.
16. Gong Xuan, Ren Xinxu, Wang Qiujie, Chen Ting, Wang Ling. A section location method with high fault tolerance stability for distribution network with distributed generation // High Voltage Engineering. 2021. Vol. 47. Iss. 11. P. 3992–4006. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20201665>.
17. Liu Pengcheng, Li Xinli. Fault-section location of distribution network containing distributed generation based on the multiple-population genetic algorithm // Power System Protection and Control. 2016. Vol. 44. Iss. 2. P. 36–41.
18. Džafić R. A. Jabr S. Henselmeyer, Đonlag ić. T. Fault location in distribution networks through graph marking // IEEE Transactions on Smart Grid. 2018. Vol. 9. Iss. 2. P. 1345–1353. <https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2587583>.
19. Guo Mou-Fa, Gao Jian-Hong, Shao Xiang, Chen Duan-Yu. Location of single-line-to-ground fault using 1-d convolutional neural network and waveform concatenation in resonant grounding distribution systems // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2021. Vol. 70. <https://doi.org/10.1109/TIM.2020.3014006>.
20. Kiaei I., Lottifard S. Fault section identification in smart distribution systems using multi-source data based on fuzzy Petri nets // IEEE Transactions on Smart Grid. 2020. Vol. 11. Iss. 1. P. 74–83. <https://doi.org/10.1109/TSG.2019.2917506>.
21. Zhang Guangxiao, Tong Xiaoyang, Hong Qiteng, Lu Xuemin, Booth C. D. A novel fault isolation scheme in power system with dynamic topology using wide-area information // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2022. Vol. 18. Iss. 4. P. 2399–2410. <https://doi.org/10.1109/TII.2021.3095254>.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Ren Zhang,**

PhD Student,

College of Energy and Electrical Engineering

Hohai University;

Nanjing, 211100, No. 8 Focheng West Road, The office building is College of Energy and Electrical Engineering.

People's Republic of China

**Haoming Liu,**

Full Professor,

College of Energy and Electrical Engineering

Hohai University;

Nanjing, 211100, No. 8 Focheng West Road, The office building is College of Energy and Electrical Engineering.

People's Republic of China

#### 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 01.12.2021; approved after reviewing 10.01.2022; accepted for publication 21.02.2022.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Жэнь Чжан,**

аспирант,

Колледж энергетики и электротехники,

Университет Хохай,

Нанкин, 211100, Фошэн Вест Роуд, № 8,

Китайская Народная Республика

**Хаомин Лю,**

профессор,

Колледж энергетики и электротехники,

Университет Хохай,

Нанкин, 211100, Фошэн Вест Роуд, № 8,

Китайская Народная Республика

#### 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 01.12.2021; одобрена после рецензирования 10.01.2022; принята к публикации 21.02.2022.



Обзорная статья

УДК 669.23

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-128-141>

## Закономерности распределения благородных металлов между шлаковой и штейновой фазами при плавке сульфидных медных и медно-никелевых концентратов

Дмитрий Михайлович Богатырев<sup>1✉</sup>, Георгий Валентинович Петров<sup>2</sup>,  
Леонид Борисович Цымбулов<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>ООО «Институт Гипроникель», г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>1</sup>[dmitri.bogatyrev@gmail.com](mailto:dmitri.bogatyrev@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-2297-6608>

<sup>2</sup>[petroffg@yandex.ru](mailto:petroffg@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0003-2382-5235>

<sup>3</sup>[lbcym@mail.ru](mailto:lbcym@mail.ru)

**Резюме.** Цель – проанализировать и структурировать информацию о распределении благородных металлов при пирометаллургической переработке сульфидных медных и медно-никелевых концентратов, приведенную в отечественных и зарубежных научных источниках. Анализ данных по влиянию парциального давления кислорода в системе, и, как следствие, состава получаемых штейнов, температуры ведения процесса и состава шлаковой фазы на распределение металлов платиновой группы, золота и серебра между продуктами плавки проводился на основе обзора отечественной и зарубежной научной литературы. Проведено исследование широкого спектра информации о распределении изучаемых металлов между штейном и шлаком при переработке сульфидных медных и медно-никелевых концентратов. Установлено, что систематическое изучение вопроса о распределении благородных металлов между продуктами плавки с применением современных методов анализа находится все еще на ранних стадиях. В опубликованных научных работах имеется весьма противоречивая информация о поведении золота, серебра и металлов платиновой группы при пирометаллургической переработке сульфидных медных и медно-никелевых концентратов, что связано с различиями в методиках постановки экспериментов, подготовки и анализа проб для анализа, и, как следствие, дальнейшей интерпретации полученных результатов. Кроме того, в научной литературе не встречается данных о влиянии на распределение золота, серебра и металлов платиновой группы между продуктами плавки таких технологических параметров процесса, как содержание магнетита в шлаковой фазе, соотношение между медью и никелем в исходной шихте и получаемых штейнах. Также отмечается отсутствие в научных источниках данных о распределении благородных металлов при ведении процесса пирометаллургического обеднения шлаков окислительной плавки медно-никелевого производства. Принято решение о поиске оптимальных технологических параметров процесса окислительной плавки сульфидных медных и медно-никелевых концентратов, а также пирометаллургического обеднения шлаков, гарантирующих наиболее высокие показатели извлечения благородных металлов в целевой продукт.

**Ключевые слова:** металлы платиновой группы, золото, серебро, коэффициент распределения, медно-никелевые штейны, печь Ванюкова

**Для цитирования:** Богатырев Д. М., Петров Г. В., Цымбулов Л. Б. Закономерности распределения благородных металлов между шлаковой и штейновой фазами при плавке сульфидных медных и медно-никелевых концентратов // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 1. С. 128–141. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-128-141>.

## Distribution of noble metals between slag and matte phases during smelting of copper-sulphide and copper-nickel concentrates

Dmitrii M. Bogatyrev<sup>1✉</sup>, Georgii V. Petrov<sup>2</sup>, Leonid B. Tsymbulov<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

<sup>3</sup> Open Joint Stock Company GiproNickel Institute, Saint Petersburg, Russia

<sup>1</sup> dmitri.bogatyrev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2297-6608>

<sup>2</sup> petroffg@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2382-5235>

<sup>3</sup> lbcy@mail.ru

**Abstract.** In this work, we analyse and structure the information on the distribution of noble metals during pyrometallurgical processing of copper-sulphide and copper-nickel concentrates, available in domestic and foreign scientific sources. The data on the influence of oxygen partial pressure in the system and, consequently, the matte composition, process temperature, and the phase composition of slag on the distribution of platinum group metals, gold, and silver between the smelting products were analysed. Broad-ranging information on the distribution of the examined metals between matte and slag in the processing of copper-sulphide and copper-nickel concentrates was studied. It was established that the distribution of noble metals between the products of smelting using modern analytical methods is still in its early stages. Contradictory information on the behaviour of gold, silver, and platinum group metals during the pyrometallurgical processing of copper-sulphide and copper-nickel concentrates is presented in literature due to the variations in the experimental procedures, preparation, and analysis of test samples, and, as a result, further interpretation of the obtained results. Furthermore, no data on the influence of such technological parameters as magnetite content in the slag phase, the relationship between copper and nickel in the initial furnace charge and obtained mattes on the distribution of gold, silver, and platinum group metals between the products of smelting are available. In addition, no information on the distribution of noble metals during the pyrometallurgical slags depletion obtained in oxidative smelting of copper-nickel production has been published. Thus, it was decided to perform further research on establishing optimal technological conditions for oxidising smelting of copper-sulphide and copper-nickel concentrates, as well as pyrometallurgical depletion of slags, allowing for the highest extraction rates of noble metals into the target product.

**Key words:** platinum group metals, gold, silver, distribution coefficient, copper-nickel mattes, Vanyukov furnace

**For citation:** Bogatyrev D. M., Petrov G. V., Tsymbulov L. B. Distribution of noble metals between slag and matte phases during smelting of copper-sulphide and copper-nickel concentrates. *iPolytech Journal*. 2022;26(1):128-141. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-128-141>.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время Россия является одним из мировых лидеров в области производства благородных металлов, в том числе металлов платиновой группы. При этом отмечается, что основным источником данных металлов являются сульфидные медно-никелевые руды, перерабатываемые пирометаллургическими методами. Накопленные исследовательские данные позволяют в настоящее время достаточно корректно оценить поведение цветных металлов при пирометаллургической переработке. В то же время сведения о поведении благородных металлов носят обрывочный характер.

Коэффициент распределения дает важную информацию о потерях металлов со шлаками. В научных источниках коэффици-

ент распределения какого-либо металла между штейном и шлаком обычно определяется как отношение массового содержания металла в штейне к содержанию металла в шлаке. Однако в зарубежных источниках, как правило, принято вычислять коэффициент распределения как отношение содержания металла в шлаке к содержанию металла в штейне. Для лучшей наглядности приводимых данных коэффициент распределения металла в данной работе будет определяться по первому варианту:

$L_{шт./шл.} = [\text{масс. \% в штейне}] / [\text{масс. \% в шлаке}]$ .

Имеются многочисленные литературные источники [1–18] по проблеме потерь базовых металлов (Cu, Ni, в меньшей степени Co) со шлаками при плавке и конвертировании.

Последняя по времени «волна» таких исследований в 1980–1990 гг. была вызвана распространением интенсивных методов плавки, таких как взвешенная плавка, плавка в жидкой ванне. В то же время опубликованных работ по распределению благородных металлов (Au, Ag, металлы платиновой группы) гораздо меньше, а значение их, несмотря на «малые» содержания, велико. В производстве меди, например, благородные металлы играют заметную роль. Известно, что медные руды являются важным источником золота и серебра. В частности, в 2015 г. в структуре производства первичного серебра лишь 30% пришлось на собственно серебряные рудники, а 22% серебра было получено в качестве побочного продукта переработки медных руд (34% – от переработки свинцово-цинковых руд и 4,8% – прочих руд<sup>4</sup> [1]).

Стоит отметить, что в настоящее время изучение распределения металлов платиновой группы при пирометаллургической переработке медно-никелевых руд приобретает крайне важное значение в связи с их возросшей стоимостью на мировом рынке. В данной статье приводятся данные только современных научных исследований, так как в ряде случаев в более ранних работах приводятся разрозненные сведения, полученные с недостаточно точными средствами анализа.

**Анализ научных исследований.** Прежде всего, структурируем все известные исследования на 3 группы. В первой группе работ изучалось влияние парциального давления кислорода и сортности штейна на распределение благородных металлов. Во второй группе приводятся данные о влиянии температуры ведения процесса на распределение золота, серебра и металлов платиновой группы между продуктами плавки. Третья группа исследований посвящена изучению состава шлаковой фазы на поведение благородных металлов в пирометаллургических процессах. Остановимся на каждой группе подробнее.

Распределению золота и металлов платиновой группы (Pt, Pd, Rh, Ru) посвящена ста-

тья японских исследователей З. Хенео [2]. Опыты выполнялись в тиглях из MgO при 1573 К,  $p_{\text{SO}_2} = 10^4$  Па ( $p_{\text{O}_2} = 6,3 \cdot 10^{-4} - 2,5 \cdot 10^{-3}$ ,  $p_{\text{S}_2} = 5 - 10^3$  Па) и сортности штейна 40–70% масс. Cu, масса образца – около 12 г, время выдержки – 24 ч. Результаты в статье практически не обсуждаются. Отмечено лишь, что в интервале содержаний меди в штейне от 40% до 65% коэффициенты распределения не претерпевают заметных изменений, но при дальнейшем повышении содержания меди начинается рост  $L^{\text{шл/шт}}$ , то есть потери металлов платиновой группы со шлаками увеличиваются при росте парциального давления кислорода в системе. Авторы на основе полученных значений  $L^{\text{шл/шт}}$  полагают, что драгоценные металлы растворены преимущественно в штейне.  $L^{\text{шл/шт}}$  для Ru – около  $10^{-2}$ , для Au, Pt и Pd –  $10^{-3}$ , для Rh –  $10^{-4}$ .

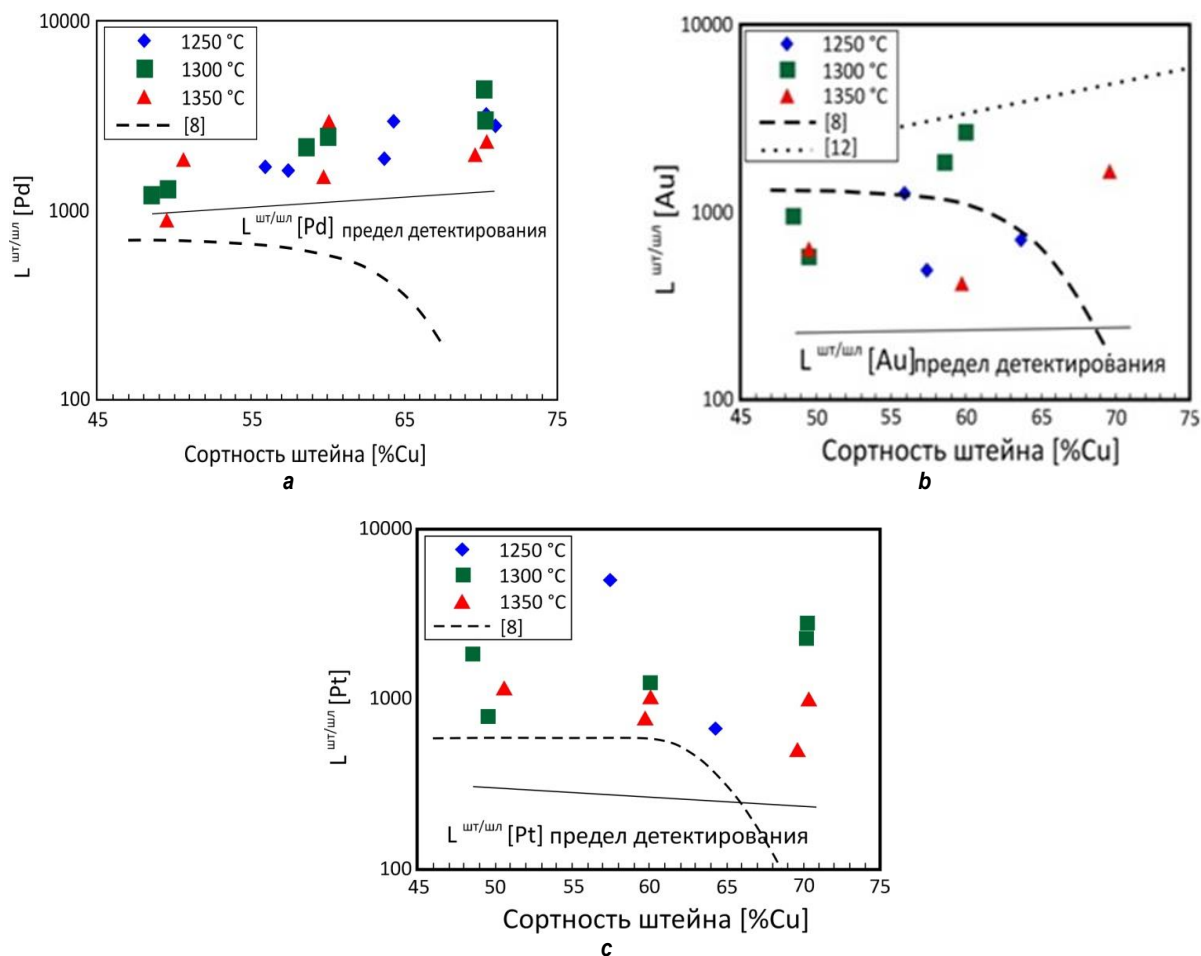
Большой вклад в изучение распределения металлов платиновой группы между шлаком и штейном при пирометаллургической переработке сульфидных концентратов внесли финские ученые университета Aalto [3–11]. Так, в работе [3] по равновесному распределению драгоценных металлов (Au, Pd, Pt, Rh) между медным штейном (Cu-Fe-S-O) и железосиликатным шлаком при 1250–1350°C в условиях контроля за парциальными давлениями кислорода и серы и фиксированном давлении  $\text{SO}_2$  выявлены следующие значения коэффициентов распределения: Au – 1500, Pd – 3000, Pt – 5000, Rh – 7000–8000. Полученные в данной работе значения содержания драгоценных металлов в железосиликатном шлаке укладываются в интервал от 1 до 20 ppm (1 ppm =  $10^{-4}$ % масс.) и имеют тенденцию к снижению с увеличением сортности штейна. Коэффициенты распределения при сортности штейна 65% Cu таковы: Au – 1500, Pd – 3000, Pt – 6000, Rh – 10000 (Ag – 100–200 в интервале сортностей штейна 50–70% Cu). В целом, по мнению авторов данной статьи, равновесное распределение штейн/шлак преимущественно определяется свойствами сульфидного штейна, несмотря

