

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

# iPolytech Journal

Том 27, № 1. 2023 / Vol. 27, № 1. 2023

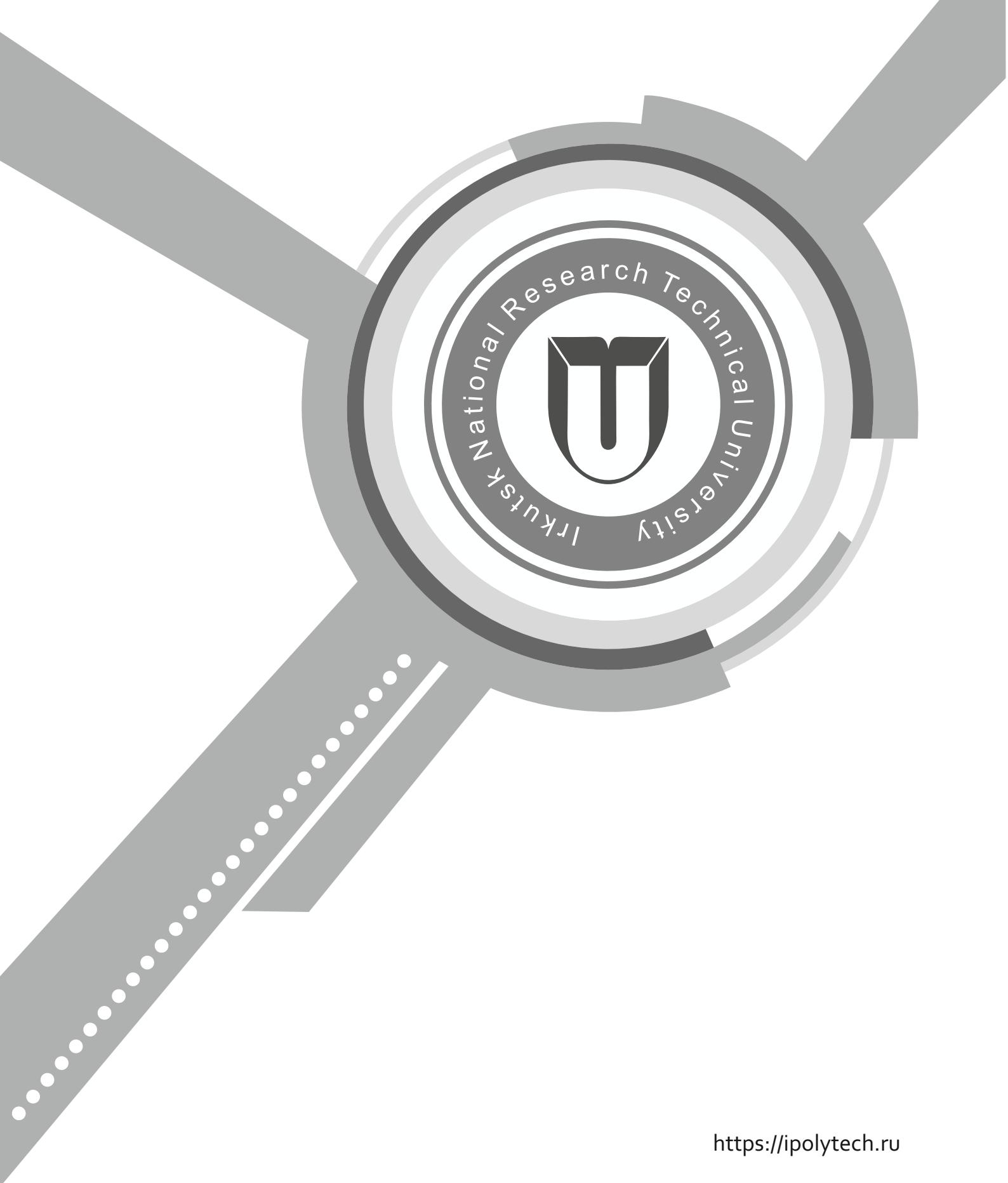


Irkutsk National Research Technical University

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

# iPolytech Journal

Tom 27, № 1. 2023 / Vol. 27, № 1. 2023





## НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Издательство

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

---

Периодичность издания – 4 раза в год

Учредитель:

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

Подписной индекс в ООО «Урал-Пресс» - 41476

Адрес ООО «Урал-Пресс»:

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

---

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

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

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

# iPolytech Journal

**Tom 27, № 1. 2023 / Vol. 27, № 1. 2023**

## SCIENTIFIC JOURNAL

### Publishers

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

---

Frequency of publication – 4 times a year

### Founder:

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

The subscription code in Ural-Press LLC: 41476

The postal address of Ural-Press LLC:  
130 Mamin-Sibiryak st.,  
Yekaterinburg, 620026, Russia

---

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

Address of the editorial office:  
83 Lermontov St., Irkutsk, 664074,  
e-mail: [pgp@istu.edu](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, профессор кафедры материаловедения, сварочных и аддитивных технологий Иркутского национального исследовательского технического университета, заместитель главного редактора по направлению «Машиностроение» (г. Иркутск, Россия)
- НЕМЧИНОВА Н.В.**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой металлургии цветных металлов Иркутского национального исследовательского технического университета, заместитель главного редактора по направлению «Металлургия» (г. Иркутск, Россия)
- ФЕДОСОВ Д.С.**, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой электрических станций, сетей и систем Иркутского национального исследовательского технического университета, заместитель главного редактора по направлению «Энергетика» (г. Иркутск, Россия)
- БАЖИН В.Ю.**, д.т.н., заведующий кафедрой металлургии 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., ректор Новгородского государственного университета имени Ярослава Мудрого (г. Великий Новгород, Россия)
- ГАВЛИК ЮЗЕФ**, профессор кафедры технологии производства и автоматизации Krakowского технологического университета (г. Krakow, Польша)
- ИЛЮШИН П.В.**, д.т.н., главный научный сотрудник ФГБУН «Институт энергетических исследований Российской академии наук», Руководитель Центра интеллектуальных электроэнергетических систем и распределенной энергетики
- КАРПЕНКО Е.И.**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой лаборатории плазменно-энергетических процессов и технологий Института физического материаловедения СО РАН (г. Улан-Удэ, Россия)
- КЛЕР А.М.**, д.т.н., главный научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)
- КОЛОСОК И.Н.**, д.т.н., ведущий научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)
- КРЮКОВ А.В.**, д.т.н., академик Российской академии транспорта, член-корр. АН ВШ РФ и Российской инженерной академии, заслуженный энергетик Республики Бурятия, профессор кафедры электроэнергетики транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения (г. Иркутск, Россия)
- КУРБАЦКИЙ В.Г.**, д.т.н., ведущий научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)
- ЛИХИ Пол**, профессор кафедры ветроэнергетики, Университетский колледж Корка, исследователь, Центр морских, климатических и энергетических исследований Ирландского научного фонда MAREI (г. Корк, Ирландия)
- МАМЯЧЕНКОВ С.В.**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой металлургии цветных металлов Уральского Федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург, Россия)
- МАРЧУК И.В.**, д.ф.-м. н., профессор РАН, декан Механико- математического факультета Новосибирского государственного университета (г. Новосибирск, Россия)
- МАТЛИН М.М.**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой деталей машин и подъемно-транспортных устройств Волгоградского государственного технического университета (г. Волгоград, Россия)
- МЫМРИН В.А.**, д.г-м.н., профессор, Федеральный университет штата Парана (Кутибиа, 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, профессор кафедры подъемно-транспортных, строительных, дорожных машин и оборудования 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 Мухаммад 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)
- СУСЛОВ К.В.**, д.т.н., профессор, Национального исследовательского университета «МЭИ» (г. Москва, Россия)
- ФАНГ ЛЮ**, профессор Центрального Южного Университета (Чанша, провинция Хунань, Китай)
- ХЕЙФЕЦ М.Л.**, д.т.н., директор Государственного научного учреждения «Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларусь» (г. Минск, Республика Беларусь)
- ФИШОВ А.Г.**, д.т.н., профессор Новосибирского государственного технического университета (г. Новосибирск, Россия)
- ШОЛЬТЕС Берхольт**, директор Института металловедения Кассельского университета (г. Кассель, Германия)

**Editorial board**

- Denis N. SIDOROV**, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Advanced Professor, Professor of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher, Melentiev Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)
- Mikhail V. KORNIAKOV**, Dr. Sci. (Eng.), Rector, Irkutsk National Research Technical University, chairman of the editorial board (Irkutsk, Russia)
- Semen A. ZADES**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Materials Science, Welding and Additive Technologies, 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)
- Denis S. Fedosov**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Power Plants, Networks and Systems, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia), Deputy Editor-in-Chief in Power Engineering
- Vladimir Yu. BAZHIN**, Dr. Sci. (Eng.), Dean of the Mineral Resources Processing Faculty, Saint Petersburg Mining University (Saint Petersburg, Russia)
- Valery Yu. BLUMENSTEIN**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Kuzbass State Technical University (Kemerovo, Russia)
- Aleksander I. BOLDYREV**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia)
- Yury S. BOROVIKOV**, Dr. Sci. (Eng.), Rector, Novgorod State University n.a. Yaroslav-the-Wise (Veliky Novgorod, Russia)
- Josef GAVLIK**, Advanced Professor, Department of Production Technology and Automation, Krakow University of Technology (Krakow, Poland)
- PAVEL V. ILYUSHIN**, Doctor of Sciences (Engineering), Chief Researcher, Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Head of the Center for Intelligent Electric Power Systems and Distributed Energy
- Evgeniy I. KARPENKO**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Head of the Department of the Laboratory of Plasma Energy Processes and Technologies, Institute of Physical Materials Science, SB RAS (Ulan-Ude, Russia)
- Aleksander M. KLER**, Dr. Sci. (Eng.), Chief researcher, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)
- Irina N. KOLOSKO**, Dr. Sci. (Eng.), Leading researcher, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)
- Andrey V. KRYUKOV**, Dr. Sci. (Eng.), Academician of the Russian Academy of Transport, Corresponding member of the Academy of Sciences, Higher School of the Russian Federation and the Russian Academy of Engineering, Honored Power Engineer of the Republic of Buryatia, Advanced Professor, Department of Transport Electric Power Industry, Irkutsk State Railway University (Irkutsk, Russia)
- Viktor G. KURBATSKY**, Dr. Sci. (Eng.), Leading researcher, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)
- Paul LEAHY**, Professor at University College Cork (Department of Wind Power);Funded Investigator in the Science Foundation Ireland MAREI Centre for Marine, Climate and Energy research (Cork, Ireland)
- Sergey V. MAMYACHENKOV**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Head of the Department of Nonferrous Metallurgy, Ural Federal University n.a. the First President of Russia B.N. Yeltsin (Yekaterinburg, Russia)
- Igor V. MARCHUK**, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Director of the Mechanics and Mathematics Department, Novosibirsk State University (Russia)
- Mikhail M. MATLIN**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Head of the Department of Machine Parts and Hoisting-and-Transport Devices, Volgograd State Technical University (Volgograd, Russia)
- Vsevolod A. MYMRIN**, Dr. Sci. (Geology), Professor, Federal University of Parana (Curitiba, Brazil)
- Nikolay N. NOVITSKY**, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)
- Pyotr M. OGAR**, Dr. Sci. (Eng.), Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of the Department of Material Handling, Construction, Road Machinery and Equipment, 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. STYCZYSKI**, Professor, Otto-von-Guericke University (Magdeburg, Germany)
- Liu FANG**, Professor, Central Southern University (Changsha, Hunan Province, China)
- Konstantin V. SUSLOV**, Dr. Sci (Eng.), Professor, National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (Moscow, 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****Машиностроение**

Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Сила резания на единичном зерне.....	10
Еловенко Д.А., Пимштейн П.Г., Кузнецов К.А. Лабораторный комплекс для моделирования и исследования работы встроенной теплозащиты на первом этапе производства энергоэффективных корпусов сосудов высокого давления.....	23
Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Чернов Д.В. Структурно-феноменологическая концепция мониторинга несущей способности элементов конструкций из композитных материалов.....	39
Осипов А.Г., Васечкин У.А. Исследование напряжений и деформаций зубьев ковшей землеройных машин.....	48
Федорещенко Н.В. Гашение колебаний груза подъемно-транспортных механизмов.....	61

**Энергетика**

Карпова Е.В., Голуб И.И. Послеварийная реконфигурация распределительной сети как способ восстановления электроснабжения потребителей.....	74
Кирпичникова И.М., Махсумов И.Б., Шестакова В.В. Снижение генерации электрической энергии солнечными модулями в условиях запыленности местности.....	83
Ляхомский А.В., Кузьмин С.В., Кудряшов А.П., Кузьмин Р.С., Кузьмин И.С., Меньшиков В.А. Анализ и совершенствование методов расчёта сопротивлений заземляющих устройств подстанций.....	94
Маленкова И.Н., Шакиров В.А. Оценка суммарной солнечной радиации с суточной детализацией на основе регрессионных моделей.....	109
Манусов В.З., Каланакова А.В. Выбор оптимальных режимов электропотребления локальной энергосистемы Республики Алтай на основе возобновляемых и альтернативных источников энергии.....	123
Местников Н.П., Васильев П.Ф., Давыдов Г.И., Хоютанов А.М., Альзаккар А.М.-Н., Лобашев А.А. Исследование влияния температуры окружающей среды на функционирование фотоэлектрической установки.....	134
Охлопков А.В., Попов Н.В., Моисеев Д.О., Битней В.Д. Разработка технических решений по выбору схемы замены барабанов, выработавших ресурс.....	147

**Металлургия**

Бажин В.Ю., Крылов К.А., Шариков Ф.Ю. Обоснование термофизического воздействия на электродную массу для получения равномерной структуры электродов из игольчатого кокса для руднотермических печей.....	161
Каримова Л.М., Кайралапов Е.Т., Мансуров Б.Е. Исследования по перколяционному выщелачиванию меди и серебра из лежальных хвостов.....	174
Ключников А.М., Гуляева Р.И., Пикалов С.М., Мальцев Г.И. Кинетика и механизм окислительного обжига сульфидной медно-cobальтовой руды.....	188

**Персоналия**

Профессору Валерию Салову 80 лет.....	219
---------------------------------------	-----

**Content**

7

**Mechanical engineering**

<b>Dimov Yu.V., Podashev D.B.</b> Force of cutting by a single abrasive grain.....	10
<b>Elovenko D.A., Pimshtein P.G., Kuznetsov K.A.</b> Laboratory installation for simulating and investigating the performance of built-in thermal protection at the first stage of manufacturing energy-efficient shells for high-pressure reservoirs.....	23
<b>Matvienko Y.G., Vasiliev I.E., Chernov D.V.</b> Structural phenomenological concept of monitoring the load-bearing capacity of structural elements of composite materials.....	39
<b>Osipov A.G., Vasechkin U.A.</b> Studies of stress and strain in bucket teeth of earth-moving machines.....	48
<b>Fedoreshchenko N.V.</b> Damping of oscillations of load lifted by handling equipment.....	61

**Power engineering**

<b>Karpova E.V., Golub I.I.</b> Post-emergency reconfiguration of a distribution network as a method for restoring power supply to consumers.....	74
<b>Kirpichnikova I.M., Makhsumov I.B., Shestakova V.V.</b> Reduced power generation efficiency of solar panels in dusty locations.....	83
<b>Lyakhomskiy A.V., Kuzmin S.V., Kudryashov A.P., Kuzmin R.S., Kuzmin I.S., Menshikov V.A.</b> Analysis and improvement of methods for calculating the resistance of substation earthing equipment.....	94
<b>Malenkova I.N., Shakirov V.A.</b> Evaluation of total solar radiation with daily breakdown based on regression models.....	109
<b>Manusov V.Z., Kalanakova A.V.</b> Selecting optimal power consumption patterns in the Republic of Altai local grid system based on renewable and alternative power sources.....	123
<b>Mestnikov N.P., Vasilyev P.F., Davydov G.I., Khoyutanov A.M., Alzakkar A.M.-N., Lobashev A.A.</b> Investigating the effects of ambient temperature on photoelectric unit operation.....	134
<b>Okhlopkov A.V., Popov N.V., Moiseev D.O., Bitney V.D.</b> Technical solutions for selecting an option for replacing overaged boiler steam drums.....	147

**Metallurgy**

<b>Bazhin V.Yu., Krylov K.A., Sharikov F.Yu.</b> Substantiation of thermophysical action over electrode paste to achieve an even structure of electrodes of needle coke for thermal furnaces.....	161
<b>Karimova L.M., Kairalapov E.T., Mansurov B.E.</b> Research into percolation leaching of copper and silver from aged tailings.....	174
<b>Klyushnikov A.M., Gulyaeva R.I., Pikalov S.M., Maltsev G.I.</b> Kinetics and mechanism of oxidizing roasting of sulfide copper-cobalt ore.....	188

**Personalia**

<b>Professor Valery Salov is 80 years old.....</b>	219
--	-----



## Уважаемые читатели!

Предлагаем вашему вниманию выпуск научного журнала «iPolytech Journal».

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

«iPolytech Journal» включен в международный каталог периодических изданий «UlrichsPeriodicals Directory», в базу данных EBSCO, в Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU), представлен в электронной библиотеке «Cyberleninka», библиотеке Oxford, Directory of Open Access Journals (DOAJ), рассыпается 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

2.5.2. Машиноведение

2.5.5. Технология и оборудование механической и физико-технической обработки

2.5.6. Технология машиностроения

- ЭНЕРГЕТИКА

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

2.4.3. Электроэнергетика

2.4.5. Энергетические системы и комплексы

- МЕТАЛЛУРГИЯ

2.6.2. Металлургия черных, цветных и редких металлов

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

2.5.2. Mechanical engineering (engineering sciences)

2.5.5. Technology and equipment for mechanical and physical and technical machining (engineering sciences)

2.5.6. Engineering technology (technical sciences)

- Power Engineering

2. 4.2. Electrotechnical equipment and systems (engineering sciences)

2.4.3. Electric power industry (engineering sciences)

2.4.5. Energy systems and complexes (engineering sciences)

- Metallurgy

2.6.2. Metallurgy of ferrous, non-ferrous and rare metals (engineering sciences)

**Editorial Board**

## МАШИНОСТРОЕНИЕ

Научная статья

УДК 621.923:621.922

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-10-22>

## Сила резания на единичном зерне

Ю.В. Димов<sup>1✉</sup>, Д.Б. Подашев<sup>2</sup><sup>1,2</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

**Резюме.** Цель – исследовать силы резания на единичном зерне при воздействии его на обрабатываемый материал. Аналитическое исследование проведено на модели единичного абразивного зерна в виде стержня с закругленной по радиусу вершиной, действующего на обрабатываемый материал. Для расчета интенсивности деформации пластически оттесняемого материала заготовки под действием единичного зерна использован метод линий скольжения (метод характеристик). В результате проведенных аналитических исследований – пластического деформирования материала, оттеснения заторможенной зоны и трения ее о поверхность зерна при движении вверх в виде стружки, трения зерна о пластически деформированный материал, а также воздействия динамической составляющей пластического деформирования – разработаны математические модели по всем перечисленным факторам. Доказана значимость динамической составляющей в общем балансе сил, связанных с пластическим деформированием, путем определения отношения динамического напряжения на линии разрыва к пределу текучести на сдвиг. На примере расчета данной зависимости для материалов Д16Т и 30ХГСА установлено, что целесообразно учитывать динамическую составляющую силы резания при скорости соударения единичного зерна с обрабатываемой поверхностью выше 50 м/с. Приведены графики зависимости относительной силы на зерне от относительной глубины внедрения зерна. Предложенная методика расчета сил резания на единичном зерне позволяет рассчитывать суммарную силу взаимодействия единичного зерна с обрабатываемым материалом. Для перехода к заданным способу обработки и обрабатываемому материалу необходимо определить количество зерен, участвующих в контакте, продолжительность контакта, скорость резания. Имея эти данные, можно рассчитывать производительность процесса и показатели качества обработанной поверхности.

**Ключевые слова:** модель единичного зерна, сила резания**Для цитирования:** Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Сила резания на единичном зерне // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 1. С. 10–22. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-10-22>.

## MECHANICAL ENGINEERING

Original article

## Force of cutting by a single abrasive grain

Yury V. Dimov<sup>1✉</sup>, Dmitry B. Podashev<sup>2</sup><sup>1,2</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

**Abstract.** This paper investigates the cutting forces arising when using a single abrasive grain. Analytical studies were carried out using a model of a single abrasive grain in the form of a rod with a radiused apex acting on the workpiece material. The slip-line method (method of characteristics) was used to calculate the deformation intensity of a plastically edged workpiece material under the action of a single grain. Mathematical models were developed for the following factors: plastic deformation of the material, edging of the stagnated zone and its friction against the grain surface when moved upwards in the form of chippings, grain friction against the plastically deformed material, and the action of the dynamic component of plastic deformation. The significance of the dynamic component in the overall balance of forces related to plastic deformation was established by determining the ratio of dynamic stress on the break line and shear yield point. This dependence calculated for D16T and 30HGSA materials showed the feasibility of accounting for the dynamic component

of the cutting force under the velocity of a single grain impacting the workpiece surface of above 50 m/s. Graphs depicting the relative grain force and the relative depth of grain penetration are given. The proposed calculation method for cutting forces using a single grain can be used to determine the total force of interaction between the single grain and the workpiece material. In order to adopt the defined processing method and the workpiece material, the number of grains in contact, the contact duration, and the cutting speed should be found. On this basis, the process performance and the quality of the workpiece surface can be calculated.

**Keywords:** model of a single grain, cutting force

**For citation:** Dimov Yu.V., Podashev D.B. Force of cutting by a single abrasive grain. *iPolytech Journal*. 2023;27(1):10-22. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-10-22>.

## ВВЕДЕНИЕ

Исследование процесса абразивной обработки для машиностроения является актуальным, поскольку появляющиеся новые методы финишной обработки позволяют заменить ручной труд на механизированный и автоматизированный.

При финишной обработке поверхностей эластичными полимерно-абразивными инструментами, хонингованием, суперфинишированием, а также в среде или в потоке свободных абразивных частиц съем материала осуществляется при взаимодействии режущего микрорельефа инструмента с обрабатываемым материалом. Исследованию процесса обработки абразивным инструментом посвящен ряд работ [1–11].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Режущий микрорельеф, как видно из профилограмм, состоит из ряда выступов (абразивных зерен). При исследовании сил резания в качестве модели единичного зерна принят конус с закругленной по радиусу вершиной. Подобную форму модели при исследовании процессов обработки с применением абразива принимали многие исследователи [12–15].

При движении единичного зерна в идеальном жесткопластическом полупространстве под углом  $\delta$  к поверхности на него действует сила, возникающая в результате:

- пластического деформирования материала;
- оттеснения заторможенной зоны и трения ее о поверхность зерна при движении вверх в виде стружки;
- трения зерна о пластически деформированный материал;
- воздействия динамической составляющей пластического деформирования.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При внедрении зерна под углом  $\delta$  к поверхности под действием нормальной ( $P$ ) и тангенциальной ( $T$ ) составляющих сил резания впереди его образуется валик наплыва, который при определенных условиях может переходить в стружку. Пластически оттесненный материал, как отмечает И.В. Крагельский [16], обтекая зерно без отделения от основной массы, образует наплыв по его боковым сторонам.

Для расчета интенсивности деформации пластически оттесняемого материала заготовки под действием единичного зерна использован метод линий скольжения (метод характеристик).

На рис. 1 приводятся принятые поля линий скольжения в меридиональных (рис. 1 а) и нормальных к оси зерна сечениях (рис. 1 б). Начало подвижной ортогональной системы координат (точка А) расположено на вершине модели зерна.

## ПОЛЕ ЛИНИЙ СКОЛЬЖЕНИЯ И НАПРЯЖЕНИЯ В МЕРИДИОНАЛЬНЫХ СЕЧЕНИЯХ

С учетом опыта построения полей линий скольжения для подобных нашему условий пластического деформирования и формы индентора [17, 18] принято поле линий скольжения в меридиональном сечении, которое приведено на рис. 1 а. Оно состоит из зон ADW, WDGJ, JGT и TGS. В пределах сферической части зерна (зона ADW)  $\eta$ -линии скольжения, как и на всем поле, представляют собой прямые линии, а  $\xi$ -линии скольжения являются криволинейными, центры

радиусов кривизны которых расположены на линии abcd. На контуре зерна радиус кривизны линий скольжения  $\xi$  равен

$$R_{\xi o} = r \cdot \cos \beta, \quad (1)$$

где  $\beta$  – угол между касательной к контуру зерна и  $\xi$ -линией скольжения,  $\beta = \alpha - \varphi$ . Здесь  $\varphi$  – угол между осью X и касательной к контуру зерна в произвольной точке;  $\alpha$  – угол между осью X и линией скольжения  $\xi$ .

Для определения радиуса кривизны  $\xi$ -линий скольжения в любой точке зоны ADW воспользуемся второй теоремой Генки, согласно которой при перемещении точки вдоль данной линии скольжения одного семейства радиусы кривизны линий скольжения другого семейства в точках пересечения с данной изменяются на величину пройденных расстояний. Приращение радиуса в связи с перемещением вдоль  $\xi$ -линий скольжения согласно рис. 1 а составит

$$dR_{\xi} = r \cdot \sin \beta \cdot d\varphi. \quad (2)$$

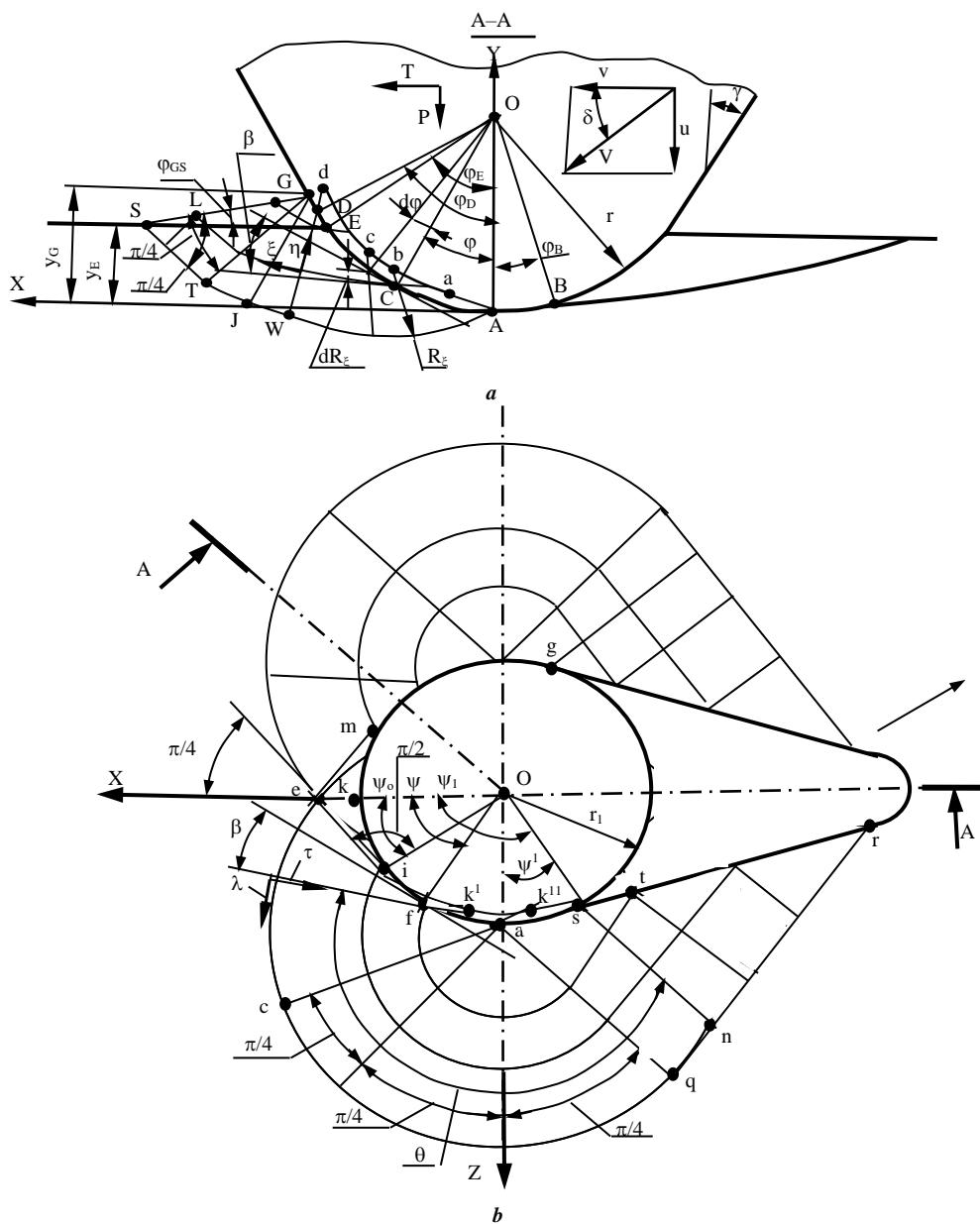


Рис. 1. Поля линий скольжения в сечениях: а – меридиональном; б – нормальном к оси зерна  
Fig. 1. Fields of slip bands in sections: a – meridian section; b – normal section to the grain axis

Проинтегрировав это выражение с учетом формулы (1), получим радиус кривизны для любой точки зоны ADW:

$$R_{\xi i} = r \cdot [\cos\beta + \sin\beta \cdot (\varphi_i - \varphi_h)],$$

где  $\varphi_h$ ,  $\varphi_i$  – углы для точек начала соответствующей  $\xi$  – линии скольжения и пересечения контура зерна искомым радиусом  $R_{\xi i}$ .

Радиус кривизны  $\xi$ -линий скольжения зоны JGT не меняется, центр его находится в точке G, а величина

$$R_{\xi JGT} = \sin\beta \cdot [r \cdot (\varphi_D - \varphi_h) + (y_D - y_E) / \cos\gamma],$$

где  $y_G$ ,  $y_E$  – ординаты точек G и E.

В профиле наплыва TGS вместо криволинейной поверхности рассматривается прямая линия GS. Эта замена обусловлена большими трудностями в аналитическом описании действительного профиля и несущественным уменьшением точности расчетов при таком допущении.

Перпендикулярно к контуру зерна действуют нормальные напряжения  $\sigma_{nxy}$ , а в тангенциальном направлении – касательные  $\tau_K$ :

$$\sigma_{nxy} = \sigma - K \cdot \sin 2\beta; \tau_K = K \cdot \cos 2\beta.$$

Для шероховатого зерна граничные условия будут иметь вид:

$$\sigma_{nxy} = 0, \tau_K = 0 \text{ на } GS; \tau_K = 2\mu_t \cdot K \text{ на } AG.$$

По мере углубления зерна в материал участок свободной поверхности GS, на котором сходит стружка, увеличивается, следовательно, растет и толщина стружки.

Используя приведенные уравнения, получим:

$$\varphi_o = \beta - \delta = \frac{1}{2} \cdot \arccos 2\mu_t - \delta \text{ при } \delta \neq 0; \varphi_o = \beta = \frac{1}{2} \cdot \arccos 2\mu_t \text{ при } \delta = 0,$$

где  $\mu_t$  – коэффициент пластического трения.

## ПОЛЕ ЛИНИЙ СКОЛЬЖЕНИЯ И НАПРЯЖЕНИЯ В СЕЧЕНИЯХ, НОРМАЛЬНЫХ К ОСИ ЗЕРНА

В сечении, перпендикулярном к оси единичного зерна, поле линий скольжения (рис. 1 b) имеет прямолинейные  $\tau$ - и криволинейные  $\lambda$ -линии скольжения. Аналогичное поле линий скольжения было рассмотрено А.Д. Томленовым [19] при исследовании открытой прошивки закругленным пуансоном. При некоторой величине угла  $\psi = \psi_o$  прямолинейная линия скольжения  $\lambda$  пересекает ось симметрии под углом  $\pi/4$ . Из рис. 1 b находим

$$\psi_o = \pi/4 - \beta = \pi/4 - 0,5 \cdot \arccos 2\mu_t,$$

где  $\beta$  – рассмотрен в формуле (1).

Площадь  $\text{mk}_{\text{ie}}$  является областью пластического равновесия (застойная зона), которая движется вместе с зерном как жесткое тело. Границы этой области (линии  $\lambda$  и  $\text{te}$ ) являются линиям разрыва скоростей. В тонком слое вдоль этих линий возникают значительные деформации.

При  $\beta = 0$  течение по поверхности зерна достигает наибольшей величины, ограниченной условием пластичности  $\tau_K = K$  ( $\tau_K$  – касательные напряжения,  $K$  – предел текучести на сдвиг в поверхностном слое заготовки). Этой величине соответствует:  $\mu_t = 0,5$  и  $\psi = \pi/4$ .

В области  $\text{ie}$  семейство  $\lambda$ -линий скольжения имеет радиусы кривизны, центры которых расположены на линии  $k^1 k^{11}$ . На контуре зерна радиус кривизны:

$$R_{\lambda o} = r_1 \cdot \sin\beta,$$

где  $r_1$  – радиус контура зерна в рассматриваемом сечении.

Для любой точки зоны ёса радиус кривизны  $\lambda$ -линии скольжения в результате тех же выводов, что и при получении уравнения (2), может быть определен из выражения:

$$R_{\lambda i} = r_1 \cdot [\sin\beta + \cos\beta \cdot (\psi_i - \psi_H)],$$

где  $\psi_H, \psi_i$  – углы  $\psi$  для точек начала соответствующей  $\lambda$ -линии скольжения и пересечения контура зерна искомым радиусом  $R_{\lambda i}$ .

Центр радиусов кривизны  $\lambda$ -линий скольжения области ас<sup>q</sup> расположен в точке а, а радиус:

$$R_{\lambda acq} = r_1 \cdot \cos\beta \cdot (\pi/4 - \psi_H).$$

В области qasn:

$$R_{\lambda qasn} = r_1 \cdot [\cos\beta \cdot (\pi/2 - \psi_H) - 0,5\sqrt{2} \cdot (\psi_i - \pi/2)].$$

Зона snr имеет прямые ортогональные друг другу линии скольжения, расположенные к свободной поверхности под углом  $\pi/4$ .

На рис. 1 приняты обозначения:  $u_E$  – глубина внедрения зерна;  $m_i$  – участок, на котором происходит стружкообразование; D – точка перехода сферической части в коническую;  $m_g$  и  $m_s$  – участки, на которых при движении зерна материал пластически оттесняется в наплыв.

Совместив вершину зерна (точка А) с началом подвижной системы координат XYZ (см. рис. 1), можем разложить действующую силу на тангенциальную  $T$  (вдоль оси X) и нормальную  $P$  (вдоль оси Y) составляющие:

$$T = T_{\partial} + T_{зат} + T_{mp} + T_{дин}; P = P_{\partial} + P_{зат} + P_{mp} + P_{дин}, \quad (3)$$

где  $T_{\partial}, P_{\partial}, T_{зат}, P_{зат}, T_{mp}, P_{mp}, T_{дин}, P_{дин}$  – тангенциальные и нормальные составляющие, возникающие при пластическом деформировании, оттеснении и трении в заторможенной зоне, трении зерна о материал, а также динамические составляющие пластического деформирования.

## СИЛА ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

На бесконечно малую площадку  $ds$  в любой точке поверхности зерна действуют элементарные составляющие силы:

$$dT_{\partial} = \sigma_n \cdot \sin\varphi \cdot \cos\psi \cdot ds \quad dP_{\partial} = \sigma_n \cdot \cos\varphi \cdot ds, \quad (4)$$

$$\text{где } ds = r^2 \cdot \sin\varphi \cdot d\varphi \cdot d\psi, \quad (5)$$

$\sigma_n$  – напряжение, нормальное к поверхности зерна по данным работы [19]:

$$\sigma_n = -2K \cdot (1/2 + 5\pi/4 + \psi_i - \psi - \varphi - \varphi_{GS} + 0,5\sin\beta - \beta), \quad (6)$$

$$\text{где } \psi_i = \pi/2 - \psi^l \cdot \sin u_i. \quad (7)$$

( $u_i$  – вертикальная составляющая скорости движения единичного зерна).

После несложного вывода получим:

$$\sin\psi^l = \frac{2 \cdot \operatorname{ctg}\phi \cdot \operatorname{tg}\delta}{1 + \operatorname{ctg}^2\phi \cdot \operatorname{tg}^2\delta}.$$

Подставив формулы (6) и (5) в зависимости (4), получим:

$$dT_{\partial} = r^2 \cdot K(p - 2\varphi - 2\psi) \cdot \sin^2\varphi \cdot \cos\psi \cdot d\varphi \cdot d\psi; \quad (8)$$

$$dP_{\partial} = r^2 \cdot K(p - 2\varphi - 2\psi) \cdot \cos\varphi \cdot d\varphi \cdot d\psi; \quad (9)$$

где  $p = 1 + \sin 2\beta + 5\pi/2 + 2\psi_i - 2\varphi_{GS} - 2\beta$ .

Здесь и далее угол  $\psi_i$  в целях упрощения вывода принят постоянным для данного

рассчитываемого уровня. В формулу (7) для определения  $\Psi_1$  подставляем  $\varphi = 0,5(\varphi_G + \varphi_E)$ . При  $|\delta| > |\varphi_E|$  следует принимать  $\psi^1 = -\pi/2$ .

Тангенциальная составляющая при  $\varphi_G > \varphi_0$ :

$$\frac{T_d}{K \cdot r^2} = 2 \int_{\phi_O}^{\phi_G} \int_{\psi_O}^{\pi/2} (p - 2\phi - 2\psi) \cdot \sin^2 \phi \cdot \cos \psi \cdot d\phi \cdot d\psi + 2 \int_{\phi_B}^{\phi_O} \int_0^{\pi/2} (p - 2\phi - 2\psi) \cdot \sin^2 \phi \cdot \cos \psi \cdot d\phi \cdot d\psi - 2 \int_{\phi_B}^{\phi_G} \int_{\pi/2}^{\psi_1} (p - 2\phi - 2\psi) \cdot \sin^2 \phi \cdot \cos \psi \cdot d\phi \cdot d\psi$$

После интегрирования получим выражение:

$$T_d/K = r^2 \{ (1 - \sin \psi_0) \cdot [2p \cdot (AG - A0 \cdot \text{sign} \varphi_0) - BG + B0] + [2p \cdot (A0 \cdot \text{sign} \varphi_0 - AB \cdot \text{sign} \varphi_B) - B0 + BB] - (\pi/2 - \cos \psi_0 - \psi_0 \cdot \sin \psi_0) \cdot (AG - A0 \cdot \text{sign} \varphi_0) - 4(\pi/2 - 1) \cdot (A0 \cdot \text{sign} \varphi_0 - AB \cdot \text{sign} \varphi_B) - (1 - \sin \psi_1) \cdot p \cdot (AG - AB \cdot \text{sign} \varphi_B) \cdot BG + BB + 4(\cos \psi_1 + \psi_1 \cdot \sin \psi_1 - \pi/2) \cdot (AG - AB \cdot \text{sign} \varphi_B) \}, \quad (10)$$

где  $A_i = 0,5\varphi_i - 0,25\sin 2\varphi_i$ ;

$$B_i = \varphi_i^2 - \varphi_i \cdot \sin 2\varphi_i - 0,5\cos 2\varphi_i; \varphi_i = \arccos(1 - y_i/r) \text{ при } i = D, B, E, G. \quad (11)$$

Выражения (11) введены для упрощения написания уравнения (10). Угол  $\varphi_B$  следует принимать исходя из условий:

при  $|\delta| > |\varphi_E|$ ,  $\varphi_B = \varphi_E$ , при  $|\delta| \leq |\varphi_E|$ ,  $\varphi_E = \delta$ .