<sup>4</sup>World Silver Survey 2021 // The Silver Institute. 2021. URL: <https://www.silverinstitute.org/wp-content/uploads/2021/04/World-Silver-Survey-2021.pdf>

на то что «примесные» элементы растворяются в шлаке, очевидно, в виде окисленных частиц. Результаты работы [3] показывают, что растворимость драгоценных металлов в шлаке «пренебрежимо мала». Это позволяет заключить, что при взвешенной плавке медных концентратов доминирующим механизмом потерь драгоценных металлов является захват частиц штейна, т.е. скорее механические, а не химические потери. Коэффициенты распределения для платины, приведенные в работе [3], выше, чем отмеченные в исследовании [2], но хорошо согласуются с коэффициентами распределения, указанным в статье [13], в которой внимание уделялось растворимости чистой платины в  $\text{FeO}_x\text{-SiO}_2$  шлаке, т.е. рассматривается равновесие шлак/платина. Методика и условия

проведения опытов в [3] аналогичны [2]. Авторы установили, что растворимость платины в шлаке увеличивается по мере роста парциального давления кислорода.

Целью работы [3] являлось изучение поведения распределения драгоценных металлов между медным штейном и железосиликатным шлаком в условиях взвешенной плавки ( $1250\text{--}1350^\circ\text{C}$ ,  $p_{\text{SO}_2} = 10^4$  Па, содержание Cu в штейне 55–75% масс.). На рис. 1 приведены экспериментально полученные в [3] коэффициенты распределения для палладия, наряду с данными работы [2], а также расчетные коэффициенты распределения на основе предела детектирования (10 ppm). На рис. 1 аналогичные линии показывают минимальные надежные коэффициенты распределения драгоценных металлов.



**Рис. 1. Зависимость коэффициентов распределения палладия (а), золота (b) и платины (с) между медным штейном и железосиликатным шлаком от доли меди в штейне при парциальном давлении диоксида серы  $10^4$  Па и температурах 1523 К, 1573 К и 1623 К [3]**  
**Fig. 1. Dependence of distribution coefficients of palladium (a), gold (b) and platinum (c) between the copper matte and iron silicate slag on copper proportion in the matte at partial pressure of  $10^4$  Pa of sulphur dioxide and temperatures of 1523 K, 1573 K and 1623 K [3]**

Очевидно, что данные работы [2] отличаются от результатов [3], и в значительной степени – для богатых медью штейнов (65% Cu). Разброс данных большой, особенно для платины и золота, где картина зависимости от доли меди в штейне довольно противоречива. Однако авторы [3] считают, что в среднем концентрация платины, видимо, постоянна при изменении содержания меди в штейне вплоть до 60% масс, после чего она начинает снижаться. Такое поведение платины указывает на следующее обстоятельство: с ростом содержания меди и парциального давления кислорода платина во все большей степени «уходит из штейна». Что касается прочих драгоценных металлов (рис. 1 а), то у концентрации палладия имеется тенденция к повышению с увеличением доли меди в штейне, в то время как концентрация золота остается примерно постоянной.

Работ, посвященных распределению драгоценных металлов между шлаком и никелевым (или медно-никелевым) штейном, чрезвычайно мало, тем более – работ последнего времени с применением современных методов анализа. Можно отметить работу, опубликованную в ноябре 2017 г. группой финских исследователей, под названием «Распределение драгоценных металлов при плавке непосредственно на никелевый (низкомедистый) файнштейн» [4]. В данном литературном источнике изучено распределение базовых металлов (Cu, Fe, Ni, Co) и драгоценных (Ag, Au, Pd, Pt) между низкожелезистыми штейнами (до 15% масс.) с соотношением никеля к меди в штейне, равном 4, и железосиликатным шлаком (насыщенным  $\text{SiO}_2$ ) при температуре 1350–1450°C в контролируемой газовой атмосфере с фиксированными значениями  $p_{\text{S}_2}$  и  $p_{\text{O}_2}$ .

Значение коэффициента распределения золота ( $\approx 10000$ ) в работе [4] на порядок выше значения ( $\approx 1000$ ), приведенного в работе [3]. Коэффициент распределения платины  $L^{\text{шт/шл}}$  также выше, чем у золота, и составляет примерно 100000. У палладия зависимость коэффициента распределения от содержания железа в штейне выражена гораздо слабее, чем у золота и платины. Коэффициент рас-

пределения палладия по порядку величины аналогичен коэффициенту распределения золота. Авторы статьи [4] на основе собственных экспериментальных данных по распределению металлов между штейном и шлаком и имеющихся литературных данных по состоянию дел на 2018 г. делают вывод, что «заниженные» коэффициенты распределения, приведенные в некоторых работах, в которых используются традиционные способы пробоотбора с последующим химическим анализом, являются результатом недостаточно эффективного механического разделения штейна от шлака. Однако, по нашему мнению, такой подход позволяет оценить совокупные потери металлов платиновой группы со шлаками, так как позволяет определить и механические, и химические потери, что, учитывая преимущественные потери металлов платиновой группы (МПГ) с корольками штейна, более актуально для промышленных систем.

Перейдем к рассмотрению известных данных о влиянии температурного режима плавки на распределение металлов платиновой группы между шлаком и штейном. Согласно результатам исследований, проведенным финскими учеными [3, 5], температура не оказывает существенного влияния на коэффициенты распределения металлов платиновой группы. Отмечается, что температурная зависимость коэффициентов распределения обычно слабо выражена, но в целом низкая температура благоприятствует переходу благородных металлов в штейн. На рис. 2 приведены две линии тренда – для 1250 и 1350°C, показывающих влияние температуры на  $\log_{10} L^{\text{шт/шл}}$  для родия. В прочих случаях температурная зависимость слишком слабая, чтобы оказывать какое-либо заметное влияние.

Авторы работы [14] исследовали процесс растворимости рутения в различных шлаковых системах. В работе варьировали парциальное давление в диапазоне от  $10^2$  до  $2,1 \cdot 10^4$  Па и температуру процесса от 1155 до 1600°C (рис. 3). Было установлено, что растворимость рутения в шлаке растет с увеличением парциального давления кислорода и



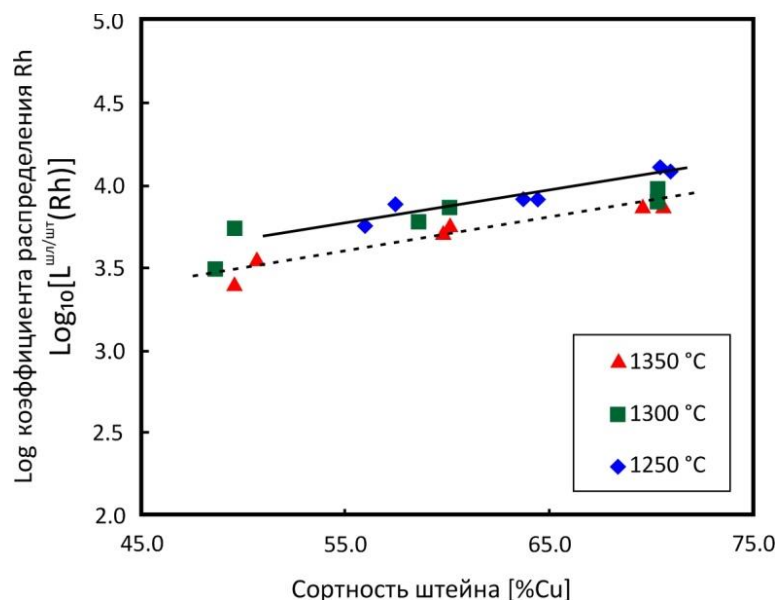


Рис. 2. Логарифм коэффициента распределения родия между железосиликатным шлаком и медным штейном при 1250–1350 °C как функция от содержания меди в штейне [11]

Fig. 2. Logarithm of the coefficient of rhodium distribution between iron silicate slag and copper matte at 1250–1350 °C as a function of the copper content in the matte [11]

при уменьшении температуры. На основании данной закономерности авторы делают вывод о том, что реакция растворения рутения в шлаке, которая может быть представлена в виде формулы:  $\text{Ru} + \frac{3}{4}\text{O}_2(\text{г}) + \frac{1}{2}\text{O}^{2-}(\text{шл.}) = \text{RuO}^{2-}(\text{шл.})$ , имеет экзотермический характер. Таким образом, опираясь на полученные результаты в работе [14], можно утверждать,

что, наряду с механическими, рутению свойственны химические потери со шлаками, в связи с чем можно предположить, что при обеднении шлака окислительной плавки твердым или газообразным восстановителем, рутений должен достаточно полно переходить из шлака в металлическую фазу.

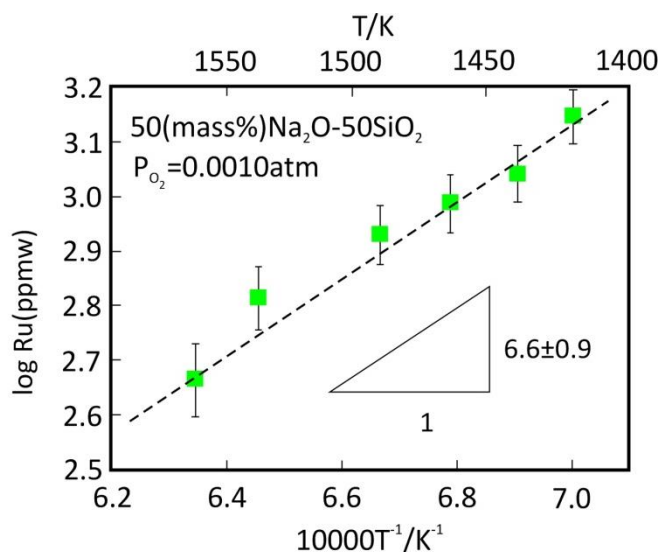


Рис. 3. Зависимость растворимости рутения от температуры в шлаковой системе  $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$  при фиксированном парциальном давлении кислорода [14] (на рис.  $p_{\text{O}_2} = 10^2$  Па)

Fig. 3. Dependence of ruthenium solubility on the temperature in the  $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$  slag system under the fixed oxygen partial pressure [14] (in the figure  $p_{\text{O}_2} = 10^2$  Pa)



Также в работе [14] были смоделированы условия процесса конвертирования меди. Исследования проводили при фиксированной температуре  $1200^{\circ}\text{C}$ , парциальном давлении кислорода  $1,52\text{ Па}$ . Состав шлака был следующим: 25%  $\text{SiO}_2$ , 70%  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , 5%  $\text{ZnO}$ . При данных условиях было установлено содержание рутения в шлаке, которое составило 47 ppm, и рассчитан коэффициент распределения рутения между конвертерным шлаком и черновой медью, который равен  $6,7 \cdot 10^{-4}$ .

Перейдем к рассмотрению третьей группы факторов, влияющих на распределение благородных металлов между шлаком и штейном, – составу шлаковой фазы. Влияние состава шлака изучалось в ряде работ финских и японских ученых [4, 14–18]. В большинстве работ было установлено, что с повышением содержания основного оксида растворимость МПГ в шлаке растет. В частности, в исследовании [15] определялась растворимость родия в зависимости от парциального давления кислорода в диапазоне от  $10$  до  $10^5\text{ Па}$ , температуры в интервале от  $1200$  до  $1600^{\circ}\text{C}$  и состава шлака. Было установлено (рис. 4), что при увеличении концентрации  $\text{CaO}$  в шлаке с 50 до 56% масс. содержание родия в шлаке увеличивается приблизительно на 20%.

С другой стороны, в работе [17], в которой исследовалась растворимость платины в

шлаковой системе  $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2-(\text{MgO}, \text{Fe}_2\text{O}_3, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{CuO})$ , авторы указывают на резкое снижение растворимости платины с увеличением концентрации  $\text{MgO}$  в шлаке. Также авторы отмечают, что растворимость платины резко снижается с увеличением содержания  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , которые ведут себя как типичные кислые оксиды в шлаках. По мнению авторов [17], несмотря на то, что  $\text{MgO}$  является основным оксидом, его основность ниже, чем у  $\text{Na}_2\text{O}$ , в связи с этим он ведет себя как разбавитель основности шлака, что, в свою очередь, приводит к увеличению коэффициента активности оксида платины при увеличении содержания оксида магния.