Тангенциальная составляющая при

$$\varphi_G \leq \varphi_0: T_d/K = r^2 \{ [2 \cdot \sin \psi_1 \cdot (p + 2\psi_1) + 4(1 - \pi + \cos \psi_1)] \cdot (AG - AB \cdot \text{sign} \varphi_B) - \sin \psi_1 \cdot (BG - BE) \}. \quad (12)$$

Нормальная составляющая при  $\varphi_G > \varphi_0$ :

$$\frac{P_d}{K \cdot r^2} = 2 \int_{\phi_O}^{\phi_G} \int_{\psi_O}^{\pi/2} (p - 2\phi - 2\psi) \cdot \cos \phi \cdot d\phi \cdot d\psi + \int_{\phi_B}^{\phi_O} \int_0^{\pi} (p - 2\phi - 2\psi) \cdot \cos \phi \cdot d\phi \cdot d\psi + 2 \int_{\phi_B}^{\phi_G} \int_{\pi/2}^{\psi_1} (p - 2\phi - 2\psi) \cdot \cos \phi \cdot d\phi \cdot d\psi.$$

После интегрирования получим:

$$P_d/K = r^2 \{ [(\pi^2 - 2\Psi_0) \cdot (D_G - D_0 + AG - A_0) + \pi(D_0 - DE + A_0 - AB) - (0,25\pi^2 - \Psi_0^2) \cdot (\sin^2 \varphi_0 \cdot \sin \varphi_0 \cdot \text{sign} \varphi_0) - 0,5\pi^2(\sin^2 \varphi_0 \cdot \text{sign} \varphi_0 - \sin^2 \varphi_E \cdot \text{sign} \varphi_E) + (2\Psi_1 - \pi) \cdot (D_G - DB + AG - AB) - (\psi_1^2 - 0,5\pi^2) \cdot (\sin^2 \varphi_G - \sin^2 \varphi_B)] \}, \quad (13)$$

где  $D_i = (0,5p - \varphi_i) \cdot \sin^2 \varphi_i \cdot \text{sign} \varphi_i$ ;  $D^1_i = (0,5p - \varphi_i) \cdot \sin^2 \varphi_i$  при  $i = D, B, G$ .

Нормальная составляющая при  $\varphi_G \leq \varphi_0$ :

$$P_d/K = r^2 \{ \pi[D_G - DB + AG - AE - 0,5(\sin^2 \varphi_G - \sin^2 \varphi_B \cdot \text{sign} \varphi_B)] + (2\psi_1 - \pi) \cdot (D_G - DB + AG - AB) - (\psi_1^2 - 0,25\pi^2) \cdot (\sin^2 \varphi_G - \sin^2 \varphi_B) \}. \quad (14)$$

## СИЛА НА ЗАТОРМОЖЕННОМ УЧАСТКЕ

Эта составляющая силы согласно принятой схеме полей линий скольжения будет существовать только при наличии составляющей скорости вдоль оси X. Заторможенный участок по мере движения единичного зерна вытесняется вверх по его образующей.

На этом участке сила складывается из двух составляющих: пластического оттеснения слоя гем и трения этого слоя о поверхность зерна.

Вдоль линии  $e_1$  (см. рис. 1) величина нормального напряжения остается неизменной.

Если подставить в уравнение (6)  $\beta = 0$ , соответствующий  $\mu_T = 0,5$  на линии  $e_1$ , и  $\psi = \psi_0$ , то получим:

$$\sigma_n = -2K \cdot (0,5 + \pi + \psi_1 - \psi_0 - \varphi - \varphi_{GS}). \quad (15)$$

Между зерном и движущимся вверх материалом создается напряжение, возникающее в результате трения в этой паре:

$$\tau_K = 2\mu_m \cdot K. \quad (16)$$

Сила на площадке  $dS_{3am}$  определится из выражения:

$$dT_{3am} = \sigma_n \cdot \sin \varphi \cdot 0,5 \sqrt{2} \cdot dS_{3am} - \tau_K \cdot \cos \varphi \cdot 0,5 \sqrt{2} \cdot dS_{3am}; \quad (17)$$

$$dP_{3am} = \sigma_n \cdot \cos \varphi \cdot dS_{3am} + \tau_K \cdot \sin \varphi \cdot dS_{3am}, \quad (18)$$

$$\text{где } dS_{3am} = 2 \cdot r^2 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin \psi_0 \cdot \sin \varphi \cdot d\varphi; dS_{13am} = 2r^2 \cdot \psi_0 \cdot \sin \varphi \cdot d\varphi. \quad (19)$$

Подставив формулы (15), (16), (19) в уравнения (17) и (18) для всей поверхности заторможенного участка, получим:

$$\frac{T_{3am}}{K \cdot r^2} = 2 \sin \psi_0 \cdot \int_{\varphi_0}^{\varphi_G} (p_{1-2\varphi}) \cdot \sin^2 \varphi \cdot d\varphi - 4\mu_T \cdot \sin \psi_0 \cdot \int_{\varphi_0 \cdot \text{sign} \varphi_0}^{\varphi_G} \cos \varphi \cdot \sin \varphi \cdot d\varphi;$$

$$\frac{P_{3am}}{K \cdot r^2} = 2\sqrt{2} \cdot \sin \psi_0 \int_{\varphi_0}^{\varphi_G} (p_{1-2\varphi}) \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi \cdot d\varphi + 4\mu_T \cdot \int_{\varphi_0}^{\varphi_G} \sin^2 \varphi \cdot d\varphi.$$

Проинтегрируем выражения (11) и (12):

$$T_{3am}/K = 2r^2 \cdot \sin \psi_0 [p_1 (A_G - A_0 \cdot \text{sign} \varphi_0) - B_G - B_0 - \mu_T (\sin^2 \varphi_G - \sin^2 \varphi_0 \cdot \text{sign} \varphi_0)], \quad (20)$$

$$P_{3am}/K = 2r^2 \cdot [\sqrt{2} \cdot \sin \psi_0 \cdot (D_{1G} - D_{10} + A_G - A_0) + \mu_T \cdot \psi_0 \cdot (A_G - A_0)]. \quad (21)$$

В приведенных зависимостях:

$$p_1 = 1 + 2\pi + 2\psi_1 - 2\psi_0 - 2\varphi_{GS}, D_{1i} = (0,5p_1 - \varphi_i) \cdot \sin^2 \varphi_i \cdot \text{sign} \varphi_i, \text{ где } i = 0, G.$$

При  $\varphi_0 \geq \varphi_G$   $T_{3am} = P_{3am} = 0$ .

## СИЛА ТРЕНИЯ

Сила трения на поверхности зерна обусловлена касательными напряжениями (16).

Составляющие  $\tau_P$  и  $\tau_T$  касательного напряжения, направленные вдоль осей  $Y$  и  $X$ , определим проектированием равнодействующей  $\tau_K$  на соответствующие оси:

$$\tau_P = \frac{\tau_K}{\sqrt{\frac{1}{\sin^2 \delta^1} + \operatorname{ctg}^2 \phi}}; \tau_T = \tau_P \operatorname{ctg} \delta^1. \quad (22)$$

В выражениях (15) угол  $\delta^1$  определится как

$$\operatorname{tg} \delta^1 = \operatorname{tg} \delta \cdot \sin \psi_c,$$

где  $\psi_c$  – средний угол  $\psi$  для участка поверхности, находящегося в контакте.

Сила на площадке  $dS$ :

$$dP_{mp} = -\tau_P \cdot dS; \quad (23)$$

$$dT_{mp} = \tau_T \cdot dS = -dP_{mp} \cdot \operatorname{ctg} \delta. \quad (24)$$

## СИЛА ПРИ $\varphi_G > \varphi_0$

После подстановки уравнений (5), (16) и (22) в формулу (23) получим:

$$\begin{aligned}
 \frac{P_{\text{тр}}}{-2K \cdot \mu_T \cdot r^2} = & 2 \int_0^{\psi_1} \int_{\phi_B}^{\phi_G} \frac{\sin \phi \cdot d\phi \cdot d\psi}{\sqrt{\frac{1}{\sin^2 \delta_1^1} + \operatorname{ctg}^2 \phi}} + 2 \int_0^{\pi/2} \int_0^{\phi^1} \frac{\sin \phi \cdot d\phi \cdot d\psi}{\sqrt{\frac{1}{\sin^2 \delta_2^1} + \operatorname{ctg}^2 \phi}} + \\
 & + 2 \cdot \operatorname{sign} \phi \int_0^{\pi/2} \int_0^{\phi_B} \frac{\sin \phi \cdot d\phi \cdot d\psi}{\sqrt{\frac{1}{\sin^2 \delta_2^1} + \operatorname{ctg}^2 \phi}} - 2 \int_0^{\psi_0} \int_0^{\phi_G} \frac{\sin \phi \cdot d\phi \cdot d\psi}{\sqrt{\frac{1}{\sin^2 \delta_3^1} + \operatorname{ctg}^2 \phi}} - 2 \cdot \operatorname{sign} \phi \int_0^{\psi_0} \int_0^{\phi_0} \frac{\sin \phi \cdot d\phi \cdot d\psi}{\sqrt{\frac{1}{\sin^2 \delta_3^1} + \operatorname{ctg}^2 \phi}}, \tag{25}
 \end{aligned}$$

где  $\delta_1^1, \delta_2^1, \delta_3^1$  находятся по уравнению (25) при значениях  $\psi_c$ , соответственно,

$$\psi_{c1} = \psi_1/2; \psi_{c2} = \pi/4; \psi_{c3} = \psi_0/2.$$

Принимая  $\sin \varphi \approx \varphi$ ,  $\operatorname{ctg} \varphi = 1/\varphi$  и интегрируя уравнение (25), получим:

$$\begin{aligned}
 P_{\text{тр}}/K = & -2\mu_m \cdot r^2 \{ \{ \psi_1 \cdot \sin^3 \delta_1^1 \{ [\varphi_G \cdot E^1 G - \ln(\varphi_G + B_G \cdot \sin^2 \delta_1^1)] - [\varphi_B \cdot E^1 B \cdot \operatorname{sign} \varphi_B - \ln(\varphi_B + E^1 B \cdot \sin^2 \delta_1^1)] \} + \\
 & + \pi/2 \cdot \sin^3 \delta_2^1 \{ [\varphi \cdot E^{11} B \cdot \operatorname{sign} \varphi_B - \ln(\varphi_B \cdot \operatorname{sign} \varphi_B + E^{11} B \cdot \sin^2 \delta_2^1)] \cdot \\
 & \cdot (1 - \operatorname{sign} \varphi_B) - \psi_0 \cdot \sin^3 \delta_3^1 \{ [\varphi_G \cdot E^{111} G - \ln(\varphi_G^1 + E^{111} G \cdot \sin^2 \delta_3^1)] - \\
 & - [\varphi_0 \cdot E^{111} o \cdot \operatorname{sign} \varphi_0 - \ln(\varphi_0 \cdot \operatorname{sign} \varphi_0 + E^{111} o \cdot \sin^2 \delta_3^1)] \cdot \operatorname{sign} \varphi_0 \} \} \}, \tag{26}
 \end{aligned}$$

$$\text{где } E_i^1 = \frac{\sqrt{\phi_i^2 + \sin^2 \delta_1^1}}{\sin^2 \delta_2^1}; E_i^{11} = \frac{\sqrt{\phi_i^2 + \sin^2 \delta_2^1}}{\sin^2 \delta_3^1}; E_i^{111} = \frac{\sqrt{\phi_i^2 + \sin^2 \delta_3^1}}{\sin^2 \delta_3^1}.$$

Согласно формуле (26):

$$\frac{T_{\text{тр}}}{K} = -\frac{P_{\text{тр}}}{K} \cdot \operatorname{ctg} \delta. \tag{27}$$

При движении зерна параллельно поверхности ( $\delta = 0$ ) нормальная составляющая согласно уравнению (26) обращается в ноль. Тангенциальная составляющая при этом условии будет иметь максимальное значение. Однако определить ее величину по уравнению (27) невозможно из-за неопределенности.

Воспользовавшись формулами (24), (5) и полагая  $\tau = \tau_k \cdot \sin \psi = 2\mu_T \cdot K \cdot \sin \psi$ , получим:

$$dT_{\text{тр}} = 2\mu_T \cdot r^2 \cdot K \cdot \sin \psi \cdot \sin \varphi \cdot d\varphi \cdot d\psi.$$

Для всей поверхности, находящейся в контакте, эта составляющая равна:

$$\frac{T_{\text{тр}}}{K} = 2r^2 \cdot \mu_T \cdot \left[ 2 \int_{\psi_0}^{\pi/2} \int_{\phi_0}^{\phi_G} \sin \varphi \cdot \sin \psi \cdot d\varphi \cdot d\psi + 2 \int_0^{\pi/2} \int_0^{\phi^1} \sin \varphi \cdot \sin \psi \cdot d\varphi \cdot d\psi \right] = 4r^2 \cdot \mu_T \cdot \\
 \cdot [\cos \psi_0 \cdot (\cos \varphi_0 - \cos \varphi_G) + (1 - \cos \varphi_0)]. \tag{28}$$

## ДИНАМИЧЕСКАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ СИЛЫ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

В пластической области имеют место тангенциальные разрывы скоростей, которые в принятом поле линий скольжения согласно совпадают с  $\xi$ -линиями скольжения. Максимальные касательные напряжения на линиях разрыва равны  $K$  и, следовательно, сила пластического деформирования, рассчитанная по формулам (10), (12), (13) и (14), соответствуют статическому состоянию.

Кроме указанной силы, на зерно действует дополнительная сила, связанная с изменением количества движения при переходе металла через поверхность разрыва.

Согласно [19], полное касательное напряжение на линии разрыва скоростей  $q_0 = K \cdot q_i$ , где  $q_i$  – динамическое напряжение на линии разрыва:

$$qi = \rho \cdot v\xi n \cdot v\xi; \quad (29)$$

$\rho$  – плотность материала;  $v_{\xi n}$  – нормальная компонента скорости на линии разрыва:

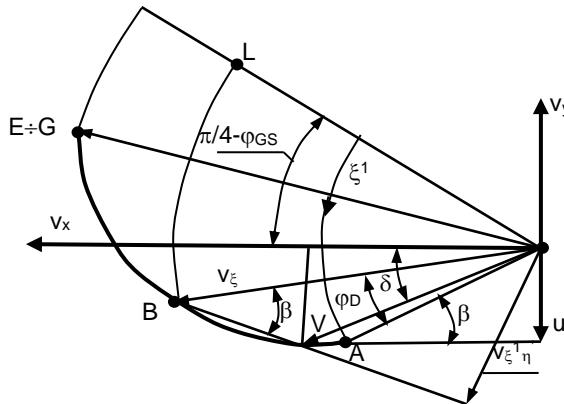


Рис. 2. Годограф скоростей в сечении XY  
Fig. 2. Velocity hodograph in XY section

$$v_{\xi n} = \frac{u \cdot \cos\phi + v \cdot \sin\phi \cdot \cos\psi}{\cos\beta};$$

где  $v_\xi$  – тангенциальная компонента скорости на линии разрыва.

$$v_\xi = \frac{u \cdot \cos\phi + v \cdot \sin\phi \cdot \cos\psi}{\sin\beta}.$$

Скорости  $v_{\xi n}$  и  $v_{\xi}$  для любой точки поля определяются по годографу скоростей, приведенному на рис. 2.

Динамическая составляющая силы пластического деформирования может быть получена по уравнениям, аналогичным уравнениям (8) и (9), после замены в них предела текучести на сдвиг динамическим напряжением  $q_i$  (29).

$$T_{\text{дин}} = \frac{2\rho \cdot r^2}{\sin\beta \cdot \cos\beta} \cdot \int_0^{\frac{\psi_1}{2}} \int_{\phi_B}^{\phi_G} (p - 2\phi - 2\psi) \cdot (u \cdot \cos\phi + v \cdot \sin\phi \cdot \cos\psi)^2 \cdot \sin^2\phi \cdot \cos\psi \cdot d\phi \cdot d\psi.$$

$$P_{\text{дин}} = \frac{2\rho \cdot r^2}{\sin\beta \cdot \cos\beta} \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_{\phi_B}^{\phi_G} (p - 2\phi - 2\psi) \cdot (u \cdot \cos\phi + v \cdot \sin\phi \cdot \cos\psi)^2 \cdot \sin\phi \cdot \cos\phi \cdot d\phi \cdot d\psi +$$

$$+ \frac{2\rho \cdot r^2}{\sin\beta \cdot \cos\beta} \cdot \int_{\pi/2}^{\psi_1} \int_{\phi_B}^{\phi_G} (p - 2\phi - 2\psi) \cdot (u \cdot \cos\phi + v \cdot \sin\phi \cdot \cos\psi)^2 \cdot \sin\phi \cdot \cos\phi \cdot d\phi \cdot d\psi.$$

После интегрирования получим:

$$T_{\text{дин}} = \frac{\rho \cdot r^2}{2 \sin^2 \beta} \left\{ \begin{array}{l} u^2 [(H_G - H_B \cdot \text{sign} \varphi_B) \cdot (p \cdot \sin \psi_1 - 2F_2 - 2) - \sin \psi_1 \cdot (N_G - N_B)] + \\ + u \cdot v \left[ (\sin^4 \varphi_G - \sin^4 \varphi_B) \cdot (p_2 \cdot F_1 - 2F_4) - 1/16 \cdot F_1 \cdot \right. \\ \left. \cdot (M_G - M_B \cdot \text{sign} \varphi_B) \right] + \\ + v^2 \left\{ 0,25 (M_G - M_B \cdot \text{sign} \varphi_B) \cdot \left[ p \cdot F_3 - 2/9 \cos^2 \psi_1 \left( \begin{array}{l} \cos \psi_1 + \\ + 3\psi_1 \cdot \sin \psi_1 \end{array} \right) - \right] \right\} \\ - 4/3 F_2 + 14/9 - 2F_3 (S_G - S_B) \end{array} \right\}. \quad (30)$$

$$P_{\text{дин}} = \frac{\rho \cdot r^2}{\sin 2\beta} \left\{ \begin{array}{l} u^2 \left\{ \begin{array}{l} [\pi(\varphi_B \cdot \text{sign}\varphi_B - \varphi_B) + \psi_1(\psi_1 - \pi/2 - p_2)] \cdot (\cos^4 \varphi_G - \cos^4 \varphi_B) - \\ - \pi/32 \cdot (R_B \cdot \text{sign}\varphi_B - R_B) - \psi_1/16 \cdot (R_G - R_B \cdot \text{sign}\varphi_B) \end{array} \right\} + \\ + u \cdot v \left\{ \begin{array}{l} [(p + 2 - \pi) \cdot (H_G - H_B) + [2F_2 + p \cdot (1 - \sin \psi_1) - \pi] \cdot \\ \cdot (H_G - H_B \cdot \text{sign}\varphi_B) - \sin \psi_1 \cdot (N_G - N_B)] \end{array} \right\} + \\ + v^2/2 \left\{ \begin{array}{l} [\pi(\varphi_B - \varphi_B \cdot \text{sign}\varphi_B) + 0,5p_2 \cdot F_1 - F_4] \cdot (\sin^4 \varphi_G - \sin^4 \varphi_B) + \\ + F_1/32(M_G - M_B \cdot \text{sign}\varphi_B) + \pi/32(M_B \cdot \text{sign}\varphi_B - M_B) \end{array} \right\} \end{array} \right\}. \quad (31)$$

В формулах (30) и (31):

$$\begin{aligned} Hi &= \varphi i - 0,25 \cdot \sin 4\varphi i; Mi = 12\varphi i - 8 \cdot \sin 2\varphi i + \sin 4\varphi i; \\ Ni &= 0,5 \cdot \sin 22\varphi i - \varphi i \cdot \sin 4\varphi i - 2\varphi 2i; Ri = 12\varphi i + 8 \cdot \sin 2\varphi i + \sin 4\varphi i; \\ Si &= 1/3 \cdot \sin 3\varphi i \cdot (\sin \varphi i - 4\varphi i \cdot \cos \varphi i) + \sin 2\varphi i - \varphi i \cdot \sin 2\varphi i + \varphi 2i \text{ при } i = G, B; \\ p2 &= p - 2\varphi G + 2\varphi B \cdot \text{sign}\varphi B; F1 = 2\psi 1 + \sin 2\psi 1; F2 = \cos \psi 1 + \psi 1 \cdot \sin \psi 1; \\ F3 &= \sin \psi 1 - 1/3 \cdot \sin 3\psi 1; F4 = \cos 2\psi 1 + \psi 1 \cdot \sin 2\psi 1 + \psi 12 - 1. \end{aligned}$$

Чтобы оценить значимость динамической составляющей в общем балансе сил, связанных с пластическим деформированием, нужно сравнить  $T_{\text{дин}}$  с  $T_{\text{д}}$ . Для этого достаточно найти отношение динамического напряжения на линии разрыва к пределу текучести на сдвиг, то есть

$$\lambda = \frac{q_i}{K} = \frac{\rho \cdot (u \cdot \cos \varphi + v \cdot \sin \varphi \cdot \cos \psi)^2}{K \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta}. \quad (32)$$

Рассмотрим изменение этого отношения в зависимости от скорости соударения на частном примере ( $\psi = 0$ ,  $\mu_T = 0,4$ ,  $u = 0$ ,  $\varphi = 0,7$  рад.), рассчитанного по выражению (32) и приведенного в таблице.

В таблице значения  $K$  определены склерометрическим методом. Целесообразность учета динамической составляющей при расчете силы деформации появляется при скорости соударения выше 50 м/с. Например, при дробеструйной обработке, при которой скорость полета дроби достигает 90 м/с [20], динамическая составляющая превышает 10%, и пренебрегать ею нельзя.

Зависимость  $\lambda$  от скорости соударения  
 $\lambda$  dependence on impact velocity

Марка материала	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$K$ , МПа	V, м/с				
			1	10	25	50	100
30ХГСА	$7,85 \cdot 10^3$	9690	$1,57 \cdot 10^{-5}$	$1,57 \cdot 10^{-3}$	$9,81 \cdot 10^{-3}$	$3,92 \cdot 10^{-2}$	0,157
Д16Т	$2,78 \cdot 10^3$	314	$1,22 \cdot 10^{-5}$	$1,22 \cdot 10^{-3}$	$7,65 \cdot 10^{-3}$	$3,06 \cdot 10^{-2}$	0,122

При таких видах обработки, как гидроструйная (скорость до 30 м/с), в уплотненном потоке свободного абразива (скорость до 25 м/с [21]), объемная вибрационная (скорость до 2 м/с) и галтовочная (скорость менее 1 м/с) динамические составляющие не превышают 1% и потому в инженерных расчетах могут не учитываться.

Уравнения (3) можно представить в следующем виде:

$$T = K \cdot r^2 \cdot f_T + T_{\text{дин}}; P = K \cdot r^2 \cdot f_P + P_{\text{дин}},$$

где  $f_T$  и  $f_P$  – безразмерные функции, зависящие от  $\varepsilon_E = y_E/r$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  и  $\mu_T$ ;

$$\begin{aligned} f_T &= \frac{1}{K \cdot r^2} \cdot (T_{\text{д}} + T_{\text{зат}} + T_{\text{тр}}), \\ f_P &= \frac{1}{K \cdot r^2} \cdot (P_{\text{д}} + P_{\text{зат}} + P_{\text{тр}}). \end{aligned}$$

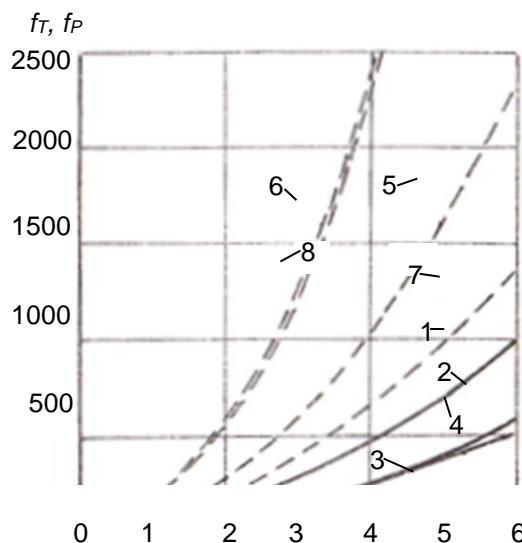


Рис. 3. Зависимость  $f_T$  и  $f_P$  от  $\varepsilon_E$ : 1, 2, 3 –  $f_T(\varepsilon_E)$  при  $\gamma=55^\circ$ ,  $\mu_T=0.4$  и  $\delta=0$ ,  $-30^\circ$  и  $+30^\circ$  соответственно; 4 –  $f_T(\varepsilon_E)$  при  $\gamma=36^\circ$ ,  $\mu_T=0.4$  и  $\delta=-30^\circ$ ; 5, 6 –  $f_P(\varepsilon_E)$  при  $\gamma=55^\circ$ ,  $\mu_T=0.4$  и  $\delta=0$  и  $-30^\circ$  соответственно; 7 –  $f_P(\varepsilon_E)$  при  $\gamma=36^\circ$ ,  $\mu_T=0.4$  и  $\delta=-30^\circ$ ; 8 –  $f_P(\varepsilon_E)$  при  $\gamma=55^\circ$ ,  $\mu_T=0.125$  и  $\delta=-30^\circ$

Fig. 3.  $f_T$  and  $f_P$  dependence on  $\varepsilon_E$ : 1, 2, 3 –  $f_T(\varepsilon_E)$  at  $\gamma=55^\circ$ ,  $\mu_T=0.4$  and  $\delta=0$ ,  $-30^\circ$  and  $+30^\circ$  respectively; 4 –  $f_T(\varepsilon_E)$  at  $\gamma=36^\circ$ ,  $\mu_T=0.4$  and  $\delta=-30^\circ$ ; 5, 6 –  $f_P(\varepsilon_E)$  at  $\gamma=55^\circ$ ,  $\mu_T=0.4$  and  $\delta=0$  and  $-30^\circ$  respectively; 7 –  $f_P(\varepsilon_E)$  at  $\gamma=36^\circ$ ,  $\mu_T=0.4$  and  $\delta=-30^\circ$ ; 8 –  $f_P(\varepsilon_E)$  at  $\gamma=55^\circ$ ,  $\mu_T=0.125$  and  $\delta=-30^\circ$

Значения составляющих сил определялись по уравнениям (10), (12), (20), (27) и (28) – для  $f_T$  и по уравнениям (13), (14), (21) и (26) – для  $f_P$ .

Введение функций  $f_T$  и  $f_P$  существенно упрощает вычисление сил. Рассчитанные на ЭВМ, они могут быть табулированы или представлены в виде номограмм. На рис. 3 приведены результаты расчета этих функций в зависимости от относительной глубины внедрения  $\varepsilon_E = y_E/r$  при некоторых значениях  $\gamma$ ,  $\delta$  и  $\mu_T$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная методика расчета сил резания на единичном зерне позволяет рассчитывать общую силу на площади контакта абразивного инструмента с заготовкой и перейти к определению удаляемого в процессе резания объема материала.

## Список источников

1. Li Ning, Ding Jinfu, Hu Liguang, Wang Xiao, Lu Lirong, Huang Jianmeng. Preparation, microstructure and compressive properties of silicone gel/SiC composites for elastic abrasive // Advanced composites letters. 2018. Vol. 27. Iss. 3. P. 122–128. <https://doi.org/10.1177/096369351802700305>.
2. Dimov Yu.V., Podashev D.B. Machining forces exerted by an elastic abrasive wheel // Russian Engineering Research. 2018. Vol. 38. Iss. 12. P. 932–937. <https://doi.org/10.3103/S1068798X18120341>.
3. Nguyen Van Tho. Finite element modeling method of centrifugally rotary processing // Applied Mechanics and Materials. 2019. Vol. 889. C. 140–147.
4. Solovev A.N., Nguyen Van Tho, Tamarcin M.A., Panfilov I.A., Wang J.P. Modeling contact abrasive interactions in centrifugally rotary processing by finite element method // Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications: Conference Proceedings (Busan, 9–11 August 2018). Busan, 2018. P. 334–802.
5. Svirchev V.I., Trubitsyn A.V., Tarasov S.V. Technological support of the surface roughness of the spigots made from the tough “relit” material with the help of the optimization of the centerless grinding mode parameters // International Journal of Applied Engineering Research. 2019. Vol. 14. No. 4. P. 896–899.
6. Spirin V.A., Makarov V.F., Khalturin O.A. Calculation of thermodynamic parameters of geometrically complex parts at abrasive globoid gear machining // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering / eds. A. Radionov, O. Kravchenko, V. Guzeyev, Y. Rozhdestvenskiy. Cham: Springer, 2019. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1\\_91](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1_91).
7. Свирщёв В.И., Трубицын А.В., Тарасов С.В. Оптимизация параметров режима бесцентрового шлифования втулок из высокотвердого материала «релит», обеспечивающих требуемую шероховатость поверхности // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2019. Т. 21. № 1. С. 25–30.

8. Han Quanli, Zhang Bin. Evolution of surface roughness of Ti plate in abrasive-less polishing // Advanced Materials Research. 2010. Vol. 139-141. P. 844–847. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.139-141.844>.
9. Макаров В.Ф., Ворожцова Н.А., Песин М.В. Обработка зубчатых колес сборными шлифовально-полировальными кругами // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Серия: Машиностроение, материаловедение. 2020. Т. 22. № 1. С. 79–87. <https://doi.org/10.15593/2224-9877/2020.1.09>.
10. Спирин В.А., Макаров В.Ф., Халтурин О.А. Производительность глобоидного зубохонингования // Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2020. № 3. С. 20–23. <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2020-3-20-23>.
11. Puoza J.C. Experimental study on abrasive water-jet polishing of cemented carbide and polycrystalline diamond tools // International Journal of Abrasive Technology. 2019. Vol. 9. № 3. P. 200–220. <https://doi.org/10.1504/IJAT.2019.10025181>.
12. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. М.: Машиностроение, 1974. 280 с.
13. Петров В.В. Гидродробеструйное упрочнение деталей и инструмента. М.: Машиностроение, 1977. 166 с.
14. Томленов А.Д. Некоторые задачи пластического формообразования металлов // Прочность металлов и конструкций: сб. ст. Киев: Академпериодика, 1975. С. 196–201.
15. Дударев А.С., Карманов В.В., Свирщев В.И., Катаева (Захарова) С.П. Моделирование формы единичного алмазного зерна // Современное машиностроение. Наука и образование. 2018. № 7. С. 545–557. <https://doi.org/10.1872/MMF-2018-47>.
16. Крагельский И.В. Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.
17. Друянов Б.А. О движении цилиндрического индентора по поверхности полупространства // Теория трения и износа: сб. статей. М.: Наука, 1965. С. 62–72.
18. Marchall E.A. Rolling contact with plastic deformation // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 1968. Vol. 16. Iss. 4. P. 243–254. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(68\)90032-X](https://doi.org/10.1016/0022-5096(68)90032-X).
19. Томленов А.Д. Теория пластического деформирования металлов. М.: Металлургия, 1972. 408 с.
20. Кулаков Ю.М., Хрульков В.А. Отделочно-зачистная обработка деталей. М.: Машиностроение, 1979. 216 с.
21. Ящерицын П.И., Мартынов А.Н., Гридин А.Д. Финишная обработка деталей уплотненным потоком свободного абразива. Минск: Наука и техника. 1978. 224 с.

#### References

1. Li Ning, Ding Jinfu, Hu Liguang, Wang Xiao, Lu Lirong, Huang Jianmeng. Preparation, microstructure and compressive properties of silicone gel/SiC composites for elastic abrasive. *Advanced composites letters*. 2018;27(3):122-128. <https://doi.org/10.1177/096369351802700305>.
2. Dimov Yu.V., Podashev D.B. Machining forces exerted by an elastic abrasive wheel. *Russian Engineering Research*. 2018;38(12):932-937. <https://doi.org/10.3103/S1068798X18120341>.
3. Nguyen Van Tho. Finite element modeling method of centrifugally rotary processing. *Applied Mechanics and Materials*. 2019;889:140-147.
4. Solovev A.N., Nguyen Van Tho, Tamarcin M.A., Panfilov I.A., Wang J.P. Modeling contact abrasive interactions in centrifugally rotary processing by finite element method. In: *Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications: Conference Proceedings*. 9–11 August 2018, Busan. Busan; 2018, p. 334-802.
5. Svirshchev V.I., Trubitsyn A.V., Tarasov S.V. Technological support of the surface roughness of the spigots made from the tough “Relit” material with the help of the optimization of the centerless grinding mode parameters. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2019;14(4):896-899.
6. Spirin V.A., Makarov V.F., Khalturin O.A. Calculation of thermodynamic parameters of geometrically complex parts at abrasive globoid gear machining. In: Radionov A., Kravchenko O., Guzeev V., Rozhdestvenskiy Y. (eds.). *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer; Cham, 2019. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1\\_91](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1_91).
7. Svirshchev V.I., Trubitsyn A.V., Tarasov S.V. Technological support of the surface roughness of the spigots made of high-hard material “relit” based on the optimization of the parameters of the centerless grinding mode. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2019;21(1):25-30. (In Russ.).
8. Han Quanli, Zhang Bin. Evolution of surface roughness of Ti plate in abrasive-less polishing. *Advanced Materials Research*. 2010;139-141:844–847. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.139-141.844>.
9. Makarov V.F., Vorozhcov N.A., Pesin M.V. Processing gears with prefabricated grinding and polishing wheels. *Vestnik Permskogo naciona'l'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie = Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*. 2020;22(1):79-87. (In Russ.). <https://doi.org/10.15593/2224-9877/2020.1.09>.
10. Spirin V.A., Makarov V.F., Khalturin O.A. Capacity of globoidal gear-honing. *Naukoyomkie tekhnologii v mashinostroenii = Science intensive technologies in mechanical engineering*. 2020;3:20-23. <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2020-3-20-23>.
11. Puoza J.C. Experimental study on abrasive water-jet polishing of cemented carbide and polycrystalline diamond tools. *International Journal of Abrasive Technology*. 2019;9(3):200-220. <https://doi.org/10.1504/IJAT.2019.10025181>.
12. Korchak S.N. *Performance of steel part grinding*. Moscow: Mashinostroenie; 1974, 280 p. (In Russ.).

13. Petrosov V.V. *Hydroshot peening hardening of parts and tools*. Moscow: Mashinostroenie; 1977, 166 p. (In Russ.).
14. Tomlenov A.D. Some issues of metal plastic shaping. In: *Prochnost' metallov i konstrukcij = Strength of metals and structures*. Kiev: Akademperiodika; 1975, p. 196-201. (In Russ.).
15. Dudarev A.S., Karmanov V.V., Svirshchev V.I., Kataeva (Zaharova) S.P. Modeling the shape of a single diamond grain. *Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie*. 2018;7:545-557. (In Russ.). <https://doi.org/10.1872/MMF-2018-47>.
16. Kragel'skij I.V. *Friction and wear*. Moscow: Mashinostroenie; 1968, 480 p. (In Russ.).
17. Druyanov B.A. On cylindrical indenter motion along the half-space surface. In: *Teoriya treniya i iznosa = Theory of friction and wear*. Moscow, Nauka, 1965, p. 62–72. (In Russ.).
18. Marchall E.A. Rolling contact with plastic deformation. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1968;16(4):243-254. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(68\)90032-X](https://doi.org/10.1016/0022-5096(68)90032-X).
19. Tomlenov A.D. *The theory of plastic deformation of metals*. Moscow: Metallurgiya; 1972, 408 p. (In Russ.).
20. Kulakov Yu.M., Hrul'kov V.A. *Finishing and brushing of parts*. Moscow: Mashinostroenie; 1979, 216 p. (In Russ.).
21. Yashchericyn P.I., Martynov A.N., Gridin A.D. *Finishing treatment of parts with a compacted stream of free abrasive*. Minsk: Nauka i tekhnika; 1978, 224 p. (In Russ.).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Димов Юрий Владимирович,

д.т.н., профессор,  
профессор кафедры конструирования  
и стандартизации в машиностроении,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия  
dimov-ura@yandex.ru

### Подашев Дмитрий Борисович,

к.т.н., доцент,  
доцент кафедры конструирования и стандартизации  
в машиностроении,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия  
dbp90@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-9112-9253>

### Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный  
вариант рукописи.

### Информация о статье

Статья поступила в редакцию 30.05.2022; одобрена  
после рецензирования 18.10.2022; принята к публикации 10.02.2023.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Yury V. Dimov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Professor of the Department of Mechanical Engineering  
Design  
and Standardization,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia  
dimov-ura@yandex.ru

### Dmitry B. Podashev,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Mechanical  
Engineering Design and Standardization,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia  
dbp90@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-9112-9253>

### Contribution of the authors

The authors contributed equally to the preparation of the article.

### Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

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

### Information about the article

The article was submitted 30.05.2022; approved after reviewing 18.10.2022; accepted for publication 10.02.2023.

## МАШИНОСТРОЕНИЕ



Научная статья

УДК 54.07:542.2:544.07:62-9:62-93

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-23-38>

## Лабораторный комплекс для моделирования и исследования работы встроенной теплозащиты на первом этапе производства энергоэффективных корпусов сосудов высокого давления

**Д.А. Еловенко<sup>1</sup>✉, П.Г. Пимштейн<sup>2</sup>, К.А. Кузнецов<sup>3</sup>**<sup>1</sup>*Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия*<sup>2,3</sup>*ИркутскНИИхиммаш, г. Иркутск, Россия*

**Резюме.** Цель – доказательство работоспособности созданного и запатентованного лабораторного испытательного комплекса, моделирующего работу под высоким давлением теплозащитного барьера корпусов сосудов большого давления и позволяющего определить теплопроводность материала теплозащиты. Моделирование работы теплозащитного барьера в испытательном комплексе осуществлялось в условиях высокого давления (до 50–70 МПа). Для создания и регулировки давления на слой теплозащиты использовался пресс разрывной машины Instron 5989, входящий в состав комплекса. Контроль изменения теплового поля и оценка эффективности работы теплоизоляционного материала осуществлялись расчетным путем на основании показаний температурных значений в контрольных точках верхнего и нижнего стержней установки. Данные значения были получены контактным (с использованием термопар поверхностного контроля температуры) либо бесконтактным (с использованием тепловизионного оборудования) способами. Проведено пилотное (тестовое) исследование работы теплозащиты из материала «теннисит» при различном давлении. Показано, что при давлении на материал 30 МПа толщина образца составляла 4,64 мм, при 40 МПа – 4,35 мм, а при давлении в 50 МПа – 4,00 мм. Установлено, что изменение давления практически не влияет на теплопроводность образца из исследуемого материала: при давлении в 30 МПа падение температуры на нем составило 198°C, при 40 МПа – 188°C, а при давлении в 50 МПа – 190°C. Показана эффективность моделирования работы теплозащиты исследуемого материала: при малой толщине слоя (в 4 мм) в условиях внутреннего давления в 50 МПа и рабочей температуры внутри корпуса оборудования до 300°C материал способен снизить уровень теплового воздействия на защищаемую часть конструкции ~ в 3 раза (с 298,6°C до 108,4°C). Представленная конструкция предназначена для моделирования и исследования поведения различных теплозащитных барьерных материалов, эксплуатируемых под высоким давлением. Результаты тестирования показали работоспособность предлагаемого лабораторного комплекса.

**Ключевые слова:** лабораторный комплекс, моделирование работы теплозащиты, теплоизоляционный материал, корпус сосуда давления, предпроизводственный этап в химическом машиностроении

**Для цитирования:** Еловенко Д.А., Пимштейн П.Г., Кузнецов К.А. Лабораторный комплекс для моделирования и исследования работы встроенной теплозащиты на первом этапе производства энергоэффективных корпусов сосудов высокого давления // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 1. С. 23–38. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-23-38>.

## MECHANICAL ENGINEERING

Original article

# Laboratory installation for simulating and investigating the performance of built-in thermal protection at the first stage of manufacturing energy-efficient shells for high-pressure reservoirs

Denis A. Elovenko<sup>1✉</sup>, Pavel G. Pimshtain<sup>2</sup>, Kirill A. Kuznetsov<sup>3</sup><sup>1</sup>*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*<sup>2,3</sup>*JSC IrkutskNIIhimmash, Irkutsk, Russia*

**Abstract.** In this work, we aim to validate the efficiency of the previously created and patented laboratory test installation for simulating the high-pressure operation of a thermal barrier of high-pressure reservoirs and for determining the thermal conductivity of thermal barrier materials. Simulation of thermal barrier operation in the test installation was carried out under elevated pressures (up to 50–70 MPa). The pressure on the thermal barrier layer was created and regulated by an Instron 5989 test machine as part of the installation. Control of temperature changes and evaluation of the thermal insulation performance were performed by a calculation method based on temperature readings in the control points of the upper and lower rods of the installation. These values were obtained by contact (using thermocouples of surface temperature control) or non-contact (using thermal imaging equipment) methods. A pilot study into the performance of a thermal barrier material “tennesite” was carried out at different pressures. At pressures of 30, 40 and 50 MPa, the thickness of the tested samples comprised 4.64 mm, 4.35 mm and 4.00 mm, respectively. Variations in pressure were established to have a negligible effect on the thermal conductivity of the studied material. Thus, at pressures of 30, 40 and 50 MPa, the temperature drop in the samples comprised 198°C, 188°C and 190°C, respectively. The installation showed high efficiency in simulating the thermal protection of the studied material. Thus, at a layer thickness of 4 mm under the internal pressure of 50 MPa and the working temperature inside the equipment housing up to 300°C, the material is capable of reducing the thermal impact on the protected part of the structure by about three times (from 298.6°C to 108.4°C). The presented design can be used when investigating the behavior of various thermal barrier materials operated under elevated pressures. The results obtained confirm the efficiency of the proposed laboratory installation.

**Keywords:** laboratory complex, modelling of thermal insulation operation, heat-insulating material, pressure vessel casing, pre-production stage in chemical engineering

**For citation:** Elovenko D.A., Pimshtain P.G., Kuznetsov K.A. Laboratory installation for simulating and investigating the performance of built-in thermal protection at the first stage of manufacturing energy-efficient shells for high-pressure reservoirs. *iPolytech Journal*. 2023;27(1):23-38. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-23-38>.

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие области применения новых теплоизоляционных материалов для повышения мощности и эффективности технологического оборудования, работающего под высокими давлением и температурой и используемого для химических, нефтехимических, ядерных и других производств [1–4], требует моделирования условий работы и исследования характеристик теплоизолирующих материалов с максимальным приближением к реальным условиям.

Практика использования технологического оборудования в нашей стране и за рубежом, которое не имеет специальной теплозащиты от нежелательного нагрева цилиндрической части корпуса сосуда, показывает наличие

характерных дефектов, возникающих в процессе эксплуатации. Так, например, в КНР эксплуатация реакторов для производства мочевины [5–7, 9–10], имеющих многослойный цилиндрический корпус, не защищенный слоем встроенной теплоизоляции [1–2], по истечении определенного периода времени приводит к появлению радиальных и кольцевых трещин в поперечном сечении кольцевых сварочных швов, соединяющих многослойные компоненты корпуса сосуда [5–10]. Также в результате негативного перегрева корпуса сосуда, не изолированного от теплового воздействия технологического (реакционного) пространства, появляются трещины на его поверхности (снаружи) либо на крайних наружных слоях [10–11]. По этим же причинам могут

разрушаться и витые многослойные конструкции корпусов сосудов [12].

Установка внутренней теплоизоляции над внутренним слоем в цилиндрическую часть корпуса сосуда с целью производства новых более совершенных и энергоэффективных единиц оборудования, повышающая его прочностные характеристики и снижающая вероятность возникновения трещин в различных зонах несущей части корпуса, невозможна без предварительного этапа тестирования и моделирования работы применяемого теплоизоляционного материала. Реализация данного этапа неразрывно связана со всем процессом производства новых единиц оборудования и является частью серьезной комплексной машиностроительной задачи.

Для моделирования поведения теплозащиты в реальных условиях требуется наличие лабораторного испытательного комплекса, состоящего из установки, моделирующей работу теплозащитного барьера под высоким давлением. Известно оборудование (приборы и установки), моделирующее работу материала как теплозащитного барьера. Объединяют такое оборудование принцип их применения и физические явления, на которых основана возможность их применения. В остальном это уникальные объекты.

В работе [13] предложена экспериментальная установка для измерения теплопроводности твердых теплоизоляционных материалов с погрешностью не более 10%. Также известна установка для экспериментального определения тепловых характеристик материалов, входящих в состав транспортных упаковочных комплектов в качестве элементов теплоизоляции [14]. Еще одна установка для эффективных измерений теплопроводности изоляции в диапазоне температур от 300 до 1650°C в соответствии с ASTM C201-93 (Стандартный метод испытания на теплопроводность огнеупоров от англ. Standard Test Method for Thermal Conductivity of Refractories) и DIN V ENV-1094 (Огнеупорные изделия для изоляционных целей, от нем. Feuerfeste Erzeugnisse für Isolationszwecke) с диапазоном теплопроводностей 0,025–2 Вт/м·К исследуемого изотропного либо неизотропного материала известна из [15].

Экспериментальные установки для определения теплопроводности образцов пористых теплоизоляционных материалов представлены в работах [16–17]. Они могут моделировать поведение теплоизоляции как в стационарной, так и в динамической зоне при различных пространственных и временных градиентах температуры.

Установка для моделирования работы материала в условиях стационарного теплового потока и исследования теплопроводности конструкционных материалов в твердом агрегатном состоянии и области высоких температур представлена в [18].

В [19, 20] представлено оборудование, позволяющее моделировать и исследовать процесс теплопередачи по толщине многослойной теплоизоляции и коэффициент измерения теплопроводности различных материалов. Измерение коэффициентов теплопроводности строительных сыпучих материалов, различных упаковок и тары также возможно с помощью разработки [21], а с применением установки [22] возможно определение теплопроводности литейной формы.

Область применения известного прибора ИТ-3, моделирующего работу теплоизоляции для исследования широкого класса твердых тел и материалов изучается в [23].

Оборудование [24] представлено университетом Цинь-Хуа для моделирования теплозащиты и определения эффективной теплопроводности с целью повышения точности расчетов и анализа безопасности конструкции китайского высокотемпературного газоохлаждаемого реактора.

Известен также прибор для моделирования работы теплоизоляции в диапазоне 100–500 Вт/(мК) с погрешностью измерения не более 5% и температурой до 70°C [25]. Еще одна установка, работающая уже в более низком диапазоне от 0,04 до 2,0 Вт/(мК) с погрешностью измерения не более 7% и временем моделирования процесса от 1 до 30 мин, показана в [26].

Отметим также и экспериментальную установку для измерения теплопроводности грунтов и горных пород [27].

Проведенный анализ на данный момент показал отсутствие какого-либо оборудования

или приборов, позволяющих моделировать работу теплозащиты под действием высокого давления. Стоит только отметить существование установки для измерения теплопроводности осадочных горных пород при высоких давлениях до 250 МПа и температурах (до 300°C) на основе метода линейного источника тепла постоянной мощности [28]. Однако целевой функцией этого оборудования не является решение комплексной машиностроительной задачи, обозначенной нами выше.

Также известна весьма простая установка для моделирования и исследования теплозащитной функции материалов, в которой образец помещают в толстостенную медную трубку с одним запорным концом [29].

Целью настоящего исследования является предложение по реализации возможности моделирования и исследования поведения и работы теплозащиты корпусов сосудов высокого давления в реальных условиях как предпроизводственного этапа решения комплексной проблемы в химическом машиностроении, направленной на производство новых энергоэффективных единиц оборудования с более высокими прочностными характеристиками.

Авторами работы спроектировано, изготовлено и оттестировано оригинальное оборудование специально для изучения геометрических и силовых параметров пресса разрывной машины фирмы «Instron» (в работе использовалась универсальная электромеханическая испытательная система Instron 5989). Оно образует с прессом единый лабораторный комплекс, позволяющий моделировать и исследовать поведение и работу теплоизоляционных материалов с целью защиты конструктивных узлов или элементов оборудования (сосудов, аппаратов, реакторов под высоким давлением) от высокотемпературного воздействия на первом этапе производственного цикла нового энергоэффективного оборудования. Представляемый нами лабораторный комплекс является абсолютно новым и уникальным объектом приборостроения, а входящая в его состав установка была запатентована авторами настоящей работы [30]. Проект и создание данного комплекса основаны на успешном опыте создания и

применения ранее предложенной установки для исследования контактной теплопроводности листового проката в работе [31].

## УСТРОЙСТВО УСТАНОВКИ

Установка (рис. 1) состоит из верхнего и нижнего стержней 1 и 2 из стали 12Х18Н10Т, основания 3, нижней проставки 4 и кожуха 6, а также расположенной между ними шайбы 5. Наружный теплоизоляционный кожух установки 7 выполнен цельным из асбосцементной трубы. Между верхним и нижним поршнями в контейнере 8, который может быть выполнен из керамического или другого материала с малой теплопроводностью, находится исследуемый материал. Перегородка 9 разделяет камеру нагревателя и функциональную камеру, в которой достигается стационарный тепловой поток. Кольцо 10 призвано обеспечить соосность между наружным теплоизоляционным кожухом и стержнями 1 и 2. В нижней части установки находится охладитель, питаемый холодной проточной водой через штуцеры входа и выхода 11. Сверху камеру с нагревателем закрывает асбестовый диск 12, а между двух технологических кожухов расположен асбестовый шнур 13. Верхний и нижний стержни (рис. 2 а и б) выполнены из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, коэффициенты теплопроводности которой в широком диапазоне температур исследованы в [32]. Верхняя часть поршня нагревателя имеет радиальную проточку для монтажа в ней спирального нагревательного элемента в теплопроводящей диэлектрической оболочке, которая исключает возможность замыкания электрического тока на стержни и корпус установки. Нижняя часть стержня охладителя имеет крестообразное сверление сквозными отверстиями, оси которых расположены в одной плоскости и перпендикулярно друг к другу (рис. 2 с) для повышения степени эффективности зоны охлаждения.

Основание 3 приварено к нижнему стержню ручной дуговой сваркой (см. рис. 1) и с нижней приставкой 4, шайбой 5 и штуцерами 11, которые сварены таким же способом, образует герметичную камеру охладителя, рассчитанную на давление проточной воды холодного водоснабжения.

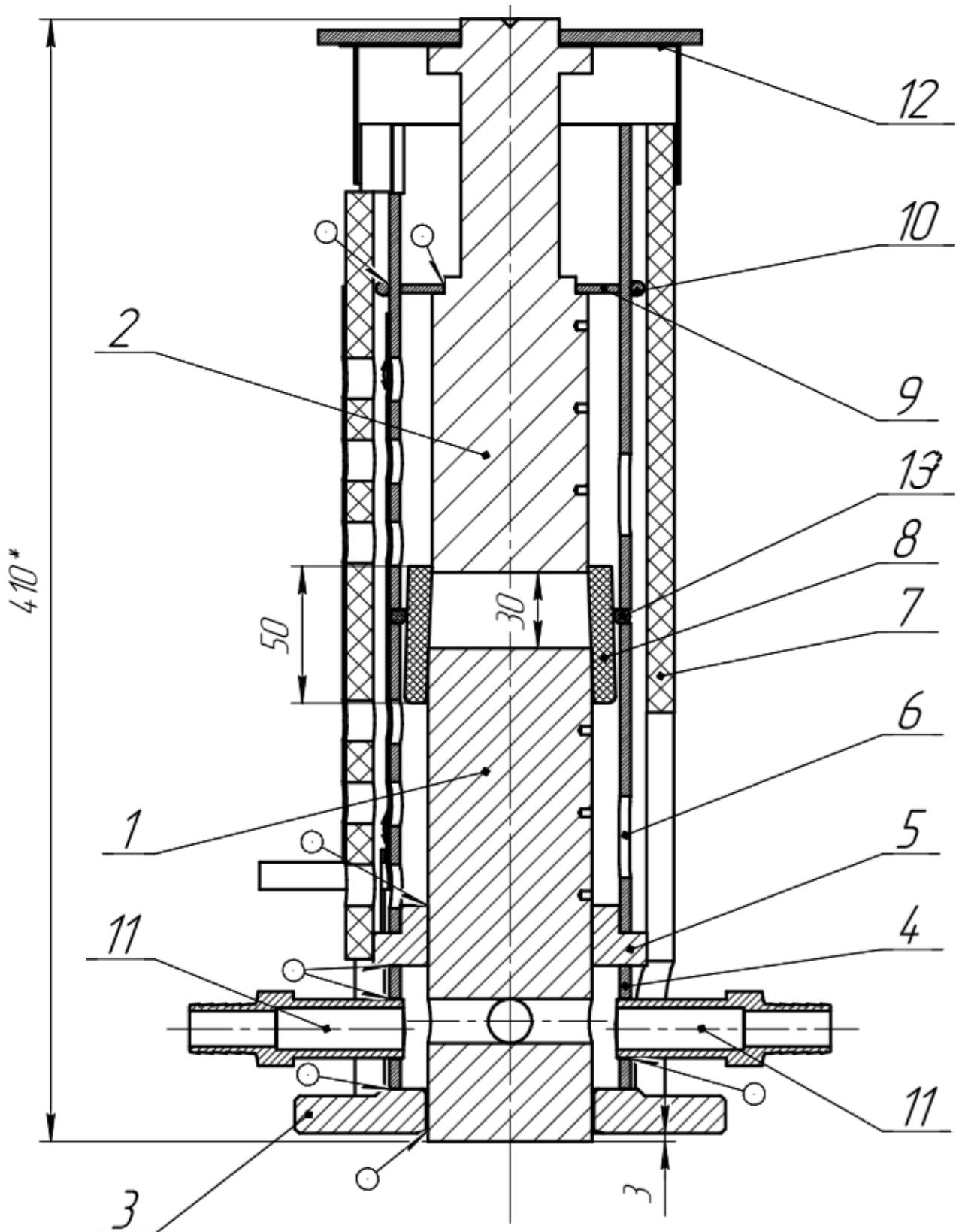


Рис. 1. Конструктивная схема основных элементов установки для исследования теплопроводности порошкообразных и гранулированных материалов под высоким давлением

Fig. 1. Design diagram of the main elements of the installation to study thermal conductivity of powdered and granular materials under high pressure

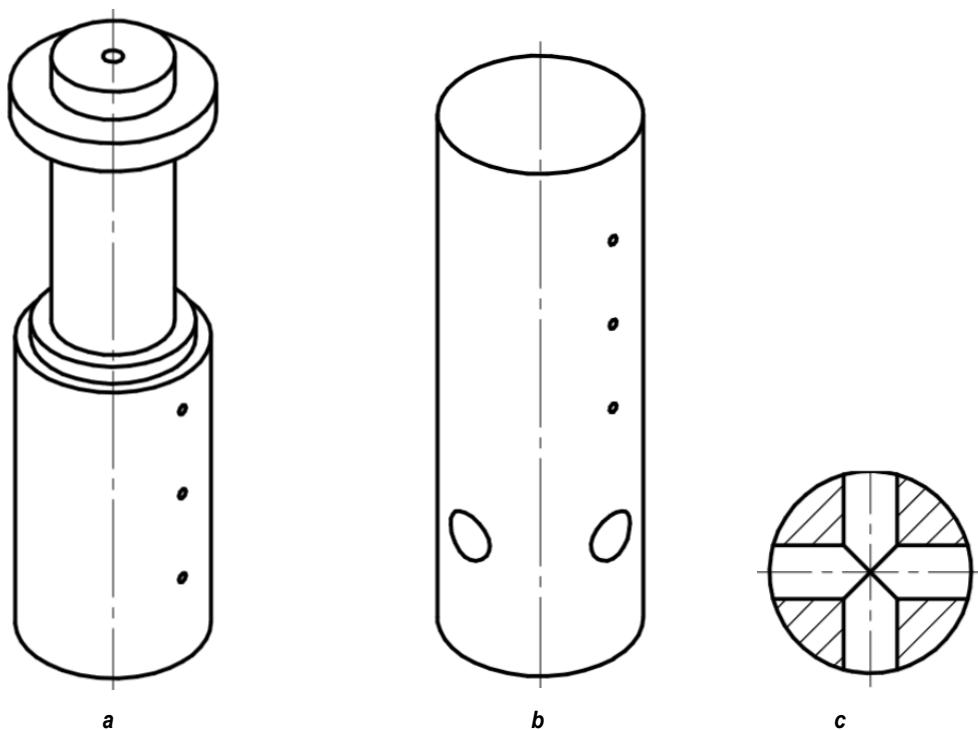


Рис. 2. Верхний стержень нагревателя (а), нижний стержень охладителя (б), крестообразное сверление нижнего стержня охладителя (с)

Fig. 2. Upper heater rod (a), lower cooler rod (b), cross drilling of the lower cooler rod (c)

Функциональная камера, в которой достигается стационарный тепловой поток, текущий через стержни и исследуемый материал, расположенный между ними, образована составным металлическим кожухом (рис. 3 а), который при монтаже обматывается специальной теплоизолирующей лентой из стеклоткани для полного исключения радиальных теплопотерь и поддержания эквивалентных температур стержней и этого кожуха. Металлический кожух отделен от внешней среды асбоцементной трубой 7 толщиной 10 мм (рис. 3 б) с целью исключения потерь тепла в окружающую среду. На асбоцементную трубу в целях безопасности одевается металлическая скоба (рис. 3 с), которая блокирует нежелательное смещение ее частей в случае разрушения от чрезмерного нагрева.

Отметим, что внутренняя поверхность составного металлического экрана в радиальном направлении должна находиться на расстоянии меньше или равном 10 мм от поверхности соответствующего стержня с целью исключения явления конвективного теплообмена (конвекции) [33]. А прокладка из асбестового шнура 13 (см. рис. 1) блокирует поток тепла между частями

кожуха 6 в осевом направлении, имитируя температуры верхнего и нижнего стержней.

Исследуемый материал представляет из себя сыпучее порошкообразное (гранулированное) вещество, способное располагаться между верхним и нижним стержнями в специальном контейнере 8, его материал должен иметь низкую тепловую проводимость и достаточную прочность, способную выдержать тепловое расширение нижнего поршня, на который он насаживается (одевается).

### ПРИНЦИП РАБОТЫ

Моделирование реальных условий работы теплозащиты и оценка ее эффективности для применения в процессе производства энергоэффективных корпусов сосудов в качестве встроенной теплоизоляции реализуется путем создания и поддержания стационарного теплового потока в цилиндрических частях контрольной зоны верхнего и нижнего поршней. Между которыми в замкнутом объеме расположен исследуемый материал, образующий вместе с ними аналог плоской многослойной (составной) стенки [33], по ней проpusкается тепловой поток.

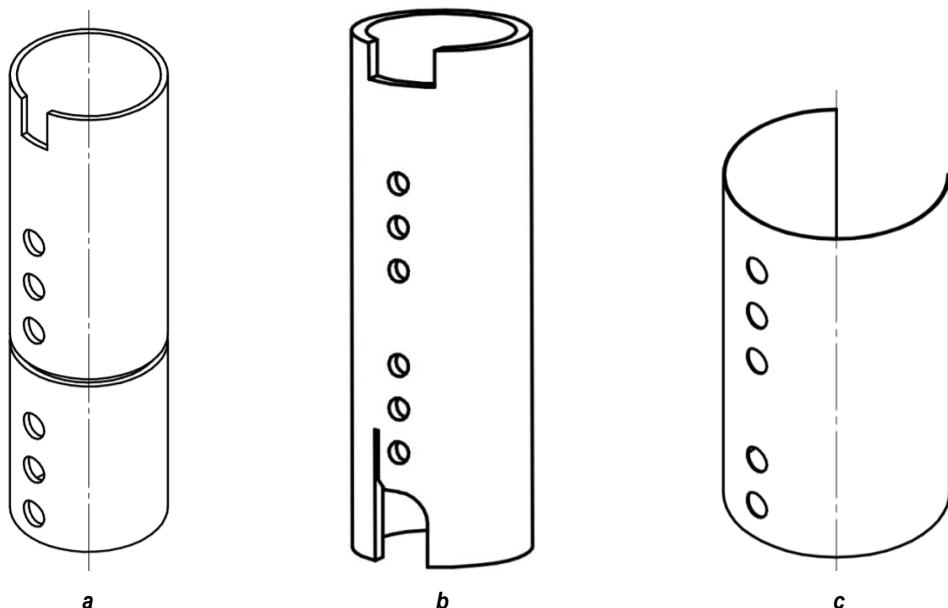


Рис. 3. Внутренний составной кожух из стали (а), наружный теплоизоляционный кожух из асбоземента (б) и защитная скоба из нержавеющей стали (с)  
Fig. 3. Composite inner casing made of steel (a), external heat insulation casing made of asbestos cement (b) and a protective bracket made of stainless steel (c)

Источником тепла является нагревательный элемент, выполненный из скрученной в спираль проволоки из никрома, на нее одеты теплопроводящие диэлектрические кольца (рис. 4). Он размещается в специально изготовленной конструкции (проточке верхнего стержня) (см. рис. 2 а) во время монтажа установки перед экспериментом.

Охладитель представляет собой замкнутую камеру, сваренную ручной дуговой сваркой с нижним цилиндром воедино (см. рис. 1), и имеет два штуцера для подачи проточной холодной воды и ее отвода. Заполнение камеры охладителя обеспечивается наличием давления при подаче, которое поддерживается в бытовой сети холодного водоснабжения.

Контроль теплового поля в функциональной камере установки осуществляется посредством тепловизионного оборудования через специальные отверстия, выполненные в обоих кожухах (см. рис. 3).

Установка предназначена для моделирования и исследования теплозащиты на предпроизводственном этапе с целью ее применения в процессе производства энергоэффективных корпусов сосудов высокого давления в качестве встроенной теплоизоляции и защищающей от теплового воздействия

технологического пространства основную (несущую) часть корпуса сосуда.



Рис. 4. Зона нагревателя на верхнем стержне установки  
Fig. 4. The heater zone on the upper rod of the installation

Конструктивная компоновка и габаритные размеры установки были спроектированы специально под геометрические характеристики пресса разрывной машины Instron 5989. Для обеспечения базирования установки на нижней траверсе пресса был предусмотрен небольшой выход торцевой поверхности нижнего стержня охладителя за плоскость основания размером 3 мм (см. рис. 1). В свою очередь, свободная торцевая поверхность стержня нагревателя имеет центрирующее углубление (см. рис. 1 и 2 а), в котором размещается металлический сферический упор (рис. 5), направляющий вектор приложения сжимающей силы строго к оси вращения стержня нагревателя и создающий максимально равномерное сжатие им исследуемого материала в контейнере.

Стоит отметить, что применение такого сферического упора на прессе разрывной машины Instron 5989 вовсе не обязательно, так как ее верхняя траверса имеет сферический поворотный шарнир, который уже выполняет функцию выравнивания сжимающего усилия и обеспечивает вертикальность его направления.

После сборки установки и ее монтажа между траверсами пресса (универсальной разрывной машины) (рис. 5) нагревательный элемент подключается к электрической сети переменного тока напряжением 220 В через специальный регулируемый блок питания с возможностью точного изменения напряже-

ния с 220 до 50 В и расчетной нагрузкой нагревательного элемента до 4 кВт. Таким образом, благодаря прибору изменения величины напряжения появляется возможность точного управления температурой нагрева. Регулирование температурного режима также осуществляется с помощью охладителя путем подвода и пропускания через него проточной холодной воды с различной скоростью протекания либо создания циркуляции специальной охлаждающей жидкости посредством специальных шлангов.

## ИСПЫТАНИЕ

Испытание и настройка работы лабораторного комплекса проходила в Научно-исследовательской лаборатории испытания строительных материалов и конструкций Иркутского национального исследовательского технического университета (рис. 6).

Для обеспечения работоспособности комплекса и выполнения им целевой функции моделирования работы теплозащиты достаточно получить стационарный тепловой поток в направлении от нагревателя к охладителю при полном контакте торцевых поверхностей верхнего и нижнего стержней, контактное давление между которыми в процессе эксперимента и снятия показаний температуры составляло 25 МПа. Как показано в [33], тепловой поток справедливо рассматривать как проходящий через плоскую двухслойную стенку.

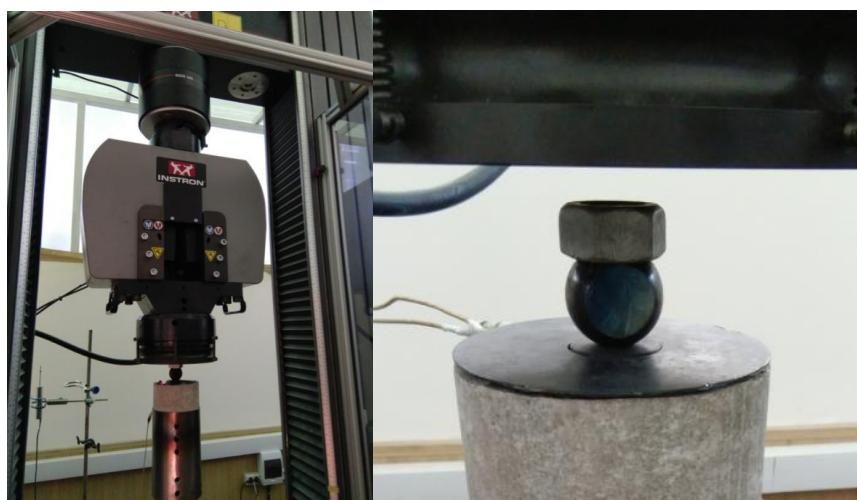


Рис. 5. Размещение (базирование) установки на прессе  
Fig. 5. Installation placing (basing) on the press

После разогрева установки возникновение стационарного теплового потока, когда его плотность на всех участках будет одинаковой, было принято считать постоянным к моменту отсутствия изменения температурных значений в верхней и нижней крайних контрольной точках, три из которых расположены на стержне нагревателя и две – на стержне охладильника.

Значения температуры регистрировались с помощью профессиональной тепловизионной камеры Flir T420. Повышая температуру нагревательного элемента с целевым значением температуры в верхней контрольной точке до 400°C, получены следующие значения при стационарном нагретом состоянии под давлением 25 МПа (рис. 7 а–е). Такие же значения температур были получены и с помощью термопары поверхностного контактного (точечного) метода измерения, которой фиксировались значения температур в

соответствующих контрольных точках.

Расстояние между смежными контрольными точками каждого стержня составляет 30 мм, а между смежными (ближайшими) контрольными точками стержня нагревателя и охладителя (точки 3 и 4) равно 65 мм (рис. 8).

В результате фиксации температурных показаний и расчетов плотностей тепловых потоков на каждом участке (таблица) установлено, что погрешность их распределения не превышала 7%, а средняя плотность общего теплового потока между точками 1 и 5 составила 43662,42 Вт/м<sup>2</sup>.

Максимально возможная температура в контрольной точке № 1, при которой возможно достигнуть равномерного распределения плотности теплового потока по всей функциональной камере, а, следовательно, сохранить и целевое назначение установки, равна 420°C. С увеличением температуры нагрева

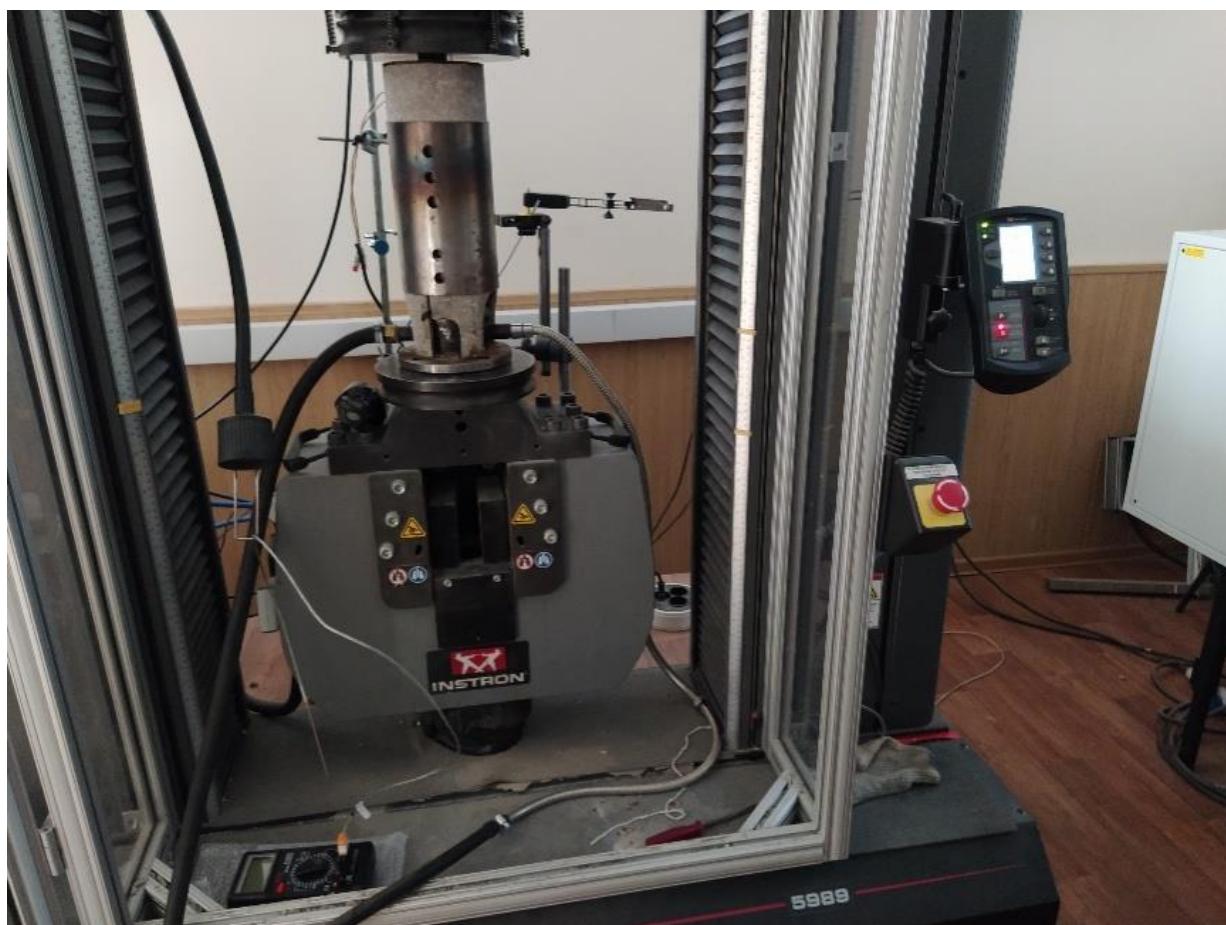
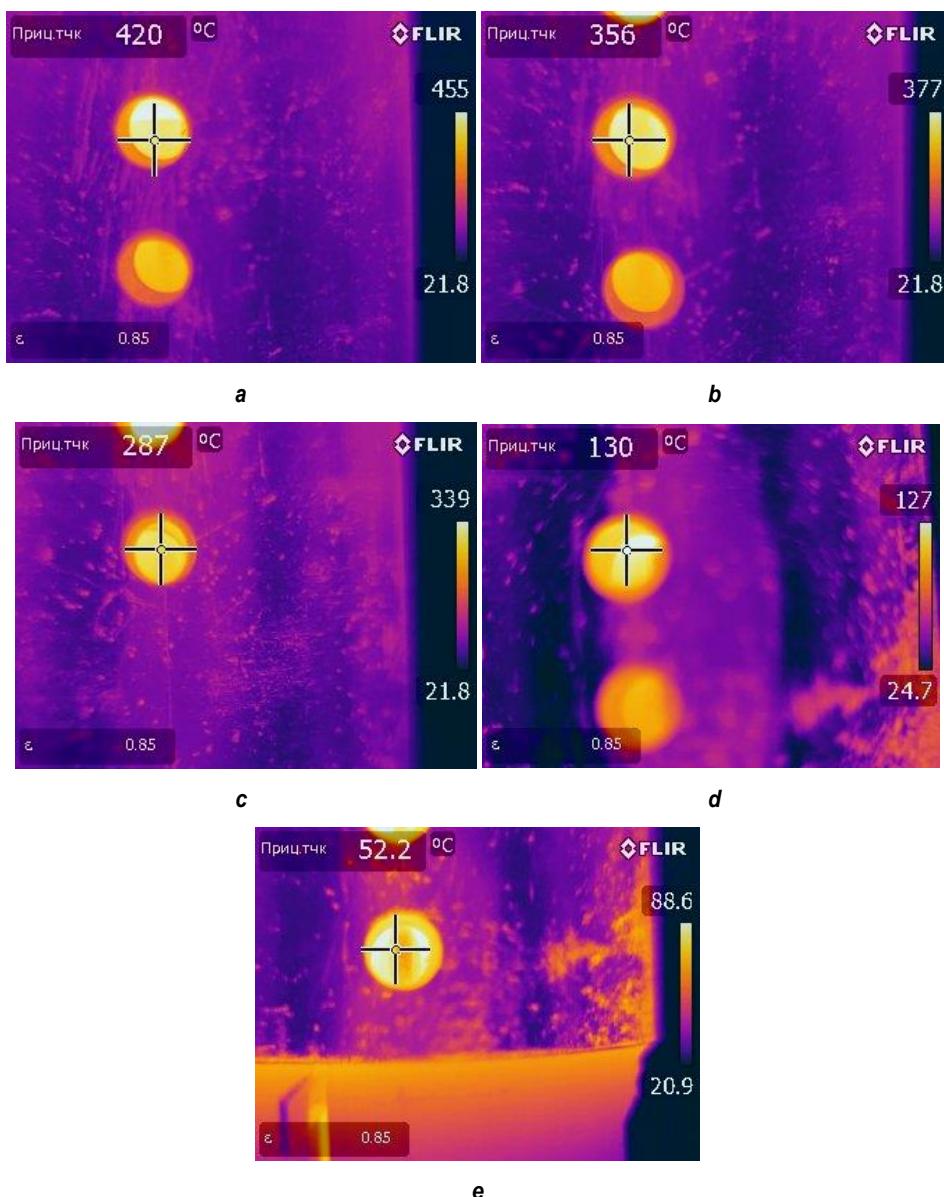


Рис. 6. Рабочее положение установки между траверсами прессы разрывной машины Instron 5989  
Fig. 6. Installation service position between the press crossbars of the Instron 5989 tensile tester



**Рис. 7. Температурные показания, снятые тепловизионной камерой Flir T420**  
**a, b, c – контрольные точки на цилиндрической поверхности стержня нагревателя;**  
**d, e – контрольные точки на цилиндрической поверхности стержня охладителя**

**Fig. 7. Temperature readings taken by the Flir T420 thermal imaging camera**

**a, b, c – control points on the cylindrical surface of the heater rod;**  
**d, e – control points on the cylindrical surface of the cooler rod**

выше этого значения распределение плотности теплового потока по участкам функциональной камеры становится все более неравномерным. Связано это как с теплопроводящими свойствами стали 12Х18Н10Т [32], так и, что является основополагающим фактором, с геометрическими размерами и особенностями компоновки установки. При этом стоит отметить, что высота установки немного более 400 мм (см. рис. 2) является

практически предельно возможным размером, который может быть установлен между траверсами прессы разрывной машины Instron 5989 при ее работе на сжатие. Диаметр стержней установки также был спроектирован с учетом возможного усилия машины Instron 5989 на сжатие, для обеспечения целевого значения по давлению на исследуемый в установке материал до 70 МПа.

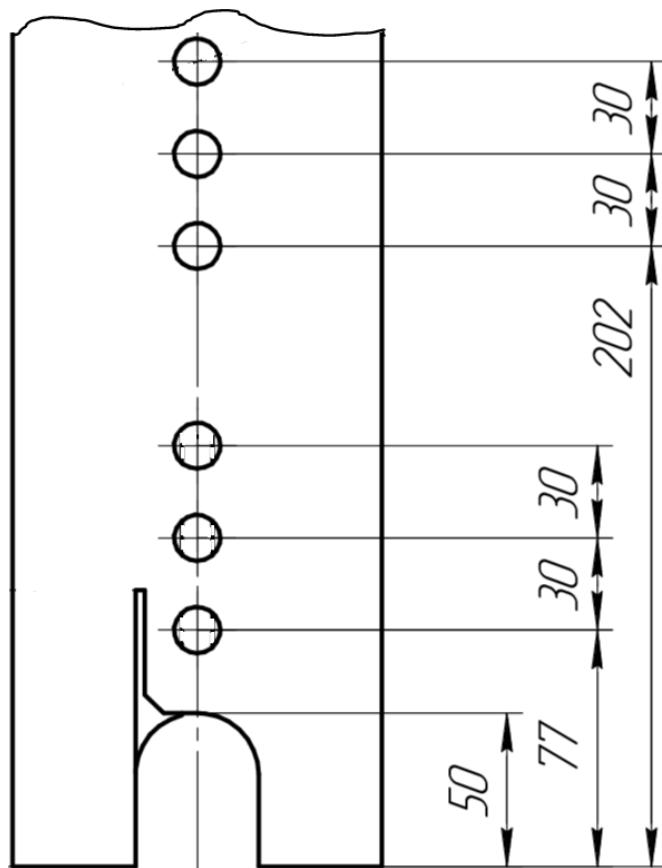


Рис. 8. Расположение контрольных окон на наружном (асбокементной трубе) и внутреннем кожухах экспериментальной камеры установки  
 Fig. 8. Location of control windows on the outer (asbestos cement pipe) and inner casings of the experimental installation chamber

Результаты расчета плотностей тепловых потоков между контрольными точками  
 Calculation results of heat flux densities between control points

№ участка	Длина участка $l$ , м	Разница температур $\Delta T$ , °C	Плотность теплового потока $q$ , Вт/м <sup>2</sup>	Погрешность $\varepsilon_q$ , %
1–2	0,03	64	43300,3	0,829
2–3	0,03	69	44350,9	1,577
3–4	0,065	157	43436,7	0,517
4–5	0,03	78	40566,5	7,091

С целью демонстрации возможности моделирования работы теплозащиты под высоким давлением на лабораторном комплексе, представленном авторами статьи выше, было проведено пилотное (тестовое) исследование материала «теннисит» под высоким давлением. При давлении в 30 МПа толщина образца составляла 4,64 мм, при давлении в 40 МПа – 4,35 мм, а при давлении в 50 МПа – 4,00 мм. Изменение давления практически не

влияет на теплопроводность образца из теннисита (рис. 9) и при давлении в 30 МПа падение температуры на нем составило 198°C, при давлении в 40 МПа – 188°C, а при давлении в 50 МПа – 190°C.

Представленный график демонстрирует возможность моделирования работы материала на лабораторном комплексе и показывает эффективность применения теннисита в качестве теплозащиты.