В работе ученых финского университета Аалто [4], приведенной выше, помимо влияния парциального давления кислорода в газовой фазе, также изучалось влияние содержания  $\text{MgO}$  в шлаковой фазе на распределение золота, платины и палладия между шлаком и штейном. Было установлено, что влияние  $\text{MgO}$  на переход палладия, платины и золота в шлак имеет одинаковый характер. Так, коэффициенты распределения, вычисляемые в данном случае как отношение содержания металла в штейне к содержанию металла в шлаке, по существу, увеличиваются более чем вдвое при добавках основного оксида. По результатам анализа шлаков содержание  $\text{MgO}$  равнялось 0, 4 и 8,5% масс.

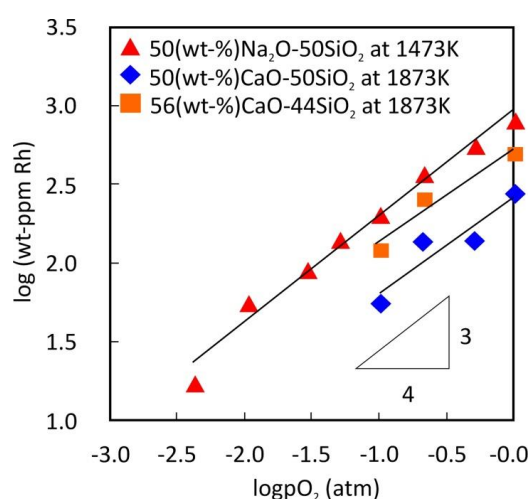


Рис. 4. Зависимость растворимости родия от парциального давления кислорода в шлаках различного состава и при различных температурах [15] (на рис. размерность от  $10^2\text{ Па}$  ( $-3,0\text{ атм}$ ) до  $10^5\text{ Па}$  ( $0\text{ атм}$ ))

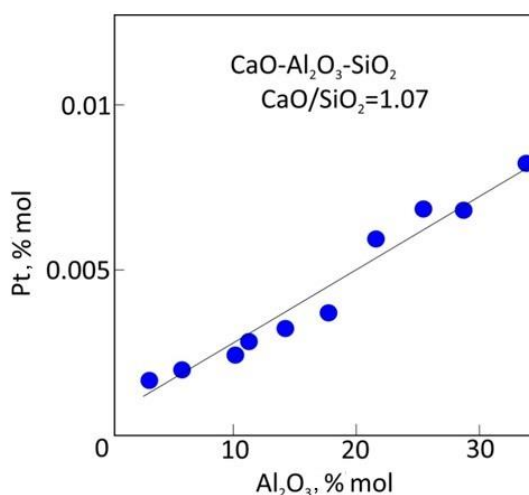
Fig. 4. Dependence of rhodium solubility on oxygen partial pressure in the slags of various compositions and at various temperatures [15] (the figure demonstrates the numbers of dimension from  $10^2\text{ Pa}$  ( $-3.0\text{ atm}$ ) to  $10^5\text{ Pa}$  ( $0\text{ atm}$ ))

В свою очередь, влияние  $\text{Al}_2\text{O}_3$  на распределение платины изучалось в работах японских исследователей [16]. Соотношение  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  в шлаке являлось постоянным параметром и равнялось 1,07, содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3$  варьировалось от 3 до 35% масс. Авторами отмечается, что в данной шлаковой системе  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ведет себя как основной оксид из-за присутствия  $\text{SiO}_2$ , который является кислым компонентом. В целом в рамках работы выявлено, что повышение концентрации  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в шлаке увеличивает содержание платины в шлаковом расплаве, рис. 5.

Из опубликованных отечественных статей по теме распределения благородных металлов между штейном и шлаком отмечаются работы, выполненные на базе АО «ИНЦИВЕТМЕТ» [20, 21], ООО «Институт Гипроникель» [22–24], Санкт-Петербургского горного университета<sup>5</sup> [25–29], литературный источник<sup>6</sup>. Так, в работах [20, 21] авторами изучались закономерности распределения металлов платиновой группы применительно к плавке сульфидных концентратов в печи Ванюкова, т.е. в условиях интенсивного перемешивания расплава. Авторами [20] отмечается снижение извлечения металлов платиновой группы в целевой продукт – штейн –

при увеличении содержания меди. Кроме того, авторы [20] указывают на пятикратное уменьшение потерь МПГ со шлаками с ростом массового соотношения в штейне  $[\text{Ni}]:[\text{Cu}]$  с 0,5 до 5.

В работе [22] авторы изучали распределение МПГ и золота применительно к плавке сульфидного медно-никелевого концентрата. Методика заключалась в предварительном обжиге концентрата при температуре  $900^\circ\text{C}$  для получения штейнов различного состава, после чего огарок продували  $\text{SO}_2$  для удаления  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Далее огарок нагревали до  $1250^\circ\text{C}$  (выше температуры плавления) и осуществляли выдержку расплава для разделения на шлаковую и штейновую фазы. В статье [22] отмечается, что оптимальным условием ведения процесса является получение штейнов с содержанием суммы цветных металлов на уровне 50–55%. При работе на более богатые штейны наблюдается повышение потерь МПГ и золота со шлаками. Кроме того, авторы указывают на существенное снижение извлечения МПГ в штейн при увеличении объема шлака. Так, при выходе штейна на уровне 2% извлечение Pt и Pd в штейн составило всего 50%.



**Рис. 5. Зависимость растворимости платины от содержания добавки оксида алюминия в шлак при  $1500^\circ\text{C}$  [16]**  
**Fig. 5. Dependence of platinum solubility on the content of the aluminium oxide addition to the slag at  $1500^\circ\text{C}$  [16]**

<sup>5</sup>Сизяков В. М., Бажин В. Ю., Бричкин В. Н., Петров Г. В. *Металлургия цветных металлов: учебник*. СПб.: Национальный минерально-сырьевой ун-т «Горный», 2015. 392 с.

<sup>6</sup>Котляр Ю. А., Меретуков М. А., Стрижко Л. С. *Металлургия благородных металлов: учебник*. В 2-х кн. Кн. 2. М.: МИСИС; ИД «Руда и металлы», 2005. 392 с.

Авторы литературного источника<sup>5</sup> описали поведение каждого из платиновых металлов в процессе руднотермической плавки сульфидного никелевого концентрата и медного концентрата, полученного из медно-никелевых руд, при плавке его в печи Ванюкова, конвертировании штейна и анодной плавке.

Установлено, что основное влияние на потери МПГ оказывает наличие или отсутствие восстановителя в шихте. Также отмечено, что потери платины, палладия, золота, рутения, осмия при нейтральной атмосфере в РТП с увеличением суммы металлов в штейне снижаются с 5,0 до 0,2%. Дальнейшее снижение наблюдается при восстановительной атмосфере в печи в присутствии 3% восстановителя. Потери платины в нейтральном режиме составляют 0,2–3,0%, в восстановительном – 0,2–1,0%; палладия 0,5–3,0 и 0,8%; рутения 0,5–5,0 и 0,5–1,5%, соответственно. Осмий в шлак переходит в одинаковой степени в нейтральном и восстановительном режимах плавки. Переход иридия в шлак выше, чем у остальных МПГ и составляет 1,5–10%. При переходе к окислительному режиму плавки резко возрастают (до 16%) потери рутения и осмия.

Авторы отмечают, что при плавке в печи Ванюкова образуется некоторое количество металлической меди, которая является коллектором МПГ, поэтому их потери со шлаками невелики. В таблице приведены коэффициенты распределения МПГ и их извлечение в системах Cu-Cu<sub>2</sub>S и Cu-Cu<sub>2</sub>O по данным<sup>5</sup>.

Данные, приведенные в источниках [30–

36], в которых рассматривалось распределение металлов платиновой группы между продуктами плавки, также подтверждают низкие потери данных металлов в растворимой форме в шлаковом расплаве. Также авторы работ [33–35] отмечают, что сульфидный расплав, представленный штейновой фазой, является хорошим коллектором металлов платиновой группы. При этом коллектирование в штейне металлов платиновой группы, в частности Pt, Pd, Ru, увеличивается по мере роста концентрации серы в штейновой фазе.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Обзор известных литературных данных показывает, что в мире проблеме распределения благородных металлов между продуктами плавки, как в медной, так и в никелевой промышленности, уделяют большое внимание [37, 38]. Достаточно много исследований по данной тематике опубликовано в последние годы, проведенных с применением современных методов анализа. Основные исследования посвящены распределению Au, Ag, Pt, Pd. Весьма отрывочные сведения касаются Rh, Ru, Ir, для которых круг публикаций резко ограничен.

2. Многие ученые считают, что коэффициенты распределения  $L_{Me}^{штейн-шлак}$  имеют высокие значения ( $10^3$ – $10^4$ ) для Au, Pt, Pd. Причем для первых двух металлов даже несколько выше. Подавляющее большинство исследователей сходятся во мнении, что потери благородных металлов определяются, главным образом, наличием в шлаках механической взвеси сульфидно-металлических

Распределение металлов платиновой группы и их извлечение в медь в системах медь-сульфид меди и медь-оксид меди<sup>5</sup>

Distribution of platinum group metals and their extraction into copper in the copper-copper sulphide and copper-copper oxide systems<sup>5</sup>

Металлы	Cu-Cu <sub>2</sub> S		Cu-Cu <sub>2</sub> O	
	$K = \frac{[Cu][Me]}{(Cu_2S)(Me)}$	Извлечение, %	$K = \frac{[Cu][Me]}{(Cu_2O)(Me)}$	Извлечение, %
Платина	100	99,7	90–100	99,6
Палладий	140	98,0	80–100	96,4
Родий	–	99,0	–	98,0
Иридий	150–450	99,0	100–150	94,0
Рутений	60	93,0	1,2–1,5	30,0
Осмий	250–350	97,0	120–140	94,0

корольков, где и сосредоточена основная часть теряемых со шлаком благородных металлов. В то же время некоторые исследователи отмечают наличие небольшой растворимости Au, Pt, Pd в шлаках, однако даже современными методами анализа определить достоверно концентрации растворенных металлов, составляющих первые единицы ppm, не представляется возможным. В одной из работ отмечается склонность к окислению Ru в процессе окислительной плавки и, как следствие, характерные для данного металла химические потери со шлаками.

3. Исследования, посвященные изучению влияния температуры процесса на распределения металлов платиновой группы между штейновой и шлаковой фазами, указывают на то, что температура процесса не оказывает значительного влияния на распределение платины, палладия и золота. В то же время, согласно некоторым данным в опубликованных источниках, увеличение температуры влечет за собой переход в шлак рутения ввиду протекания реакции окисления, которая носит экзотермический характер.

#### Список источников

1. Avarmaa K., O'Brien H., Taskinen P. Equilibria of gold and silver between molten copper and  $\text{FeO}_x\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  slag in WEEE smelting at 1300°C // *Advances in Molten Slags, Fluxes, and Salts: Proceedings of the 10th International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts*. 2016. P. 193–202. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-48769-4\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48769-4_20).
2. Heneo Z., Hector M., Yamaguchi K., Ueda S. Distribution of precious metals (Au, Pt, Pd, Rh and Ru) between copper matte and iron-silicate slag at 1573 K // *Sohn International Symposium on Advanced Processing of Metals and Materials: Principles, Technologies and Industrial Practice* (San Diego, 27–31 August 2006). San Diego, 2006. Vol. 1. P. 723–729.
3. Avarmaa K., O'Brien H., Johto H., Taskinen P. Equilibrium distribution of precious metals between slag and copper matte at 1250–1350°C // *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2015. Vol. 1. P. 216–228. <https://doi.org/10.1007/s40831-015-0020-x>.
4. Piskunen P., Avarmaa K., O'Brien H., Klemettinen L., Johto H., Taskinen P. Precious metal distributions in direct nickel matte smelting with low-Cumattes // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2018. Vol. 49. Iss. 1. P. 98–112. <https://doi.org/10.1007/s11663-017-1115-5>.
5. Avarmaa K., O'Brien H., Klemettinen L., Taskinen P. Precious metal recoveries in secondary copper smelting with high-alumina slags // *Journal of material cycles and waste management*. 2020. Vol. 22. P. 642–655. <https://doi.org/10.1007/s10163-019-00955-w>.
6. Klemettinen L., Avarmaa K., Taskinen P. Slag chemistry of high-alumina iron silicate slags at 1300°C in WEEE smelting // *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2017. Vol. 3. P. 772–781. <https://doi.org/10.1007/s40831-017-0141-5>.
7. Sukhomlinov D., Taskinen P. Distribution of Ni, Co, Ag, Au, Pt, Pd between copper metals and silica saturated iron silicate slag // *Thermodynamic investigation of complex inorganic material systems for improved renewable energy and metals production processes: Proceedings of the European Metallurgical Conference (EMC)*. 2017. Vol. 3. P. 1029–1038.
8. Roghani G., Takeda Y., Itagaki K. Phase equilibrium and minor element distribution between  $\text{FeO}_x\text{-SiO}_2\text{-MgO}$ -based slag and  $\text{Cu}_2\text{S-FeS}$  matte at 1573 K under high partial pressures of  $\text{SO}_2$  // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2000. Vol. 31. No. 4. P. 705–712. <https://doi.org/10.1007/s11663-000-0109-9>.
9. Avarmaa K., Johto H., Taskinen P. Distribution of precious metals (Ag, Au, Pd, Pt, and Rh) between copper matte and iron silicate slag // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2016. Vol. 47. P. 244–255. <https://doi.org/10.1007/s11663-015-0498-4>.
10. Avarmaa K., Klemettinen L., O'Brien H., Taskinen P. Urban mining of precious metals via oxidizing copper smelting // *Minerals Engineering*. 2019. Vol. 133. P. 95–102. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.01.006>.
11. Sukhomlinov D., Klemettinen L., Avarmaa K., O'Brien H., Taskinen P., Jokilaakso A. Distribution of Ni, Co, precious and platinum group metals in copper making process // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2019. Vol. 50. P. 1752–1765. <https://doi.org/10.1007/s11663-019-01576-2>.
12. Dinsdale A. SGTE Pure Element Database (UNARY) // *Scientific Group Thermodata Europe*. 2009. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sgte.net/en/free-pure-substance-database> (12.10.2021).
13. Shishin D., Hidayat T., Chen J., Hayes P.C., Jak E. Experimental investigation and thermodynamic modeling of the distributions of Ag and Au between slag, matte, and metal in the  $\text{Cu-Fe-O-S-Si}$  System // *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2019. Vol. 5. No. 2. P. 240–249. <https://doi.org/10.1007/s40831-019-00218-w>.
14. Yamaguchi K. Distribution of precious metals between matte and slag and precious metal solubility in slag // *Proceedings of Copper*. 2010. Vol. 3. P. 1287–1295.
15. Shuto H., Okabe T. H., Morita K. Ruthenium solubility and dissolution behavior in molten slag // *Materials transactions*. 2011. Vol. 52. P. 1899–1904.
16. Morita K., Wiraseranee C., Shuto H., Nakamura S., Iwasawa K., Okabe T. H., et al. Dissolution behaviour of platinum group metals into molten slags // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy IMM Transactions*