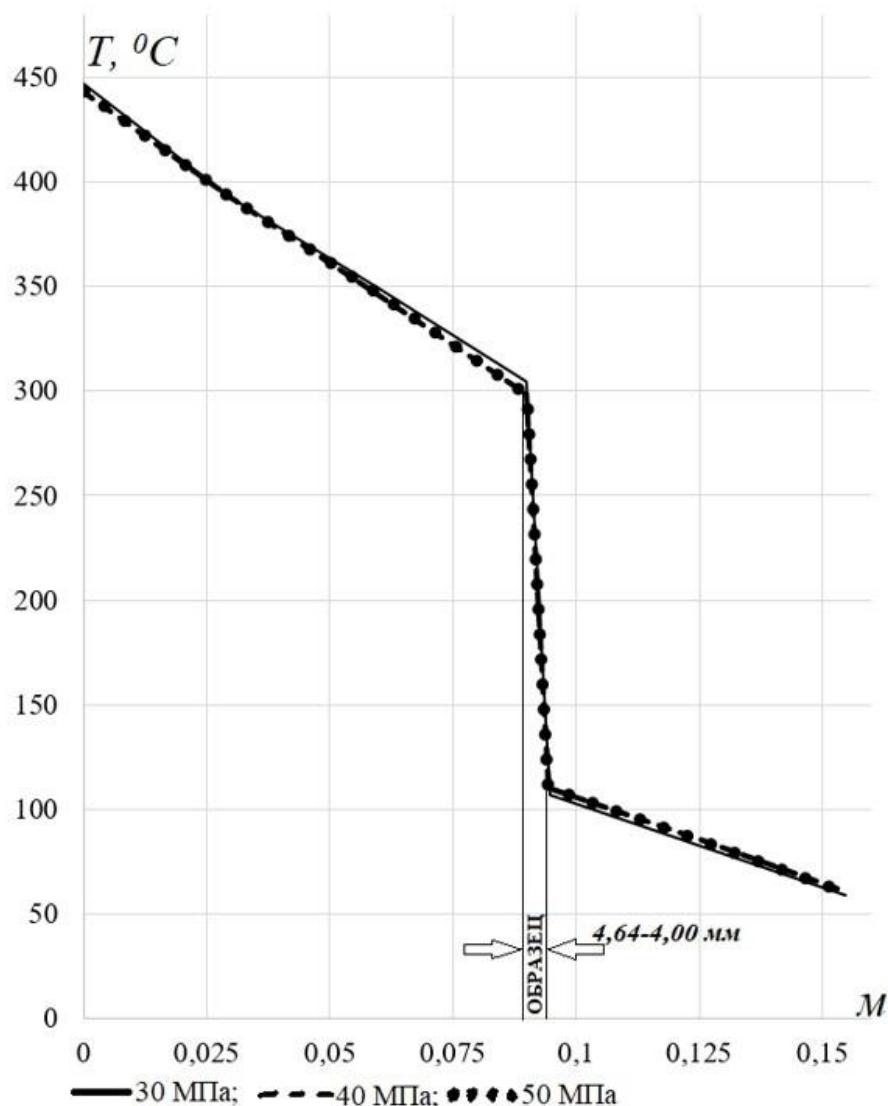


Рис. 9. График падения температуры на образце из теннисита при давлении 30–50 МПа  
Fig. 9. Graph of temperature drop on a Tennisite sample at the pressure of 30-50 MPa

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный лабораторный комплекс для моделирования и исследования поведения и работы внутренней теплоизоляции новых энергоэффективных корпусов сосудов высокого давления с более высокими прочностными характеристиками на первом этапе их производства в химическом машиностроении позволяет моделировать работу сыпучих неметаллических теплоизоляционных материалов под высоким давлением.

Результаты тестирования показывают работоспособность лабораторного комплекса и эффективность моделирования работы теплозащиты на примере материала «теннисит».

Существует возможность гибкой регулировки параметров теплового поля (изменения до необходимого значения вручную), что позволяет эмитировать температуру внутренней среды (реакционного или технологического пространства внутри какого-либо оборудования) и управлять ей как целевым параметром [1, 34]. После перехода системы в состояние стационарного теплового поля определяется теплопроводность исследуемого материала. Таким образом, становится возможной оценка эффективности теплозащитных характеристик исследуемого под высоким давлением материала.

### **Список источников**

1. Еловенко Д.А. Перспективные направления развития автоклавов высокого давления // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2010. № 1. С. 277–279.
2. Пимштейн П.Г., Еловенко Д.А. Исследование под давлением оболочки со встроенными в стенку нагревательными элементами и слоем теплоизоляционного материала // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2011. № 4. С. 17–22.
3. Elovenko D., Kräusel V. The study of thermal conductivity of asbestos cardboard and fire clay powder to assess the possibility of their application in prefabricated structures of cylindrical housings of pressure vessels // Materials Today: Proceedings. 2019. Vol. 19. Part 5. P. 2389–2395. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.041>.
4. Graf A., Elovenko D., Kräusel V., Hirsch A. Mathematic model for describing the stress-tension behavior of an autoclave with integrated heating element // Technologies for Lightweight Structures. 2018. Vol. 2. Iss. 1. P. 1–13. <https://doi.org/10.21935/tls.v2i1.108>.
5. Song Mingda, Wang Weiqiang, Zhao Yafan, Cui Yuliang. Urea reactor integrity evaluation based on failure analysis // Journal of Pressure Vessel Technology. 2007. Vol. 129. Iss. 4. P. 744–753. <https://doi.org/10.1115/1.2767368>.
6. Wang Weiqiang, Aiju Li, Zhu Yanyong, Yao Xiaojing. The explosion reason analysis of urea reactor of Pingyin // Engineering Failure Analysis. 2009. Vol. 16. Iss. 3. P. 972–986. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2008.08.006>.
7. Xu Shugen, Wang Weiqiang, Li Mengli, Song Mingda. A modified weld structure of layered urea reactor based on stress analysis and leak detection // Pressure Vessels and Piping Conference (Washington 18–22 July 2010). Washington, 2010. P. 557–562. <https://doi.org/10.1115/PVP2010-25225>.
8. Zheng Jianjun, Han Kuo, Wang Yingjun, Shi Xianda. Breaking cause analysis on a 110 kV overhead grounding wire (OGW) // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1550. P. 032098. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1550/3/032098>.
9. Song Mingda, Wang Weiqiang, Cao Huaiyang, Wang Lixin, Zhang Bo. Multilayer urea reactor safety evaluation based on acoustic emission examination // Pressure Vessels and Piping Conference (Toronto, 15–19 July 2012). Toronto, 2012. P. 515–524. <https://doi.org/10.1115/PVP2012-78135>.
10. Cao Huai Xiang, Wang Chun Mao, Qiu Xing Qi. Analysis on backside cracks in 316LMod inner linings of urea reactors // Applied Mechanics and Materials. 2012. Vol. 184–185. P. 858–863. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.184-185.858>.
11. Xu Shugen, Wang Chong, Zhao Yanling. Residual stress in the welding joint of layered cylindrical vessels including the weld clad effect // Journal of Pressure Vessel Technology. 2015. Vol. 137. Iss. 4. P. 041405. <https://doi.org/10.1115/1.4028726>.
12. Zheng J.Y., Deng G.D., Chen Y.J., Sun G.Y., Hu Y.L., Zhao L.M., et al. Experimental investigation of discrete multilayered vessels under internal explosion // Combustion, Explosion, and Shock Waves. 2006. Vol. 42. Iss. 5. P. 617–622.
13. Kovaleva I.V., Korablev I.V., Azima Yu.I. A nonstationary method and experimental equipment for measuring the thermal conductivity of heat insulators // Measurement Techniques. 2005. Vol. 48. Iss. 8. P. 789–797. <https://doi.org/10.1007/s11018-005-0222-x>.
14. Пат. № 2289126, Российская Федерация, G01N 25/32. Установка для исследования теплопроводности теплоизоляционных материалов / М.М. Пеньков, М.В. Веденников, И.В. Наумчик; заявитель и патентообладатель Министерство обороны Российской Федерации, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского. Заявл. 18.04.2005; опубл. 10.12.2006.
15. Barth G., Gross U., Wulf R. A new panel test facility for effective thermal conductivity measurements up to 1650°C // International Journal of Thermophysics. 2007. Vol. 28. Iss. 5. P. 1668–1678. <https://doi.org/10.1007/s10765-007-0272-1>.
16. Марюшин Л.А., Сенникова О.Б., Курочкин И.А. Экспериментальное исследование теплопроводности пористых теплоизоляционных материалов // Известия Московского государственного индустриального университета. 2009. № 4. С. 29–34.
17. Падерин Л.Я., Прусов Б.В., Токарев О.Д. Исследование теплопроводности пористых теплоизоляционных материалов при высоких температурах // Ученые записки ЦАГИ. 2011. Vol. 42. № 4. С. 77–83.
18. Желобцов Е.А., Исааков Э.Х., Пелецкий В.Э., Тюфтяев А.С. Метод исследования теплопроводности конструкционных материалов и экспериментальная установка // Перспективные материалы. 2009. № 6. С. 98–102.
19. Исаев Г.Ю., Сучков А.Ф. Установка для исследования многослойных преград из огнеупорных и теплоизоляционных материалов // Современные материалы, техника и технология: матер. II Междунар. науч.-практ. конф. (г. Москва, 25 декабря 2012 г.). Москва, 2012. С. 125–128.
20. Селезnev Н.П., Чернов В.В., Сучков А.Ф. Разработка новых лабораторных установок на кафедре теплофизики и экологии МГВМИ // Современные автомобильные материалы и технологии (Саммит-2011): сб. статей III Междунар. науч.-техн. конф. (г. Курск, ноябрь, 2011 г.). Курск: Юго-Зап. гос. ун-т., 2011. С. 118–121.
21. Танганов Б.Б., Багаева Т.В., Бубеева И.А., Ханхасаев Г.Ф., Гармаев В.Ч. Чувствительная установка для измерения теплопроводности строительных и сыпучих материалов, тары и упаковок // Вестник Бурятского государственного университета. 2012. № 3. С. 131–134.
22. Савинов А.С. Установка по определению теплопроводности литьевой формы // Литейные процессы. 2014. № 13. С. 68–71.
23. Рогов И.В., Полунина Н.Ю., Рожков А.В., Жуков Н.П. Измерительная система на базе прибора ИТ-3 для исследования теплопроводности материалов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. № 8. С. 31–34.

24. Ren C., Yang X., Li C., Sun Y., Liu Z. Modeling of the heat transfer characteristics of the effective thermal conductivity test facility for high temperature gas-cooled reactors // Journal of Tsinghua University. 2015. Vol. 55. Iss. 9. P. 991–997.
25. Cherepanov V.Y., Lozinskaya O.M., Rybak N.I., Yamshanov V.A. Measuring equipment and a comparator for measuring high values of thermal conductivity // Measurement techniques. 2009. Vol. 52. Iss. 10. P. 1107–1111. <https://doi.org/10.1007/s11018-010-9403-3>.
26. Bol'shev K.N., Zarichnyak Y.P., Ivanov V.A. Determination of thermal conductivity by the method of the initial stage of warming up a sample by a constant heat flux // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2018. Vol. 91. Iss. 5. P. 1342–1346. <https://doi.org/10.1007/s10891-018-1867-z>.
27. Blázquez C.S., Martín A.F., Nieto I.M., González-Aguilera D. Measuring of thermal conductivities of soils and rocks to be used in the calculation of a geothermal installation // Energies. 2017. Vol. 10. Iss. 6. P. 795. <https://doi.org/10.3390/en10060795>.
28. Верноградский В.А., Попов Ю.А., Миклашевский Д.Е. Метод и установка для измерений теплопроводности горных пород при высоких давлениях и температурах // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2003. № 5. С. 47–51.
29. Shishkina R.A., Zemlyanskayab A.P., Beketov A.R. High performance thermal grease with aluminum nitride filler and an installation for thermal conductivity investigation // Solid State Phenomena. 2018. Vol. 284. P. 48–53. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.284.48>.
30. Пат. № 2783366, Российской Федерации, G01N 25/18, G01N 25/32, G01N 3/18. Установка для определения теплопроводности материалов под давлением / Д.А. Еловенко, П.Г. Пимштейн, К.А. Кузнецов; заявитель и патентообладатель Иркутский национальный исследовательский технический университет. Заявл. 16.02.2022; опубл. 11.11.2022.
31. Барсук Е.Г., Пимштейн П.Г., Жукова В.Н. Определение контактной теплопроводности листового проката // Заводская лаборатория. 1972. № 3. С. 305–306.
32. Станкус С.В., Савченко И.В., Багинской А.В., Верба О.И., Прокопьев А.М., Хайрулин Р.А. Коэффициенты теплопроводности нержавеющей стали 12X18H10T в широком интервале температур // Теплофизика высоких температур. 2008. Т. 46. № 5. С. 795–797. <https://doi.org/10.1134/S0018151X08050222>.
33. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи: 2-е изд. М.: Энергия, 1977. 344 с.
34. Еловенко Д.А., Пимштейн П.Г., Репецкий О.В., Татаринов Д.В. Экспериментальное исследование модели автоклава для гидротермального синтеза минералов // Вестник Байкальского союза стипендиатов DAAD. 2010. № 1. С. 11–19.

## References

1. Elovenko D.A. Future directions of the development of high-pressure autoclaves. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2010;1:277-279. (In Russ.).
2. Pimshteyn P.G., Elovenko D.A., Tatarinov A.D. The research of enclosure under pressure with heating element installed in wall with heat insulation material layer. *Sovremennye tehnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye = Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2011;4:17-22. (In Russ.).
3. Elovenko D., Kräusel V. The study of thermal conductivity of asbestos cardboard and fire clay powder to assess the possibility of their application in prefabricated structures of cylindrical housings of pressure vessels. *Materials Today: Proceedings*. 2019;19(5):2389-2395. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.041>.
4. Graf A., Elovenko D., Kräusel V., Hirsch A. Mathematic model for describing the stress-tension behavior of an autoclave with integrated heating element. *Technologies for Lightweight Structures*. 2018;2(1):1-13. <https://doi.org/10.21935/tls.v2i1.108>.
5. Song Mingda, Wang Weiqiang, Zhao Yafan, Cui Yuliang. Urea reactor integrity evaluation based on failure analysis. *Journal of Pressure Vessel Technology*. 2007;129(4):744-753. <https://doi.org/10.1115/1.2767368>.
6. Wang Weiqiang, Aiju Li, Zhu Yanyong, Yao Xiaojing. The explosion reason analysis of urea reactor of Pingyin. *Engineering Failure Analysis*. 2009;16(3):972-986.
7. Xu Shugen, Wang Weiqiang, Li Mengli, Song Mingda. A modified weld structure of layered urea reactor based on stress analysis and leak detection. In: *Pressure Vessels and Piping Conference*. 18–22 July 2010, Washington. Washington; 2010, p. 557-562. <https://doi.org/10.1115/PVP2010-25225>.
8. Zheng Jianjun, Han Kuo, Wang Yingjun, Shi Xianda. Breaking cause analysis on a 110 kV overhead grounding wire (OGW). *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1550:032098. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1550/3/032098>.
9. Song Mingda, Wang Weiqiang, Cao Huaiyang, Wang Lixin, Zhang Bo. Multilayer urea reactor safety evaluation based on acoustic emission examination. In: *Pressure Vessels and Piping Conference*. 15–19 July 2012, Toronto. Toronto; 2012, p. 515-524. <https://doi.org/10.1115/PVP2012-78135>.
10. Cao Huai Xiang, Wang Chun Mao, Qiu Xing Qi. Analysis on backside cracks in 316LMod inner linings of urea reactors. *Applied Mechanics and Materials*. 2012;184-185:858-863. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.184-185.858>.
11. Xu Shugen, Wang Chong, Zhao Yanling. Residual stress in the welding joint of layered cylindrical vessels including the weld clad effect. *Journal of Pressure Vessel Technology*. 2015;137(4):041405. <https://doi.org/10.1115/1.4028726>.
12. Zheng J.Y., Deng G.D., Chen Y.J., Sun G.Y., Hu Y.L.,

- Zhao L.M., et al. Experimental investigation of discrete multilayered vessels under internal explosion. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2006;42(5):617-622.
13. Kovaleva I.V., Korablev I.V., Azima Yu.I. A nonstationary method and experimental equipment for measuring the thermal conductivity of heat insulators. *Measurement Techniques*. 2005;48(8):789-797.  
<https://doi.org/10.1007/s11018-005-0222-x>.
14. Pen'kov M.M., Vedernikov M.V., Naumchik I.V. *An installation to study thermal conductivity of heat-insulating materials*. Patent RF, no. 2289126; 2006. (In Russ.).
15. Barth G., Gross U., Wulf R. A new panel test facility for effective thermal conductivity measurements up to 1650°C. *International Journal of Thermophysics*. 2007;28(5):1668-1678. <https://doi.org/10.1007/s10765-007-0272-1>.
16. Maryushin L.A., Sennikova O.B., Kurochkin I.A. Experimental study of thermal conductivity of porous heat-insulating materials. *Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta = Proceedings of Moscow State Industrial University*. 2009;4:29-34. (In Russ.).
17. Paderin L.Ya., Prusov B.V., Tokarev O.D. Investigation of heat conductivity of porous thermal insulation materials at high temperatures. *Uchenye zapiski CAGI*. 2011;42(4):77-83. (In Russ.).
18. Zhelobtsov E.A., Isakaev E.H., Peleckij V.E., Tyuftyaev A.S. A method and experimental installation for studying structural material thermal conductivity. *Journal Perspektivnye materialy*. 2009;6:98-102. (In Russ.).
19. Isaev G.Yu., Suchkov A.F. An installation for studying multilayer barriers from refractory and heat-insulating materials. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologiya: materialy II Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Modern materials, equipment and technology: materials of the 2<sup>nd</sup> International scientific and practical conference*. 25 December 2012, Moscow. Moscow; 2012, p. 125-128. (In Russ.).
20. Seleznev N.P., Chernov V.V., Suchkov A.F. Development of new laboratory facilities at the Department of Thermal Physics and Ecology of the Moscow State Evening Metallurgical Institute. *Sovremennye avtomobil'nye materialy i tekhnologii (Summit-2011): sbornik statej III Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii = Modern Automotive Materials and Technologies (Summit-2011): collection of articles of the 3<sup>d</sup> International scientific and technical conference*. November 2011, Kursk. Kursk: Southwest State University; 2011, p. 118-121. (In Russ.).
21. Tanganov B.B., Bagaeva T.V., Bubeeva I.A., Khankhasaev G.F., Garmaev V.Ch-D. Sensitive plant for measurement of thermal conductivity of building and loose materials, packaging and packing. *Vestnik Burjatskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2012;3:131-134. (In Russ.).
22. Savinov A.S. Installation for determining casting mold thermal conductivity. *Litejnye processy*. 2014;13:68-71. (In Russ.).
23. Rogov I.V., Polunina N.Yu., Rozhkov A.V., Zhukov N.P. Measuring system based on an IT-3 device used to study the thermal conductivity of materials. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov = Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 2015;81(8):31-34. (In Russ.).
24. Ren C., Yang X., Li C., Sun Y., Liu Z. Modeling of the heat transfer characteristics of the effective thermal conductivity test facility for high temperature gas-cooled reactors. *Journal of Tsinghua University*. 2015;55(9):991-997.
25. Cherepanov V.Y., Lozinskaya O.M., Rybak N.I., Yamshanov V.A. Measuring equipment and a comparator for measuring high values of thermal conductivity. *Measurement techniques*. 2009;52(10):1107-1111.  
<https://doi.org/10.1007/s11018-010-9403-3>.
26. Bol'shev K.N., Zarichnyak Y.P., Ivanov V.A. Determination of thermal conductivity by the method of the initial stage of warming up a sample by a constant heat flux. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2018;91(5):1342-1346. <https://doi.org/10.1007/s10891-018-1867-z>.
27. Blázquez C.S., Martín A.F., Nieto I.M., González-Aguilera D. Measuring of thermal conductivities of soils and rocks to be used in the calculation of a geothermal installation. *Energies*. 2017;10(6):795.  
<https://doi.org/10.3390/en10060795>.
28. Vertogradskij V.A., Popov Yu.A., Miklashevskij D.E. Method and installation for measuring rock thermal conductivity at high pressures and temperatures. *Izvestiya vysших uchebnyh zavedenij. Geologiya i razvedka = Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2003;5:47-51. (In Russ.).
29. Shishkina R.A., Zemlyanskaya A.P., Beketov A.R. High performance thermal grease with aluminum nitride filler and an installation for thermal conductivity investigation. *Solid State Phenomena*. 2018;284:48-53.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.284.48>.
30. Yakovenko D.A., Pimshtejn P.G., Kuznetsov K.A. *Installation for determining the thermal conductivity of materials under pressure*. Patent RF, no. 2783366; 2022. (In Russ.).
31. Barsuk E.G., Pimshtejn P.G., Zhukova V.N. Determination of the contact thermal conductivity of sheet metal. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov = Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 1972;3:305-306. (In Russ.).
32. Stankus S.V., Savchenko I.V., Baginskii A.V., Verba O.I., Prokop'ev A.M., Khairulin R.A. Thermal conductivity coefficients of 12H18N10T stainless steel in a wide temperature range. *Teplofizika vysokih temperature = High Temperature*. 2008;46(5):795-797.  
<https://doi.org/10.1134/S0018151X08050222>.
33. Miheev M.A., Miheeva I.M. *Fundamentals of heat transfer*. Moscow: Energiya; 1977, 344 p. (In Russ.).
34. Elovenko D.A., Pimshtejn P.G., Repeckij O.V. Tatarnov D.V. Experimental study of a pressure vessel model for hydrothermal synthesis of minerals. *Vestnik Bajkal'skogo soyuza stipendiatorov DAAD*. 2010;1:11-19. (In Russ.).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Еловенко Денис Александрович,**  
к.т.н., доцент,  
доцент кафедры конструирования и стандартизации в  
машиностроении,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия  
✉ elozenko03@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0001-6520-9268>

**Пимштейн Павел Гда́льевич,**  
д.т.н., профессор,  
ведущий научный сотрудник отдела оборудования  
для химической, нефтехимической,  
нефтегазоперерабатывающей и других отраслей  
промышленности,  
ИркутскНИИхиммаш,  
664074, г. Иркутск, ул. Академика Курчатова, 3,  
Россия  
pim1937@mail.ru

**Кузнецов Кирилл Анатольевич,**  
к.т.н.,  
первый заместитель генерального директора,  
ИркутскНИИхиммаш,  
664074, г. Иркутск, ул. Академика Курчатова, 3,  
Россия  
k.kuznetsov@hm.irk.ru

**Вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный  
вариант рукописи.*

**Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 20.04.2022; одобрена  
после рецензирования 31.08.2022; принята к публикации 11.01.2023.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Denis A. Elozenko,**  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Design  
and Standardization in Mechanical Engineering,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia  
✉ elozenko03@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0001-6520-9268>

**Pavel G. Pimshtain,**  
Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Leading Researcher of the Department of Equipment  
for Chemical, Petrochemical, Oil and Gas Processing  
and other Industries,  
JSC IrkutskNIIhimmash,  
3, Akademika Kurchatova St., Irkutsk 664074, Russia  
pim1937@mail.ru

**Kirill A. Kuznetsov,**  
Cand. Sci. (Eng.), First Deputy Director General,  
JSC IrkutskNIIhimmash,  
3, Akademika Kurchatova St., Irkutsk 664074, Russia  
k.kuznetsov@hm.irk.ru

**Contribution of the authors**

The authors contributed equally to the preparation of the article.

**Conflict of interests**

The authors declare no conflicts of interests.

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

**Information about the article**

The article was submitted 20.04.2022; approved after re-viewing 31.08.2022; accepted for publication 11.01.2023.

## МАШИНОСТРОЕНИЕ



Научная статья

УДК 620.179.16:620.179.143

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-39-47>

## Структурно-феноменологическая концепция мониторинга несущей способности элементов конструкций из композитных материалов

**Ю.Г. Матвиенко<sup>1</sup>✉, И.Е. Васильев<sup>2</sup>, Д.В. Чернов<sup>3</sup>**<sup>1-3</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва, Россия

**Резюме.** Целью представленной статьи является демонстрация возможностей разработанной в Институте машиноведения им. А.А. Благонравова РАН методологии мониторинга кинетики повреждений и оценки несущей способности высоконагруженных композитных элементов конструкций с применением метода акустической эмиссии. Предложенная методология реализована при усталостном испытании авиационной панели в виде сложной гибридной конструкции с обшивкой из слоистого композита и сотовой внутренней структурой из алюминиевой фольги с полимерным наполнителем, которая в зонах захватов имеет сплошную слоистую структуру. Усталостные испытания панели проведены при частоте 4 Гц отнулевого цикла нагружения с амплитудой 145 кН. Для регистрации процессов накопления повреждений использовали установленные на панели преобразователи R150 –AST фирмы «Mistral» (США) и восьмиканальную акустико-эмиссионную систему A-line 32D производства ООО «Интерюнис-ИТ». Сопоставление весового содержания локационных импульсов с их пороговыми значениями в энергетических кластерах, характеризующих кинетику микро-, мезо- и макроповреждений структуры композитного материала, позволило установить несущую способность авиационной панели на соответствующих стадиях кинетики повреждений данного материала. Приведены результаты акустико-эмиссионной диагностики исследованной авиационной панели в процессе циклического нагружения, включающие координатную локацию источников акустической эмиссии, накопление акустико-эмиссионных событий каналами, динамику изменения парциальной активности и весового содержания локационных импульсов на стадиях эволюции повреждений композитного материала. Таким образом, в процессе акустико-эмиссионной диагностики панели удалось не только установить зоны интенсивного накопления повреждений в гибридной структуре панели, но и контролировать фактический уровень несущей способности, определяя степень ее поврежденности на разных масштабно-структурных уровнях в процессе циклического нагружения. Рассмотренная в статье методология применения акустико-эмиссионной диагностики для мониторинга кинетики повреждений и контроля фактического состояния несущей способности высоконагруженных композитных элементов конструкций открывает новые возможности, существенно расширяющие исследовательский потенциал метода акустической эмиссии.

**Ключевые слова:** акустическая эмиссия, структурно-феноменологическая концепция, кластерный анализ, весовое содержание, кинетика повреждений, разрушение

**Для цитирования:** Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Чернов Д.В. Структурно-феноменологическая концепция мониторинга несущей способности элементов конструкций из композитных материалов // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 1. С. 39–47. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-39-47>.

## MECHANICAL ENGINEERING

Original article

## Structural phenomenological concept of monitoring the load-bearing capacity of structural elements of composite materials

**Yury G. Matvienko<sup>1</sup>✉, Igor E. Vasiliev<sup>2</sup>, Dmitry V. Chernov<sup>3</sup>**<sup>1-3</sup>Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**Abstract.** The authors demonstrate the potential of a methodological approach for monitoring the damage kinetics and evaluating the load-bearing capacity of composite structural elements based on the method of acoustic emission. This methodology was developed by specialists of the Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences. The methodology was implemented for a fatigue test of an aircraft panel represented by a complex hybrid structure with a lining made of layered composite and a cellular internal structure of aluminum foil with polymeric filler that has a continuous layered structure in the gripping area. Fatigue tests were carried out at 4 Hz from the zero-loading cycle with an amplitude of 145 kN. To record the accumulation of damages, R15α-AST transducers by Mistral (USA) and an A-line 32D 8-channel acoustic emission system by Interunis-IT LLC were used. Comparing the weight content of location impulses with their threshold values in energy clusters characterizing the kinetics of micro-, meso-, and macro-damages of the composite material structure made it possible to determine the bearing capacity of the aircraft panel at respective stages of damage kinetics. The results of the acoustic emission diagnostics are given for the examined aircraft panel during cyclic loading, including the coordinate location of acoustic emission sources, accumulation of acoustic emission events by channels, the dynamics of partial activity changes, and weight content of location impulses at damage evolution stages of a composite material. Therefore, the acoustic emission diagnostics of the aircraft panel made it possible to identify the areas of intensive damage accumulation in the hybrid structure of the panel and control the actual bearing capacity by defining the extent of its damages at various scale and structural levels during cyclic loading. The described methodology of using acoustic emission diagnostics for monitoring the damage kinetics and actual bearing capacity of highly loaded composite elements extends the research potential of the acoustic emission method.

**Keywords:** acoustic emission, structural and phenomenological concept, cluster analysis, weight content, damage kinetics, failure

**For citation:** Matvienko Y.G., Vasiliev I.E., Chernov D.V. Structural phenomenological concept of monitoring the load-bearing capacity of structural elements of composite materials. *iPolytech Journal*. 2023;27(1):39-47. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-39-47>.

## ВВЕДЕНИЕ

Существующие теории поврежденности конструкционных материалов [1–8], как и современные риск-ориентированные подходы [9–11], не позволяют учесть влияние рассеянных структурных повреждений, остаточных напряжений, особенностей эксплуатации и деградации свойств материала на снижение несущей способности конструкций. Возникла актуальная необходимость разработки методологии, позволяющей контролировать фактическое состояние поврежденности высоконагруженных элементов конструкций и оценивать текущий уровень их несущей способности в процессе эксплуатации или испытаний. Особенno актуальна такая разработка для мониторинга эволюции разрушений конструкций из композитных материалов, в которых структурные повреждения возникают уже на ранней стадии нагружения в процессе распрямления армирующих волокон<sup>4</sup>, а окончательное их разрушение происходит при составляющих порядка 1,5–2% деформациях<sup>4</sup> [12–16].

Как хорошо известно, применение полимерных композитных материалов (ПКМ) значительно увеличивает прочность и жесткость

конструкций от действия растягивающих нагрузок, снижая при этом их вес и повышая коррозионную устойчивость. Рациональное их применение позволяет при обеспечении требуемых прочностных характеристик планера снизить на 20–30% его массу, что дает возможность повысить грузоподъемность летательного аппарата, увеличивая при этом дальность перелета за счет сокращения расхода топлива. В беспилотных летательных аппаратах и в малой авиации доля композитных материалов может превышать 65%, а металлические сплавы используют в основном только для изготовления стоек шасси и высоконагруженных деталей двигателя. Поэтому тенденция увеличения доли композитных материалов в конструкциях современных планеров будет только нарастать. Это требует широкого применения средств неразрушающего контроля и технической диагностики не только при проведении стендовых испытаний авиационных конструкций, но и их внедрения в системы авионики для мониторинга текущего состояния накопления повреждений и контроля фактического состояния высоконагруженных элементов конструкций.

<sup>4</sup>Полилов А.Н. Экспериментальная механика композитов: учеб. пособ. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 376 с.

## СТРУКТУРНО-ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ КОНЦЕПЦИЯ И МОДЕЛЬ ЭВОЛЮЦИИ РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Для осуществления указанных выше целей в Институте машиноведения разработаны структурно-феноменологическая концепция и модель эволюции разрушения твердого тела на разных масштабных уровнях, связывающих несущую способность изделия с кинетикой перераспределения весового содержания микро-, мезо- и макроповреждений в структуре конструкционного материала, подробно изложенной в [17–20]. Применялась акустическая эмиссия (АЭ) – диагностика, методология применения которой, а также алгоритм и разработанное программное обеспечение рассмотрены в публикации [20].

С целью облегчения восприятия дальнейшего содержания статьи дадим некоторые пояснения часто используемых терминов:

**Локационные импульсы** – сигналы АЭ, по разности времени прихода которых на приемные преобразователи АЭ локационной группы определяют координаты источника АЭ.

**Кластеры нижнего (Н), среднего (С), верхнего (В) энергетического уровня** – представляют зоны разделения регистрируемых импульсов в поле дескрипторов относительной энергии ( $E_u$ ) и усредненной частоты выбросов ( $N_u/t_i$ , где  $N_u$  – количество выбросов, а именно – пересечений фронтом волны порога дискриминации сигналов  $u_{th}$ ,  $t_i$  – длительность импульса, т.е. разность между моментами времени, в течение которого фронт нарастающей волны превышает порог  $u_{th}$ , а затем уходит под него.

**Параметры ( $W_i$ ) весового содержания локационных импульсов** в Н, С, В кластерах:

$$WH = (NH/N\Sigma) \cdot 100\%;$$

$$WC = (NC/N\Sigma) \cdot 100\%;$$

$$WB = (NB/N\Sigma) \cdot 100\%,$$

где  $NH$ ,  $NC$ ,  $NB$  – кумулятивные значения локационных импульсов, регистрируемые в нижнем, среднем и верхнем кластерах;

$N\Sigma = NH + NC + NB$  – суммарное их количество.

**Парциальная активность АЭ ( $\dot{N}_i$ )** – количество локационных импульсов, регистрируемых ежесекундно в Н, С, В кластерах ( $\dot{N}\Sigma = \dot{N}_H + \dot{N}_C + \dot{N}_B$ ).

**Несущая способность конструкционного материала** – определяется сопоставлением текущих и пороговых значений весового содержания локационных импульсов в кластерах Н и С по следующим формулам:

$$B_{WH} = \frac{W_H - [W_H]}{(W_H)_{max} - [W_H]} \cdot 100\%;$$

$$B_{WC} = \frac{[W_C] - W_C}{[W_C] - (W_C)_{min}} \cdot 100\%,$$

где  $(W_H)_{max}$ ,  $(W_C)_{min}$  – экстремальные значения весового содержания локационных импульсов, регистрируемые в энергетических кластерах при переходе от рассеянного повреждения к локальному накоплению АЭ событий [20].

## ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И ДИАГНОСТИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

С целью апробации предложенной методологии АЭ диагностики контроля накопления повреждений в структуре конструкционного материала и оценки текущего уровня несущей способности изделий в режиме их нагружения были проведены усталостные испытания элемента перспективной конструкции крыла самолета. Исследуемая панель представляла собой сложную гибридную конструкцию с обшивкой из слоистого композита и сотовой внутренней структурой из алюминиевой фольги с полимерным наполнителем, которая в зонах захватов имеет сплошную слоистую структуру. На рис. 1 показаны форма и основные размеры панели, а также места установки преобразователей R15α-AST фирмы «Mistral» (США). Усталостные испытания авиационной панели проводились при частоте отнулевого цикла  $f = 4$  Гц и амплитуде  $P_a = 145$  кН.

Для регистрации процессов накопления повреждений использовалась восьмиканальная акустико-эмиссионная система A-line 32D

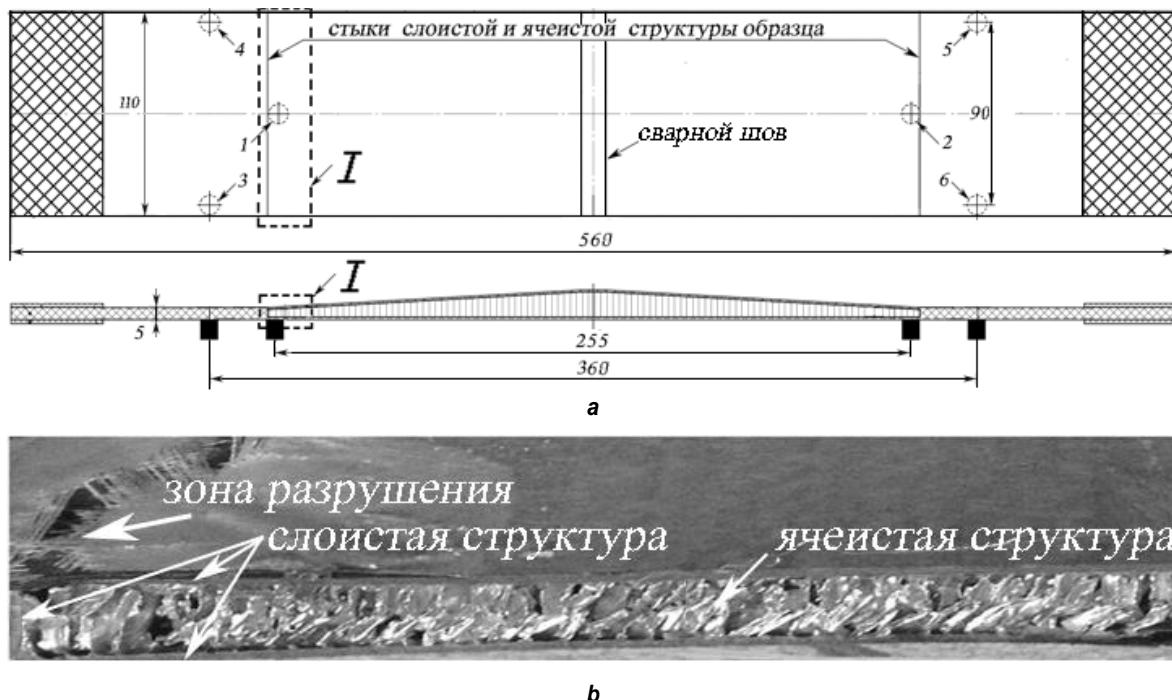


Рис. 1. Форма, габаритные размеры (а) и зона разрушения панели (б);

1–6 – места установки преобразователей R15α-SMA

Fig. 4. Shape, outside dimensions (a) and panel destruction area (b); 1–6 – transducer locations

производства ООО «Интерюнис–ИТ», которая имела следующие настройки: порог дискриминации сигналов  $u_{th} = 42$  дБ, полосу пропускания цифровых фильтров  $\Delta f = 100\text{--}300$  кГц, расчетную групповую скорость импульсов, установленную по результатам тестирования панели  $V_g = 29$  мм/мкс.

## ПРИМЕНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДИАГНОСТИКИ МОНИТОРИНГА КИНЕТИКИ ПОВРЕЖДЕНИЙ И ОЦЕНКИ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПРИ УСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЯХ ПАНЕЛИ

На рис. 2 приведены результаты АЭ диагностики, зарегистрированные в ходе циклического нагружения панели, включающие координатную локацию источников АЭ (а), накопление АЭ событий каналами (б), динамику изменения парциальной активности (с) и весового содержания локационных импульсов (д) на стадиях эволюции конструкционного материала, в том числе рассеянного накопления повреждений  $\tau_0 = 0\text{--}1050$  с, образования локальных зон «*in situ*» повреждений  $\tau_1 = 1050\text{--}3000$  с, устойчивого их роста  $\tau_2 = 3000\text{--}4300$  с и достижения предельного состояния  $\tau_3 = 4300\text{--}4624$  с.

Наибольшая плотность индикаций источников АЭ (график 2 а) при циклическом нагружении регистрировалась в зонах стыков слоистой и ячеистой структур панели, отмеченных стрелками на рис. 2 а. В области «сварного шва», расположенного в центре панели, плотность индикаций источников АЭ была на порядок ниже. Всего в ходе АЭ диагностики при усталостных испытаниях панели было зарегистрировано  $N_{\text{дл}} = 16088$  ед. индикаций источников АЭ.

На стадии  $\tau_0$  в течение первых 600 с или 2400 циклов нагружения локация источников отсутствовала, после чего, как следует из графика 5 с, регистрировалась низкая прерывистая парциальная активность АЭ в энергетических кластерах  $H$  и  $C$ , не превышающая, соответственно,  $\bar{N}_H = 5\text{--}8$  им/с и  $\bar{N}_C = 1\text{--}2$  им/с. Такая типичная для стадии рассеянного накопления повреждений активность локационных импульсов в ПКМ, характеризуемая экстремальными значениями весового содержания локационных импульсов в  $H$  и  $C$  кластерах, составляла  $(W_H)_{\text{max}} = 96\text{--}100\%$ ,  $(W_C)_{\text{min}} = 0\text{--}4\%$ , что свидетельствовало о снижении уровня несущей способности панели в течение первых 4200 циклов испытания примерно на  $\Delta B_w = 5\%$ .