- section C. 2014. Vol. 123. No. 1. P. 29–34. <https://doi.org/10.1179/0371955313Z.00000000070>.
17. Nakamura S., Sano N. Solubility of platinum in molten fluxes as a measure of basicity // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2010. Vol. 28. P. 103–108. <https://doi.org/10.1007/s11663-997-0132-1>.
18. Wiraseranee C., Yoshikawa T., Okabe T. H., Morita K. Dissolution behavior of platinum in Na<sub>2</sub>O–SiO<sub>2</sub>-based slags // *Material Transactions*. 2014. Vol. 55. No. 7. P. 1083–1090. <https://doi.org/10.2320/matertrans.M2014042>.
19. Wiraseranee C., Yoshikawa T., Okabe T. H., Morita K. Effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO and CuO<sub>x</sub> on the dissolution behavior of rhodium in the Na<sub>2</sub>O–SiO<sub>2</sub> slags // *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*. 2013. Vol. 49. No. 2. P. 131–138.
20. Токарь Л. Л., Ерцев В. И., Цесарский В. С., Денисов А. Ф., Шевцова Н. В. Изучение закономерностей поведения редких платиновых металлов в системе штейн-шлак применительно к плавке в расплаве // *Автогенные процессы в производстве тяжелых цветных металлов: сб. науч. тр. М.: ЦНИИцветмет экономики и информации*, 1987. С. 86–91.
21. Орлов А. М., Токарь Л. Л., Бруэк В. Н., Быстров В. П., Цесарский В. С. Исследование поведения благородных металлов в процессе испытаний плавки в жидкой ванне сульфидного медно-никелевого сырья // *Автогенные процессы в производстве тяжелых цветных металлов: сб. науч. тр. М.: ЦНИИцветмет экономики и информации*, 1987. С. 79–86.
22. Цемехман Л. Ш., Цымбулов Л. Б., Пахомов Р. А., Попов В. А. Поведение платиновых металлов при переработке сульфидного медно-никелевого сырья // *Цветные металлы*. 2016. № 11. С. 50–56. <https://doi.org/10.17580/tsm.2016.11.05>.
23. Рябко А. Г., Вайсбурд С. Е., Сорокин В. Г. Механизм образования платиносодержащих участков в составе металлической фазы штейна // *Труды Института Гипроникель*. 1979. № 52. С. 24–29.
24. Tsymbulov L. B., Knyazev M. V., Tsemekhman L. Sh. Oxide nickel ores smelting of ferronickel in two-zone Vaniukov furnace // *Canadian Metallurgical Quarterly*. 2011. Vol. 50. Iss. 2. P. 135–144. <https://doi.org/10.1179/000844311X12949291727772>.
25. Петров Г. В., Грейвер Т. Н., Лазаренков В. Г. Современное состояние и технологические перспективы производства платиновых металлов из хромитовых руд. СПб.: Изд-во «Недра», 2001. 200 с.
26. Александрова Т. Н., О'Коннор С. Переработка платинометаллических руд в России и Южной Африке: состояние и перспективы // *Записки Горного института*. 2020. Т. 244. С. 462–473. <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.4.9>.
27. Теляков А. Н., Рубис С. А., Горленков Д. В. Разработка эффективной технологии переработки промышленного сырья, содержащего благородные металлы // *Записки Горного института*. 2011. Vol. 192. С. 88–90.
28. Петров Г. В., Диаките М., Спыну А. Ю. Обзор спос
- собов вовлечения в переработку техногенных платиносодержащих отходов горно-металлургического комплекса // *Обогащение руд*. 2012. № 1. С. 25–28.
29. Gorlenkov D. V., Gorlenkova I. V., Beloglazov I. I., Timofeev V. Y. Selection of complete recovery of precious metals in the processing of copper-nickel alloys in hydrometallurgical way // *Materials Science Forum*. 2018. Vol. 927. P. 190–194. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.927.190>.
30. Wan Xingbang, Kleemola L., Klemettinen L., O'Brien H. On the kinetic behavior of recycling precious metals (Au, Ag, Pt, and Pd) through copper smelting process // *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2021. Vol. 7. No. 3. P. 920–931. <https://doi.org/10.1007/s40831-021-00388-6>.
31. Nagamori M., Mackey P. Thermodynamics of copper matte converting: part I. Fundamentals of the Noranda process // *Metallurgical and materials transactions B*. 1978. Vol. 9. P. 255–265. <https://doi.org/10.1007/BF02653691>.
32. Shuva M. A. H., Rhamdhani M. A., Brooks G. A., Masood S. H., Reuter M. A. Thermodynamics of palladium (Pd) and tantalum (Ta) relevant to secondary copper smelting // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2017. Vol. 48. Iss. 1. P. 317–327. <https://doi.org/10.1007/s11663-016-0839-y>.
33. Fonseca R. O. C., Campbell I. H., O'Neill H. St. C., Allen C. M. Solubility of Pt in sulphide mattes: Implications for the genesis of PGE-rich horizons in layered intrusions // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2009. Vol. 73. No. 19. P. 5764–5777. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2009.06.038>.
34. Laurenz V., Fonseca R., Ballhaus C., Sylvester P. J. Solubility of palladium in picritic melts: 1. The effect of iron // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2010. Vol. 74. Iss. 10. P. 2989–2998. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.02.015>.
35. Laurenz V., Fonseca R. O. C., Ballhaus C., Jochum K. P., Heuser A., Sylvester P. J. The solubility of palladium and ruthenium in picritic melts: 2. The effect of sulfur // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2013. Vol. 108. P. 172–183. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.01.013>.
36. Avarmaa K., Taskinen P., Klemettinen L. Ni–Fe–Co alloy – magnesia-iron-silicate slag equilibria and the behavior of minor elements Cu and P in nickel slag cleaning // *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. Vol. 15. P. 719–730. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.07.112>.
37. Avarmaa K., O'Brien H., Johto H., Taskinen P. Equilibrium distribution of precious metals between slag and copper matte at 1250–1350°C // *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2015. Vol. 1. P. 216–228. <https://doi.org/10.1007/s40831-015-0020-x>.
38. Nansai K., Nakajima K., Kagakawa S., Kondo Y., Shigetomi Y., Suh Sangwon. Global mining risk footprint of critical metals necessary for low-carbon technologies: the case of neodymium, cobalt, and platinum in Japan // *Environmental Science & Technology*. 2015. Vol. 49. No. 4. P. 2022–2031. <https://doi.org/10.1021/es504255r>.



## References

1. Avarmaa K., O'Brien H., Taskinen P. Equilibria of gold and silver between molten copper and  $\text{FeO}_x\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  slag in WEEE smelting at 1300°C. In: *Advances in Molten Slags, Fluxes, and Salts: Proceedings of the 10th International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts*. 2016:193-202. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-48769-4\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48769-4_20).
2. Heneo Z., Hector M., Yamaguchi K., Ueda S. Distribution of precious metals (Au, Pt, Pd, Rh and Ru) between copper matte and iron-silicate slag at 1573 K. In: *Sohn International Symposium on Advanced Processing of Metals and Materials: Principles, Technologies and Industrial Practice*. 27–31 August 2006, San Diego. San Diego; 2006, vol. 1, p. 723–729.
3. Avarmaa K., O'Brien H., Johto H., Taskinen P. Equilibrium distribution of precious metals between slag and copper matte at 1250–1350°C. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2015;1:216-228. <https://doi.org/10.1007/s40831-015-0020-x>.
4. Piskunen P., Avarmaa K., O'Brien H., Klemettinen L., Johto H., Taskinen P. Precious metal distributions in direct nickel matte smelting with low-Cu mattes. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2018;49(1):98-112. <https://doi.org/10.1007/s11663-017-1115-5>.
5. Avarmaa K., O'Brien H., Klemettinen L., Taskinen P. Precious metal recoveries in secondary copper smelting with high-alumina slags. *Journal of material cycles and waste management*. 2020;22:642-655. <https://doi.org/10.1007/s10163-019-00955-w>.
6. Klemettinen L., Avarmaa K., Taskinen P. Slag chemistry of high-alumina iron silicate slags at 1300°C in WEEE smelting. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2017;3:772-781. <https://doi.org/10.1007/s40831-017-0141-5>.
7. Sukhomlinov D., Taskinen P. Distribution of Ni, Co, Ag, Au, Pt, Pd between copper metals and silica saturated iron silicate slag. In: *Thermodynamic investigation of complex inorganic material systems for improved renewable energy and metals production processes: Proceedings of the European Metallurgical Conference (EMC)*. 2017;3:1029-1038.
8. Roghani G., Takeda Y., Itagaki K. Phase equilibrium and minor element distribution between  $\text{FeO}_x\text{-SiO}_2\text{-MgO}$ -based slag and  $\text{Cu}_2\text{S-FeS}$  matte at 1573 K under high partial pressures of  $\text{SO}_2$ . *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2000;31(4):705-712. <https://doi.org/10.1007/s11663-000-0109-9>.
9. Avarmaa K., Johto H., Taskinen P. Distribution of precious metals (Ag, Au, Pd, Pt, and Rh) between copper matte and iron silicate slag. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2016;47:244-255. <https://doi.org/10.1007/s11663-015-0498-4>.
10. Avarmaa K., Klemettinen L., O'Brien H., Taskinen P. Urban mining of precious metals via oxidizing copper smelting. *Minerals Engineering*. 2019;133:95-102. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.01.006>.
11. Sukhomlinov D., Klemettinen L., Avarmaa K., O'Brien H., Taskinen P., Jokilaakso A. Distribution of Ni, Co, precious and platinum group metals in copper making process. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2019;50:1752-1765. <https://doi.org/10.1007/s11663-019-01576-2>.
12. Dinsdale A. SGTE pure element database (UNARY). Scientific Group Thermodata Europe. 2009. Available from: <https://www.sgte.net/en/free-pure-substance-database> [Accessed 12th October 2021].
13. Shishin D., Hidayat T., Chen J., Hayes P. C., Jak E. Experimental investigation and thermodynamic modeling of the distributions of Ag and Au between slag, matte, and metal in the Cu-Fe-O-S-Si System. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2019;5(2):240-249. <https://doi.org/10.1007/s40831-019-00218-w>.
14. Yamaguchi K. Distribution of precious metals between matte and slag and precious metal solubility in slag. In: *Proceedings of Copper*. 2010;3:1287-1295.
15. Shuto H., Okabe T. H., Morita K. Ruthenium solubility and dissolution behavior in molten slag. *Materials transactions*. 2011;52:1899-1904.
16. Morita K., Wiraseranee C., Shuto H., Nakamura S., Iwasawa K., Okabe T. H., et al. Dissolution behaviour of platinum group metals into molten slags. In: *Mineral Processing and Extractive Metallurgy IMM Transactions section C*. 2014;123(1):29-34. <https://doi.org/10.1179/0371955313Z.00000000070>.
17. Nakamura S., Sano N. Solubility of platinum in molten fluxes as a measure of basicity. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2010;28:103-108. <https://doi.org/10.1007/s11663-997-0132-1>.
18. Wiraseranee C., Yoshikawa T., Okabe T. H., Morita K. Dissolution behavior of platinum in  $\text{Na}_2\text{O-SiO}_2$ -based slags. *Material Transactions*. 2014;55(7):1083-1090. <https://doi.org/10.2320/matertrans.M2014042>.
19. Wiraseranee C., Yoshikawa T., Okabe T. H., Morita K. Effect of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  and  $\text{CuO}_x$  on the dissolution behavior of rhodium in the  $\text{Na}_2\text{O-SiO}_2$  slags. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*. 2013;49(2):131-138.
20. Tokar' L. L., Ercev V. I., Cesarskij V. S., Denisov A. F., Shevcova N. V. Studying behaviour regularities of rare platinum metals in the matte-slag system as applied to smelting in the melt. In: *Avtogennyye processy v proizvodstve tyazhelykh cvetnykh metallov: sbornik trudov = Autogenous processes in the production of heavy non-ferrous metals: Collected scientific works*. Moscow: Central Research Institute of Economy and Information; 1987, p. 86-91. (In Russ.).
21. Orlov A. M., Tokar' L. L., Bruek V. N., Bystrov V. P., Cesarskij V. S. Studying behavior of noble metals under testing of melting in a liquid bath of sulphide copper-nickel raw materials. *Avtogennyye processy v proizvodstve tyazhelykh cvetnykh metallov: sbornik trudov = Autogenous processes in the production of heavy non-ferrous metals: Collected scientific works*. Moscow: Central Research Institute of Economy and Information; 1987, p. 79-86. (In Russ.).
22. Tsemekhman L. Sh., Tsybulov L. B., Pahomov R. A., Popov V. A. Behavior of platinum metals during sulfide copper-nickel raw materials



processing. *Tsvetnye metally*. 2016;11:50-56. <https://doi.org/10.17580/tsm.2016.11.05>.

23. Ryabko A. G., Vaysburd S. E., Sorokin V. G. Formation mechanism of platinum-containing areas in the composition of matte metallic phase. *Proceedings of the Giprotnickel Institute*. 1979;52:24-29. (In Russ.).

24. Tsymbulov L. B., Knyazev M. V., Tsemekhman L. Sh. Oxide nickel ores smelting of ferronickel in two-zone Vanuikuv furnace. *Canadian Metallurgical Quarterly*. 2011;50(2):135-144.

<https://doi.org/10.1179/000844311X12949291727772>.

25. Petrov G. V., Grejver T. N., Lazarenkov V. G. *Current state and technological prospects for the production of platinum metals from chromite ores*. Saint-Petersburg: Nedra; 2001, 200 p. (In Russ.).

26. Aleksandrova T. N., O'Konnor S. Processing of platinum group metal ores in Russia and South Africa: current state and prospects. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2020;244:462-473. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.4.9>.

27. Telyakov A. N., Rubis S. A., Gorlenkov D. V. Developing an effective technology for processing of industrial raw materials containing noble metals. *Zapiski Gornogoinstituta = Journal of Mining Institute*. 2011;192:88-90. (In Russ.).

28. Petrov G. V., Diakite M. L. L., Spynu A. Yu. The Mine-and-mill complex man-caused platinum-containing waste involvement into processing (review of methods). *Obo-gashchenie rud*. 2012;1:25-28. (In Russ.).

29. Gorlenkov D. V., Gorlenkova I. V., Beloglazov I. I., Timofeev V. Y. Selection of complete recovery of precious metals in the processing of copper-nickel alloys in hydro-metallurgical way. *Materials Science Forum*. 2018;927:190-194.

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.927.190>.

30. Wan Xingbang, Kleemola L., Klemettinen L., O'Brien H. On the kinetic behavior of recycling precious metals (Au, Ag, Pt, and Pd) through copper smelting process. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2021;7(3):920-931. <https://doi.org/10.1007/s40831-021-00388-6>.

31. Nagamori M., Mackey P. Thermodynamics of copper

matte converting: Part I. Fundamentals of the Noranda process. *Metallurgical and materials transactions B*. 1978;9:255-265. <https://doi.org/10.1007/BF02653691>.

32. Shuva M. A. H., Rhamdhani M. A., Brooks G. A., Masood S. H., Reuter M. A. Thermodynamics of palladium (Pd) and tantalum (Ta) relevant to secondary copper smelting. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2017;48(1):317-327. <https://doi.org/10.1007/s11663-016-0839-y>.

33. Fonseca R. O. C., Campbell I. H., O'Neill H. St. C., Allen C. M. Solubility of Pt in sulphide mattes: Implications for the genesis of PGE-rich horizons in layered intrusions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2009;73(19):5764-5777. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2009.06.038>.

34. Laurenz V., Fonseca R., Ballhaus C., Sylvester P. J. Solubility of palladium in picritic melts: 1. The effect of iron. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2010;74(10):2989-2998. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.02.015>.

35. Laurenz V., Fonseca R. O. C., Ballhaus C., Jochum K. P., Heuser A., Sylvester P. J. The solubility of palladium and ruthenium in picritic melts: 2. The effect of sulfur. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2013;108:172-183. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.01.013>.

36. Avarmaa K., Taskinen P., Klemettinen L. Ni-Fe-Co alloy – magnesia-iron-silicate slag equilibria and the behavior of minor elements Cu and P in nickel slag cleaning. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021;15:719-730.

<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.07.112>.

37. Avarmaa K., O'Brien H., Johto H., Taskinen P. Equilibrium distribution of precious metals between slag and copper matte at 1250–1350°C. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2015;1:216-228. <https://doi.org/10.1007/s40831-015-0020-x>.

38. Nansai K., Nakajima K., Kagakawa S., Kondo Y., Shigetomi Y., Suh Sangwon. Global mining risk footprint of critical metals necessary for low-carbon technologies: the case of neodymium, cobalt, and platinum in Japan. *Environmental Science & Technology*. 2015;49(4):2022-2031. <https://doi.org/10.1021/es504255r>.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Богатырев Дмитрий Михайлович**,  
аспирант,  
Санкт-Петербургский горный университет,  
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2,  
Россия

**Петров Георгий Валентинович**,  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры металлургии,  
Санкт-Петербургский горный университет,  
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2,  
Россия

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Dmitrii M. Bogatyrev**,  
Postgraduate Student,  
St. Petersburg Mining University,  
2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia

**Georgii V. Petrov**,  
Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Professor of the Metallurgy Department,  
St. Petersburg Mining University,  
2, 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia

**Цымбулов Леонид Борисович,**  
доктор технических наук, профессор,  
директор департамента по исследованиям  
и разработкам  
ООО «Институт Гипроникель»,  
195220, г. Санкт-Петербург, Гражданский пр-т, 11,  
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 13.12.2021; одобрена после рецензирования 08.02.2022; принята к публикации 18.02.2022.

**Leonid B. Tsymbulov,**  
Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Director of the Research and Development Department,  
Gipronickel Institute LLC,  
11 Grazhdansky pr., St. Petersburg 195220, 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 13.12.2021; approved after reviewing 08.02.2022; accepted for publication 18.02.2022.



## Percolation leaching of clay mixed copper ores

Lyutsiya M. Karimova<sup>1✉</sup>, Yerlan T. Kairalapov<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>KazHydroMed LLP, Karaganda, Kazakhstan

<sup>1</sup>[lutsia.08@mail.ru](mailto:lutsia.08@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6205-6585>

<sup>2</sup>[kairalapov.e@mail.ru](mailto:kairalapov.e@mail.ru)

**Abstract.** The present work addresses the problem of improving the percolation properties of heap leaching piles of clay, slime-oxidised and mixed ores. These ores are prone to colmatation, which hinders percolation of the solution through the ore layer. Laboratory tests on percolation leaching were carried out using a 2 m column having an internal diameter of 190 mm, loaded with 89.42 kg of ore material having a grain size of -55+0 mm. In order to eliminate colmatation, the ore layer was divided into two equal parts by a drainage layer of polystyrene foam. The research object was ore material extracted from the northern Nurkazgan deposit (Karaganda region, Republic of Kazakhstan), in which copper is present in the form of sulphide (53.48%) and oxidised minerals (46.52%), including 23.5% of chrysocolla. The mineral composition of a test sample determined by optical and electron microscopy, X-ray diffraction, local X-ray spectral, X-ray fluorescence and inductively coupled plasma mass spectrometry was characterised by 93.78% of rock-forming minerals, 53.23% of which comprised layered silicates, namely, mica, chlorite and kaolinite. Ore mineralisation was characterised by both sulphide (copper sulphides, pyrite) and oxide (malachite, iron hydroxides and manganese oxides) phases. The content of easy-slimes minerals equalled 56.30%. Prior to leaching, moisture saturation during the period of one day was carried out. The ore was top irrigated with a solution of sulphuric acid having a concentration of 60 g/dm<sup>3</sup>. Pregnant solutions were processed following a sorption method (sorption/desorption–electrolysis). The copper extraction into the solution yielded 60.04% with a sulphuric acid consumption of 50.0 kg/t ore at an average irrigation rate of 10.58 dm<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>h) or 0.1058 dm/h per clear opening. Therefore, heap leaching of ores at a layer height of lower than 1 m can be performed following the "leaching–extraction/re-extraction or sorption/desorption–electrolysis" scheme.

**Keywords:** leaching, column, ore, copper minerals, solution, extraction

**For citation:** Karimova L. M., Kairalapov Y. T. Percolation leaching of clay mixed copper ores. *iPolytech Journal*. 2022;26(1):142-153. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-142-153>.

## МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 669.334.3

Научная статья

## Исследования по перколяционному выщелачиванию меди из глинистых смешанных медных руд

Люция Монировна Каримова<sup>1✉</sup>, Ерлан Токпаевич Кайралапов<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ТОО «КазГидроМедь», г. Караганда, Республика Казахстан

<sup>1</sup>[lutsia.08@mail.ru](mailto:lutsia.08@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6205-6585>

<sup>2</sup>[kairalapov.e@mail.ru](mailto:kairalapov.e@mail.ru)

**Резюме.** Цель – повышение фильтрационных свойств штабеля кучного выщелачивания глинистых, шламистых окисленных и смешанных руд, которые склонны к кольматации и резко снижают просачивание раствора через слой руды. Для проведения лабораторных испытаний по перколяционному выщелачиванию использовалась колонна высотой 2 м и внутренним диаметром 190 мм, в которую была загружена руда массой 89,42 кг крупностью 55-0 мм. С целью устранения кольматации руду загружали слоем высотой 1 м, далее укладывали дренажный слой из пенополистирола и снова насыпали слой руды высотой 1 м. Объектом исследований является руда северного участка Нурказган (Карагандинская обл., Республика Казахстан), в которой медь практически поровну представлена сульфидными (53,48%) и окисленными (46,52%) минералами, из них хризокolla составляет 23,5%. В минеральном составе пробы, определенном с учетом данных оптических и электронномикроскопи-

ческих исследований, рентгеноструктурного, локального рентгеноспектрального, рентгенофлуоресцентного и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой, преобладают порообразующие минералы, составляющие 93,78%, из которых 53,23% приходится на слоистые силикаты – слюды, хлорит, каолинит. Рудная минерализация представлена как сульфидными фазами (сульфиды меди, пирит), так и оксидными – малахит, гидроксиды железа, оксиды марганца. Содержание легкошламуемых минералов составило 56,30%. Перед началом выщелачивания производили влагонасыщение руды в течение суток. Сверху руду орошали раствором серной кислоты с концентрацией 60 г/дм<sup>3</sup>. Переработку продуктивных растворов осуществляли по сорбционной схеме (сорбция/десорбция – электролиз). В результате проведения исследований извлечение меди в раствор составило 60,04% с расходом серной кислоты 50,0 кг/т руды при средней скорости орошения 10,58 дм<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч) или 0,1058 дм/ч на свободное сечение трубы. Таким образом, использование послонного штабельного выщелачивания руды с высотой слоя не более 1 м может быть реализовано по схеме «выщелачивание – экстракция/реэкстракция или сорбция/десорбция – электролиз».

**Ключевые слова:** выщелачивание, колонна, руда, медные минералы, раствор, извлечение

**Для цитирования:** Каримова Л. М., Кайралапов Е. Т. Исследования по перколяционному выщелачиванию меди из глинистых смешанных медных руд // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 1. С. 142–153. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-142-153>.

## INTRODUCTION

Improving the percolation properties of a leached mineral is essential for the efficient operation of heap leaching plants at deposits characterised by a high content of clay ores. The colmatation of clay and slime ores occurring during their leaching either impedes or reduces the solution percolation through the ore layer. In order to improve the percolation properties of a heap leaching pile, the pelletising of clay ores is widely used [1–18] in industrial mining of weathered gold-containing ores and alluvial and hard rock gold mining heaps having a high clay content.

In [2], various ores were pelletised at an average cement consumption of 5–6 kg per ton of ore and 3.5–4 kg of chlorinated lime. The strength of the as-pelletised ore amounts to 73.5–78.4 kPa. A further increase in the binder content reduces the percolation properties, prolongs the leaching process, as well as raises the cost of ore dressing. Moreover, when pelletising clay ore and tailings, an increase in cement consumption may lead to an opposite effect, namely, a decrease in the strength of pellets [10].

Ore material is pelletised using sulphuric acid as a binder [18]. Ore pellets and samples of various grades are loaded into percolation columns for leaching experiments. Due to the critical static pressure in the upper part of the pile (over 73.5 kPa with the strength of pelletised ore of 68.3 kPa), the leaching rate becomes low, followed by the formation of fine grains in the initial ore. As a result, the hydraulic conductivity of the pile is reduced.

The heap leaching of metals directly in the

ore pile can be intensified by mechanical loosening (in particular, blasting), which increases the porosity and ore jointing, thus facilitating the extraction of the target component to the pregnant solution [19–22]. However, during mechanical loosening by blasting, on the first day, the need for solution irrigation (leaching) increases by 5–8 times. The resulting ore repacking slows down the leaching process.

In [23], a cuvette-heap leaching of metals was carried out by leaching a mineral mass with a reagent solution, followed by metal extraction by sorption leaching in two steps: firstly, the mineral mass is placed in cuvettes having moisture-proof walls, initial reagent solution is introduced, further slime-clay and sand fractions are separated by hydrocyclone. The sand fraction is piled and subjected to heap leaching. Following the leaching of sand and clay-sand fractions, the remaining liquid phase is strengthened and fed to heap leaching.

## MATERIALS AND METHODS

This research is aimed at improving the percolation properties of heap leaching piles of clay and slime oxidised and mixed ores, which are susceptible to colmatation. Colmatation is known to reduce the solution percolation through the ore layer. In order to solve this problem, leaching was carried out in layers having limited height. To this end, a porous material (polystyrene foam or inorganic-hydrophilic sorbent) was placed between the layers, or the ore was loaded into cuvettes by layers divided using a filtering material (polystyrene foam or inorganic-hydrophilic sorbent).

The residues of the leaching (cakes) can be utilised as a backfill material in underground mining [24].

Ore material extracted at the northern Nur-

kazgan deposit (Karaganda region, Republic of Kazakhstan) was used as a research object. The results of chemical and phase analysis are presented in tab. 1 and 2.

**Table 1.** Chemical composition of copper ore

**Таблица 1.** Химический состав руды

Component	Cu	Ag*	Au*	Fe	S	Zn	Pb	As
Weight percent, %, *g/t	0.417	1.79	0.33	10.37	0.94	0.052	0.001	0.0043
Component	P	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Mo
Weight percent, %, *g/t	0.114	53.36	19.64	0.52	2.25	4.11	0.16	0.004

**Table 2.** Copper phase analysis in ore

**Таблица 2.** Фазовый анализ меди в руде

Metal speciation	Cu content, % (abs.)	Cu distribution, % (rel.)
Cu in sulphide minerals	0.223	53.48
Cu in oxidised minerals, including chrysocolla	0.194	46.52
	0.098	23.50
Total	0.417	100.0

Note / Примечание: abs. – absolute; rel. – relative / abs. – абсолютный; rel. – относительный.

Tab. 2 shows that copper is almost uniformly distributed between sulphide (53.48%) and oxidised (46.52%) minerals, including 23.5% of chrysocolla.

Ore mineralisation is dominated by secondary supergene phases, including iron hydroxides, hematite, manganese oxides, jarosite, as well as the rarely occurring malachite. In rare cases, sulphide minerals, such as chalcocite, chalcopyrite, covellite and pyrite, are observed. The investigated ore belongs to the oxidised type, having predominantly ingrain and colloform textures.

The mineral composition of the test sample determined based on optical and electron microscopy, X-ray diffraction, atomic emission spectrometry, local X-ray spectral, X-ray fluorescence and chemical analyses, is characterised by 93.78% of rock-forming minerals, including 53.23% of layered silicates, namely, mica, chlorite, kaolinite. Ore mineralisation comprises sulphide phases (copper sulphides, pyrite) and oxide phases (malachite, iron hydroxides, manganese oxides). The content of easy-sliming minerals equals 56.30%, which can reduce the efficiency of dressing processes.

Microscopic studies revealed that ferruginised clay-mica-quartz metasomatites are characterised by a relic porphyric structure, visible in cross-polarised light, and a solid, partly porous grain resulting from the destruction and leaching of primary sulphide and carbonate minerals. Iron hydroxides in the form of fine dust primarily impregnate mica-clay minerals. They occur as small clusters and films in interstices and over the grain interface of quartz in the binder mass and develop as sinter deposits on the walls of cavities and micropores (fig. 1 and 2).

Iron hydroxides and oxides are the principal ore minerals in the sample. They are represented by finely dispersed formations, evenly distributed over the host rock, resulting in a yellowish-brownish colour; linear aggregations of finely dispersed particles, developing along the cleavage of layered silicates; a non-uniformly distributed hematite impregnation (10–150 microns), pseudomorphically substituting pyrite; sinter, often zonal deposits (films, crusts) on the walls of pores and solution cavities; continuous solid isolations, infilling fragmenting cracks in deformation zones, associated with chlorite, kaolinite, and sericite (fig. 3).