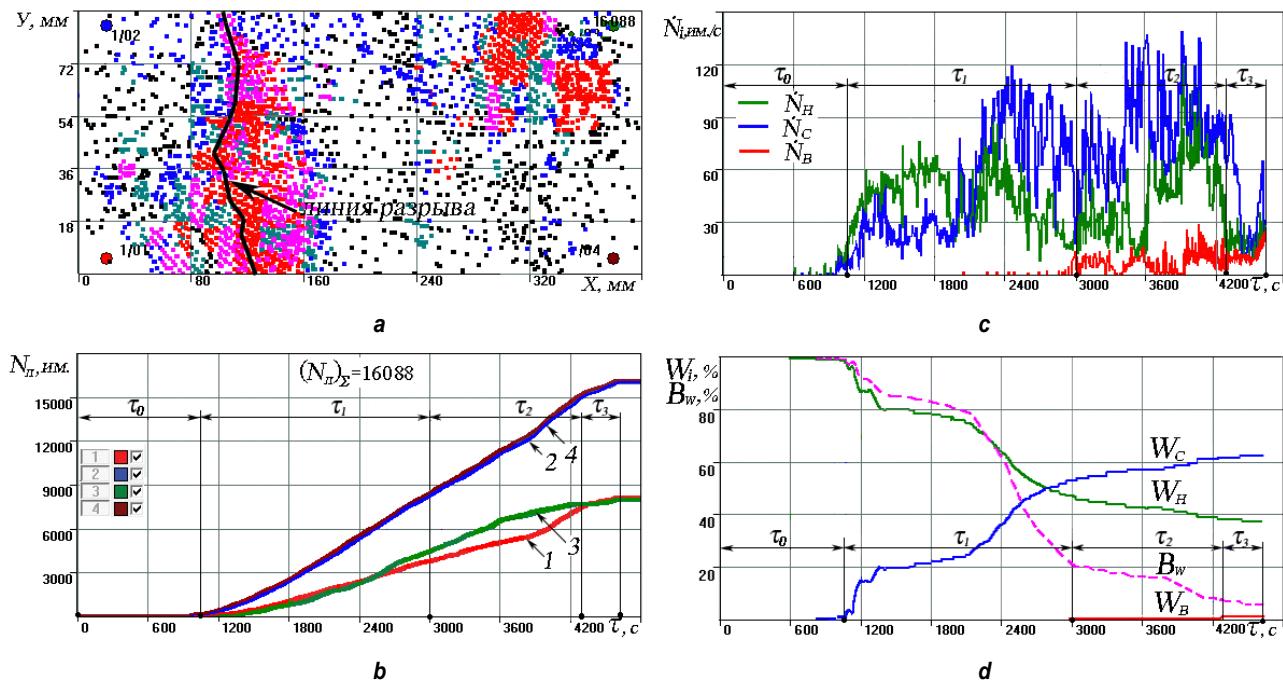


Рис. 2. Результаты акустической эмиссии диагностики, зарегистрированные при проведении испытаний панели на циклическое нагружение: а – координатная локация источников акустической эмиссии; б – накопление локационных импульсов каналами акустической эмиссии системы; в – парциальная активность акустической эмиссии в энергетических кластерах; г – динамика изменения весового содержания локационных импульсов в H, C, B кластерах

Fig. 2. Acoustic emission diagnostic results registered when testing a panel under cyclic loading: a – coordinate location of acoustic emission sources; b – accumulation of location pulses by acoustic emission system channels; c – partial activity of acoustic emission in energy clusters; d – dynamics of weight content variation of location pulses in H, C and B clusters

В течение стадий  $\tau_1$  и  $\tau_2$  регистрировался практически линейный рост накопления локационных импульсов каналами АЭ системы (график 2 б), хотя изменение значений парциальных параметров  $\dot{N}_i$  и  $W_i$  в H и C кластерах, особенно на стадии  $\tau_1$ , как видно из графиков 2 в и 2 г, существенно отличался от линейного.

На стадии  $\tau_1$  рассеянное накопление источников АЭ сменилось регулярной их локацией в зонах потенциальных разрушений, расположенных в области стыков слоистой и сотовой структур панели. При этом резко на порядок возросла активность АЭ в H и C кластерах, которая к 1200 с испытания достигла, соответственно,  $\dot{N}_H = 60$  им/с и  $\dot{N}_C = 40$  им/с. В период 1200–2100 с испытания активность локационных импульсов стабилизировалась и составляла  $\dot{N}_H = 60–75$  им/с и  $\dot{N}_C = 30–50$  им/с. Дальнейшее нагружение образца панели в период 2100–2400 с испытания сопровождалось более чем двукратным повышением активности в среднем кластере, достигающим  $\dot{N}_C = 100–120$  им/с, и заметно меньшим

ростом в нижнем кластере, не превышающим  $\dot{N}_H = 75–90$  им/с. На заключительной стадии  $\tau_1$  в период 2400–3000 с нагружения активность в энергетических кластерах синхронно снижалась, соответственно, до  $\dot{N}_H = 15–30$  им/с и  $\dot{N}_C = 30–60$  им/с. Несмотря на такие колебания активности АЭ, тренд изменения весового содержания локационных импульсов в энергетических кластерах был достаточно устойчив. В этот период отмечалось резкое снижение параметра  $W_H$  до 44%, сопровождаемое синхронным повышением параметра  $W_C$  до 56%. С учетом динамики изменения экстремальных и пороговых значений параметра  $W_H$ , принятых равными ( $W_H$ )<sub>max</sub> = 100% и  $[W_H] = 32\%$  при вычислении характеристики  $B_{W_H}$ , несущая способность панели на стадии  $\tau_1$  снизилась на  $\Delta B_W = 75\%$  с 95 до 20%.

На стадии  $\tau_2$ , как видно из графика 2 с, наибольший рост активности АЭ во всех энергетических кластерах отмечался в течение 3600–4000 с испытания, когда ее уровень в H, C и B кластерах достигал следующих значений:  $\dot{N}_H = 110$  им/с,  $\dot{N}_C = 130$  им/с и  $\dot{N}_B = 25$

им/с. В заключительный период стадии  $\tau_2$  активность АЭ в энергетических кластерах синхронно снижалась до уровней:  $\dot{N}_H = 45$  им/с,  $\dot{N}_C = 90$  им/с и  $\dot{N}_B = 20$  им/с. Такое синхронное снижение парциальной активности локационных импульсов сказалось и на динамике параметров  $W_i$  в  $H$ ,  $C$ ,  $B$  кластерах, которая в этот период усталостных испытаний заметно замедлилась: параметр  $W_H$  снижался с 44 до 38%,  $W_C$  повышался от 56 до 61%, а  $W_B$  возрастал до 1%. Как следует из рис. 2 *d*, уровень несущей способности панели на стадии  $\tau_2$ , определяемый при характерных значениях параметров ( $W_H$ )<sub>max</sub> = 100% и  $[W_H] = 32\%$ , снизился на  $\Delta B_W = 12\%$  с 20 до 8%.

На стадии  $\tau_3$  после 17200 циклов нагружения (4300 с испытания) накопление локационных импульсов каналами АЭ системы (график 2 *b*) заметно замедлилось. При этом отмечалось синхронное снижение активности АЭ во всех энергетических кластерах (график 2 *c*), уровень которой в течение 4400–4500 с испытания изменялся в следующих пределах:  $\dot{N}_H = 15\text{--}35$  им/с,  $\dot{N}_C = 30\text{--}65$  им/с и  $\dot{N}_B = 10\text{--}25$  им/с. Наблюдаемое перед завершением усталостных испытаний повышение активности АЭ существенным образом не отразилось на весовом содержании локационных импульсов в энергетических кластерах, составивших при остановке нагружающего стенда следующие значения:  $W_H = 35\%$ ,  $W_C = 63\%$ ,  $W_B = 2\%$ .

В заключительный период усталостных испытаний после 18000 циклов нагружения несущая способность панели снизилась до близкого к предельному состояния. Как видно из рис. 1 *b*, трещина в зоне разрушения обшивки панели распространилась по всей ее ширине. При этом из-за потери несущей способности

наблюдалась повышенная вибрация нагружающего стенда, сопровождаемая резким снижением максимальной амплитуды в циклах нагружения панели. Поэтому после 18496 циклов нагружения на 4624 с АЭ диагностики усталостные испытания были прекращены. Как следует из рис. 2 *d*, уровень несущей способности панели на стадии  $\tau_3$  снизился на  $\Delta B_W = 3\%$  с 8 до 5%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С целью демонстрации разработанной методологии применения АЭ диагностики для мониторинга кинетики микро-, мезо- и макроповреждений и оценки текущего уровня несущей способности изделия рассмотрены усталостные испытания авиационной панели со слоистой композитной обшивкой и ячеистой внутренней структурой с полимерным сотовым наполнителем. Приведенное на графиках рис. 2 *d* изменение параметров  $W_i$  в  $H$ ,  $C$ ,  $B$  кластерах отображает кинетику микро-, мезо- и макроповреждений в структуре материала панели в процессе усталостных испытаний, сопровождающую снижением ее несущей способности от 100 до 5% в течение 18464 отнулевых циклов нагружения, выполняемых с частотой  $f = 4$  Гц и максимальной амплитудой  $P_a = 145$  кН.

Рассмотренная в статье методология применения АЭ диагностики для мониторинга кинетики повреждений в структуре конструкционного материала и контроля фактического состояния несущей способности высоконагруженных элементов конструкций открывает новые возможности, существенно расширяющие исследовательский потенциал метода акустической эмиссии.

## Список источников

1. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. 2-е изд., стереотип. М.: Наука, 2014. 752 с.
2. Матвиенко Ю.Г. Модели и критерии механики разрушения. М.: Физматлит, 2006. 328 с.
3. Kukudzhanov V.N. Numerical continuum mechanics. Berlin, 2021. 447 p.
4. Murakami S. Continuum damage mechanics: a continuum mechanics approach to the analysis of damage and fracture // Engineering, Engineering (R0). Dordrecht: Springer, 2012. Vol. 92. Iss. 6. P. 402. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-2666-6>.
5. Czichos H. Handbook of technical diagnostics: fundamentals and application to structures and systems // Engineering, Engineering (R0). Berlin – Heidelberg: Springer – Verlag, 2013. 560 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-25850-3>.
6. Cherepanov G.P. Invariant Integrals in Physics // Physics and Astronomy. Cham: Springer, 2019. 259 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-28337-7>.
7. Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Панин А.В. Нелинейные волновые процессы в деформируемом твердом теле как многоуровневой иерархически организованной системе

- // Успехи физических наук. 2012. Vol. 182. P. 1351–1357. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0182.201212i.1351>.
8. Егорушкин В.Е., Панин В.Е., Панин А.В. О физической природе пластичности // Физическая мезомеханика. 2020. Т. 23. № 2. С. 5–14. <https://doi.org/10.24411/1683-805X-2020-12001>.
9. Makhutov N., Nadein V., Gadenin M., Reznikov D., Risk and industrial safety // Reliability: Theory & Applications. 2022. Vol. 17. № 3. P.138–143. <https://doi.org/10.24412/1932-2321-2022-366-138-143>.
10. Лепихин А.М., Морозов Е.М., Махутов Н.А., Лещенко В.В. Возможности оценки вероятностей разрушения и допустимый размеров дефектов элементов конструкций по критериям механики разрушения // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. Т. 88. № 3. С. 41–50. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-3-41-50>.
11. Лепихин А.М., Махутов Н.А., Шокин Ю.И., Юрченко А.В. Концепция риска-анализа технических систем с использованием цифровых двойников / Вычислительные технологии. 2020. Т. 25. № 4. С. 99 –113. <https://doi.org/10.25743/ICT.2020.25.4.009>.
12. Yi Xiao-Su, Du Shanyi, Zhang Litong. Composite materials engineering // Fundamentals of Composite Materials. Vol. 1. Singapore: Springer, 2018. 786 p.
13. Matvienko Y.G., Vasil'ev I.E., Chernov D.V. Damage and failure of unidirectional laminate by acoustic emission combined with video recording // Acta Mechanica. 2021. Vol. 232. P. 1889–1900. <https://doi.org/10.1007/s00707-020-02866-6>.
14. Олейников А.И., Кузьмина Т.А. Упруго-прочностные характеристики монослоев *in situ* в композиционном пакете // Инженерный журнал: наука и инновации. 2020. № 7. С. 4–14. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2020-7-1996>.
15. Ono K., Gallego A. Research and applications of AE on advanced composites // Acoustic Emission: Springer Handbook of Acoustics / eds. T.D. Rossing. New York: Springer, 2014. P. 1209–1229.
16. Sause M.G.R. In situ monitoring of fiber-reinforced composites // Chemistry and Materials Science. Cham: Springer, 2016. P. 242. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-30954-5>.
17. Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Чернов Д.В. Исследование кинетики разрушения одностороннего ламината с применением акустикой эмиссии и видеорегистрации // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 11. С. 45–61. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-11-45-61>.
18. Matvienko Y.G., Vasil'ev I.E., Chernov D.V. Damage and failure of unidirectional laminate by acoustic emission combined with video recording // Acta Mechanica. 2021. Vol. 232. P. 1889–1900. <https://doi.org/10.1007/s00707-020-02866-6>.
19. Махутов Н.А., Матвиенко Ю.Г., Иванов В.И., Васильев И.Е., Чернов Д.В. Исследование на разрыв армирующих волокон и одностороннего ламината с применением акустической эмиссии // Приборы и техника эксперимента. 2022. № 2. С. 109–117. <https://doi.org/10.31857/S003281622202001X>.
20. Матвиенко Ю.Г., Махутов Н.А., Васильев И.Е., Чернов Д.В., Иванов В.И., Елизаров С.В. Оценка остаточной прочности композитных изделий на основе структурно-феноменологической концепции повреждений и акустико-эмиссионной диагностики // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. Т. 88. № 1. С. 69–81. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-1-69-81>.

## References

1. Rabotnov Yu.N. Creep flow of structural elements. Moscow: Nauka; 2014, 752 p. (In Russ.).
2. Matvienko Yu.G. Models and criteria of fracture mechanics. Moscow: Fizmatlit; 2006, 328 p. (In Russ.).
3. Kukudzhanov V.N. Numerical continuum mechanics. Berlin; 2021, 447 p. (In Russ.).
4. Murakami S. Continuum damage mechanics: a continuum mechanics approach to the analysis of damage and fracture. In: *Engineering, Engineering (R0)*. Dordrecht: Springer; 2012, vol. 92, Iss. 6, p. 402. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-2666-6>.
5. Czichos H. Handbook of technical diagnostics: fundamentals and application to structures and systems. In: *Engineering, Engineering (R0)*. Berlin – Heidelberg: Springer – Verlag; 2013, 560 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-25850-3>.
6. Cherepanov G.P. Invariant Integrals in Physics. In: *Physics and Astronomy*. Cham: Springer; 2019, 259 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-28337-7>.
7. Panin V.E., Egorushkin V.E., Panin A.V. Nonlinear wave processes in a deformable solid as in a multiscale hierarchically organized system. *Uspekhi fizicheskikh nauk = Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences)*. 2012;182:1351-1357.
8. Egorushkin V.E., Panin V.E., Panin A.V. The physical nature of plasticity. *Fizicheskaya mezomehanika*. 2020; 23(2):5-14. <https://doi.org/10.24411/1683-805X-2020-12001>.
9. Makhutov N., Nadein V., Gadenin M., Reznikov D. Risk and industrial safety. *Reliability: Theory & Applications*. 2022;17(3):138-143. <https://doi.org/10.24412/1932-2321-2022-366-138-143>.
10. Lepikhin A.M., Morozov E.M., Makhutov N.A., Leschenko V.V. Assessment of failure probabilities and the allowable size of defects in structural elements using the criteria of fracture mechanics. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2022;88(3):41-50. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-3-41-50>.
11. Lepikhin A.M., Makhutov N.A., Shokin Y.I., Yurchenko A.V. Analysis of risk concept for technical systems using digital twins. *Vychislitel'nye tekhnologii = Computational Technologies*. 2020;25(4):99-113. <https://doi.org/10.25743/ICT.2020.25.4.009>.
12. Yi Xiao-Su, Du Shanyi, Zhang Litong. Composite materials engineering. *Fundamentals of Composite Materials*. Vol. 1. Singapore: Springer; 2018, 786 p.
13. Matvienko Y.G., Vasil'ev I.E., Chernov D.V. Damage and failure of unidirectional laminate by acoustic emission

- combined with video recording. *Acta Mechanica*. 2021;232:1889-1900. <https://doi.org/10.1007/s00707-020-02866-6>.
14. Oleinikov A.I., Kuzmina T.A. The in situ PLY elasticity and strength in laminated composites. *Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii = Engineering Journal: Science and Innovation*. 2020;7:4-14. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2020-7-1996>.
15. Ono K., Gallego A. Research and applications of AE on advanced composites. In: Rossing T.D. (eds.). *Acoustic Emission: Springer Handbook of Acoustics*. New York: Springer; 2014, p. 1209-1229.
16. Sause M.G.R. In situ monitoring of fiber-reinforced composites. In: *Chemistry and Materials Science*. Cham: Springer; 2016, p. 242. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-30954-5>.
17. Matvienko Yu.G., Vasil'ev I.E., Chernov D.V. Study of the fracture kinetics of a unidirectional laminate using acoustic emission and video recording. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov = Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 2019;85(11):45-61. (In Russ.). <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-11-45-61>.
18. Matvienko Y.G., Vasil'ev I.E., Chernov D.V. Damage and failure of unidirectional laminate by acoustic emission combined with video recording. *Acta Mechanica*. 2021;232:1889-1900. <https://doi.org/10.1007/s00707-020-02866-6>.
19. Makhutov N.A., Matvienko Y.G., Vasil'ev I.E., Chernov D.V., Ivanov V.I. Tensile creep rupture tests of reinforcing fibers and a unidirectional laminate using acoustic emission. *Pribory i tekhnika eksperimenta = Instruments and Experimental Techniques*. 2022;2:109-117. <https://doi.org/10.31857/S003281622202001X>.
20. Matvienko Yu.G., Makhutov N.A., Vasil'ev I.E., Chernov D.V., Ivanov V.I., Elizarov S.V. Evaluation of the residual strength of composite products based on the structural-phenomenological concept of damage and acoustic-emission diagnostics. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov = Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 2022;88(1):69-81. (In Russ.). <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-1-69-81>.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Матвиенко Юрий Григорьевич**,  
д.т.н., профессор,  
заведующий отделом прочности, живучести и  
безопасности машин,  
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова  
РАН,  
101000, г. Москва, Малый Харитоньевский пер., 4,  
Россия  
✉ [ygmatvienko@gmail.com](mailto:ygmatvienko@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-3189-1438>

**Васильев Игорь Евгеньевич**,  
к.т.н., с.н.с. лаборатории моделирования  
повреждений и разрушений,  
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова  
РАН,  
101000, г. Москва, Малый Харитоньевский пер., 4,  
Россия  
✉ [vie03@mail.ru](mailto:vie03@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0002-0304-1436>

**Чернов Дмитрий Витальевич**,  
к.т.н.,  
с.н.с. лаборатории моделирования повреждений и  
разрушений,  
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова  
РАН,  
101000, г. Москва, Малый Харитоньевский пер., 4,  
Россия  
✉ [chernovdv@inbox.ru](mailto:chernovdv@inbox.ru)

## Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в  
подготовку публикации.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Yury G. Matvienko**,  
Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Head of the Department of Machinery Strength, Durability  
and Safety,  
Mechanical Engineering Research Institute of the  
Russian Academy of Sciences,  
4, Malii Kharitonievsky per., Moscow 101000, Russia  
✉ [ygmatvienko@gmail.com](mailto:ygmatvienko@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-3189-1438>

**Igor E. Vasiliev**,  
Cand. Sci. (Eng.),  
Senior Researcher of the Laboratory of Fracture and  
Destruction Modeling,  
Mechanical Engineering Research Institute of the  
Russian Academy of Sciences,  
4, Malii Kharitonievsky per., Moscow 101000, Russia  
✉ [vie03@mail.ru](mailto:vie03@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0002-0304-1436>

**Dmitry V. Chernov**,  
Cand. Sci. (Eng.),  
Senior Researcher of the Laboratory of Fracture and  
Destruction Modeling,  
Mechanical Engineering Research Institute of the  
Russian Academy of Sciences,  
4, Malii Kharitonievsky per., Moscow 101000, Russia  
✉ [chernovdv@inbox.ru](mailto:chernovdv@inbox.ru)

## Contribution of the authors

The authors contributed equally to the preparation of the  
article.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

**Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 22.12.2022; одобрена после рецензирования 31.01.2023; принята к публикации 03.03.2023.

**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 22.12.2022; approved after reviewing 31.01.2023; accepted for publication 03.03.2023.

## МАШИНОСТРОЕНИЕ

Научная статья

УДК 621.926

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-48-60>

## Исследование напряжений и деформаций зубьев ковшей землеройных машин

А.Г. Осипов<sup>1</sup>✉, У.А. Васечкин<sup>2</sup><sup>1,2</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

**Резюме.** Целью представленной работы является анализ существующих конструкций зубьев ковшей землеройных машин и научно обоснованный выбор оптимальной конструкции. Объектом исследований явились 6 моделей конструкций зубьев землеройных машин, выполненных из легированной марганцевой стали марки 110Г13Л. Построение моделей зубьев осуществлялось с помощью компьютерной программы КОМПАС-3D. Расчет продольных упругих внутренних напряжений и определение упругих деформаций в моделях зубьев проводился с использованием программного продукта COMSOL Multiphysics. Рассчитаны продольные упругие внутренние напряжения и определены упругие деформации моделей зубьев при приложенной к ним нагрузке на мягких грунтах 9 кН, а на скальных – 90 кН. Установлены оптимальные конструкции зубьев для грунтов различной категории твердости. На основании полученных результатов исследований выявлено, что на мягких грунтах оптимальным сочетанием эффективности и прочности обладает зуб-рыхлитель, а также комбинированный криволинейный зуб с дополнительным зубом-рыхлителем. Показано, что если принять упругую деформацию стандартного зуба на мягких породах за 100%, то деформация зуба-рыхлителя, в зависимости от исходного состояния, составляет 30–35%, а комбинированного криволинейного зуба с дополнительным зубом-рыхлителем – 32–35%. Установлено, что на твердых грунтах наилучшим сочетанием эффективности и прочности обладает комбинированный криволинейный зуб с дополнительным зубом-рыхлителем, а также обычный криволинейный зуб. Так, если принять упругую деформацию стандартного зуба на твердых породах за 100%, то деформация комбинированного криволинейного зуба с дополнительным зубом-рыхлителем в зависимости от исходного состояния составляет 18–20%, а криволинейного зуба – 42–45%. Научно обоснована целесообразность применения на землеройных машинах ковшей с комбинированными зубьями оптимальной конструкции. В дальнейшем планируется исследовать различные конструкции ковшей землеройных машин и определить оптимальную, позволяющую целесообразно применять ее на грунтах разной категории твердости.

**Ключевые слова:** землеройные машины, рабочие органы с ковшами, зубья ковшей, зуб оптимальной конструкции, напряжения и деформации

**Для цитирования:** Осипов А.Г., Васечкин У.А. Исследование напряжений и деформаций зубьев ковшей землеройных машин // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 1. С. 48–60. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-48-60>.

## MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Original article

## Studies of stress and strain in bucket teeth of earth-moving machines

Artur G. Osipov<sup>1</sup>✉, Ulyan A. Vasechkin<sup>2</sup><sup>1,2</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

**Abstract.** This paper aims to analyze the existing designs of bucket teeth in earth-moving machines with the purpose of selecting an optimal design in a scientifically grounded manner. The research objects included six design models of teeth of earth-moving machines made of alloyed manganese steel 110G13L. Teeth models were built using the KOMPAS-3D software. Lateral elastic internal stresses and elastic strains in the teeth models were determined using the COMSOL Multiphysics software. Lateral elastic internal stresses and elastic strains were calculated for the applied load of 9 kN in soft soil and 90 kN in rocky soil. Optimal teeth designs were determined for soils of various hardness. In soft soils, a ripper

tooth and a combined curved tooth with an extra ripper tooth showed the optimum combination of efficiency and strength. Thus, provided that the elastic strain of a standard tooth in soft soils equals 100% and depending on the initial state, a ripper tooth and a combined curved tooth with an extra ripper tooth showed the strain values of 30–50% and 32–35%, respectively. In hard soils, a combined curved tooth with an extra ripper tooth and a regular curved tooth showed the optimum combination of efficiency and strength. Thus, provided that the elastic strain of a standard tooth in hard soil equals 100% and depending on the initial state, a combined curved tooth with an extra ripper tooth and a curved tooth showed the strain values of 18–20% and 42–45%, respectively. The feasibility of using buckets with combined teeth of optimal design in earth-moving machines was scientifically substantiated. Future research will investigate various bucket designs of earth-moving machines to find their optimal modifications for soils of various hardness.

**Keywords:** earth-moving machines, working bodies with buckets, bucket teeth; optimal design tooth; stresses and deformations

**For citation:** Osipov A.G., Vasechkin U.A. Studies of stress and strain in bucket teeth of earth-moving machines. *iPolytech Journal*. 2023;27(1):48-60. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-48-60>.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для разработки грунтов различной категории твердости, добычи полезных ископаемых, прокладывания в них тоннелей и траншей, а также выполнения работ по рыхлению, выемке, погрузке, распределению, транспортировке различных материалов существует большой типоразмерный ряд землеройных машин, базирующихся на самоходных колесных, гусеничных, шагающих и прицепных шасси [1].

В зависимости от назначения конструкции землеройные машины значительно отличаются друг от друга и в первом приближении могут классифицироваться на погрузчики, одноковшовые экскаваторы, скреперы, драглайны, грузоподъемные краны с грейферами и другие машины [2].

Все вышеперечисленные машины объединяют один общий конструктивный компонент – рабочий орган с ковшом, оборудованным зубьями, предназначенными для разрушения и рыхления грунта или породы. Несмотря на сопоставимость конструкции, ковши имеют

значительные различия в исполнении (рис. 1) [3–6].

Практика показывает, что наиболее распространенной и универсальной землеройной машиной в настоящее время является одноковшовый экскаватор, так как с его помощью выполняется до 40...45% всех земляных работ [7–9].

Для обеспечения наибольшей производительности и увеличения ресурса землеройных машин необходимо правильно подбирать ковши не только в соответствии с видом предполагаемых работ (зачистка, погрузка, рыхление, планировка, выемка траншей, скальвание, профилирование), но и с учетом категории твердости разрабатываемого грунта или породы.

Как уже отмечалось, правильный выбор ковша должен осуществляться с учетом категории твердости разрабатываемых грунтов, которые в первом приближении по абразивности и плотности классифицируются на низкие, средние и высокие.

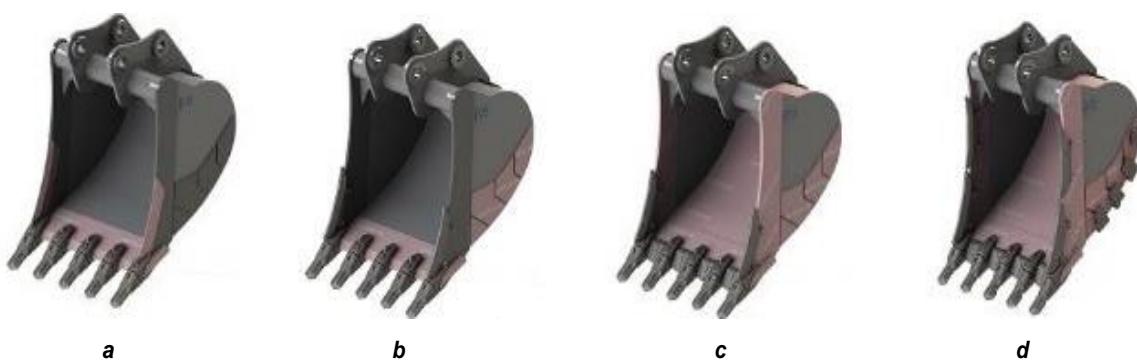


Рис. 1. Конструктивное исполнение ковшей: а – ковши общего назначения; б – усиленные ковши; в – скальные ковши; г – скальные сверхусиленные ковши

Fig. 1. Design of buckets: a – general purpose buckets; b – reinforced buckets; c – rock buckets; d – super duty rock buckets

Наиболее важными компонентами ковша, имеющего в основном сварно-литую конструкцию, являются зубья, закрепляемые на его кромке клиновым способом. Для изготовления зубьев широко используют легированную сталь марки 110Г13Л, отличающуюся высокой прочностью и устойчивостью к абразивному истиранию [10].

Зубья предназначены для разрушения и рыхления грунта или горной породы. Они первыми вступают во взаимодействие с разрабатываемым грунтом или горной породой, приводя их к разрушению [11]. При этом зубья подвергаются ударным и разрушительным нагрузкам, приводящим к изменению первоначальной конфигурации зуба [12]. При этом максимальное воздействие приходится на грани зуба, что приводит к его износу, уменьшению длины и снижению его технических характеристик.

В свою очередь, износ зубьев снижает производительность землеройной машины и влечет за собой экономические потери, связанные с сокращением ресурса машины. Поэтому основной целью представленной работы является научно обоснованный выбор конструкции

зубьев ковша землеройных машин.

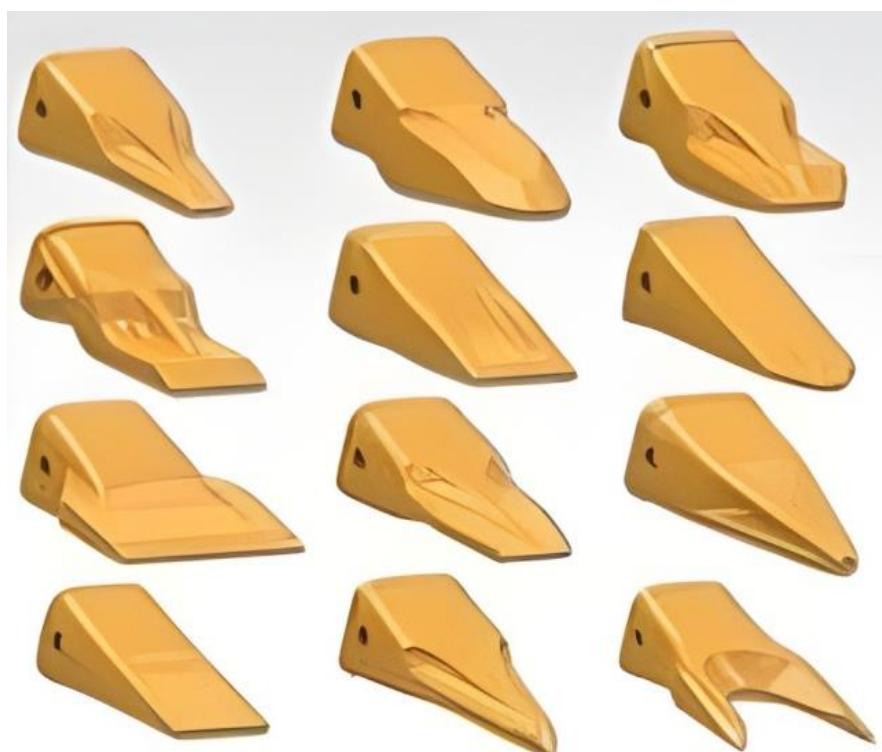
#### **Конструктивное исполнение зубьев.**

Геометрия зуба и его технические характеристики оговариваются в конструкторской документации землеройной машины и зависят от категории твердости разрабатываемых грунтов и горных пород.

Следует отметить, что конструкция зубьев ковша (рис. 2) прежде всего определяется видом производимых работ.

В первом приближении зуб состоит из режущей части и хвостовика с пазами, предназначенными для его крепления на кромке ковша. К техническим характеристикам зубьев ковша землеройных машин предъявляются особые требования, чем они выше, тем больше производительность машины и дольше ее ресурс.

Совершенствованию зубьев ковшей землеройных машин уделяется большое внимание. В этом направлении работают как учёные, так и практики. Полученные ими результаты показывают, что в процессе работы зубья подвергаются значительному износу, при этом их технические характеристики снижаются до недопустимых пределов.



*Рис. 2. Конструкция зубьев ковша землеройной машины  
Fig. 2. Designs of earth-moving machine bucket teeth*

По данным Ю.А. Ветрова, при полном износе зуба угол его режущей части увеличивается в 2–2,5 раза, достигая 65–70° вместо 26°, как у нового зуба, при этом его рабочая длина уменьшается в 3–4 раза [13].

Работа при изношенных зубьях снижает производительность землеройной машины и сокращает ее ресурс.

В результате проводимых в последнее время научно-исследовательских и конструкторских работ удалось снизить энергоемкость рабочих процессов на 20–50%, повысить производительность землеройных машин на 15–40% и увеличить их ресурс за счет усовершенствования режущих частей зубьев ковша [14].

Экспериментальным путем А.С. Ребровым установлена оптимальная геометрия режущей части зуба и предложены расчетные формулы для определения ширины рабочей части зуба, длины этой части, а также угла заострения зуба, принятого для новых зубьев равным 26° [13]. Предложенные зависимости широко применяются для определения геометрии режущей части зубьев при проектировании отечественных землеройных машин.

Продолжаются работы в направлении повышения износостойкости зубьев и подбора новых материалов для их изготовления и наплавки режущей части. При этом широко используется легированная марганцевая

сталь марки 110Г13Л (сталь Гатфильда). Она обладает следующими физико-механическими свойствами: высокой износостойкостью, способностью воспринимать большие динамические и статические нагрузки. Имеет предел прочности  $\sigma_B = 800$ –900 МПа, условный предел текучести  $\sigma_{0,2} = 310$ –350 МПа, модуль упругости  $E = 200000$  МПа, модуль сдвига  $G = 78000$  МПа.

В целях повышения эффективности работы режущих зубьев, за счет оптимизации их геометрии, в настоящее время используются различные численные методы расчета долговечности режущих зубьев [15] и специальные программы, в частности, программный продукт COMSOL Multiphysics.

Заслуживают внимания широкопроводимые в настоящее время исследования в направлении биомеханического моделирования режущих зубьев землеройных машин [16–18].

Отдельные работы, посвященные совершенствованию зубьев ковшей землеройных машин, характеризуются патентной чистотой и защищены патентами Российской Федерации и авторскими свидетельствами СССР<sup>3,4</sup>. Представляют теоретический и практический интерес разработки ковшей с адаптирующимися зубьями, описанными в трудах [19, 20].

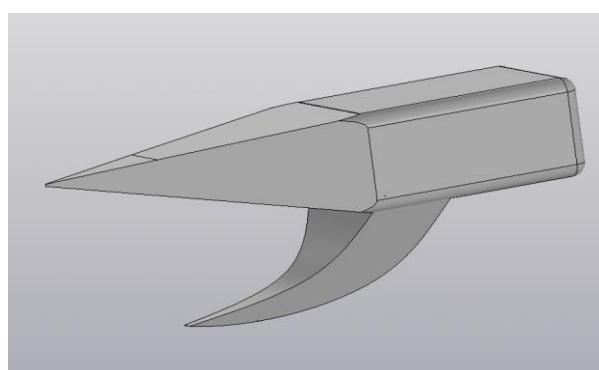


Рис. 3. Конструкция комбинированного зуба с дополнительным зубом-рыхлителем  
Fig. 3. Design of a combined tooth with an additional ripper tooth

<sup>3</sup>А. с. № 1134681, СССР, Е 02 F 9/28. Зуб к ковшу землеройной машины / Р.У. Шукуров, М.А. Тылкин, Т.И. Аскарходжаев, Р.Х. Валеев, Ю.И. Густов; заявитель и патентообладатель Ташкентский автомобильно-дорожный институт. Заявл. 31.03.82; опубл. 15.01.85. Бюл. № 2.

<sup>4</sup>А. с. № 1198163, СССР, Е 02 F 3/40. Ковш экскаватора / Т.И. Аскарходжаев, А.А. Абдуразаков, Р.Х. Валеев, Р.У. Шукуров, В.П. Брыков; заявитель и патентообладатель Ташкентский автомобильно-дорожный институт. Заявл. 31.03.82; опубл. 15.12.85. Бюл. № 46.

Как уже отмечалось, практика показывает, что наиболее распространенной и универсальной землеройной машиной является в настоящее время одноковшовый экскаватор, так как с его помощью выполняется до 40...45% земляных работ [7–9].

Для дальнейшего повышения производительности землеройных машин и увеличения их ресурса в последнее время могут применяться комбинированные зубья, предназначенные как для разрушения, так и рыхления грунта. При этом основной зуб может с дополнительным зубом-рыхлителем, как показано на рис. 3. (моделирование конструкции зуба ковша проводилось с помощью компьютерной программы КОМПАС-3D, разработанной российской компанией «Аскон»). Показанная на рис. 3 конструкция комбинированного зуба теоретически может применяться как на обычных ковшах с расположением зубьев только на режущей кромке, так и на специализированных ковшах-рыхлителях с расположением зубьев по всему днищу ковша.

В первом случае рабочий орган экскаватора или другой землеройной машины работает следующим образом. Во время наполнения ковша основные зубья срезают и разрыхляют определенную часть грунта, при этом дополнительные зубья-рыхлители, расположенные ниже основных зубьев, дополнительно рыхлят разрабатываемый грунт, незатронутый основными зубьями. Таким образом, происходит подготовка грунта или породы к следующему рабочему циклу.

Рабочий орган экскаватора или другой землеройной машины во втором случае, когда комбинированные зубья применяются на ковшах-рыхлителях, работает следующим образом. Во время первого рабочего цикла происходит наполнение ковша грунтом или породой, при этом основные зубья срезают и разрыхляют определенную часть разрабатываемого грунта, одновременно и дополнительные зубья-рыхлители, расположенные ниже основных зубьев. Начинают разрабатывать грунт, который остался незатронутым предшествующими зубьями. В это же время во взаимодействие с грунтом или породой начинают вступать зубья, расположенные на

днище ковша, еще больше и глубже разрушая и разрыхляя разрабатываемый грунт.

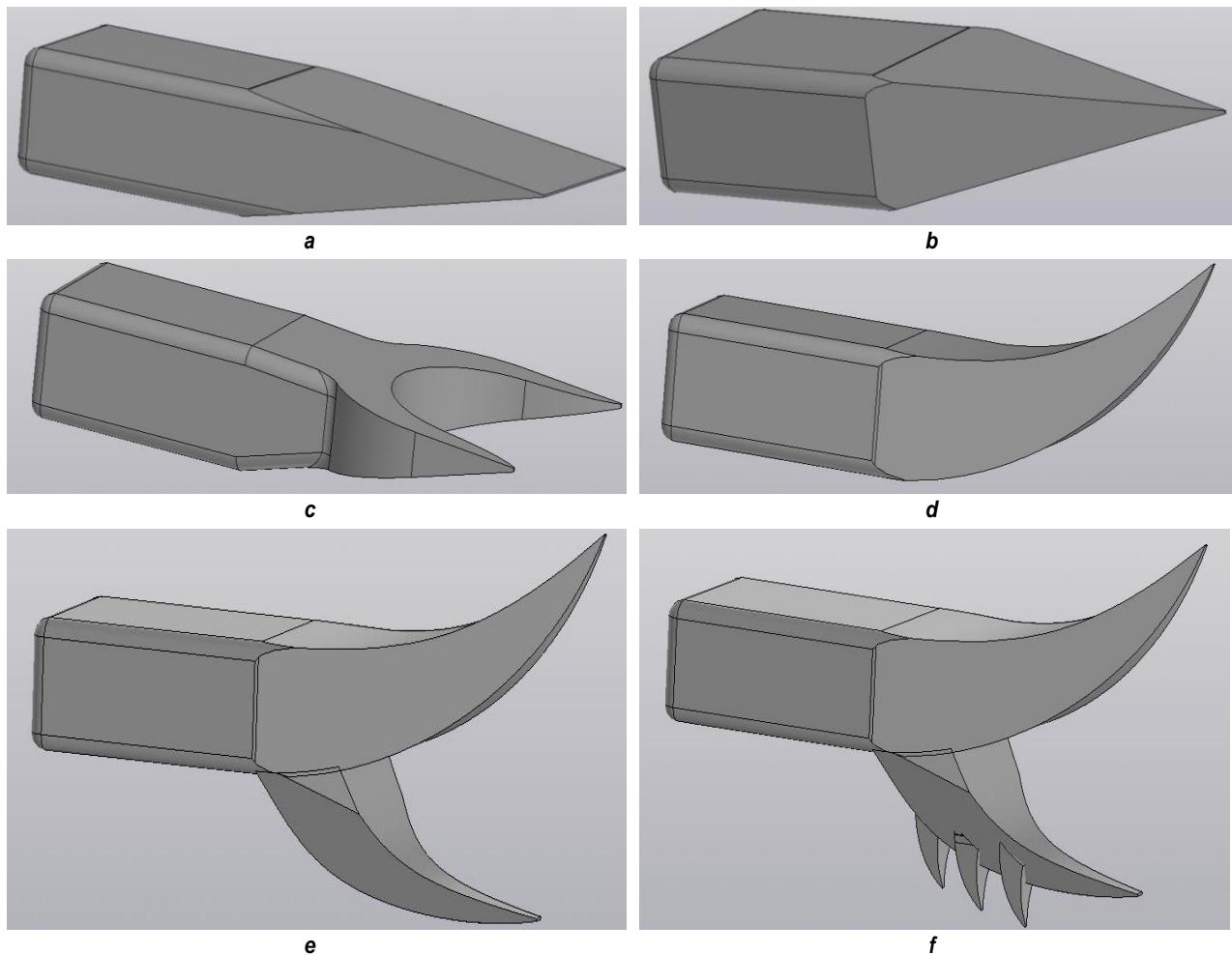
Во время последующих рабочих циклов основные зубья, расположенные на режущей кромке ковша, и расположенные на днище ковша зубья выполняют те же функции, что и в первом цикле. Однако дополнительные зубья-рыхлители, находящиеся ниже основных зубьев, производят дополнительное рыхление грунта, разрушенного и разработанного в предыдущих рабочих циклах, таким образом разрыхляя грунт до более мелких фракций, что облегчает наполнение ковша грунтом и удешевляет дальнейшую переработку горной породы на обогатительных фабриках.