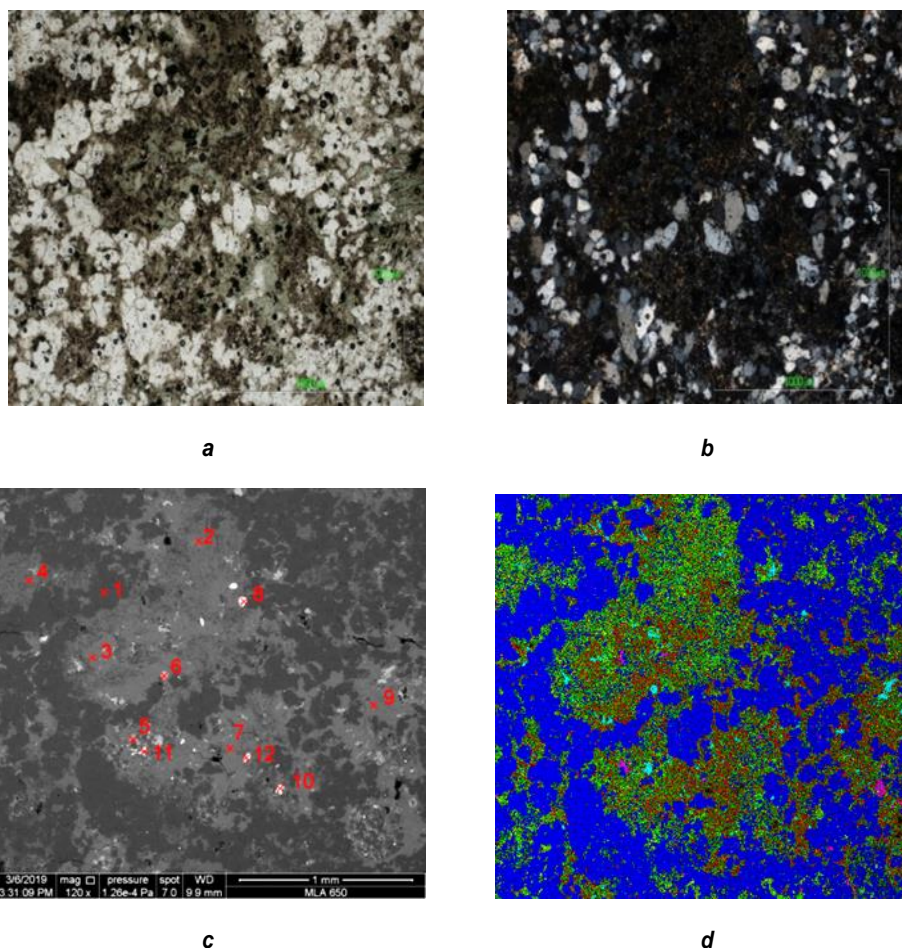


Fig. 1. Clay-mica-quartz metasomatite, characterised by a relic porphyritic structure: a – polarised-light transmission; b – cross-polarised light; c – in back-scattered electrons; d – combined in characteristic radiation of elements. Spectra in Fig. c:

1 – quartz; 2, 3, 7, 9 – chlorite; 4 – chlorite + sercite; 5 – apatite; 6 – rutile;  
8 – covellite + chalcopyrite; 10, 12 – pyrite; 11 – barite

Рис. 1. Глинисто-слюдисто-кварцевый метасоматит, характеризующийся реликтовой порфировидной структурой: а – при одном николе; б – в скрещенных николях; с – в обратно рассеянных электронах; d – комбинированное в характеристическом излучении элементов. Спектры на рис. с: 1 – кварц; 2, 3, 7, 9 – хлорит; 4 – хлорит + серицит; 5 – апатит; 6 – рутил; 8 – ковеллин + халькопирит; 10, 12 – пирит; 11 – барит

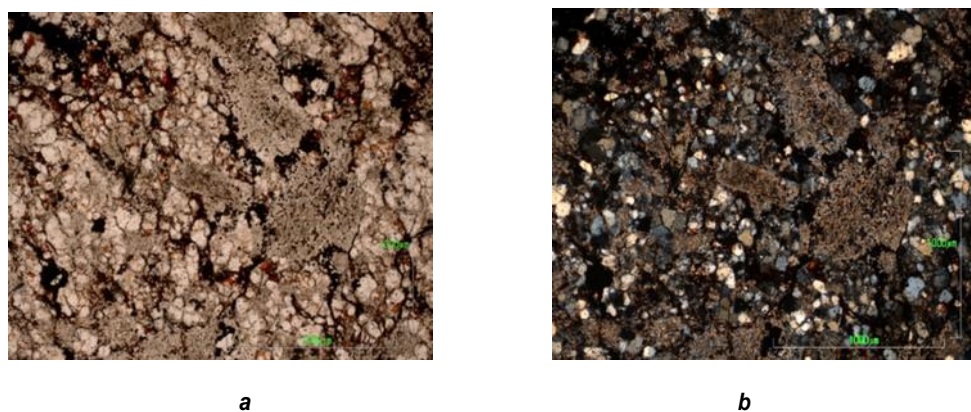
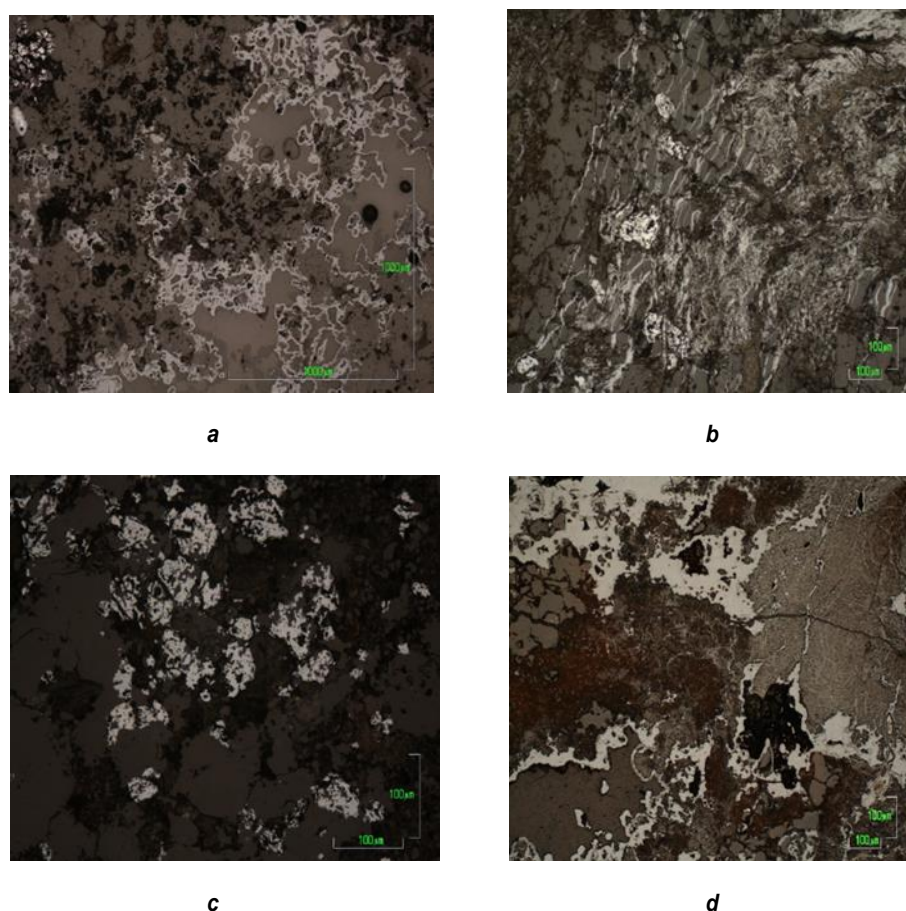


Fig. 2. Ferruginised clay-mica- quartz metasomatites

Рис. 2. Ожелезненные глинисто-слюдисто-кварцевые метасоматиты





**Fig. 3. Formation of iron oxides and hydroxides (reflection image): a – sinter deposits on the walls of solution cavities; b – impregnation of mica-clay minerals by finely dispersed formations; c – dissemination of hematite in pyrite; d – impregnation of rocks by finely dispersed formations and infilling of pores and voids by hematite**

**Рис. 3. Форма выделения оксидов и гидроксидов железа (изображение в отраженном свете): а – натечные образования по стенкам пустот выщелачивания; б – пропитка тонкодисперсными образованиями слюисто-глинистых минералов; с – вкрапленность гематита, образовавшегося по пириту; d – пропитка пород тонкодисперсными образованиями и выполнение пор и пустот гематитом**

Copper constitutes an industrially valuable component, whose minerals-concentrators are represented by inherent phases, including sulphides (chalcopyrite, chalcocite, covellite) and carbonates (malachite), as well as iron hydroxides and mica-clay minerals, where copper is present as an isomorphic impurity.

For percolation leaching, a 2 m column was used, loaded with 89.42 kg of the ore having a grain size of  $-55+0$  mm. The ore was irrigated from the top with a sulphuric acid solution at a rate of 300 ml/h. However, following one day, the process was halted due to the high content of clay and slime components. It is well known that such components can cause colmatation, thus reducing drastically the solution percolation through the ore layer up to its complete halt.

The layer height was reduced to avoid colmatation during the leaching of oxidised ore from the Northern section of the Nurkazgan deposit. Leaching was carried out in a 1 m high column having a diameter of 140 mm. About 21.5 kg of the ore having a grain size of  $-55+0$  mm were loaded into the column; leaching was carried out at the initial sulphuric acid concentration of  $60 \text{ g/dm}^3$ . The pregnant leaching solutions were processed according to the “sorption/desorption–electrolysis” scheme. The daily volume of pregnant solution from the column was forwarded to the sorption columns filled with Lewatit MonoPlus cation-exchange resin (LANXESS Deutschland GmbH (Germany)) [25–28]. Solutions obtained upon sorption extraction of copper, following strengthening to the

required concentration of sulphuric acid, were directed to feed the leaching process. The sorption scheme was selected based on a rather low copper content in pregnant leaching solutions (0.3–0.8 g/dm<sup>3</sup>).

The following parameters were controlled: copper mass, solution volume and process duration. According to the obtained data, the first four cycles ensure 84% of copper extraction with a maximum in the third cycle (fig. 4).

On completing the percolation leaching, the cake yield equalled 96.42%. The total leaching time amounted to 14 days. The chemical and phase compositions of the cake are presented in tab. 3 and 4.

Thus, upon percolation leaching in a 1 m high column, the copper recovery into solution amounted to 56.06%. Further studies were carried out in a 2 m column.

The research was carried out on a setup comprising 2 m high plastic percolation columns ("Evonik Operations GmbH", Germany), having

an inner diameter of 190 mm. The ore was ground to the grain size of -55+0 mm; 89.42 kg of the ore were loaded into the column. It had been established earlier that, for an ore layer height of 2 m, the leaching process halted, while for a 1 m layer, no colmatation was observed. In order to address this limitation, 1 m layer of ore was first loaded, followed by a Styrofoam drainage layer, and one more 1 m layer of ore was added. Prior to leaching, the ore was moistened for a day. The ore was irrigated with sulphuric acid solution from the top at a rate of 300 ml/h or per specific flow rate in the column:

$$\frac{0.3 \cdot 4}{F \cdot 0.19^2} = 10.58 \text{ dm}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{h}).$$

This corresponds to a flow rate of 0.1058 dm/h in the column per clear opening (or 1.058 cm/h). Such a feed rate is used in conventional copper production with low permeability ores and is selected given the strong colmatation of

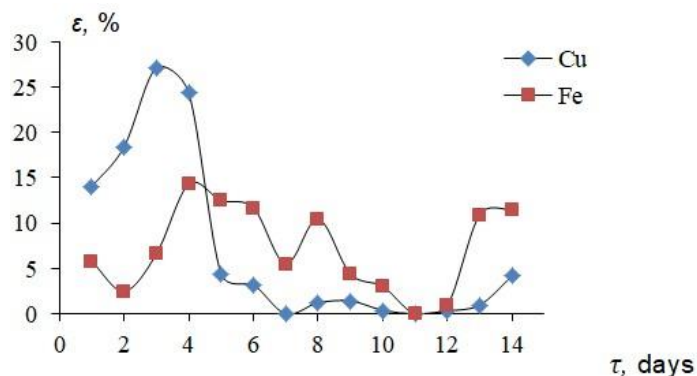


Fig. 4. Dependencies of copper and iron extraction into solution on duration of leaching

Рис. 4. Зависимости извлечения меди и железа в раствор от продолжительности выщелачивания

Table 3. Chemical composition of the ore residue (cake) following percolation leaching in a 1m high column

Таблица 3. Химический состав остатка руды (кека) после перколяционного выщелачивания в колонне высотой 1 м

Cu	Fe	Zn	Pb	Al	S	Mo, g/t
0.190	9.67	0.039	0.003	8.55	0.84	30.3
P	Au, g/t	Ag, g/t	As, g/t	Si	Mg	Ca
0.080	0.32	1.63	24.9	18.0	1.636	0.394

Table 4. Copper phase analysis in cake following percolation leaching of ore

Таблица 4. Фазовый анализ меди в кеке после перколяционного выщелачивания руды

Copper components	Abs. %	Rel. %
Oxides, including chrysocolla	0.091	47.89
	0.062	—
Sulphides	0.099	52.11
Total	0.190	100.0

Note / Примечание: abs. – absolute; rel. – relative / abs. – абсолютный; rel. – относительный.

the column material. The initial solution was fed from a reservoir by a Qudos 60 Watson Marlow peristaltic pump to a distribution device installed at the top of the column, which distributed the solution evenly over the column section. The solution passing through the ore mass was collected in a storage tank. Upon reaching a specific copper concentration in the solution, the latter was fed for copper sorption. Solutions, fully or partially strengthened with acid and refilled with water to the required volume, were recycled for irrigation. Acidity was adjusted using a pH meter and chemical analysis for the residual acidity of the solution. Leaching was carried out up to the trace level of oxidised copper in ore.

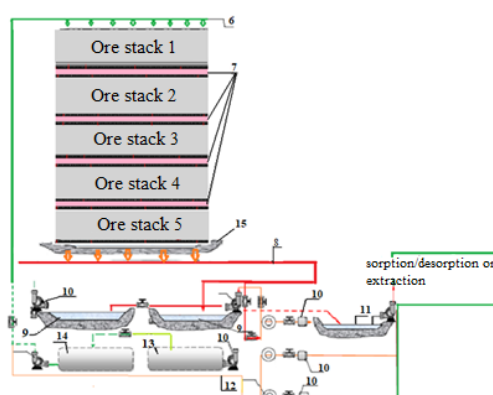
The grain size distribution of the initial ore intended for percolation leaching was studied. The grain size distribution and chemical composition of the initial ore are shown in tab. 5.

Fig. 5 shows the scheme used for ore heap leaching. This method can be carried out as a cuvette ore loading with a layer height of less than 1 m. Drainage material is deposited on top of this layer, followed by the next ore layer of up to 1 m high. Thereby, the weight pressure of the ore layer is applied to the drainage material instead of the underlying layer. Therefore, the permissible accumulation of finer ore fractions occurs in individual layers, rather than in the bottom layer [29].

**Table 5.** Granulometric and chemical composition of the initial ore for percolation leaching

**Таблица 5.** Гранулометрический и химический состав исходной руды для перколяционного выщелачивания

Class, mm	Yield, %	Components, %						Distribution, %		
		Cu	Fe	Al	Ag, g/t	Si	Ca	Cu	Fe	Ag, g/t
-55 + 45	6.68	0.459	10.46	10.13	1.86	25.04	0.378	7.36	6.73	7.01
-45 + 40	4.28	0.649	8.5	11.02	1.28	25.84	0.370	6.66	3.51	3.10
-40 + 31.5	8.88	0.738	10.91	10.05	3.91	24.54	0.258	15.73	9.32	18.42
-31.5 + 25	8.69	0.196	10.72	11.14	0.58	23.04	0.347	4.09	8.97	2.90
-25 + 20	6.45	0.502	10.18	10.14	1.36	25.54	0.319	7.76	6.33	4.96
-20 + 14	9.61	0.363	9.65	9.66	1.72	26.24	0.329	8.38	8.95	9.33
-14 + 10	8.16	0.325	9.72	10.11	1.42	26.04	0.369	6.36	7.65	6.56
-10 + 7	5.58	0.307	9.66	10.52	1.45	24.84	0.591	4.11	5.21	4.58
-7 + 5	7.42	0.334	9.95	10.18	1.54	24.94	0.385	5.95	7.13	6.46
-5 + 3.4	7.46	0.322	10.09	10.49	1.39	26.04	0.383	5.76	7.26	5.87
-3.4 + 2	5.58	0.359	10.22	10.68	1.54	24.64	0.371	4.80	5.50	4.86
-2 + 0	21.21	0.453	11.48	10.66	2.17	24.24	0.468	23.04	23.44	25.95
Ore/sum	100.0	0.417	10.37	10.40	1.79	24.95	0.390	100.0	100.0	100.0



**Fig. 5.** Chain of apparatuses of ore heap leaching: 1–5 – leach (ore pile), particle size – 55+0 mm; 6 – heap irrigation system; 7 – drainage layer of polystyrene foam or inorganic-hydrophilic sorbent; 8 – process solution collection header; 9 – solution ponds; 10 – pumps; 11 – settling tank; 12 – pipelines; 13 – sulphuric acid solution; 14 – freshwater tank; 15 – ore container

**Рис. 5.** Схема цепи аппаратов послойного штабельного кучного выщелачивания руды: 1–5 – выщелачиваемый материал (рудный штабель), крупностью -55+0 мм; 6 – система орошения кучи; 7 – дренажный слой из пенополистирола или минеральногидрофильного сорбента; 8 – коллектор сбора технологического раствора; 9 – прудки для сбора растворов; 10 – насосы; 11 – отстойник; 12 – трубопроводы; 13 – раствор серной кислоты; 14 – бак свежей воды; 15 – рудная кювета

The sorption process of ore leaching solutions was carried out in the following stages: sorption/desorption and sorbent scrubbing. The solution following the sorption process was recycled for leaching. The sorbent was subjected to a desorption process (with cycling), yielding an electrolyte containing  $\geq 40 \text{ g/dm}^3$  of copper. The wash water following scrubbing of the sorbent was fed (strengthened) to the leaching process. Chemical and phase analysis of residue (cake), following percolation leaching of ore, as well as particle size distribution, are presented in tab. 6–8.

An analysis of cake grain size distribution following percolation leaching showed a minor redistribution of grain size grades. The copper

content in grades decreases from 0.649–0.196% to 0.295–0.114%, indicating successful leaching. This is also confirmed by the residual distribution of components by grades in cake (see tab. 9). Here, the copper content decreases from 0.417% in the ore to 0.164% in a cake; its yield of 90.65% corresponds to the 60.04% extraction of copper into the solution.

Given that the ore contains a higher concentration of fine grades (see tab. 5), it can be assumed that sulphide minerals in them are released more fully, which indicates their higher activity in the leaching process.

Copper and iron extraction into solution (relative) depending on leaching duration is shown in fig. 6.

**Table 6.** Chemical composition of the residue after percolation leaching of ore

**Таблица 6.** Химический состав остатка (кека) после перколяционного выщелачивания руды

Cu	Fe	Zn	Pb	Al	S	Mo, g/t
0.164	9.52	0.0385	0.0006	9.46	0.848	48.02
P	Au, g/t	Ag, g/t	As, g/t	Si	Mg	Ca
0.0901	0.17	1.753	24.4	18.0	1.353	0.269

**Table 7.** Copper phase analysis in residue (cake) following percolation leaching of ore

**Таблица 7.** Фазовый анализ меди в остатке (кеке) после перколяционного выщелачивания руды

Copper components	Abs. %	Rel. %
Oxides	0.079	48.17
Sulphides	0.085	51.83
Total:	0.164	100.0

*Note/Примечание:* abs. – absolute; – relative / abs. – абсолютный; rel. – относительный.

**Table 8.** Granulometric and chemical composition of the residue by size classes after percolation leaching of ore (italics – weighted average content in the residue after leaching, cake)

**Таблица 8.** Гранулометрический и химический составы кека по классам крупности после перколяционного выщелачивания (курсив – средневзвешенное содержание в остатке после выщелачивания (кеке))

Class, mm	Exit, %	Components, %						Distribution, %		
		Cu	Fe	Al	Ag, g/t	Si	Ca	Cu	Fe	Ag, g/t
-55+45	5.79	0.295	10.78	9.80	1.971	18.7	0.358	10.36	6.41	6.51
-45+40	4.35	0.257	10.62	10.22	1.351	17.1	0.259	6.79	4.82	3.35
-40+31.5	8.98	0.212	10.84	10.05	1.441	18.4	0.233	11.56	9.48	7.38
-31.5+25	8.81	0.221	8.97	8.45	1.574	17.6	0.235	11.82	9.05	7.91
-25+20	6.53	0.179	8.54	11.20	1.662	19.0	0.214	7.10	5.69	6.19
-20+14	9.41	0.141	8.37	10.21	7.729	18.9	0.235	8.05	9.19	9.28
-14+10	9.13	0.131	8.42	10.09	1.571	18.7	0.289	7.26	8.85	8.18
-10+7	5.88	0.120	8.52	12.20	1.342	20.1	0.243	4.28	5.86	4.50
-7+5	7.33	0.118	8.77	8.73	1.435	19.1	0.211	5.25	6.39	6.00
-5+3.4	8.79	0.117	9.54	9.97	1.663	18.8	0.200	6.24	8.04	8.34
-3.4+2	4.98	0.114	9.86	8.641	1.944	18.2	0.231	3.44	4.33	5.52
-2+0	20.02	0.147	10.98	9.45	2.351	18.8	0.324	17.85	21.89	26.84
<i>Cake/Sum</i>	<i>100.00</i>	<i>0.164</i>	<i>9.52</i>	<i>9.46</i>	<i>1.753</i>	<i>18.0</i>	<i>0.269</i>	<i>100</i>	<i>100</i>	<i>100</i>

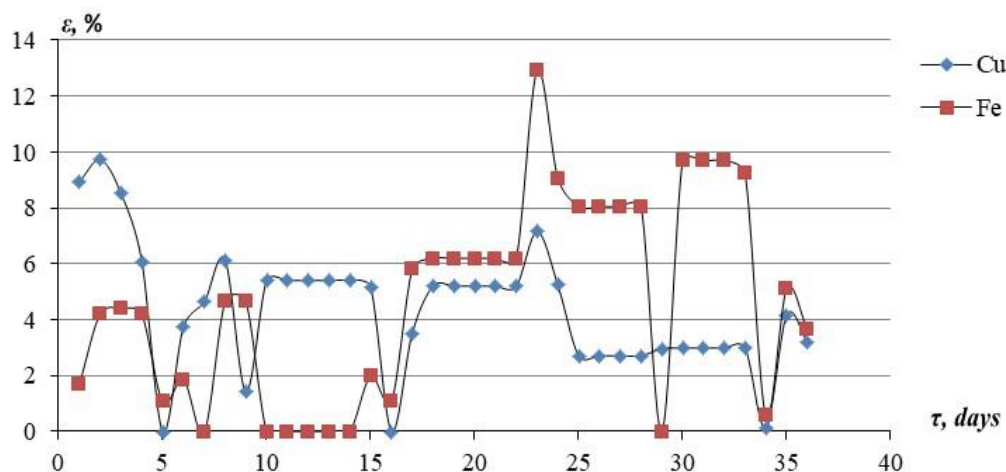


Fig. 6. Dependencies of copper and iron extraction into solution on duration of leaching

Рис. 6. Зависимости извлечения меди и железа в раствор от продолжительности выщелачивания

Acid consumption increases sharply at a copper recovery of approximately 40%. At the initial stage, along with the dissolution of copper, the readily soluble waste rock compounds (oxides, iron hydroxides, calcium and magnesium carbonates, etc.) are intensively leached. By reducing their content in the ore, the efficiency of the process improves. In the latter case, however, the dissolution rate of copper and its concentration in the solution decreases.

## CONCLUSION

In the conducted study, copper extraction into the solution amounted to 60.04% with a sulphuric

acid consumption of 50.0 kg/t ore or 21 kg per kilogram of extracted copper at an average irrigation rate of  $10.58 \text{ dm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h}) = 0.1058 \text{ dm}^3/\text{h}$ .

The obtained results show that:

- between 1 and 10 days of leaching, most of the copper (30%) is extracted into the solution;
- low copper concentration solutions obtained in the final stages of leaching should be recycled.

Heap leaching of ore piles having a height of lower than 1 m can be performed via the following stages: "leaching–extraction/re-extraction or sorption/desorption–electrolysis".

## References

1. Fazlullin M. I. *Underground and heap leaching of uranium, gold and other metals*. In 2 vol., vol. 2: Zoloto. Moscow: Ruda i metallurgy; 2005, 328 p. (In Russ.).
2. Druzhinina G. Ya., Stroganov G. A., Zyryanov M. N. Heap leaching of gold from pre-pelletized ores. *Tsvetnye metall*. 1997;9:17-19. (In Russ.).
3. Rashkin A. V., Avdeev I. A., Yashkin I. A. Classification of ore heap leaching control methods. *Vestnik Mezhdunarodnoy akademii nauk ekologii i bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti (MANEB) = Vestnik IAELPS*. 2006;11(5):166-169. (In Russ.).
4. Rashkin A. V., Avdeev P. B., Yashkin I. A. Rational formation of ore piles during heap leaching of ores. *Gornyy informacionno-analiticheskij byulleten' = Mining informational and analytical bulletin*. 2005;11:252-254. (In Russ.).
5. Voloschuk S. N. *Heap and underground leaching of metals*. Moscow: Nedra; 1982, 113 p. (In Russ.).
6. Vodolazov L. I., Drobachenko V. P., Lobanov D. P., Maluhin N. G. *Geotechnology. Heap leaching of lean mineral raw materials*. Moscow: Moscow State Geological Exploration Institute; 2000, 300 p. (In Russ.).
7. Rashkin A. V., Avdeev P. B., Reznik Yu. N., Shumilova L. V., Yashkin I. A. *Method for heap leaching of ores*. Patent RF, no. 2283879; 2006. (In Russ.).
8. Shumilova L. V., Reznik Yu. N., Rubcov Yu. I. *Method of industrial waste ore preparation for heap leaching of gold*. Patent RF, no. 2283883; 2006. (In Russ.).
9. Sekisov A. G., Reznik Yu. N., Shumilova L. V., Zykov N. V., Lavrov A. Yu., Korolev V. S., Konareva T. G. *Preparation method of refractory sulfide ores and concentrates for leaching*. Patent RF, no. 2361937, 2009. (In Russ.).
10. Fazlullin M. I. *Heap leaching of precious metals: monograph*. Moscow: Academy of Mining Sciences; 2001, 647 p. (In Russ.).
11. Lewandowski K. A., Kawatra S. K. Binders for heap leaching agglomeration. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2009;26(1-24):489-492. <https://doi.org/10.1007/BF03403413>.
12. Nab B. M. Exploring HPGR technology for heap leaching of fresh rock gold ores. In: *IIR Crushing &*



Grinding Conference. 29–30 March 2006, Townsville. Townsville; 2006. Available from: <https://orway.com.au/wp-content/uploads/2015/10/Technical-ExploringHPGRTechnology.pdf> [Accessed 30th August 2021].

13. Thiel R., Smith M. E. State of the practice review of heap leach pad design issues. *Geotextiles and Geomembranes*. 2003;22(6):555-568. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2004.05.002>.

14. Bouffard S. C. Agglomeration for heap leaching: equipment design, agglomerate quality control, and impact on the heap leaching process. *Minerals Engineering*. 2008;21(15):1115-1125. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2008.02.010>.

15. Rogozhnikov D. A., Rusalev R. E., Dizer O. A., Naboychenko S. S. Nitric acid loosening of rebellious sulphide concentrates containing precious metals. *Tsvetnye Metally*. 2018;12:38-44. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2018.12.05>.

16. Velarde G. Agglomeration control for heap leaching processes. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2005;26(3-4):219-231. <https://doi.org/10.1080/08827500590943974>.

17. Lowandowski K. A., Kawatra S. K. Development of experimental procedures to analyze copper agglomeration stability. *Minerals and Metallurgical Processing*. 2005;25(2):110-116. <https://doi.org/10.1007/BF03403395>.

18. Koltsov V. Yu., Krinov D. I., Kuznetsov I. V. Use of sulfuric acid in the time of pelletization of uranium ores before their heap leaching. *Gornyj zhurnal*. 2014;7:90-93. (In Russ.).

19. Tyupin V. N., Zajcev R. V., Baryshnikov V. I., Truhin V. A. Use of explosion energy as an effective and environmentally safe intensification method of heap leaching of uranium and gold-bearing ores. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 1999;6:12-14. (In Russ.).

20. Sekisov A. G., Shevchenko Yu. S., Lavrov A. Yu. Explosive injection preparation of ores for leaching. In: *Fundamental'nye problemy formirovaniya tekhnogennoj gosredy: trudy Vserossijskoj konferencii s uchastiem inostrannykh uchennykh = Fundamental problems of technogenic geoenvironment formation: proceedings of All-Russian conference with international participation*. 9–12 October 2012, Novosibirsk. In 2 vol. Novosibirsk: Chinakal Institute of Mining of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2012, vol. 1, p. 283-287. (In Russ.).