Дополнительные зубья-рыхлители могут выполняться практически на всех типах зубьев, расположенных на режущей кромке ковша землеройной машины. Такая необходимость возникает при работе землеройной машины на мерзлом грунте, скальных породах, а так же при разработке тяжелых грунтов с многочисленными твердыми включениями.

**Моделирование зубьев.** Для научного обоснования оптимальной конструкции зуба ковша в данной работе построены расчетные модели основных типов зубьев, распространенных в настоящее время (рис. 4).

В частности, для проведения расчетов построены модели как традиционно существующих (рис. 4 а–д), так и новых комбинированных зубьев (рис. 4 е, ф). При этом использовались наиболее распространенные типы зубьев ковша, в том числе стандартный зуб (рис. 4 а), скальный зуб (рис. 4 б), зуб-рыхлитель (рис. 4 с), предназначенный для рыхления непрочных пород, а так же криволинейный зуб (рис. 4 д), рекомендованный в работах Р.У. Шукрова (ТАДИ, г. Ташкент, Узбекистан) в связи с его высокими техническими показателями [16–18].

Наряду с моделями широкоизвестных зубьев были построены расчетные модели новых комбинированных криволинейных зубьев с дополнительными рыхлителями разных конфигураций, а именно – с обычным дополнительным рыхлителем (рис. 4 е) и усиленным дополнительным рыхлителем (рис. 4 ф).



*Рис. 4. Построенные расчетные модели зубьев: а – стандартный; б – скальный; в – рыхлитель; г – криволинейный; д – криволинейный с дополнительным рыхлителем; е – криволинейный с усиленным дополнительным рыхлителем*  
*Fig. 4. Constructed design models of bucket teeth: a – standard long; b – rock chisel; c – ripper (Twin Tiger); d – curved (penetration); e – curved with an additional ripper; f – curved with a reinforced additional ripper*

Для исследования построенных моделей использована инженерная расчетная программа COMSOL Multiphysics (компания COMSOL Inc., Швеция). Эта программа позволила спрогнозировать распределение продольных упругих внутренних напряжений в зубе и получить его упругую деформацию при взаимодействии с различными по твердости категориями грунтов и пород.

Используя вышеуказанный программный продукт, исследуем построенные модели зубьев, предполагая, что они используются на мягких грунтах.

В программу вносим геометрическую расчетную модель, выбираем материал – легированную марганцевую сталь марки 110Г13Л, из которой она будет выполнена, принимаем

места жесткой заделки; задаем граничные условия и нагружения по осям; строим конечно-элементную сетку; запускаем программу на счет и получаем графическое распределение продольных упругих внутренних напряжений и деформаций зуба на мягких грунтах (рис. 5 а–f).

При разработке грунта или породы на зубья действует сила сопротивления копанию, а так как зуб входит в грунт под определенным углом, то дополнительно возникает изгибающий момент. Для упрощения расчета примем, что данные нагрузки воздействуют на зуб только в продольной плоскости, следовательно, возникают только продольные упругие внутренние напряжения и деформации. Деформации в разных зонах зуба разные: в

нижней части происходит растяжение волокон стали, а в верхней, наоборот, сжатие, но в дальнейшем деформацию будем рассматривать обобщенно, как перемещение зуба из исходного состояния в конечное.

Согласно работам Р.У. Шукрова, наиболее эффективным углом резания является угол  $40^\circ$ , при этом зубья должны выдерживать минимальную нагрузку не менее 60 кН и максимальную около 90 кН.

Согласно ГОСТ 12248-2020<sup>5</sup>, прочность мягких и скальных пород отличается между собой более чем в 10 раз. Таким образом, приближая наши исследования к реальным условиям работы, принимаем, что угол резания составляет  $40^\circ$ , а воспринимаемая зубом нагрузка на мягких грунтах – 9, а на скальных – 90 кН.

Данная работа направлена на установление оптимальной по эффективности и долговечности конструкции зуба. Поскольку при исследовании моделей зубьев использовалась только сталь одной марки, а модели зубьев имеют одинаковый размер, возникающие продольные упругие внутренние напряжения и деформации в исследуемых зубьях будем сравнивать с продольными упругими внутренними напряжениями и деформациями, возникающими в стандартном зубе, так как именно в нем наблюдаются самые большие изменения.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

По результатам исследований на рис. 5 и 6 можно наблюдать распределение продольных упругих внутренних напряжений, возникающих в моделях зубьев под действием силы сопротивления копанию и изгибающего момента, а так же наблюдать упругую деформацию зубьев, которые прогибаются в противоположную сторону от действующей нагрузки.

Продольные упругие внутренние напряжения и деформации постепенно уменьшаются от места соприкосновения с грунтом до места фиксации зуба. Недеформированное состояние зубьев изображено сплошными черными линиями, которые образуют контур исходного

состояния зуба, а деформированное состояние показано сплошной фигурой, на которой разными цветами показаны продольные упругие внутренние напряжения, постепенно распределенные в зубе. На данных рисунках цифрами обозначены геометрические размеры зубьев. Для чистоты результатов исследований все модели зубьев выполнялись одного размера.

Оси координат обозначены в нижнем левом углу рисунков a–f, объединенных в общие рис. 5 и 6. Сами зубья по умолчанию в программе располагаются в координатной сетке, цифры на которой обозначают геометрические размеры зубьев в метрах. С правой стороны рисунков располагаются две шкалы, одна из которых обозначает зависимость цвета напряжений от их численных значений, обозначенных в МПа, а другая показывает деформацию зуба в процентах, при этом деформация стандартного зуба взята за 100%, а все остальные зубья сравниваются с ней.

Проведенные исследования при угле резания  $40^\circ$  и нагрузке 9 кН на мягких грунтах показали, что скальный и криволинейный зубья (рис. 5 b, d) обладают весьма маленькими продольными упругими внутренними деформациями и возникающими в них напряжениями из-за маленькой площади взаимодействия кромки зуба с грунтом, однако из-за этого они малоэффективны на мягких грунтах, так как недостаточно разрыхляют грунт. Они подобно ножу прорезают грунт, не обеспечивая достаточного рыхления.

Из полученных результатов также видно, что на мягких грунтах самые большие упругие напряжения и деформации возникают в стандартном зубе (рис. 5 a), что связано с большой площадью взаимодействия кромки зуба с грунтом. Несмотря на это, им обеспечивается достаточное рыхление.

Зуб-рыхлитель подвержен большим продольным упругим внутренним деформациям и возникающим напряжениям (рис. 5 c), однако благодаря двум заостренным наконечникам внедрение в грунт происходит более легко, чем у стандартного зуба, поэтому напряжения

<sup>5</sup>ГОСТ 12248-2020. Грунты. Определение характеристик деформируемости методом компрессионного сжатия. Введ. 01.06.2021.

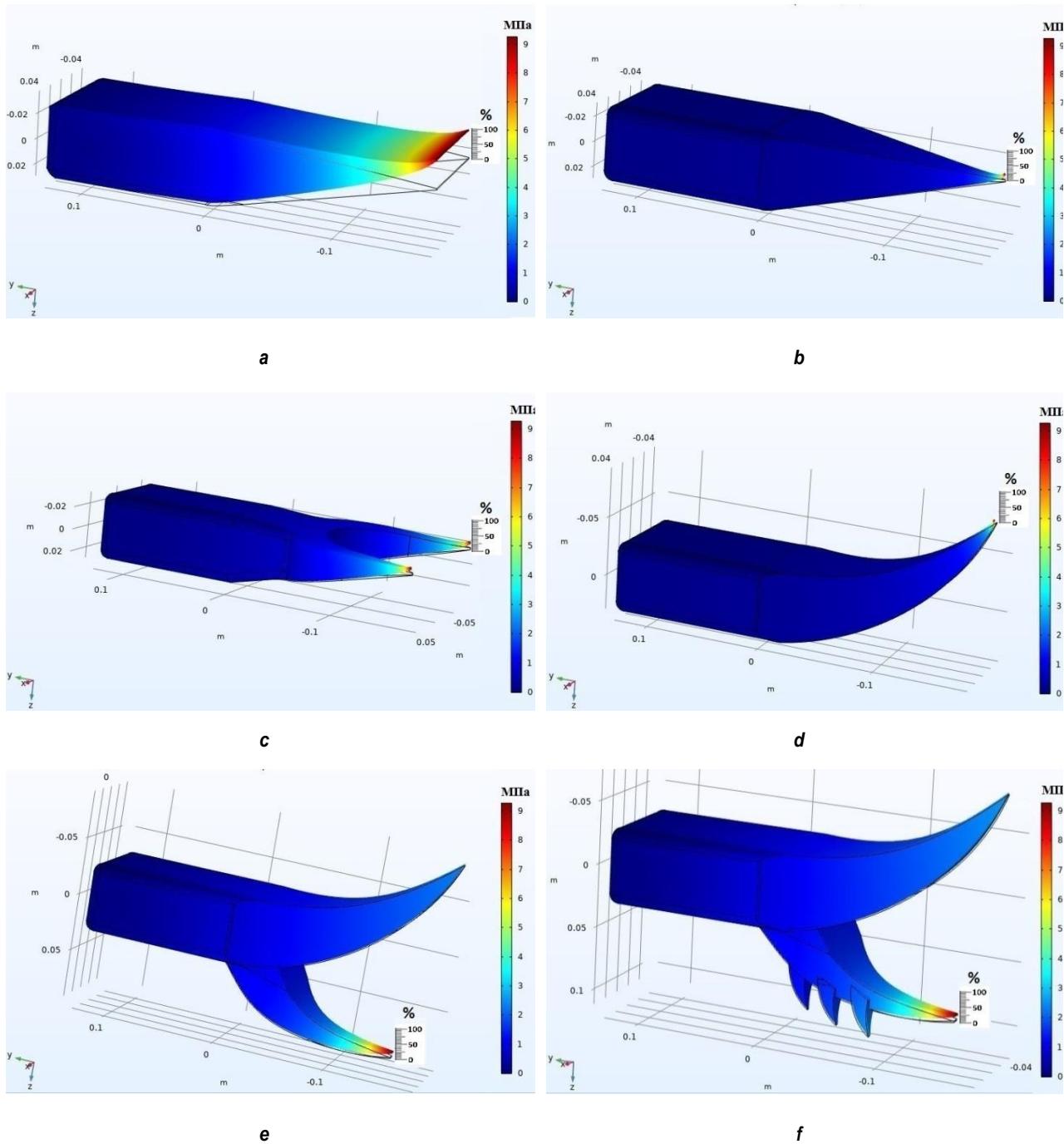


Рис. 5. Распределение продольных упругих внутренних напряжений и деформаций в зубьях моделей при работе на мягких грунтах: а – стандартный; б – скальный; в – рыхлитель; г – криволинейный; д – криволинейный с рыхлителем; е – криволинейный с рыхлителем; ж – криволинейный с усиленным рыхлителем

Fig. 5. Distribution of longitudinal internal elastic stresses and deformations in the bucket teeth of models operating in soft soils: a – standard long tooth; b – rock chisel; c – ripper (Twin Tiger); d – curved (penetration); e – curved tooth with a ripper; f – curved tooth with a reinforced ripper

и деформации в зубе меньше. При этом захватываемая площадь грунта больше, чем у стандартного зуба, что обеспечивает лучшее разрушение и рыхление мягких грунтов.

Комбинированные криволинейные зубья с дополнительным зубом-рыхлителем и с

дополнительным усиленным зубом-рыхлителем также обеспечивают достаточное разрушение и рыхление мягких грунтов из-за большой площади взаимодействия поверхности зуба с грунтом. На рис. 5 е, ж видно, что в них действуют небольшие продольные упругие

внутренние напряжения и они подвержены небольшим упругим деформациям, что обеспечивается благодаря заостренным наконечникам и изогнутой форме зубьев.

Существующая проблема скального и криволинейного зубьев, заключающаяся в недостаточном рыхлении грунта, в данном случае решается благодаря дополнительному зуборыхлителю.

Если принять упругую деформацию стандартного зуба на мягких породах за 100%, то деформация скального и криволинейного зубьев, в зависимости от исходного состояния, составляет 12–15%, зуба-рыхлителя – 30–35%, криволинейного зуба с дополнительным зубом-рыхлителем и криволинейного зуба с дополнительным усиленным зубом-рыхлителем – 32–35%.

Показания комбинированного криволинейного зуба с дополнительным зубом-рыхлителем и зуба с дополнительным усиленным зубом-рыхлителем практически идентичны. Из этого следует, что применять комбинированный зуб с дополнительным усиленным зубом-рыхлителем нецелесообразно. При этом деформация дополнительного зуба-рыхлителя в обеих моделях больше, чем деформация зуба-рыхлителя (см. рис. 5 с).

На основании полученных результатов исследований можно сделать вывод, что на мягких грунтах оптимальным сочетанием эффективности и прочности обладает зуб-рыхлитель (см. рис. 5 с), а после него стоит комбинированный криволинейный зуб с дополнительным зубом-рыхлителем (см. рис. 5 е).

На втором этапе исследований зубьев полагаем, что они работают на твердых грунтах с многочисленными каменистыми включениями, или на тяжелых грунтах в условиях вечной мерзлоты при угле резания 40° и нагрузке 90 кН.

По результатам исследований второго этапа (рис. 6 а–ф) четко видно, что на скальных породах и тяжелых грунтах в зубьях возникают более значительные продольные упругие внутренние напряжения, следовательно, возникают более крупные упругие деформации по сравнению с деформациями зубьев на мягких грунтах.

В стандартном зубе и зубе-рыхлителе

возникают самые большие напряжения, таким образом, и наибольшие деформации (рис. 6 а, с). Поэтому они не предназначены для работы в данных условиях, а предназначены только для работы на мягких грунтах.

В скальном зубе также наблюдаются большие продольные упругие внутренние напряжения и деформации (рис. 6 б), но уже значительно меньшие, чем в предыдущих двух зубьях (рис. 6 а, с). Следовательно, этот зуб более приспособлен для данных условий.

В криволинейном зубе возникающие напряжения и деформации меньше чем в два раза (рис. 6 д) по сравнению со стандартным зубом и зубом-рыхлителем. Однако применение на его нижней поверхности дополнительного зуба-рыхлителя или дополнительного усиленного зуба-рыхлителя позволяет уменьшить напряжения и деформации в зубе еще в два раза (рис. 6 е, ф) по сравнению с обычным криволинейным зубом.

Если принять упругую деформацию стандартного зуба на скальных породах за 100%, то деформация скального зуба в зависимости от исходного состояния составляет 52–55%, зуба-рыхлителя примерно – 105%, криволинейного зуба – 42–45%, комбинированного криволинейного зуба с дополнительным зубом-рыхлителем и комбинированного криволинейного зуба с дополнительным усиленным зубом-рыхлителем – 18–20%.

Как и в случае с мягкими грунтами, дополнительный усиленный зуб-рыхлитель не дает практически полезного эффекта, однако он незначительно уменьшает продольные упругие внутренние напряжения и деформации в зубе. Следует отметить, что изготовление данного зуба из-за сложности конструкции будет весьма проблематично и дорого. На основании вышеотмеченного можно заключить, что его применение на практике нецелесообразно.

По результатам исследований второго этапа можно сделать вывод, что на скальных породах и тяжелых мерзлых грунтах наилучшим сочетанием эффективности и прочности обладает комбинированный криволинейный зуб с дополнительным зубом-рыхлителем (см. рис. 3), а на втором месте – обычный криволинейный зуб.

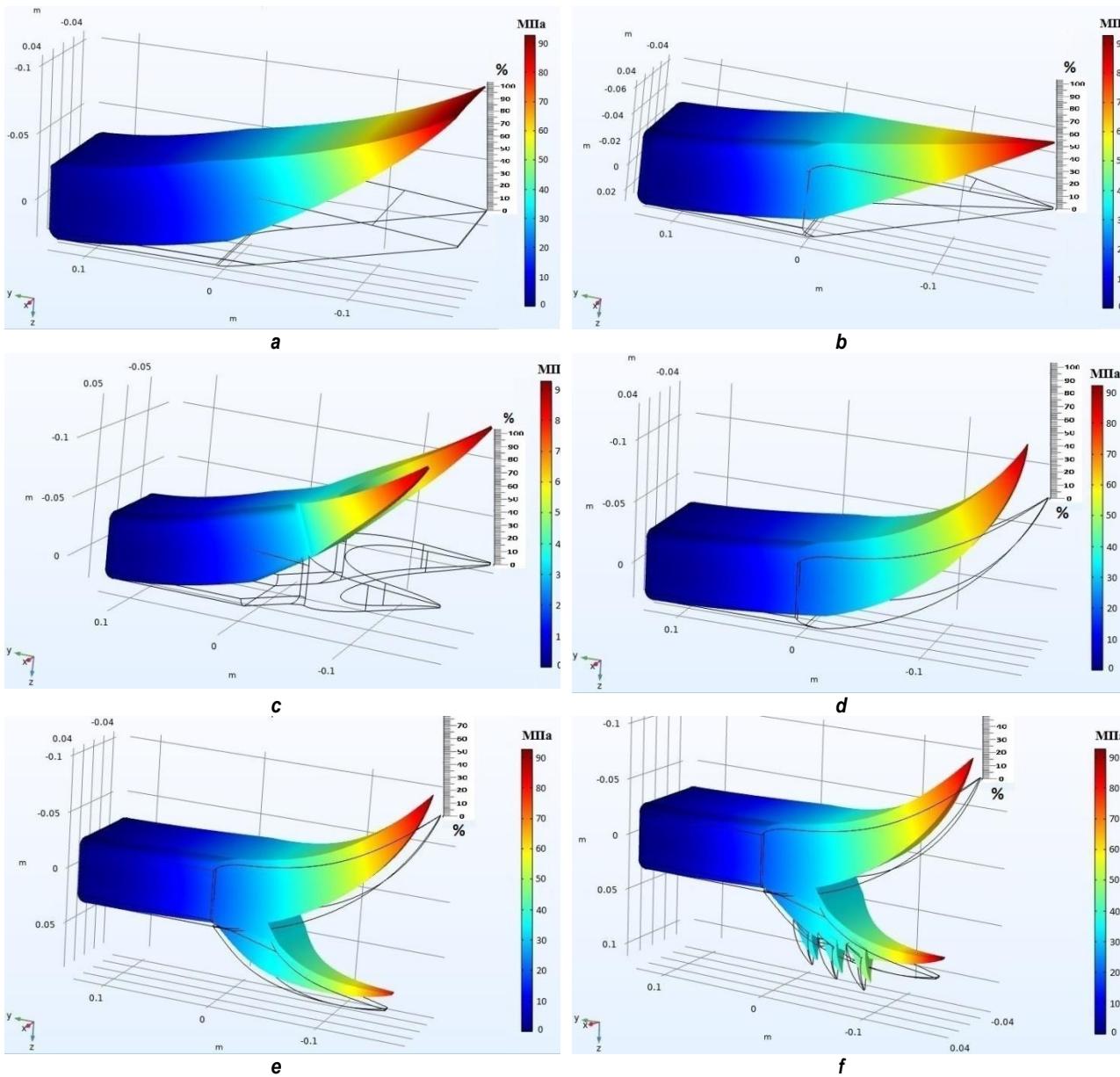


Рис. 6. Распределение продольных упругих внутренних напряжений и деформаций в зубьях моделей при работе на твердых грунтах: а – стандартный; б – скальный; в – рыхлитель; г – криволинейный; д – криволинейный с рыхлителем; е – криволинейный с усиленным рыхлителем

Fig. 6. Distribution of longitudinal internal elastic stresses and deformations in the bucket teeth of models operating in hard soils: a – standard long; b – rock chisel; c – ripper (Twin Tiger); d – curved (penetration); e – curved tooth with a ripper; f – curved tooth with a reinforced ripper

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании вышеизложенного можно сделать следующий вывод, что при разработке мягких грунтов целесообразно применять зуб-рыхлитель, а при разработке горных пород и тяжелых грунтов с многочисленными твердыми включениями, а также при работе в условиях вечной мерзлоты, целесообразно применять комбинированные зубья с дополнительным зубом-рыхлителем, расположенным

ным на нижней поверхности основного зуба (см. рис. 3).

Это позволит частично увеличить производительность землеройных машин, несколько увеличить объемы выполняемых работ, уменьшить экономические затраты на ремонт рабочего оборудования, а также позволит работать машинам в широком по твердости диапазоне разнообразных грунтов и пород, не меняя рабочий орган.

## Список источников

- Потехин В.М. Землеройная машина, виды и типы // СМИ «Вторая индустриализация России» [Электронный ресурс]. URL: <https://xn--80aaaftebbc3auk2aepkhr3ewjpa.xn--p1ai/zemleroynaya-mashina-vidyi-i-tipyi/> (02.05.2022).
- Shehadeh A., Alshboul O., Tatari O., Alzubaidi M.A., El-Sayed Salama A.H. Selection of heavy machinery for earth-work activities: a multi-objective optimization approach using a genetic algorithm // *Alexandria Engineering Journal*. 2022. Vol. 61. Iss. 10. P. 7555–7569. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.01.010>.
- Valtonen K., Keltamäki K., Kuokkala V.-T. High-stress abrasion of wear resistant steels in the cutting edges of loader buckets // *Tribology International*. 2018. Vol. 119. P. 707–720. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.12.013>.
- Bošnjak S.M., Arsić M.A., Gnjatović N.B., Milenović I.L.J., Arsić D.M. Failure of the bucket wheel excavator buckets // *Engineering Failure Analysis*. 2018. Vol. 84. P. 247–261. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.11.017>.
- Mohajeri M.J., Bergh A.J., Jovanova J., Schott D.L. Systematic design optimization of grabs considering bulk cargo variability // *Advanced Powder Technology*. 2021. Vol. 32. Iss. 5. P. 1723–1734. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2021.03.027>.
- Guevara J., Arevalo-Ramirez T., Yandun F., Torres-Torriti M., Cheein F.A. Point cloud-based estimation of effective payload volume for earthmoving loaders // *Automation in Construction*. 2020. Vol. 117. P. 103207. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103207>.
- Mal B.C. Chapter 1 - Pond construction machinery // *Aquacultural Facilities and Equipment*. 2021. P. 1–22. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85691-1.00007-6>.
- Botyan E., Pushkarev A. Improving the methodology of choosing machinery models for the formation of an excavator and vehicle fleet during the modernization of a mining transport system, with account for the Arctic specifics // *Transportation Research Procedia*. 2021. Vol. 57. P. 106–112. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.09.031>.
- Keleş A., Yıldırım M. Improvement of mechanical properties by means of titanium alloying to steel teeth used in the excavator // *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2020. Vol. 23. Iss. 5. P. 1208–1213. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2019.12.003>.
- Li Xinggao, Yuan Dajun, Jiang Xingqi, Wang Fei. Damages and wear of tungsten carbide-tipped rippers of tunneling machines used to cutting large diameter reinforced concrete piles // *Engineering Failure Analysis*. 2021. Vol. 127. P. 105533. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105533>.
- Liu Yi, Dai Feng. A review of experimental and theoretical research on the deformation and failure behavior of rocks subjected to cyclic loading // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2021. Vol. 13. Iss. 5. P. 1203–1230. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.03.012>.
- Mishra A.K., Aryal B. Operational maintenance analysis of actively utilized road construction equipments // *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 57. P. 256–264. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.051>.
- Дэлэг Д., Ванчинжав С., Пурэвдорж Н. Исследование самозатачивания зуба ковша экскаватора // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. Iss. S1. С. 402–416.
- Armstrong M., Lagos T., Emery X., Homem-de-Mello T., Lagos G., Sauré D. Adaptive open-pit mining planning under geological uncertainty // *Resources Policy*. 2021. Vol. 72. P. 102086. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102086>.
- Кадыров С.М., Шукров Р.У., Ишунин А.К. Численный метод расчета долговечности режущих органов землеройных машин // Узбекский журнал нефти и газа. 2000. № 3. С. 43–48.
- Шукров Р.У. Биомеханическое моделирование в создании режущих органов землеройных машин // Строительные и дорожные машины. 2001. № 3. С. 37–39.
- Густов Ю.И. Шукров Р.У. Биомеханическое моделирование в строительной технике // Строительные материалы и оборудование технологии XXI века. 2007. № 12. С. 46–47.
- Густов Ю.И., Шукров Р.У., Воронина Ю.В. Биомеханическое моделирование в землеройной технике // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2008. № 7. С. 16–19.
- Таджиходжаева М.Р., Шермухамедов А.А. Экскаватор с адаптирующимися зубьями ковша при разработке каменистых грунтов // Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы: сб. докл. XXIII Московской Междунар. межвузовской науч.-техн. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых (г. Москва, 4 апреля 2019 г.). М.: МИСИ – МГСУ, 2019. С. 412–416.
- Бочаров В.С., Козбагаров Р.А. Адаптация бульдозерного оборудования к изменению грунтовых условий // Особенности проектирования строительства и эксплуатации автомобильных дорог в Восточно-Сибирском регионе: матер. Междунар. науч.-техн. конф. (г. Иркутск, 23 мая 1998 г.). Иркутск: ИрГТУ, 1998. С. 221–225.

## References

- Potekhin V.M. Earthmoving machines, designs and types. SMI “Vtoraya industrializaciya Rossii”. Available from: <https://xn--80aaaftebbc3auk2aepkhr3ewjpa.xn--p1ai/zemleroynaya-mashina-vidyi-i-tipyi/> [Accessed 2nd May 2022]. (In Russ.).
- Shehadeh A., Alshboul O., Tatari O., Alzubaidi M.A., El-Sayed Salama A.H. Selection of heavy machinery for earth-work activities: a multi-objective optimization approach using a genetic algorithm. *Alexandria Engineering Journal*. 2022;61(10):7555-7569.

- [https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.01.010.](https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.01.010)
3. Valtonen K., Keltamäki K., Kuokkala V.-T. High-stress abrasion of wear resistant steels in the cutting edges of loader buckets. *Tribology International*. 2018;119:707-720. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.12.013>.
4. Bošnjak S.M., Arsić M.A., Gnjatović N.B., Milenović I.L.J., Arsić D.M. Failure of the bucket wheel excavator buckets. *Engineering Failure Analysis*. 2018;84:247-261. <https://doi.org/10.1016/j.englfailanal.2017.11.017>.
5. Mohajeri M.J., Bergh A.J., Jovanova J., Schott D.L. Systematic design optimization of grabs considering bulk cargo variability. *Advanced Powder Technology*. 2021;32(5): 1723-1734. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2021.03.027>.
6. Guevara J., Arevalo-Ramirez T., Yandun F., Torres-Torriti M., Cheein F.A. Point cloud-based estimation of effective payload volume for earthmoving loaders. *Automation in Construction*. 2020;117:103207. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103207>.
7. Mal B.C. Chapter 1 - Pond construction machinery. *Aquacultural Facilities and Equipment*. 2021;1-22. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85691-1.00007-6>.
8. Botyan E., Pushkarev A. Improving the methodology of choosing machinery models for the formation of an excavator and vehicle fleet during the modernization of a mining transport system, with account for the Arctic specifics. *Transportation Research Procedia*. 2021;57:106-112. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.09.031>.
9. Keleş A., Yıldırım M. Improvement of mechanical properties by means of titanium alloying to steel teeth used in the excavator. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2020;23(5):1208-1213. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2019.12.003>.
10. Li Xinggao, Yuan Dajun, Jiang Xingqi, Wang Fei. Damages and wear of tungsten carbide-tipped rippers of tunneling machines used to cutting large diameter reinforced concrete piles. *Engineering Failure Analysis*. 2021;127:105533. <https://doi.org/10.1016/j.englfailanal.2021.105533>.
11. Liu Yi, Dai Feng. A review of experimental and theoretical research on the deformation and failure behavior of rocks subjected to cyclic loading. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2021;13(5):1203-1230. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.03.012>.
12. Mishra A.K., Aryal B. Operational maintenance analysis of actively utilized road construction equipments. In: *Materials Today: Proceedings*. 2021;57:256-264. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.051>.
13. Deleg D., Vanchinzhav S., Purevdorzh N. Study of excavator bucket tooth self-sharpening. *Gornjy informacionno-analiticheskij byulleten' = Mining informational and analytical bulletin*. 2008;S1:402-416. (In Russ.).
14. Armstrong M., Lagos T., Emery X., Homem-de-Mello T., Lagos G., Sauré D. Adaptive open-pit mining planning under geological uncertainty. *Resources Policy*. 2021;72:102086. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102086>.
15. Kadyrov S.M., Shukurov R.U., Ishunin A.K. Numerical method to calculate earth-moving machine cutting body durability. *Uzbekskij zhurnal nefti i gaza*. 2000;3:43-48. (In Russ.).
16. Shukurov R.U. Biomechanical modeling for earth-moving machine cutting body design. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2001;3:37-39. (In Russ.).
17. Gustov Yu.I. Shukurov R.U. Biomechanical modeling of construction equipment. *Stroitel'nye materialy i oborudovanie tekhnologii HH veka*. 2007;12:46-47. (In Russ.).
18. Gustov Y.I., Shukurov R.U., Voronina Y.V. Biomechanical modeling of earthmoving equipment. *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroenii*. 2008;7:16-19. (In Russ.).
19. Tadzhihodzhaeva M.R., Shermuhamedov A.A. Excavator with adaptable bucket teeth in stony soil development. In: *Pod"emno-transportnye, stroitel'nye, dorozhnye, putesevye mashiny i robototekhnicheskie kompleksy: sbornik dokladov XXIII Moskovskoj Mezhdunarodnoj mezhvuzovskoj nauchno-tehnicheskoj konferencii studentov, magistrantov, aspirantov i molodyh uchenyh = Lifting and transport, construction, road, track machines and robotic complexes. Collected reports of the 23<sup>rd</sup> Moscow International Inter-University Scientific and Technical Conference of students, undergraduates, postgraduates and young scientists. 4 April 2019, Moscow*. Moscow: MISI – Moscow State University of Civil Engineering; 2019, p. 412-416. (In Russ.).
20. Bocharov B.C., Kozbagarov P.A. Bulldozer equipment adjustment to changes in soil conditions. *Osobennosti proektirovaniya stroitel'stva i ekspluatacii avtomobil'nyh dorog v Vostochno-Sibirskom regione: materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoj konferencii = Design features of highway construction and operation in the East Siberian region: materials of the International scientific and technical conference*. 23 May 1998, Irkutsk, Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 1998, p. 221-225. (In Russ.).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Осипов Артур Геннадьевич,**  
к.т.н., доцент,  
доцент кафедры конструирования и стандартизации в  
машиностроении,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия  
✉ arthur.osipov@rambler.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Artur G. Osipov,**  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Design and  
Standardization in Mechanical Engineering,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russian Federation  
✉ arthur.osipov@rambler.ru

Васечкин Ульян Александрович,  
студент,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия  
ulyan.vase4kin@ya.ru

**Ulyan A. Vasechkin,**  
Student,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russian Federation  
ulyan.vase4kin@ya.ru

**Вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подго-  
товку 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 20.04.2022; одобрена  
после рецензирования 05.09.2022; принятa к публика-  
ции 08.02.2023.

**Information about the article**

The article was submitted 20.04.2022; approved after re-  
viewing 05.09.2022; accepted for publication 08.02.2023.

## МАШИНОСТРОЕНИЕ

Научная статья

УДК 681.5.01524

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-61-73>

## Гашение колебаний груза подъемно-транспортных механизмов

Н.В. Федорещенко<sup>1</sup>✉<sup>1</sup>*Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия*

**Резюме.** Цель – повышение производительности различных подъемно-транспортных механизмов путем оптимизации цикла транспортировки, т.е. уменьшения времени разгона и торможения за счет гашения колебаний груза, повышения скорости установившегося движения и уменьшения времени пауз. Объектом моделирования является мостовой кран грузоподъемностью 15 т и высотой подъема до 15 м, имеющий 3 степени свободы. При разработке математической модели мостового крана использовались уравнения Лагранжа второго рода в виде нелинейной, неоднородной системы. Математический анализ процесса гашения выполнен методом составления энергетического баланса. Проведенные на модели исследования дали возможность получить оптимальную амплитуду и частоту гасящих импульсов для изменения длины подвеса в пределах 5%. Эти импульсы имеют максимальную частоту до 3 колебаний в секунду и подаются в противофазе колебаниям груза. Энергетические затраты на гашение колебаний груза, согласно расчетам, не превышают 3–4% от мощности двигателя подъема–спуска. Показано, каким образом реализуется гашение при ручном управлении и рассчитаны коэффициенты, определяющие амплитуду изменения длины подвеса груза или рабочего органа. Диапазоны изменения данных коэффициентов составляют 0,85–0,9 и 1,1–1,15 для настройки амплитуды и частоты гасящих импульсов при использовании автоматической системы. Таким образом, для мостового подъемного крана разработана система гашения колебаний груза при его перемещении. Предлагаются варианты реализации системы гашения: оператором или автоматической системой управления. Математическая модель крана пригодна для исследования различных видов механизмов. Рекомендуется использовать данный способ гашения, как при проектировании новой техники, так и при модернизации существующей, ввиду его высокой эффективности при относительно невысокой стоимости.

**Ключевые слова:** мостовой кран, способ гашения, изменение длины подвеса, алгоритм, варианты реализации

**Для цитирования:** Федорещенко Н.В. Гашение колебаний груза подъемно-транспортных механизмов // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 1. С. 61–73. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-61-73>.

## MECHANICAL ENGINEERING

Original article

## Damping of oscillations of load lifted by handling equipment

Nikolay V. Fedoreshchenko<sup>1</sup>✉<sup>1</sup>*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

**Abstract.** This work is aimed at improving the performance of various handling equipment by optimizing the transportation cycle, e.g., decreasing the time of acceleration and deceleration by damping load oscillations, increasing the steady-state motion speed, and decreasing the time of pauses. The object of modeling is an overhead crane with a capacity of 15 ton, a stroke of 15 m, and three degrees of freedom. A Lagrange equation of the first kind as a non-linear heterogeneous system was used. A mathematical analysis of the damping process was carried out by energy balance modeling. As a result, the optimal amplitude and frequency of damping impulses required to change the suspension length within 5% were obtained. These impulses have a maximum frequency of three oscillations per second and are supplied in a reversed phase to load oscillations. According to calculations, energy costs for damping load oscillations are below 3–4% of the lifting motor power. It is shown how damping is implemented in manual control, and coefficients are calculated to define the amplitude of changes in the load and arm suspension length. The ranges of changes in these coefficients comprise 0.85–0.9 and 1.1–1.15 for setting the amplitude and frequency of damping impulses when using an automatic system. On

this basis, a load oscillation damping system for a moving overhead crane is developed. Options are proposed for the damping system: by an operator or an automatic control system. The mathematical model of a crane is suitable for studying various types of equipment. Due its high efficiency and relatively low cost, the proposed method of damping is recommended when designing new equipment or improving the existing equipment.

**Keywords:** overhead travelling crane, damping method, suspension length change, algorithm, implementation options

**For citation:** Fedoreshchenko N.V. Damping of oscillations of load lifted by handling equipment. *iPolytech Journal*. 2023;27(1):61-73. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-61-73>.

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных функций электропривода (ЭП) является приведение в движение людей, грузов, механизмов, инструментов. Транспортные операции в этих механизмах предъявляют к ЭП широкий спектр самых разнообразных требований и характеристик, и практически невозможно разработать единую информационную и управляющую технологию, в полной мере удовлетворяющую все эти группы транспорта. Рассмотрим проблему гашения колебаний на примере крановых механизмов: мостовых кранах (МК), козловых, кран-балках и т.д. Это довольно большая группа подъемно-транспортных механизмов (ПТМ) с широким диапазоном технических характеристик и разнообразными видами конструктивного исполнения. До недавнего времени эти механизмы разработчики относили к вспомогательным устройствам, придавая им второстепенное значение, и по возможности стараясь обойтись без автоматизации кранов. Сегодня, когда краны становятся неотъемлемой частью системы логистики, отношение к их характеристикам и уровню автоматизации меняется [1].

Существенному повышению производительности МК препятствуют колебания груза при перемещениях. Это явление вносит неопределенность в управление краном и сводит к нулю эффект от автоматизации. Все попытки добиться повышения производительности кранов только увеличением их рабочих скоростей и ускорений заканчивались снижением средней производительности крана. Это происходит по следующим причинам:

- увеличивается время на точную остановку и успокоение колебаний груза;
- возрастает время простоев крана в результате повышения износа и отказов аппаратуры управления из-за увеличения числа включений, необходимых для гашения колебаний груза;

– повышаются напряженность труда и утомляемость оператора и стропальщика, ухудшаются условия его работы;

– повышается вероятность аварий и несчастных случаев по вине человека.

Таким образом, для увеличения производительности и надежности кранов с гибким подвесом груза необходимо исследовать явления, протекающие при раскачиваниях груза, и обеспечить его перемещение с малыми колебаниями. Решение этого вопроса позволит повысить производительность крановых механизмов и использовать их для работы в автоматическом цикле в составе гибких производственных систем [1–3].

## МЕТОДЫ ГАШЕНИЯ

Проблема разработки систем гашения колебаний груза (СГКГ) весьма актуальна, поэтому данная тема широко представлена в периодике. Имеется большое количество патентов и авторских свидетельств, статей в журналах различного уровня, докладов на конференциях на эту тему. Предложения по гашению колебаний груза ПТМ можно разделить на три большие группы:

- 1) ручное управление [4–23];
- 2) дополнительные механические устройства в виде специальных подвесок или направляющих, демпферов и гасителей, растяжек, вибраторов [22, 23];
- 3) специализированные автоматизированные системы регулирования перемещений механизмов передвижения МК [5–8, 15–17, 19–21].

Способы, основанные на ручном управлении, заключаются в том, что оператор (крановщик) определенным образом маневрирует механизмами крана. При ручном управлении система электропривода может быть сравнительно простой, однако работа оператора оказывается в этих случаях весьма интенсивной и напряженной, а сам он должен быть

достаточно опытным.