21. Sekisov A. G., Shevchenko Yu. S., Lavrov A. Yu. Prospects for underground leaching in gold mines. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh = Journal of Mining Sciences*. 2016;1:116-123. (In Russ.).

22. Ghorbani Y., Mainza A. N., Petersen J., Becker M., Franzidis J.-P., Kalala J. T. Investigation of particles with high crack density produced by HPGR and its effect on the redistribution of the particle size fraction in heaps. In: *8th International Comminution Symposium: Proceedings of Comminution 2012*. 17–20 April 2012, Cape Town. Cape Town; 2012. Available from: <http://toc.proceedings.com/15671webtoc.pdf> [Accessed 30th August 2021].

23. Sekisov A. G., Reznik Yu. N., Zykov N. V., Shumilova L. V., Lavrov A. Yu., Manzyrev D. V., et al. *Method for cuvette-heap leaching of metals from minerals*. Patent RF, no. 2350665; 2009. (In Russ.).

24. Chen Qiusong, Zhang Qinli, Xiao Chongchun, Chen Xin. Backfilling behaviour of a mixed aggregate based on construction waste and ultrafine tailings. *PLoS one*. 2017;12(6):e0179872. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179872>.

25. Rogozhnikov D. A., Tropnikov D. L., Mamyachenkov S. V., Dizer O. A. Perfection of sulphatization roasting process of refractory copper-zinc sulphide raw material. *Metallurg*. 2017;8:92-97. (In Russ.).

26. Zakharyan S. V., Rogozhnikov D. A., Karimova L. M., Naboychenko S. S., Dizer O. A. Study of hydrometallurgical processing of roasted copper concentrate leach solutions. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(5):207-213. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-5-207-213>.

27. Zaharyan S., Gedgagov E., Yun A. Increase in an ecological safety at the entities of non-ferrous metallurgy due to use of sorption processes. *Ekologia i promyshlennost' Rossii = Ecology and Industry of Russia*. 2018;22(1):26-32. (In Russ.). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2018-1-26-32>.

28. Yun A. B., Zahar'yan S. V., Karimova L. M., Terent'eva I. V., Serikbaj A. U. Studies of nitric acid leaching of rough copper concentrate from Zhezkazgan deposit from the ores of current production of Kazakhmys Corporation LLP. In: *Abishevskie chteniya–2016; Innovacii v kompleksnoj pererabotke mineral'nogo syr'ya: materialy nauchno-prakticheskoy konferencii = Abishevskie Readings – 2016; Innovations in complex processing of mineral raw materials: Proceedings of the scientific and practical conference*. 21–22 January 2016, Almaty. Almaty: National center on complex processing of mineral raw materials of the Republic of Kazakhstan; 2016, p. 581-583.

29. Oleinikova T. O., Zelensky V. P., Terentyeva I. V., Karimova L. M., Malyshev V. P., Kajralapov E. T. *Method of percolation leaching of copper from clayey oxidized and mixed copper ores*. Patent RK, no. 6649; 2021. (In Russ.).

#### Список источников

1. Фазлуллин М. И. Подземное и кучное выщелачивание урана, золота и других металлов. В 2 т., т. 2: Золото. М.: ИД «Руда и металлы», 2005. 328 с.  
2. Дружинина Г. Я., Строганов Г. А., Зырянов М. Н. Кучное выщелачивание золота из предварительно

окомкованных руд // Цветные металлы. 1997. № 9. С. 17–19.  
3. Рашкин А. В., Авдеев П. Б., Яшкин И. А. Классификация способов управления процессами кучного выщелачивания руд // Вестник Международной академии

наук экологии и безопасности жизнедеятельности (МАНЭБ). 2006. Т. 11. № 5. С. 166–169.

4. Рашкин А. В., Авдеев П. Б., Яшкин И. А. Рациональное формирование рудного штабеля при кучном выщелачивании руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. № 11. С. 252–254.

5. Волощук С. Н. Кучное и подземное выщелачивание металлов. М.: Из-во «Недра», 1982. 113 с.

6. Водолазов Л. И., Дробаденко В. П., Лобанов Д. П., Малухин Н. Г. Геотехнология. Кучное выщелачивание бедного минерального сырья. М.: Из-во МГГРУ им. С. Орджоникидзе, 2000. 300 с.

7. Пат. № 2283879, Российская Федерация, С22В3/04 С22В11/00. Способ кучного выщелачивания руд / А. В. Рашкин, П. Б. Авдеев, Ю. Н. Резник, Л. В. Шумилова, И. А. Яшкин; заявитель и патентообладатель Читинский государственный университет. Заявл. 20.04.2006; опубл. 20.09.2006. Бюл. № 26.

8. Пат. № 2283883, Российская Федерация, С22В 11/00. Способ рудоподготовки техногенных отходов к кучному выщелачиванию золота / Л. В. Шумилова, Ю. Н. Резник, Ю. И. Рубцов; заявитель и патентообладатель Читинский государственный университет. Заявл. 03.03.2005; опубл. 20.09.2006. Бюл. № 26.

9. Пат. 2361937, Российская Федерация, С22В 11/00, С22В 3/04. Способ подготовки упорных сульфидных руд и концентратов к выщелачиванию / А. Г. Секисов, Ю. Н. Резник, Л. В. Шумилова, Н. В. Зыков, А. Ю. Лавров, В. С. Королев, Т. Г. Конарева; заявитель и патентообладатель Читинский государственный университет. Заявл. 06.12.2007; опубл. 20.07.2009. Бюл. № 28.

10. Фазлуллин М. И. Кучное выщелачивание благородных металлов: монография. М.: Из-во АГН, 2001. 647 с.

11. Lewandowski K. A., Kawatra S. K. Binders for heap leaching agglomeration // Mining, Metallurgy & Exploration. 2009. Vol. 26. No. 1-24. P. 489–492. <https://doi.org/10.1007/BF03403413>.

12. Nab B. M. Exploring HPGR technology for heap leaching of fresh rock gold ores // IIR Crushing & Grinding Conference (Townsville, 29–30 March 2006). Townsville, 2006. [Электронный ресурс]. URL: <https://orway.com.au/wp-content/uploads/2015/10/Technical-ExploringHPGRTechnology.pdf> (30.08.2021).

13. Thiel R., Smith M. E. State of the practice review of heap leach pad design issues // Geotextiles and Geomembranes. 2003. Vol. 22. Iss. 6. P. 555–568. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2004.05.002>.

14. Bouffard S. C. Agglomeration for heap leaching: equipment design, agglomerate quality control, and impact on the heap leaching process // Minerals Engineering. 2008. Vol. 21. Iss. 15. P. 1115–1125. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2008.02.010>.

15. Рогожников Д. А., Русалев Р. Э., Дизер О. А., Набойченко С. С. Азотнокислотное вскрытие упорных сульфидных концентратов, содержащих благородные металлы // Цветные металлы. 2018. No 12. С. 38–44. <https://doi.org/10.17580/tsm.2018.12.05>.

16. Velarde G. Agglomeration control for heap leaching

processes // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2005. Vol. 26. Iss. 3-4 P. 219–231. <https://doi.org/10.1080/08827500590943974>.

17. Lowandowski K. A., Kawatra S. K. Development of experimental procedures to analyze copper agglomeration stability // Minerals and Metallurgical Processing. 2005. Vol. 25. No. 2. P. 110–116. <https://doi.org/10.1007/BF03403395>.

18. Кольцов В. Ю., Кринов Д. И., Кузнецов И. В. Использование серной кислоты при окомковании урановых руд перед их кучным выщелачиванием // Горный журнал. 2014. № 7. С. 90–93.

19. Тюпин В. Н., Зайцев Р. В., Барышников В. И., Трухин В. А. Использование энергии взрыва в качестве эффективного и экологически безопасного способа интенсификации кучного выщелачивания урановых и золотосодержащих руд // Безопасность труда в промышленности. 1999. № 6. С. 12–14.

20. Секисов А. Г., Шевченко Ю. С., Лавров А. Ю. Взрывоинъекционная подготовка руд к выщелачиванию // Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды: тр. Всерос. конф. с участием иностранных ученых (г. Новосибирск, 9–12 октября 2012 г.). В 2 т. Новосибирск: Изд-во ИГД им. Н.А. Чинакала СО РАН, 2012. Т. 1. С. 283–287.

21. Секисов А. Г., Шевченко Ю. С., Лавров А. Ю. Перспективы использования шахтного выщелачивания при разработке золоторудных месторождений // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2016. № 1. С. 116–123.

22. Ghorbani Y., Mainza A. N., Petersen J., Becker M., Franzidis J.-P., Kalala J. T. Investigation of particles with high crack density produced by HPGR and its effect on the redistribution of the particle size fraction in heaps // 8th International Comminution Symposium: Proceedings of Comminution 2012. (Cape Town, 17–20 April 2012). Cape Town, 2012. [Электронный ресурс]. URL: <http://toc.proceedings.com/15671webtoc.pdf> (30.08.2021).

23. Пат. 2350665, Российская Федерация, С22В 3/18, С22В 11/08. Способ кюветно-кучного выщелачивания металлов из минеральной массы / А. Г. Секисов, Ю. Н. Резник, Н. В. Зыков, Л. В. Шумилова, А. Ю. Лавров, Д. В. Манзырев [и др.]; заявитель и патентообладатель Забайкальский государственный колледж. Заявл. 05.16.2007; опубл. 27.03.2009. Бюл. № 9.

24. Chen Qiusong, Zhang Qinli, Xiao Chongchun, Chen Xin. Backfilling behaviour of a mixed aggregate based on construction waste and ultrafine tailings // PloS one. 2017. Vol. 12. No. 6. P. e0179872. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179872>.

25. Рогожников Д. А., Тропников Д. Л., Мамяченков С. В., Дизер О. А. Совершенствование процесса сульфатизирующего обжига трудновскрываемого медно-цинкового сульфидного сырья // Металлург. 2017. № 8. С. 92–97.

26. Захарьян С. В., Рогожников Д. А., Каримова Л. М., Набойченко С. С., Дизер О. А. Исследование гидрометаллургической переработки растворов выщелачивания обожженного медного концентрата // Вестник Иркутского государственного технического

университета. 2018. Т. 22. № 5. С. 207–213. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-5-207-213>.

27. Захарьян С. В., Гедгагов Э. И., Юн А. Б. Повышение экологической безопасности на предприятиях цветной металлургии // Экология и промышленность России. 2018. Т. 22. № 1. С. 26–32. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2018-1-26-32>.

28. Юн А. Б., Захарьян С. В., Каримова Л. М., Терентьева И. В., Серикбай А. У. Исследования по азотнокислородному выщелачиванию черноватого медного концентрата ЖОФ из руд текущей добычи ТОО «Корпорация Казахмыс» // Абишевские чтения–2016; Ин-

новации в комплексной переработке минерального сырья: материалы науч.-практ. конф. (г. Алматы, 21–22 января 2016 г.). Алматы: Национальный центр по комплексной переработке минерального сырья Республики Казахстан, 2016. С. 581–583.

29. Пат. 6649, Республика Казахстан. Способ перколяционного выщелачивания меди из глинистых окисленных и смешанных медных руд / Т. О. Олейникова, В. П. Зеленский, И. В. Терентьева, Л. М. Каримова, В. П. Малышев, Е. Т. Кайралапов; заявитель и патентообладатель РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности». Оpubл. 08.07.2021.

#### INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Lyutsiya M. Karimova,**

Lyutsiya M. Karimova,  
Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Head of the Metallurgy Laboratory,  
KazHydroMed LLP,  
4, Moskovskaya St., Karaganda 100000, Kazakhstan

**Yerlan T. Kairalapov,**

Cand. Sci. (Eng.),  
Senior Researcher of the Research Laboratory,  
KazHydroMed LLP,  
48, Bukhar-Zhyrau St., Karaganda 100000, Kazakhstan

#### 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 18.01.2022; approved after reviewing 07.02.2022; accepted for publication 28.02.2022.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Каримова Люция Монировна,**

доктор технических наук, доцент,  
ведущий научный сотрудник  
Научно-исследовательской лаборатории,  
ТОО «КазГидроМедь»,  
100000, г. Караганда, ул. Бухар-Жырау, 48, Казахстан

**Кайралапов Ерлан Токпаевич,**

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник  
Научно-исследовательской лаборатории,  
ТОО «КазГидроМедь»,  
100000, г. Караганда, ул. Бухар-Жырау, 48, Казахстан

#### 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 18.01.2022; одобрена после рецензирования 07.02.2022; принята к публикации 28.02.2022.

### ***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: [pgp@istu.edu](mailto:pgp@istu.edu) **в виде файла с расширением \*.DOC** – документа, построенного средствами Microsoft Word 97 или последующих версий.

При наборе статьи в Microsoft Word рекомендуются следующие установки:

- 1) параметры страницы и абзаца: отступы сверху и снизу – 2 см; слева и справа – 2 см; табуляция – 2 см; ориентация – книжная;
- 2) шрифт – **Times New Roman**, размер – **12**, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;
- 3) при вставке формул использовать **Microsoft Equation 3** при установках: элементы формулы выполняются **курсивом**; для греческих букв и символов назначать шрифт **Symbol**, для остальных элементов – **Times New Roman**. Размер символов: обычный – 12 пт, крупный индекс – 7 пт, мелкий индекс – 5 пт, крупный символ – 18 пт, мелкий символ – 12 пт. Все экспликации элементов формул необходимо также выполнять в виде формул;
- 4) рисунки, вставленные в текст, должны быть выполнены с разрешением 300 dpi, B&W – для черно-белых иллюстраций, Grayscale – для полутонов, максимальный размер рисунка с надписью: ширина 150 мм, высота 245 мм и представлены в виде файла с расширением \*.BMP, \*.TIFF, \*.JPG, должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. **Схемы, графики** выполняются во встроенной программе **MS Word** или в **MS Excel**, с приложением файлов (**представляемые иллюстрации должны быть четкими и ясными во всех элементах**);
- 5) библиографические ссылки должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ Р 7.05 2008.

**Внимание! Публикация статьи является бесплатной.**

«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: [pgp@istu.edu](mailto:pgp@istu.edu)

ISSN 2782-4004 (print)

# iPolytech Journal

Том 25, № 6. 2021 / Vol. 25, № 6. 2021

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 30.03.2022 г.  
Формат 60x90/8.  
Бумага офсетная. Печать трафаретная.  
Усл. печ. л. 20.  
Тираж 500 экз. Заказ 43. 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