Механические способы ограничения раскачивания груза приводят к усложнению конструкции крепления груза, увеличивают инерционность и габаритные размеры систем, повышают сложность их настройки и эксплуатации.

В автоматических и автоматизированных СГКГ применяются сложные датчики отклонения (замкнутые системы) или формируются программные законы изменения ускорения механизма передвижения от времени (разомкнутые системы). К недостаткам этих систем следует отнести их высокую стоимость, сложность обслуживания, существенное запаздывание при обработке информации, зависимость от поставок зарубежных фирм.

Проанализируем более подробно СГКГ из третьей группы, т.к. за автоматическими системами будущее, они будут использоваться в автоматическом производстве, их стоимость и запаздывание будут снижаться [5, 17]. Немаловажно то, что способы этой группы базируются на достаточно точных и эффективных методах теории автоматического управления [2, 3, 18]. Так, например, классический вариант решения задачи оптимального управления по критерию «быстродействие» с использованием принципа максимума Л.С. Понtryгина [1–3]. Этот классический метод дает решение в виде многократного переключения между максимальным и минимальным значениями силы, действующей на точку подвеса груза. Для этого требуется точное измерение параметров системы: соотношение масс груза и механизма, постоянство длины подвеса и других параметров. Сочетание ошибок измерения и возможное появление случайных возмущений (ветер, препятствие, растяжение канатов, изменение трения) дает в итоге остаточные колебания груза до 15–30% от максимального отклонения каната при пуске и торможении [1, 2].

В большинстве СГКГ этой группы используется формирование закона изменения ускорения тележки МК во времени [5, 7, 8, 14, 16, 17]. Для синтеза сигнала управления применяются системы с нечетким (приближенным) управлением – фазирегулятор [11, 20], шейпинг-фильтры [20, 21], которые основаны на

перераспределении во времени силового воздействия на объект управления при сохранении неизменной величины суммарного воздействия. Применяются также пропорционально-дифференцирующие (ПД), пропорционально-интегрирующие (ПИ) и пропорционально-интегрально-дифференцирующие (ПИД) регуляторы [21], наблюдатели, модальные регуляторы и другие устройства и методы современной теории автоматического управления [18].

Зарубежные фирмы, например, «Siemens» (преобразователь частоты), «Schneider Electric» (крановая карта) предлагают СГКГ на базе микропроцессоров с программным обеспечением, с датчиками ориентации, ускорения. Это оборудование с хорошими характеристиками гашения колебаний, но имеет существенное запаздывание, высокую стоимость и ряд других недостатков, и поэтому в массовом порядке не устанавливается [5, 16].

В работе [19] предлагается для подавления аналогичных колебаний в течение одного полного периода использовать вибратор на закрепленном конце троса МК. Параметры этого вибратора, т.е. коэффициенты, определяющие величину изменения длины подвеса, рассчитываются по формуле:

$$h = \frac{l(1 - \cos 10^\circ)}{6} = \frac{0.08}{6} = 0.013l,$$

где  $h$  – изменение длины подвеса, м;  $l$  – длина подвеса, м.

На рис. 1 показано [19], что колебания подвешенного груза имеют низкую частоту, составляющую 0,3 колебаний в секунду [24–26]. Амплитуда колебаний гасящих импульсов (АГ), создаваемых приводом подъема–спуска, составляет  $A\Gamma = 5\%$  от длины подвеса груза.

После быстрого затухания наблюдаются лишь вертикальные вынужденные колебания с частотой вибратора. Частота вибраций взята произвольно – 1,5 колебаний в секунду. В итоге в системе точка подвеса–канат–груз получены слабозатухающие негармонические колебания.

Анализ существующих методов гашения колебаний МК позволяет сделать следующие выводы:

- 1) не существует универсального метода гашения колебаний, который позволил бы решить эту проблему для всех ПТМ;
- 2) проблема весьма актуальна, СГКГ – вос требованы, в разных странах (Германия, США, Китай) работают над ее решением;
- 3) решение проблемы должно содержать компромисс между гашением колебаний, быстродействием и стоимостью системы управления;
- 4) максимальную эффективность будут иметь СГКГ, которые помогают оператору реализовывать 3-этапную диаграмму перемещения груза (рис. 2) по всем координатам перемещения с гашением колебаний при разгоне и торможении;
- 5) при разработке СГКГ следует проводить исследование и проектирование для конкретного устройства МК с его характеристиками, параметрами, условиями эксплуатации и требованиями к его работе;
- 6) предлагаемый в статье метод гашения колебаний [4] близок по принципу действия к [19], но имеет ряд преимуществ, которые изложены ниже.

## ТРЕБОВАНИЯ К СИСТЕМЕ ГАШЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ ГРУЗА

Для МК с тремя степенями подвижности (подъем–спуск, перемещение тележки, перемещение моста) необходимо разработать СГКГ. Исполнительный ЭП системы гашения – привод подъема (спуска) МК. Цель – повысить производительность транспортировки МК грузоподъемностью 10 т [23]. Система

гашения должна:

- строиться на принципах параметрического управления гашением без непосредственного измерения датчиками;
- иметь минимальное время выработки управляющего воздействия;
- просто сопрягаться с системами управления тележки и моста;
- минимально загружать оператора при разгоне и торможении;
- работать при 3-этапной диаграмме перемещения груза в горизонтальной плоскости.

На рис. 2 показана такая диаграмма перемещения груза с помощью приводов тележки и моста (отдельно или совместно).

На рис. 2:  $V_{уст.}$ ,  $V_0$  – линейные скорости движения груза в установившемся режиме и в режиме дотягивания (позиционирования), м/с; 1–9 – характерные точки типового цикла перемещения груза [23].

На участках 0–3, 4–7 и 8–9 привод ускоряется или тормозится, поэтому возможны колебания груза. Кроме этого, возможны колебания, которые появляются случайным образом на любом участке данной диаграммы (ветер, столкновение с препятствием и т.п.). Эти колебания затягивают процесс транспортировки, создают условия для повышенного износа оборудования и аварий, а также для травматизма людей и поломки груза [23].

Для гашения этих колебаний, а также колебаний от столкновений с препятствиями и ветровой нагрузки (при работе крана вне помещения) предлагается использовать способ, сущность которого показана на рис. 3 [3, 4].

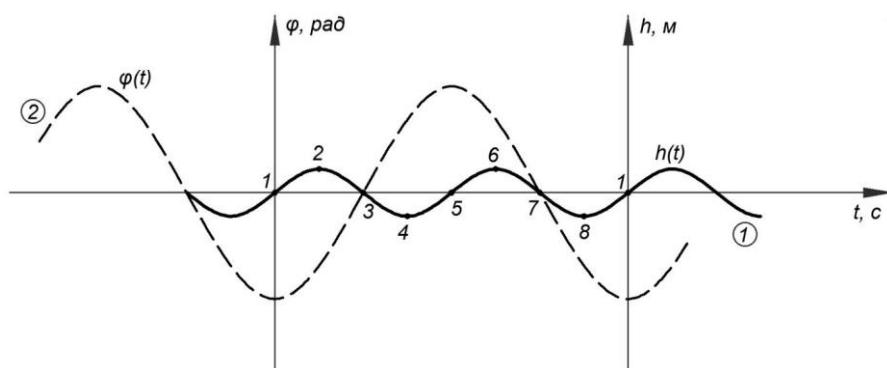


Рис. 1. Осциллограммы при вертикальных вибрациях и частоте устойчивости  $\omega_{уст.}$   
(1 – колебания вибратора, 2 – колебания груза)  
Fig. 1. Oscillograms under vertical oscillations and stability frequency  $\omega_{уст.}$   
(1 – vibrator oscillations, 2 – load oscillations)

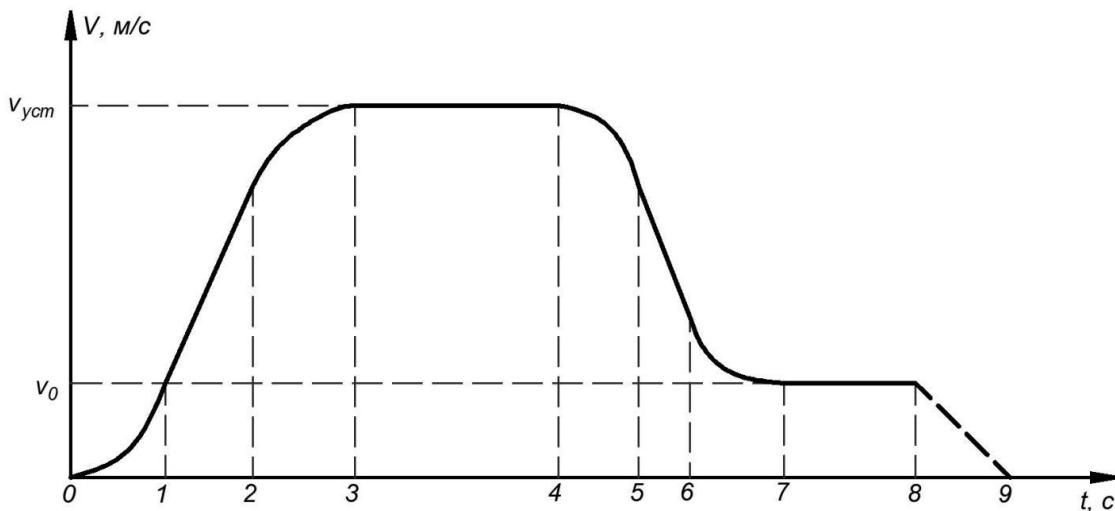


Рис. 2. Диаграмма работы приводов перемещения мостовых кранов  
 Fig. 2. Operation diagram of overhead travelling crane drives

На рис. 3:  $mg = F$  – сила, действующая на груз, кг;  $N$  – сила натяжения каната, Н. Величина  $\Delta l = h$  представляет собой удвоенную амплитуду параметрических колебаний каната подвеса длиной  $L$ . Обозначения:

$v_1, v_2$  – скорости груза в верхнем и нижнем положении его движения, м/с;

$\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – начальный и конечный (на данном полупериоде) углы отклонения груза, рад.

Цифрами 1–8 показаны характерные точки движения груза при раскачивании. При рассмотрении и расчетах не учитывались силы сопротивления воздуха и другие силы трения, которые дополнительно только увеличивали бы разницу между углами. При начальном отклонении груза на угол  $\varphi_1$  длина его подвеса, отсчитываемая от точки 0 на рис. 3,  $l$  (для точек 2, 6 и т.д.), а груз под действием внешней силы перейдет из положения 1 в положение 2. Такое колебание осуществимо, если подтягивать и опускать грузовой канат в точке 0 с помощью привода подъема–спуска МК, т.е. прикладывать внешнюю силу к грузу. Тогда центр масс при колебательном движении в точке 3 ( $\varphi = 0$ ) получит скорость  $v_1$ , которую можно рассчитать при помощи формул из [19], выведенных с учетом равенства кинетической энергии в точке 3 и потенциальной в точке 2 на рис. 3.

Из уравнения

$$\frac{mv_1^2}{2} = mgl(1 - \cos j_1) \quad (1)$$

определяем значение скорости

$$v_1 = \sqrt{2gl(1 - \cos j_1)}. \quad (2)$$

При опускании груза из точки 3 в точку 4 на высоту  $h$  его скорость (закон сохранения импульса) уменьшится до значения  $v_2$ . Определим эту скорость из формулы:

$$mv_1 l = mv_2 (l + h), \quad (3)$$

откуда получим соотношение

$$v_2 = v_1 \frac{l}{l+h}. \quad (4)$$

Как видно из формулы (4), скорость  $v_2$  меньше  $v_1$ , поэтому теперь кинетической энергии груза будет недостаточно для достижения грузом наивысшего положения, которое соответствовало бы следующему условию:  $\varphi_2 = \varphi_1$ . При этом выполняется неравенство  $\varphi_2 < \varphi_1$ , а это означает, что уменьшилась амплитуда колебаний груза. Эти потери (колебания) механической энергии в системе точка подвеса–канат–груз вносятся извне работой внешних сил (привод подъема–спуска), действующих по определенному закону изменения во времени.

Анализ колебаний в системе точка подвеса–канат–груз позволяет сформулировать характер изменения работы привода подъема–спуска. Закон управления длиной каната

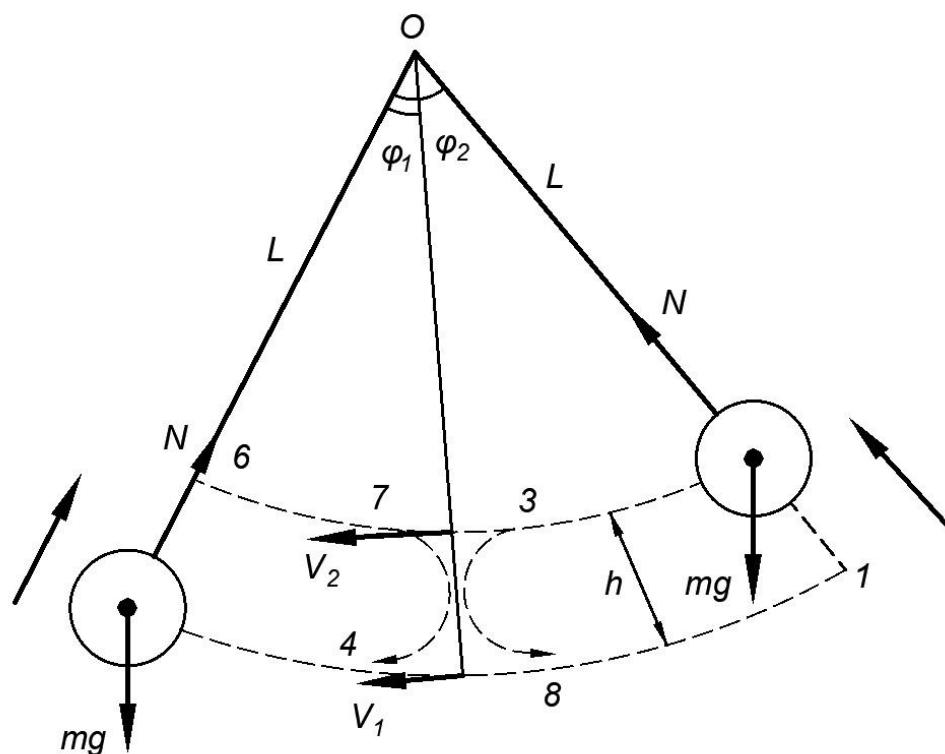


Рис. 3. Колебания груза на гибком подвесе при изменении длины подвеса  
Fig. 3. Oscillations of a flexible suspended load under suspension length variation

$h(t)$  при практическом применении может быть релейным (рис. 4) в противофазе колебаниям [3, 4] или гармоническим (см. рис. 1) с двойной или кратной ей частотой, но со сдвигом по фазе относительно колебания груза на угол  $\pi$  [19, 22].

## МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для исследования режимов работы МК была разработана обобщенная математическая модель крановой установки, которая может быть использована для описания и исследования способов гашения колебаний рабочего органа (груза) разнообразных ПТМ [2]. Эта модель позволяет получать большое количество локальных моделей, более простых по своей структуре, и проводить определение и оптимизацию параметров, а также формирование управляющих воздействий.

Обобщенная математическая модель получена при следующих условиях и допущениях, вполне приемлемых при теоретических исследованиях:

1) система предполагается жесткой – упругая податливость звеньев, зазоры в

механизмах, скольжение в приводе по сравнению с рассматриваемыми координатами пре-небрежимо малы;

2) система является неконсервативной (ее работе сопутствует диссипация энергии);

3) система с голономной (без производных), нестационарной (зависящей от времени), идеальной (удерживающей) связью;

4) рассматриваются углы отклонения груза до  $20^\circ$ , погрешность (относительная) при замене синуса угла значением самого угла не превышает 2%.

На рис. 5. показана расчетная схема крановой установки, по которой разрабатывалась математическая модель для исследования.

Данная математическая модель крановой установки построена на основе уравнения Лагранжа второго рода в виде нелинейной, неоднородной системы семи дифференциальных уравнений второго порядка с переменными коэффициентами. Локальная модель мостового крана с тремя поступательными движениями: подъем груза, передвижение тележки и моста описывается следующими уравнениями:

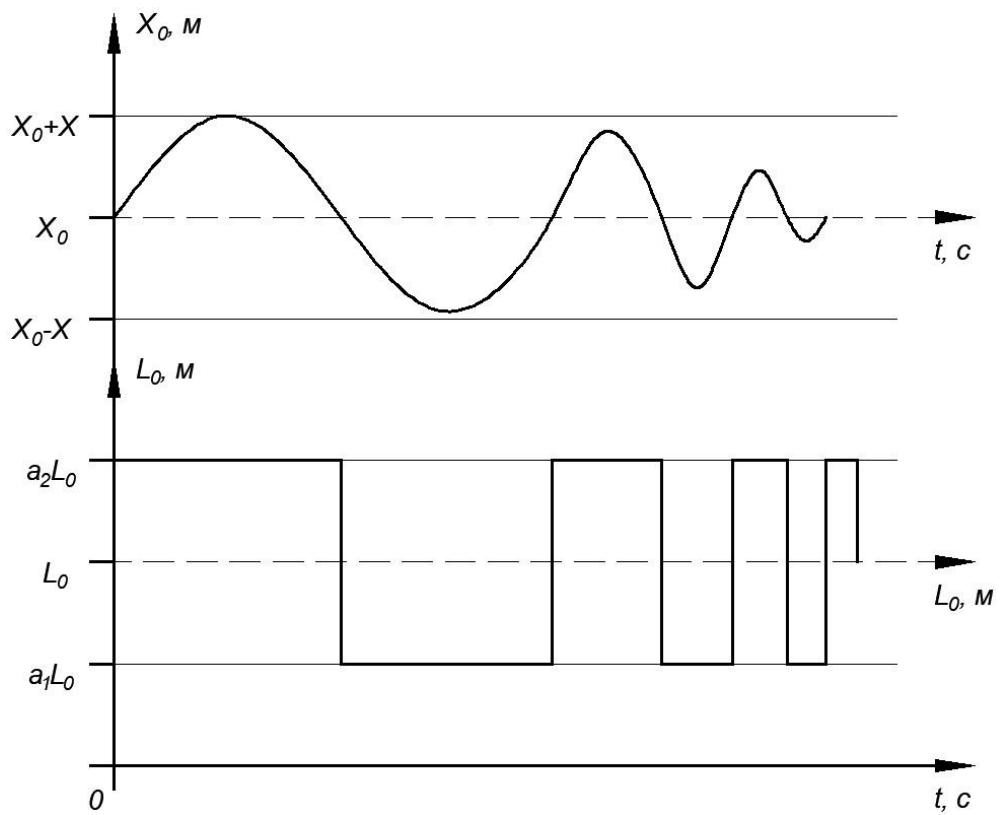


Рис. 4. Графики угла отклонения груза при колебаниях  $x(t)$  и амплитуды изменения длины его подвеса  $l(t)$   
 Fig. 4. Graphs of the load deflection angle under  $x(t)$  oscillations and  $l(t)$  amplitude of its suspension length variation

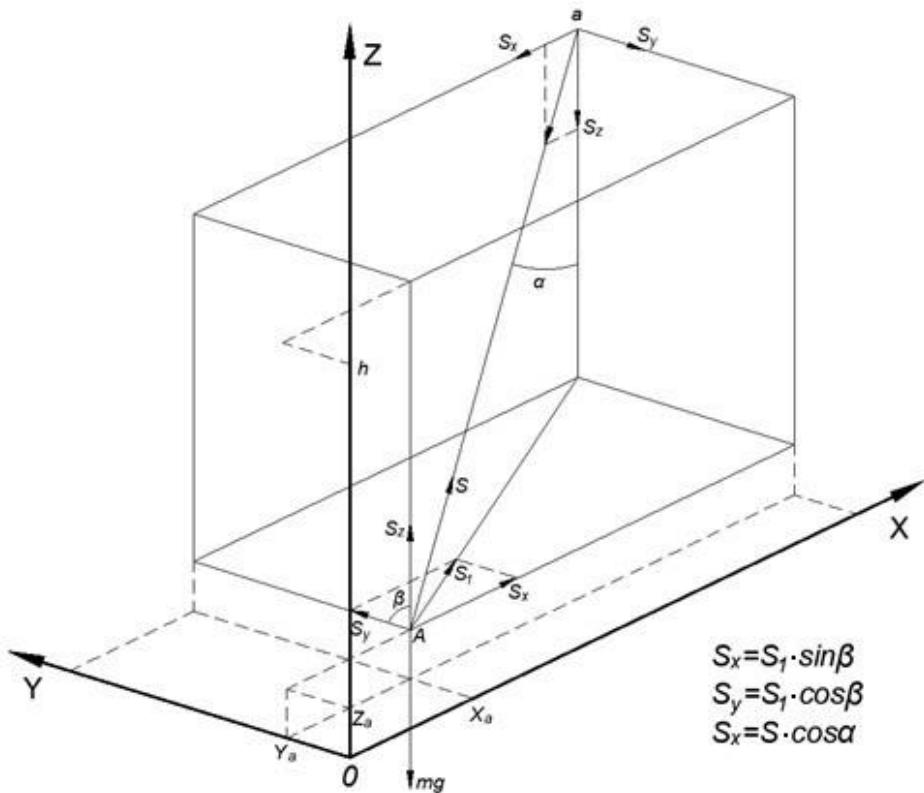


Рис. 5. Расчетная схема крановой установки  
Fig. 5. Design model of the crane installation

$$\begin{aligned}
 x'' + \frac{S}{m_1} \cdot \frac{x - x_\alpha}{l} &= \frac{1}{m_1} (P_x - W_x); \\
 y'' + \frac{S}{m_2} \cdot \frac{y - e_a}{l} &= \frac{1}{m_2} (P_y - W_y); \\
 x_\alpha'' - \frac{S}{m} \cdot \frac{x - x_\alpha}{l} &= 0; \\
 z_\alpha'' - \frac{1}{m_1 n^2 + m} (n \cdot P_l - mg) &= 0; \\
 y_\alpha'' - \frac{S}{m} \cdot \frac{y - y_\alpha}{l} &= 0; \\
 S &= m(g + z_\alpha''). \tag{5}
 \end{aligned}$$

В уравнениях (5):

$$m_1 = m_T + m_{TP};$$

$$m_2 = m_M + m_T + m_{Mp},$$

где  $m_T$ ,  $m_M$ ,  $m_T$  – массы тележки, моста и груза, кг;  $m_{TP}$ ,  $m_{Mp}$ ,  $m_{Tp}$  – приведенные вращающиеся массы соответственно привода тележки – к оси ее ходового колеса, привода моста – к оси его колеса, лебедки – к ободу барабана, кг;  $n$  – кратность подъемного полиспаста, раз;  $W_x$ ,  $W_y$  – сопротивления движению тележки и моста, приведенные к осям колес, Н;  $S$  – натяжение грузового каната, Н;  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $x_\alpha$ ,  $y_\alpha$ ,  $z_\alpha$  – координаты точек подвеса груза и самого груза, м;  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  – движущие усилия механизмов, приложенные к осям ходовых колес тележки, моста и ободу барабана лебедки, Н;  $L$  – длина подвеса, м.

Проведем ряд преобразований и решим данную систему уравнений [2] относительно перемещений.

В частном случае  $t = 0$ ,  $x = 0$ ,  $x_\alpha = 0$ ,  $x'' = 0$ ,  $x''' = 0$  (перемещение из состояния покоя):

$$\begin{aligned}
 x &= \frac{S}{2k_1^2} x_0 t^2 + \frac{S_1}{r_1^2} (1 - \cos k_1 t); \\
 x_\alpha &= \frac{S}{2k_1^2} x_0 t^2 - \frac{S}{k_1^2} (1 - \cos k_1 t); \tag{6}
 \end{aligned}$$

$$x - x_\alpha = \frac{1}{k_1^2} x_0 (1 - \cos k_1 t).$$

Из выражений (6) можно найти функции скоростей и параметры колебаний системы. Так, например, в верхнем уравнении системы (6) движение тележки и груза при жесткой подвеске характеризует 3 первых слагаемых, а колебания груза как маятника – 2 последних слагаемых. Частоту колебаний  $k_1$  определяют масса груза и масса тележки, приведенная к точке подвеса. Для перемещений моста ( $y$  и  $y_\alpha$ ) функции скорости, ускорения, а также вид колебаний аналогичные.

Для различного рода ПТМ, у которых один конец подвижного элемента конструкции закреплен жестко (или на шарнире), а другой подвержен колебаниям в процессе движения, правильность (достоверность) этого способа гашения колебаний подтверждается решением уравнений движения механизма (6):

$$x - x_\alpha = \frac{x_0}{k_1^2} (1 - \cos k_1 t), \tag{7}$$

где  $x$  – координата жестко закрепленного конца элемента конструкции (рабочего органа);  $x_\alpha$  – координата свободного конца;  $x_0$  – движущее усилие;  $k_1$  – собственная частота колебаний системы.

$$k_1 = \sqrt{\frac{g}{L_0}} \left( \frac{m+m_1}{m} \right), \tag{8}$$

где  $m$  – масса перемещаемого груза, кг;  $m_1$  – масса конструкции рабочего органа и привода, кг;  $L_0$  – длина элемента конструкции (рабочего органа), м;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Выражения (7) и (8) характеризуют поведение системы в частном случае при нулевых начальных условиях и движении конструкции из состояния покоя, когда в момент времени  $t = 0$ ,  $x = 0$ ,  $x_\alpha = 0$ ,  $x'' = 0$ ,  $x''' = 0$ , а также и производные от координат  $x_\alpha$ ,  $x$ .

В процессе исследования на модели (5)–(8) длина рабочего органа изменялась на незначительную величину. Параметры релейного закона изменения длины рабочего органа, а именно – направление (увеличение

или уменьшение длины), длительность импульса, его амплитуда, количество импульсов, определяются в зависимости от параметров самой системы: массы рабочего органа и переносимого груза, динамических свойств электропривода, заданной степени гашения колебаний. Численные значения параметров релейного закона управления рассчитываются по методикам, которые приняты в теории оптимального управления [1, 2, 18].

Расчеты проведены при условии, что скорость точки подвеса (привод подъема–спуска) может изменяться практически мгновенно. Это предположение справедливо, если время изменения скорости точки подвеса от нуля до установившегося значения (время разгона) мало по сравнению с периодом свободных колебаний системы с подвешенным грузом. У большинства электрических двигателей ПТМ малой и средней мощности время выхода скорости (механическая постоянная) на стационарный режим значительно меньше периода колебаний груза. Это справедливо и при торможении, к тому же современные ПТМ оснащены тормозными системами, которые обеспечивают практически мгновенную остановку тележки [2, 4].

Уменьшения разности координат  $x$  и  $x_\alpha$ , то есть уменьшения упругих колебаний, можно добиться, уменьшая движущее усилие  $x_0$  или изменения его плавно. Но это не дает преимущества в быстродействии и повышении производительности ПТМ. Изменений собственной частоты  $k_1$  можно добиться двумя путями: первый – изменяя массу груза, второй – изменением длины подвеса груза или длины элемента конструкции. Масса задана технологией транспортировки, поэтому для гашения следует использовать изменение длины подвеса груза. На рис. 6 показан характер изменения отклонений груза при различных длинах подвеса.

Анализируя результаты моделирования, можно сделать следующий вывод: изменение собственной частоты системы  $k_1$  влияет на амплитуду и частоту колебаний рабочего органа системы. Направление изменения длины в сторону увеличения или уменьшения начальной величины зависит от того, в какую сторону отклонился свободный незакрепленный конец троса или конструкции. Первый импульс на изменение длины при начале движения моста всегда должен уменьшать ее, т.е.  $x > x_\alpha$ .

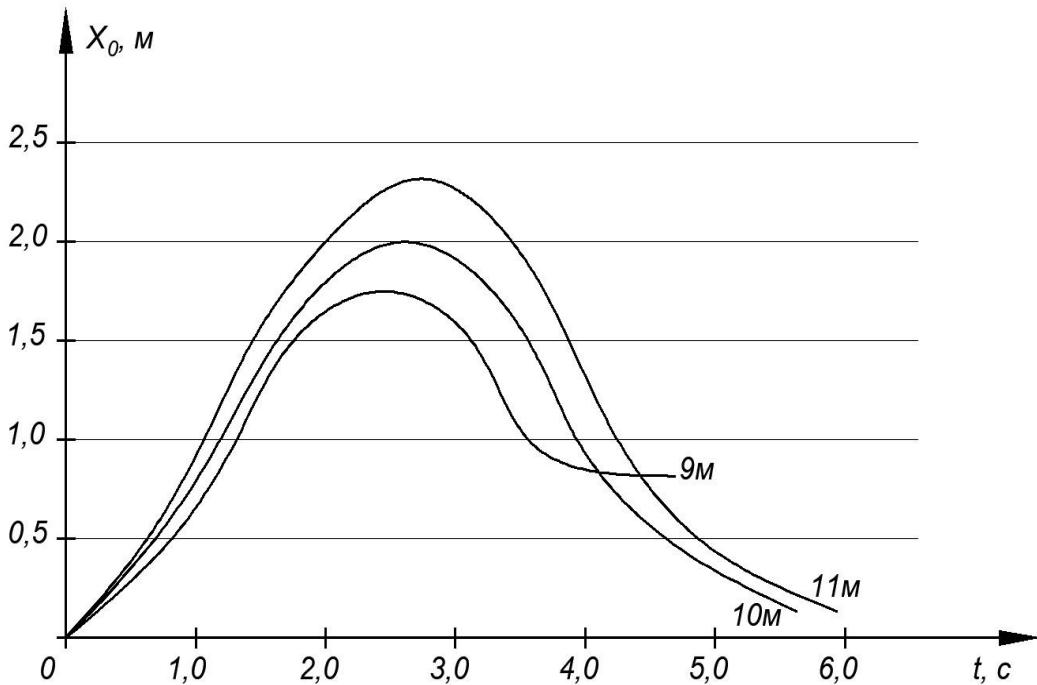


Рис. 6. Графики изменения колебаний груза при разной длине подвеса  
 Fig. 6. Graphs of load oscillation variation at different suspension lengths

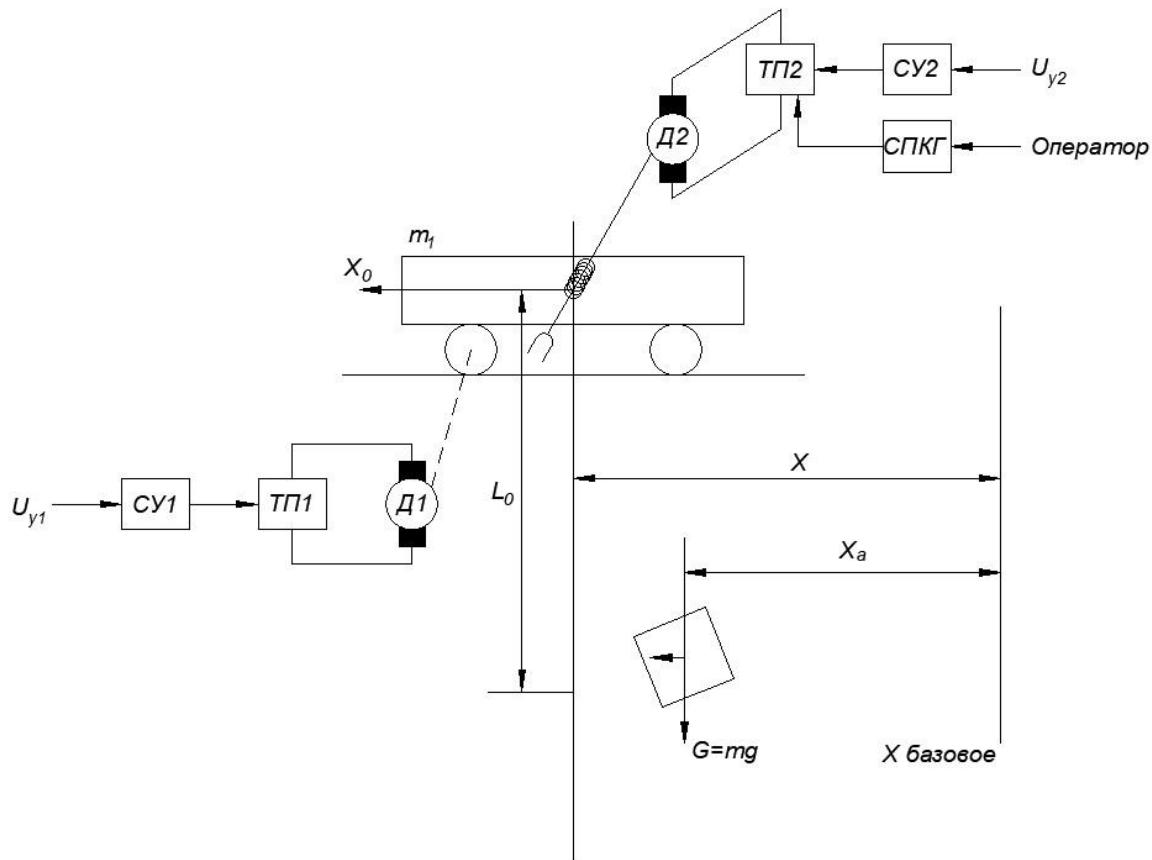


Рис. 7. Структурная схема систем гашения колебаний груза  
Fig.7. Block diagram of load oscillation damping systems

При остановке, например, тележки мостового крана, в точке позиционирования груз по инерции будет еще двигаться, т.е.  $x_a > x$ , поэтому значение длины подвеса груза следует увеличить. Амплитуда гасящего импульса вначале движения при этом будет определяться  $A_{\text{нач.}} = a_1 \cdot L$ , а при позиционировании –  $A_{\text{поз.}} = a_2 \cdot L$ . Коэффициенты  $a_1$  и  $a_2$  определяют амплитуду изменения длины подвеса груза или рабочего органа. Диапазоны изменения этих коэффициентов  $0,85 < a_1 < 0,9$  и  $1,1 < a_2 < 1,15$  получены при исследованиях на вышеописанной модели. При исследовании рассматривалась большая группа ПТМ различной грузоподъемности (до 15 т) и высотой подъема до 15 м [3, 13].

Величина коэффициентов  $a_1$  и  $a_2$  зависит от заданного времени гашения колебаний, допустимых ускорений груза и ряда других параметров. Количество импульсов управления электроприводом изменения длины рабочего органа и их длительность можно определить

путем использования методики, изложенной в [2, 4].

## РЕАЛИЗАЦИЯ

Возможно несколько вариантов исполнения СГКГ на основе рассмотренного выше способа [3, 4].

1. Инструкция для машинистов (операторов) МК. Достоинства – простота реализации и обучения. Недостатки – не дает существенного повышения быстродействия и не снижает нагрузку на персонал.

2. Цифровое управление – крановая карта, встраиваемая в преобразователь привода подъема–спуска. Сигнал на гашение подает оператор. Достоинства: современное оборудование, отсутствие датчиков. Недостатки: запаздывание из-за обработки сигнала, высокая стоимость.

3. Отдельный канал управления двигателем подъема–спуска для гашения колебаний груза. В СГКГ должны входить полупро-

водниковый широтно-импульсный преобразователь или регулятор напряжения, а также система формирования гасящих импульсов, ножной нажимной командоаппарат для машиниста. Схема реализации – на рис. 7. Достоинства: простота реализации, относительно низкая стоимость. Недостатки: согласование с производителем МК, необходимость обучения машинистов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования, расчеты и моделирование показали, что при определенной амплитуде и расчетной частоте включение–отключение привода, которое колеблет точку подвеса груза, можно получить необходимое и быстрое демпфирование колебаний груза, вызванных ускоренным перемещением моста крана или тележки.

## Список источников

1. Герасимяк Р.П., Лещёв В.А. Анализ и синтез крановых электромеханических систем. Одесса: СМИЛ, 2008. 192 с.
2. Смехов А.А., Ерофеев Н.И. Оптимальное управление подъемно-транспортными машинами. М.: Машиностроение, 1975. 293 с.
3. Федорещенко Н.В. Управление колебаниями подъемно-транспортных механизмов // Оптимизация режимов работы систем электроприводов: межвузовский сборник. Красноярск: КрПИ, 1992. С. 53–57.
4. Болотова В.А., Федорещенко Н.В., Машукова Н.И. Проектирование актуаторов для систем позиционирования // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием: в 2 т. (г. Иркутск, 21–25 апреля 2015 г.). Иркутск: ИРНИТУ, 2015. Т. 1. С. 159–162.
5. Ишматов З.Ш., Бахматов С.А. Электропривод крановых механизмов перемещения с функцией предотвращения раскачивания груза // Электроприводы переменного тока: тр. XVII Междунар. науч.-техн. конф. (г. Екатеринбург, 26–30 марта 2018 г.). Екатеринбург, 2018. С. 53–57.
6. Enin S.S., Omelchenko E.Y., Fomin N.V., Beliy A.V. Overhead crane computer model // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2018. Vol. 327. Iss. 2. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/2/022028>.
7. Enin S.S., Omelchenko E.Y., Beliy A.V. Crane anti-sway control system with sway angle feedback // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. 2018. <https://doi.org/10.1109/ICI-EAM.2018.8728750>.
8. Enin S., Omelchenko E., Maksimov I. Crane anti-sway control system algorithm // IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (Magnitogorsk, 4–5 October 2019). Magnitogorsk: IEEE, 2019. Р. 54–58. <https://doi.org/10.1109/PEAMI.2019.8915227>.
9. Ловчаков В.И. Необходимые условия максимального быстродействия линейных динамических систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18. № 6. С. 378–382. <https://doi.org/10.17587/mau.18.376-382>.
10. Даньшина А.А., Пятибратов Г.Я. Многофакторный выбор электромеханического модуля для сбалансированного манипулятора // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2016. <https://ipolytech.ru>
11. Khizhniakov Yu.N., Yuzhakov A.A., Bezukladnikov I.I., Trushnikov D.N. Adaptive fuzzy control of tracking electro-mechanical systems // Russian Electrical Engineering. 2018. Vol. 89. Iss. 11. P. 648–651.
12. Bogdanov D.Yu., Pyatibratov G.Ya., Bekin A.B. System Implementation of Speed Restriction While Developing the Force Compensation Systems // Procedia Engineering. 2016. Vol. 150. P. 1032–1040. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.210>.
13. Прокопьев А.В., Федорещенко Н.В. Упругие колебания промышленных электроприводов // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием (г. Иркутск, 28–30 апреля 2016 г.). Иркутск: ИРНИТУ, 2016. С. 123–127.
14. Pyatibratov G.Y., Bogdanov D.Y., Bekin A.B. Retrofit simulator to train cosmonauts for working in non-gravity and reduced gravity environment // Procedia Engineering. 2015. Vol. 129. P. 42–50. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.006>.
15. Щербаков В.С., Корытов М.С., Шершнева Е.О. Активный способ гашения колебаний груза после остановки мостового крана // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17. № 6. С. 368–374.
16. Нуриахметов Р.М., Новиков В.А. Системы управления движением подъемно-транспортных машин с реализацией способов предотвращения раскачивания груза // Известия Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ». 2016. № 1. С. 42–44.
17. Корытов М.С., Щербаков В.С. Оценка точности суперпозиции плоских моделей мостового крана при моделировании гашения пространственных колебаний груза // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2018. Т. 15. № 1. С. 29–36. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-1-29-36>.
18. Федорещенко Н.В. Оптимизация радиуса приведения механизма актуатора для точного позиционирования в автоматическом производстве // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2019. Т. 23. № 6. С. 1116–1125. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1116-1125>.
19. Лещёв В.А. Параметрическое управление гашением колебаний подвешенного на кране груза //

- Электрические и компьютерные системы. 2011. № 4. С. 39–41.
20. Шмарловский А.С. Эффективные алгоритмы управления подъемно-транспортными механизмами // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. 2011. № 5. С. 26–34.
21. Марков А.В., Подковырова А.А., Хаджинов М.К., Шведова О.А. Анализ колебаний троса и способов их подавления для грузоподъемных механизмов // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. 2014. № 7. С. 83–89.
22. Капица П.Л. Маятник с вибрирующим подвесом // Успехи физических наук. 1951. № 44. Вып. 1. С. 7–20.
23. Федорещенко Н.В. Модернизация промышленных электроприводов // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием: в 2 т. (г. Иркутск, 18 февраля 2017 г.). Иркутск: ИРНИТУ, 2017. Т. 1. С. 117–119.
24. Ловчаков В.И., Сухинин Б.В., Сурков В.В. Нелинейные системы управления электроприводами и их аналитическое конструирование: монография. Тула: ТулГУ, 1999. 180 с.
25. Abdel-Rahman E.M., Nayfeh A.H, Masoud Z.N. Dynamics and control of cranes: a review // Journal of Vibration and Control. 2003. Vol. 9. Iss. 7. P. 863–908. <https://doi.org/10.1177/1077546303009007007>.
26. Cekus D., Depta F., Kubanek M., Kuczyński Ł, Kwiatoń P. Event visualization and trajectory tracking of the load carried by rotary crane // Sensors. 2022. Vol. 22. Iss. 2. P. 480. <https://doi.org/10.3390/s22020480>.

### References

1. Gerasimyak R.P., Leshchyov V.A. *Analysis and synthesis of crane electromechanical systems*. Odessa: SMIL; 2008, 192 p. (In Russ.).
2. Smekhov A.A., Erofeev N.I. *Optimal control of handling machinery*. Moscow: Mashinostroenie; 1975, 293 p. (In Russ.).
3. Fedoreshchenko N.V. Oscillation control of hoisting and carrying mechanisms. *Optimizatsiya rezhimov raboty sistem elektroprivodov = Optimization of operating modes of electric drive systems*. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk Polytechnic Institute; 1992, p. 53-57. (In Russ.).
4. Bolotova V.A., Fedoreshchenko N.V., Mashukova N.I. Designing actuators for positioning systems. *Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyah Sibiri: materialy Vserossijskoj nauchnotekhnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem = Improving efficiency of energy production and use in Siberia: Proceedings of All-Russian scientific and technical conference with international participation*. 21–25 April 2015, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2015, vol. 1, p. 159–162. (In Russ.).
5. Ishmatov Z.Sh., Bakhmatov S.A. Electric drive of crane mechanisms with the anti-sway function. In: *Elektroprivody peremennogo toka: trudy XVII Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii = AC electric drives: Proceedings of 17<sup>th</sup> International scientific and technical conference*. 26–30 March 2018, Ekaterinburg. Ekaterinburg; 2018, p. 53-57. (In Russ.).
6. Enin S.S., Omelchenko E.Y., Fomin N.V., Belyi A.V. Overhead crane computer model. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2018;327(2). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/2/022028>.
7. Enin S.S., Omelchenko E.Y., Belyi A.V. Crane anti-sway control system with sway angle feedback. In: *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*. 2018. <https://doi.org/10.1109/ICI-EAM.2018.8728750>.
8. Enin S., Omelchenko E., Maksimov I. Crane anti-sway control system algorithm. In: *IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice*. 4–5 October 2019, Magnitogorsk. Magnitogorsk: IEEE; 2019, p. 54-58. <https://doi.org/10.1109/PEAMI.2019.8915227>.
9. Lovchakov V.I. Necessary conditions of time-optimality of linear dynamical systems. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie = Mechatronics, Automation, Control*. 2017;18(6):376-382. (In Russ.). <https://doi.org/10.17587/mau.18.376-382>.
10. Danzhina A.A., Pyatibratov G.Ya. Multifactorial determination of electromechanical module for prospective balanced manipulator. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika = Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2016;16(3):23-31. (In Russ.). <https://doi.org/10.14529/power160303>.
11. Khizhniakov Yu.N., Yuzhakov A.A., Bezukladnikov I.I., Trushnikov D.N. Adaptive fuzzy control of tracking electromechanical systems. *Russian Electrical Engineering*. 2018;89(11):648-651.
12. Bogdanov D.Yu., Pyatibratov G.Ya., Bekin A.B. System implementation of speed restriction while developing the force compensation systems. *Procedia Engineering*. 2016;150:1032-1040. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.210>.
13. Prokopiev A.V., Fedoreshchenko N.V. Elastic oscillations of industrial electric drives. *Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyah Sibiri: materialy Vserossijskoj nauchnotekhnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem = Improving efficiency of energy production and use in Siberia: Proceedings of All-Russian scientific and technical conference with international participation*. 28–30 April 2016, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2016, p. 123-127. (In Russ.).
14. Pyatibratov G.Y., Bogdanov D.Y., Bekin A.B. Retrofit simulator to train cosmonauts for working in non-gravity and reduced gravity environment. *Procedia Engineering*. 2015;129:42-50. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.006>.
15. Shcherbakov V.S., Korytov M.S., Shershneva E.O. Active damping method for load oscillations after stopping an overhead crane. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya*,

Управление = Mechatronics, Automation, Control. 2016;17(6):368-374. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.17587/mau.17.368-374>.

16. Nuriakhmetov R.M., Novikov V.A. Lifting machines anti-sway control systems. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo elektrotekhnicheskogo universiteta «LETI» = Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University*. 2016;1:42-44. (In Russ.).

17. Korytov M.S., Shcherbakov V.S. Accuracy evaluation of the bridge crane flat models' superposition at modeling the saturation of cargo spatial vibrations. *Vestnik SibADI = The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2018;15(1):29-36. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-1-29-36>.

18. Fedoreshchenko N.V. Actuator mechanism reduction radius optimization for precise positioning in automatic production. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(6):1116-1125. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1116-1125>.

19. Leshchyov V.A. Parametric control of a hanged at a crane load vibrations. *Elektricheskie i komp'yuternye sistemy*. 2011;4:39-41. (In Russ.).

20. Shmarlouski A.S. Effective control algorithms for lift-and-carry devices. *Doklady Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radioelektroniki*. 2011;5:26-34. (In Russ.).

21. Markov A.V., Podkovirova A.A., Hadzhinov M.K., Shvedova O.A. Analysis of rope sway and methods for damping

the oscillation arising during the movement of a load using hoisting mechanism. *Doklady Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radioelektroniki*. 2014;7:83-89. (In Russ.).

22. Kapica P.L. Pendulum with vibrating suspension. *Uspekhi fizicheskikh nauk = Advances in Physical Sciences*. 1951;44(1):7-20. (In Russ.).

23. Fedoreshchenko N.V. Modernization of industrial electric drives. *Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyah Sibiri: materialy Vseso Rossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii s mezhdu-narodnym uchastiem = Improving efficiency of energy production and use in Siberia: Proceedings of All-Russian scientific and technical conference with international participation*. 18 February 2017, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk National research Technical University; 2015, vol. 1, p. 117-119. (In Russ.).

24. Lovchakov V.I., Sukhinin B.V., Surkov V.V. *Nonlinear electric drive control systems and their analytical design: monograph*. Tula: Tula State University; 1999, 180 p. (In Russ.).

25. Abdel-Rahman E.M, Nayfeh A.H, Masoud Z.N. Dynamics and control of cranes: a review. *Journal of Vibration and Control*. 2003;9(7):863-908. <https://doi.org/10.1177/1077546303009007007>.

26. Cekus D., Depta F., Kubanek M., Kuczyński Ł, Kwiatoń P. Event visualization and trajectory tracking of the load carried by rotary crane. *Sensors*. 2022;22(2):480. <https://doi.org/10.3390/s22020480>.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Федорещенко Николай Васильевич,**  
к.т.н., доцент,  
доцент кафедры электропривода и электрического транспорта,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия  
[✉ n-fed38@mail.ru](mailto:n-fed38@mail.ru)

### Критерии авторства

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

### Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

### Информация о статье

Статья поступила в редакцию 24.06.2022; одобрена после рецензирования 20.09.2022; принята к публикации 03.03.2023.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Nikolay V. Fedoreshchenko,**  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Electric Drive and Electric Transport,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia  
[✉ n-fed38@mail.ru](mailto:n-fed38@mail.ru)

### Authorship criteria

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

### Conflict of interests

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

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

### Information about the article

The article was submitted 24.06.2022; approved after reviewing 20.09.2022; accepted for publication 03.03.2023.

Original article

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-74-82>

## Post-emergency reconfiguration of a distribution network as a method for restoring power supply to consumers

**Elena V. Karpova<sup>1</sup>✉, Irina I. Golub<sup>2</sup>**<sup>1,2</sup>*Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia*

**Abstract.** The work is aimed at solving the problem of using reconfiguration and additional reactive power sources to restore power to consumers of the medium-voltage distribution network in the case of emergency disconnections of connections by bus section circuit breakers. The reconfiguration problem for a 118-node test distribution network is solved using a high-speed algorithm involving the construction of a maximum spanning tree on a network graph as the basis for determining information about the composition of branches and chords of independent circuits necessary to restore power following disconnection. To ensure acceptable voltage levels following power restoration, additional reactive power sources determined using singular Jacobian matrix analysis methods are installed in the sensor nodes of the network. For the test circuit, the modes for single disconnections of individual sectional switches, including in dead-end sections, are analysed. By optimally reconfiguring the network in the normal mode, it is possible to reduce voltage deviations from 13% to 7%. For the modes caused by disconnections of individual bus section circuit breakers that lead to unacceptable voltage deviations, the set-down locations and reactive power of additional sources are selected. In the most severe of the considered disconnection scenarios, the installation of additional sources provided a reduction in voltage deviations from 18 to 8%. Thus, the methods proposed by the authors make it possible to restore the test network mode following emergency disconnections and ensure that the voltages in the network nodes are maintained within acceptable limits, both in normal and in post-emergency modes.

**Keywords:** distribution network, resilience, reconfiguration, supply restoration

**For citation:** Karpova E.V., Golub I.I. Post-emergency reconfiguration of a distribution network as a method for restoring power supply to consumers. *iPolytech Journal*. 2023;27(1):74-82. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-74-82>.

### ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья  
УДК 621.311

## Послеаварийная реконфигурация распределительной сети как способ восстановления электроснабжения потребителей

**Е.В. Карпова<sup>1</sup>✉, И.И. Голуб<sup>2</sup>**<sup>1,2</sup>*Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Россия*

**Резюме.** Цель – проведение исследований, направленных на решение проблемы использования реконфигурации и дополнительных источников реактивной мощности для восстановления питания потребителей распределительной сети среднего напряжения при аварийных отключении связей с секционными выключателями. Проблема реконфигурации для 118-узловой тестовой распределительной сети решается с использованием быстродействующего алгоритма, заключающегося в построении на графе сети максимального покрывающего дерева и определения на его основе информации о составе ветвей и хордах независимых контуров, необходимой для восстановления питания после отключения связей. Для обеспечения допустимых уровней напряжений после восстановления питания производится установка дополнительных источников реактивной мощности в сенсорных узлах сети, определяемых методами сингулярного анализа матрицы Якоби. Для тестовой схемы проанализированы

режимы при единичных отключении отдельных секционных выключателей, в том числе и в тупиковых секциях. Показано, что оптимальная реконфигурация сети в нормальном режиме позволила уменьшить отклонения напряжений с 13 до 7%. Для режимов, вызванных отключениями отдельных секционных выключателей, которые приводят к недопустимым отклонениям напряжения, выбраны места размещения и реактивные мощности дополнительных источников. В наиболее тяжелом из рассмотренных сценариев отключения связей установка дополнительных источников обеспечила снижение отклонений напряжений с 18 до 8%. Таким образом, предлагаемые авторами методы позволяют восстановить режим тестовой сети после аварийных отключений связей и обеспечить поддержание напряжений в узлах сети в допустимых пределах, как в нормальном, так и в послеаварийном режимах.

**Ключевые слова:** распределительная сеть, отказоустойчивость, реконфигурация, восстановление электроснабжения

**Для цитирования:** Карпова Е.В., Голуб И.И. Послеаварийная реконфигурация распределительной сети как способ восстановления электроснабжения потребителей // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 1. С. 74–82. (In Eng.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-74-82>.

## INTRODUCTION

A distribution network represents an important link in an electric power system for connecting power sources to end consumers. One of its most significant functions is the ability to restore operating conditions during emergency disconnections of individual branches and multiples thereof. Three major approaches to enhancing resilience are: strengthening distribution poles in critical lines [1]; network reconfiguration [2]; penetration of distributed energy resources [3]. When solving the problem of power supply restoration, it is necessary to factor in the operational and technical limitations associated with the need to maintain the radial configuration of the network, with feasible feeder sections currents and nodal voltages levels [4].

The methods used to restore power supply to consumers can be conditionally divided into three groups: those based on graph theory, those relying on artificial intelligence technologies, and those using expert systems [4].

## RECONFIGURATION ALGORITHM USING THE MAXIMUM SPANNING TREE METHOD

Numerous reconfiguration algorithms, reconfiguration criteria and constraints have been developed. Among the various reconfiguration criteria, heuristic optimization algorithms are most commonly used. These include genetic algorithms [5, 6], tabu search algorithms [7], ant colony algorithms [8, 9], harmony search algorithms [10] and particle swarm optimization algorithms [11]. However, the complexity of present-day heuristic algorithms hinders their real-time application, especially when applied to large systems.

The algorithm used in the present paper is based on graph theory [12–14]. The

reconfiguration of a distribution network generally involves opening normally closed sectional bus section circuit breakers and closing normally open line switches. At the beginning of the first step of the algorithm, all line switches are assumed to be closed. At each iteration of the first stage, the number of which is equal to the number of independent circuits, the power flow is calculated, the maximum spanning tree is constructed (the weights of its branches represented by the magnitudes of currents flowing through them), and the chord with the minimum current is opened. The optimal composition of the line switches will provide the minimum currents in the spanning tree chords.

At the second stage of reconfiguration, each of the chords opened at the first stage is sequentially closed and to determine the set of branches of the circuit associated with the chord. After sequentially opening the branches of this set, the power flow is calculated and the total losses determined. The chord whose opening corresponds to the minimum losses, is optimal. Thus, the minimum value of power losses in the distribution network is ensured.

## RECONFIGURATION OF THE TEST DISTRIBUTION NETWORK

For illustrative purposes, let us reconfigure a distribution network consisting of 118 nodes, 132 branches, and 15 line switches (Fig. 1). The total power loads are 22 709.7 kW and 17 041.1 kVAR. The parameters of the equivalent circuit elements and the load are taken from [15].

The optimal composition of line switches corresponding to the chords of the new spanning tree is determined using the fast-acting steady-state calculation program SDO-7. The

composition of the line switches and their corresponding independent circuits of the original and optimal schemes is given in Table 1.

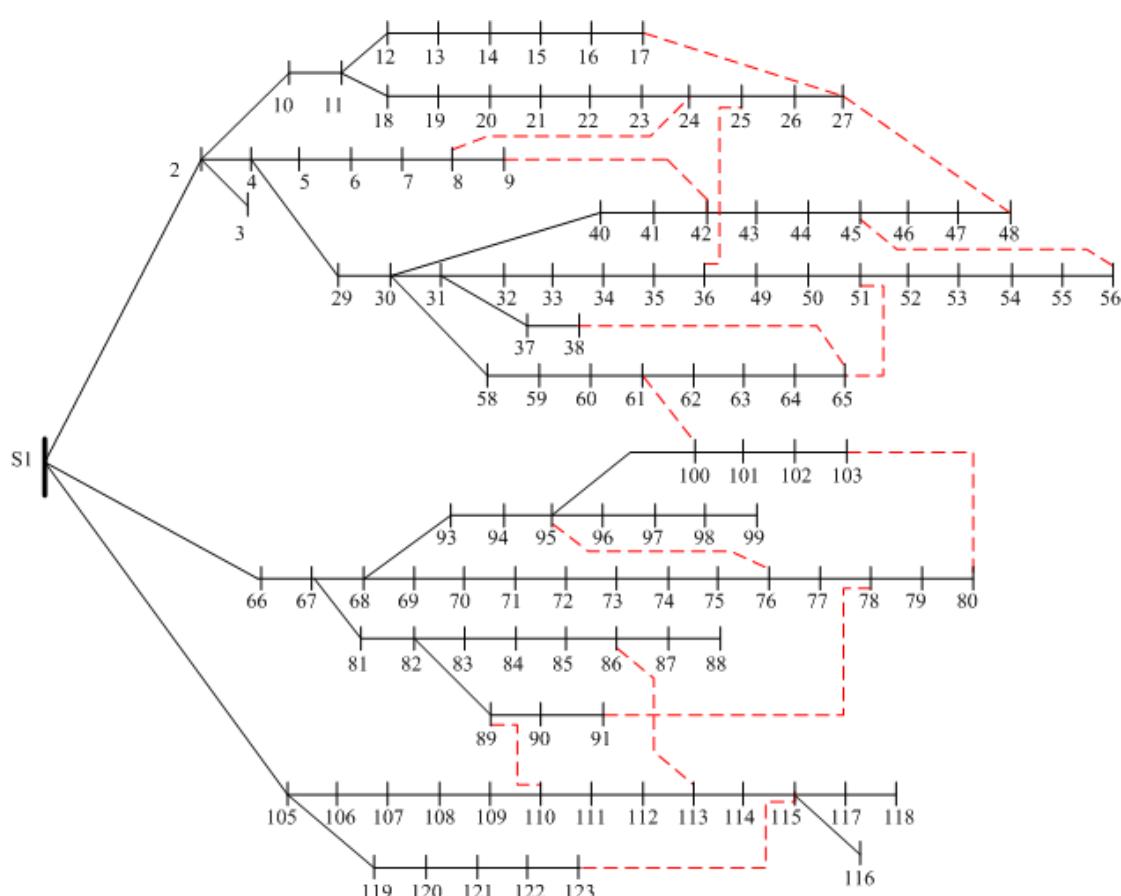
Assuming the voltage at the power node S1 equal to 11 kV, we compare power losses in the network for its three states: initial, with closed line switches, and after reconfiguration. An analysis of the steady state showed that for the original network, the losses amounted to 1 298.54 kW; for the closed network – 819.67 kW; for the network following reconfiguration – 887.48 kW. Thus, a power loss value close to the minimum losses in a closed network was achieved.

The minimization of power losses additionally affected the value of nodal voltage in the network. Taken as the nominal voltage of the power source, the deviation of the nodal voltage from the voltage value reaches 13% (9.57 kV) for the initial network configuration, significantly exceeding the standard values. After determining the optimal composition of line switches, the deviations of the nodal voltage do not exceed 7% (10.23 kV).

A further increase in the voltage levels in the network can be achieved, for example, by increasing the voltage of the power source, connecting additional active and (or) reactive power sources, managing the demand of load-controlled consumers, or by combining these measures.

## RESTORATION OF OPERATING CONDITIONS AFTER AN EMERGENCY DISCONNECTION OF TIE LINES

The main purpose of reconfiguration in case of emergency shutdown of the bus section circuit breaker is to restore power supply to the maximum number of consumers by closing the line switch. Since the same branch of the spanning tree can be included in several circuits, the operating conditions in the case of an emergency tripping of the bus section circuit breaker can be restored by switching on any of the line switches connected with these circuits.



*Fig. 1. Initial scheme of the distribution network*  
 Рис. 1. Исходная схема распределительной сети

Table 1. Composition of independent circuits of initial and optimal schemes

Таблица 1. Состав независимых контуров исходной и оптимальной схемы

No.	Initial scheme		Optimal scheme	
	Chord	Independent circuit	Chord	Independent circuit
1	8–24	<b>8-7-6-5-4-2-10-11-18-19-20-21-22-23-24</b>	23–24	<b>23-22-21-20-19-18-11-10-2-4-5-6-7-8-24</b>
2	9–42	<b>9-8-7-6-5-4-29-30-40-41-42</b>	35–36	<b>35-34-33-32-31-30-29-4-5-6-7-8-24-25-36</b>
3	17–27	<b>17-16-15-14-13-12-11-18-19-20-21-22-23-24-25-26-27</b>	17–27	<b>17-16-15-14-13-12-10-2-4-5-6-7-8-24-25-26-27</b>
4	25–36	<b>25-24-23-22-21-20-19-18-11-10-2-4-29-30-31-32-33-34-35-36</b>	41–42	<b>41-40-30-29-4-5-6-7-8-9-42</b>
5	27–48	<b>27-26-25-24-23-22-21-20-19-18-11-10-2-4-29-30-40-41-42-43-44-45-46-47-48</b>	44–45	<b>44-43-42-9-8-24-25-26-27-48-47-46-45</b>
6	38–65	<b>38-37-31-30-58-59-60-61-62-63-64-65</b>	50–51	<b>50-49-36-25-24-8-7-6-5-4-29-30-31-37-38-65-51</b>
7	45–56	<b>45-44-43-42-41-40-30-31-32-33-34-35-36-49-50-51-52-53-54-55-56</b>	53–54	<b>53-52-51-65-38-37-31-30-29-4-5-6-7-8-24-25-26-27-48-47-46-45-56-55-54</b>
8	51–65	<b>51-50-49-36-35-34-33-32-31-30-58-60-61-62-63-64-65</b>	64–65	<b>64-63-62-61-60-59-58-30-31-37-38-65</b>
9	61–100	<b>61-60-59-58-30-29-4-2-S1-66-67-68-93-94-95-100</b>	61–100	<b>61-60-59-58-30-29-4-2-S1-66-67-68-93-94-95-100</b>
10	76–95	<b>76-75-74-73-72-71-70-69-68-93-94-95</b>	74–75	<b>74-73-72-71-70-69-68-93-94-95-76-75</b>
11	78–91	<b>78-77-76-75-74-73-72-71-70-69-68-67-81-82-89-90-91</b>	76–77	<b>76-95-94-93-68-67-81-82-89-90-91-78-77</b>
12	80–103	<b>80-79-78-77-76-75-74-73-72-71-70-69-68-93-94-95-100-101-102-103-103</b>	79–80	<b>79-78-91-90-89-82-81-67-68-93-94-95-100-101-102-103-80</b>
13	86–113	<b>86-85-84-83-82-81-67-66- S1-105-106-107-108-109-110-111-112-113</b>	85–86	<b>85-84-83-82-81-67-66-S1-105-106-107-108-109-110-111-112-113-86</b>
14	89–110	<b>89-82-81-67-66-S1-105-106-107-108-109-110</b>	89–110	<b>89-82-81-67-66-S1-105-106-107-108-109-110</b>
15	115–123	<b>115-114-113-112-111-110-109-108-107-106-105-119-120-121-122-123</b>	114–115	<b>114-113-112-111-110-109-108-107-106-105-119-120-121-122-123-115</b>

The reconfiguration algorithm used in the study can be used to identify the section with line switches that provide minimal power losses in the network, as well determining the lists of bus section circuit breakers whose power supply (when any of them is tripped) can be restored by closing the line switch. The selection of the optimal option for restoring power supply to consumers follows the criterion of power loss minimization, which, as a rule, ensures minimal voltage deviations. If the voltage deviations exceed the feasible limits, then a decision on additional measures is made to ensure their previously determined feasible values.

The studies carried out in [16–20] show that the sensor nodes at which the response of voltage magnitudes and phases to external disturbances will be maximum, can be determined by the maximum components of the right singular vector corresponding to the minimum singular value of the Jacobian matrix. The response of voltage magnitudes of sensor nodes to disturbances can be decreased by installing active and reactive power sources at them. An indicator of network reinforcement with the introduction of additional sources at sensor nodes is an increase in the minimum singular value of the Jacobian

matrix, which characterizes the improvement in its conditionality consisting in a the decrease in the influence of changes in active and reactive nodal powers on changes in voltage magnitudes and phases. Let us analyze the accidents associated with the disconnection of bus section circuit breakers connecting nodes 4–29, 29–30, 30–31, 51–52, 81–82, and 105–106. These disconnections are considered as outages leading to significant voltage drops that require network modernization.

Table 2 contains data on modeling the tripping of sectional switches, including disconnected sections; the number of circuits that include the disconnected section; possible options for power supply restoration; the chord whose closure corresponds to the minimum power loss; the node number having the minimum values of voltage and power losses in the network after closing the line switch.

**Disconnection of Section 4–29.** As seen in Tables 1 and 2, this section comprises part of five circuits. The best option for power supply restoration is to close chord 41–42. However, at the same time, the voltage drop observed at some nodes is unacceptable (up to 8.801 kV at node 53). To ensure acceptable voltage levels at load nodes, only the connection of additional reactive power sources was analyzed. The graph in Fig. 2 depicts the sensor nodes that are most sensitive to external impacts and which correspond to the maximum components of the right singular vector associated with the minimum singular value of

the Jacobian matrix. Since groups of sensor nodes form sequentially located load nodes, the most sensitive nodes that belong to different sections of the radial network and are the farthest from the power source are selected to accommodate additional reactive power sources. In the case of this emergency shutdown, these are the nodes numbered 35, 53 and 64, the capacities of the reactive power sources installed at them are 1658 kVAR, 3430.42 kVAR, and 1958.76 kVAR, respectively.

The feasible voltage level at the network nodes ensured by performing this measure demonstrated by the graph in Fig. 3. The minimum voltage value in this case is 10.22 kV at node 60; the power loss value decreased to 1480.8 kW.

**Disconnection of sections 29–30, 30–31, 51–52, 81–82, and 105–106.** The analysis of power supply restoration with the indicated sections disconnected is performed similarly to that in the study on the disconnection of section 4–29. The calculation results are given in Table 3.

**Disconnection of dead-end sections.** In addition, the reconfiguration algorithm is used us to identify dead-end sections, whose disconnection will lead to a lack of power for the consumer during their repair. For the network under study, such sections are those with load nodes 3, 87, 88, 96, 97, 98, 99, 116, 117, and 118. The decision on the need to install backup power sources for these consumers should be based on the information about their power supply categories.

**Table 2.** Options for power supply restoration when the bus section circuit breakers is tripped

**Таблица 2.** Варианты восстановления электроснабжения при отключении секционного выключателя

Disconnected section	The number of circuits	Possible replacements					Minimum voltage, kV – at nodes	Power losses, kW
4–29	5	35–36	<b>41–42</b>	50–51	53–54	61–100	8.801 - 53	1025.87
29–30	5	35–36	<b>41–42</b>	50–51	53–54	61–100	8.99 - 53	1683.34
30–31	4	35–36	<b>50–51</b>	53–54	64–65	–	9.125 - 35	1499.5
51–52	1	<b>53–54</b>	–	–	–	–	9.805 - 52	1052.08
81–82	4	76–77	79–80	85–86	<b>89–110</b>	–	9.636 - 77	1240.16
105–106	3	85–86	<b>89–110</b>	114–115	–	–	9.303 - 88	1542.24

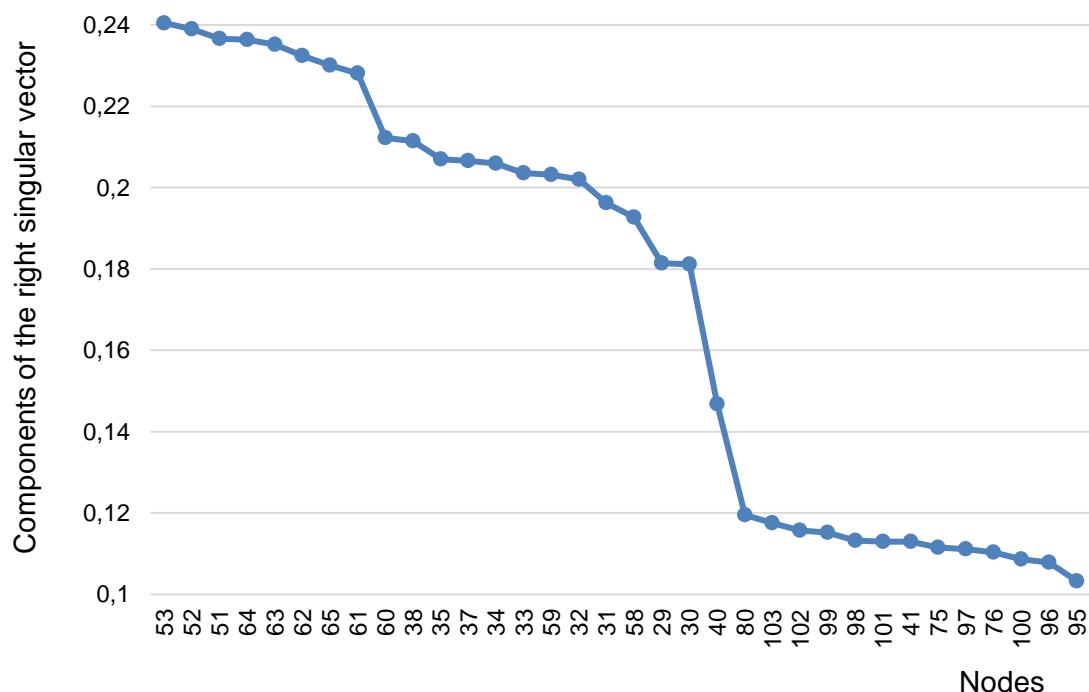


Fig. 2. Node sensitivity analysis for emergency disconnection of section 4-29  
Рис. 2. Анализ сенсорности узлов для аварийного отключения секции 4-29

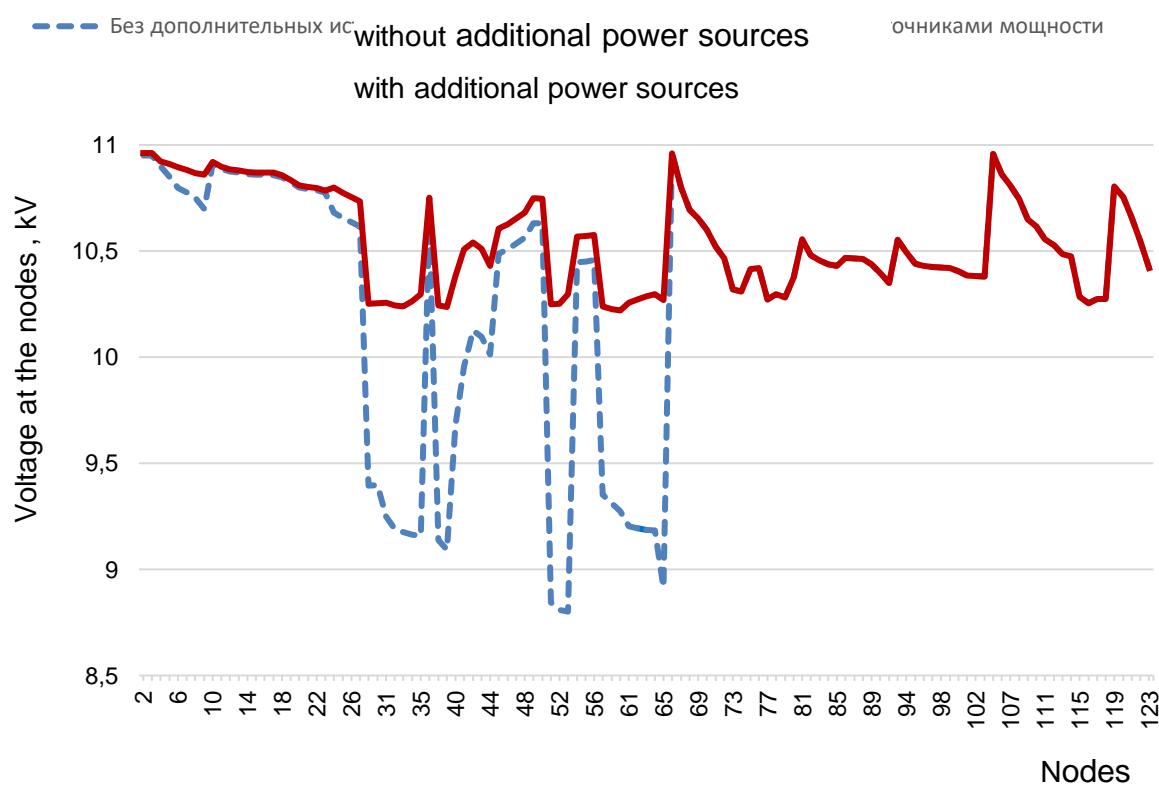


Fig. 3. Voltage level at network nodes for emergency shutdown of section 4-29  
Рис. 3. Уровень напряжений в узлах сети для аварийного отключения секции 4-29

**Table 3.** Restoration of power supply when bus section circuit breakers are tripped

Таблица 3. Восстановление электроснабжения при отключении секционных выключателей

Disconnected section	Before installation of additional reactive power sources		Sensor nodes (in descending order of the magnitude of the right singular vector component)	Installation sites for additional reactive power sources	Capacity of additional reactive power sources, kVAR	After installation of additional reactive power sources	
	Minimum voltage, kV	Power losses, kV				Minimum voltage, kV	Power losses, kV
29–30	8.99	1 683.34	53	35	1 258.19	10.254	1306.5
			52				
			64	53	3 185.11		
			51				
			65	64	1 555.38		
30–31	9.125	1 499.5	35 34 33 32 31	35	4 792.82	10.208	1379.7
51–52	9.805	1 052.08	52 53 54 80 103 47	53	2 814.44	10.255	918.5
81–82	9.636	1 240.16	79	79	2 065.2	10.007	1062.7
			77 78 91 90	106	2 622.34		
105–106	9.303	1 542.24	88 87 114 113 112 106	88	3 090.93	10.219	1627.9

## CONCLUSION

The presented numerical results confirm the applicability of the maximum spanning tree method for reducing power losses and levelling the voltage profile at the distribution network nodes under normal operating conditions. In emergency situations, the proposed method made it possible to restore power supply to the consumer by closing the corresponding line

switch. For the most severe accidents, the singular analysis of the Jacobian matrix was employed to identify sensor nodes, at which the installation of additional reactive power sources ensured the feasible voltage values.

Further research will investigate the restoration of power supply to the consumer for the cases of simultaneous failure of several sections, as well as sections connected to a power source.

## References

- Lin Yanling, Bie Zhaohong. Tri-level optimal hardening plan for a resilient distribution system considering reconfiguration and DG islanding. *Applied Energy*. 2018;210:1266–1279. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.059>.
- Ding Tao, Lin Yanling, Bie Zhaohong, Chen Chen. A resilient microgrid formation strategy for load restoration considering master-slave distributed generators and topology reconfiguration. *Applied Energy*. 2017;199:205–216. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.012>.
- Zu Guoqiang, Xiao Jun, Sun Kai. Mathematical base and deduction of security region for distribution systems with DER. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2019;10(3):2892–2903. <https://doi.org/10.1109/TSG.2018.2814584>.
- Uspensky M.I., Kyzrodev I.V. *Power restoration methods in distribution networks*. Syktyvkar: Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 2010, 120 p. (In Russ.).
- Guimaraes M.A.N., Castro C.A., Romero R. Distribution systems operation optimisation through reconfiguration and capacitor allocation by a dedicated genetic algorithm. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2010;4(11):1213–1222. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2010.0020>.

6. Abubakar A.S., Ekundayo K.R., Olaniyan A.A. Optimal reconfiguration of radial distribution networks using improved genetic algorithm. *Nigerian Journal of Technological Development*. 2019;16(1):10-16. <https://doi.org/10.4314/njtd.v16i1.2>.
7. Pereira B.R.J., Cossi A.M., Contreras J., Mantovani J.R.S. Multiobjective multistage distribution system planning using tabu search. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2014;8(1):35-45. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2013.0115>.
8. Abdelaziz A.Y., Osama R.A., El-Khodary S.M. Reconfiguration of distribution systems for loss reduction using the hyper-cube ant colony optimisation algorithm. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2012;6(2):176-187. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2011.0281>.
9. Chang Chung-Fu. Reconfiguration and capacitor placement for loss reduction of distribution systems by ant colony search algorithm. *IEEE Transactions on Power System*. 2008;23(4):1747-1755. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2008.2002169>.
10. Kavousi-Fard A., Niknam T., Khooban M.H. Intelligent stochastic framework to solve the reconfiguration problem from the reliability view. *IET Science, Measurement & Technology*. 2014;8(5):245-259. <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2013.0106>.
11. Wu Wu-Chang, Tsai Men-Shen. Application of enhanced integer coded particle swarm optimization for distribution system feeder reconfiguration. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2011;26(3):1591-1599. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2010.2094212>.
12. Minieka E., Dekker M. *Optimization algorithms for networks and graphs*. New York: John Wiley & Sons; 1979, 356 p.
13. Golub I.I., Vojtov O.N., Boloev E.V., Semenova L.V. Urban distribution network reconfiguration algorithm. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Energetika = Thermal Engineering*. 2020;5:3-12. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0002331020050052>.
14. Golub I.I., Vojtov O.N., Boloev E.V., Semenova L.V. Choice of short-term constant configuration of the distribution network. *Izvestiâ vysših učebnyh zavedenij. Problemy energetiki = Power engineering: research, equipment, technology*. 2018;20(9-10):39-51. (In Russ.). <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-39-51>.
15. Zhang Dong, Fu Zhengcai, Zhang Liuchun. An improved TS algorithm for loss-minimum reconfiguration in large-scale distribution systems. *Electric Power Systems Research*. 2007;77(5-6):685-694. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2006.06.005>.
16. Gamm A.Z., Golub I.I. *Sensors and weak places in electric power systems*. Irkutsk: Melentiev Energy Systems Institute SB RAS; 1996, 99 p. (In Russ.).
17. Vojtov O.N., Voropai N.I., Gamm A.Z., Golub I.I., Efimov D.N. *Analysis of heterogeneities of electric power systems*. Novosibirsk: Nauka; 256 p. (In Russ.).
18. Agarkov O.A., Vojtov O.N., Voropai N.I., Gamm A.Z., Golub I.I. *Two approaches to the analysis of weak points of electric power systems*. Moscow: Vysshaya shkola; 1985, 536 p. (In Russ.).
19. Belov E.I. Influence of nodes' and branches' parameters on the sensitivity of a power system's elements. *Izvestiya NTTS Edinoi ehnergeticheskoi sistemy*. 2018;2:88-95. (In Russ.).
20. Belov E.I., Latmanizova Yu.N., Sorokin E.V. Singular analysis application for determining sensory branches in electric power systems. *Ehlektroehnergiya. Peredacha i raspredelenie*. 2018;4:48-52. (In Russ.).

### **Список источников**

1. Lin Yanling, Bie Zhaohong. Tri-level optimal hardening plan for a resilient distribution system considering reconfiguration and DG islanding // *Applied Energy*. 2018. Vol. 210. P. 1266-1279. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.059>.
2. Ding Tao, Lin Yanling, Bie Zhaohong, Chen Chen. A resilient microgrid formation strategy for load restoration considering master-slave distributed generators and topology reconfiguration // *Applied Energy*. 2017. Vol. 199. P. 205-216. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.012>.
3. Zu Guoqiang, Xiao Jun, Sun Kai. Mathematical base and deduction of security region for distribution systems with DER // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2019. Vol. 10. Iss. 3. P. 2892-2903. <https://doi.org/10.1109/TSG.2018.2814584>.
4. Успенский М.И., Кызроев И.В. Методы восстановления электроснабжения в распределительных сетях. Сыктывкар: Коми научный центр УрО РАН, 2010. 120с.
5. Guimaraes M.A.N., Castro C.A., Romero R. Distribution systems operation optimisation through reconfiguration and capacitor allocation by a dedicated genetic algorithm // *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2010. Vol. 4. Iss. 11. P. 1213-1222. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2010.0020>.
6. Abubakar A.S., Ekundayo K.R., Olaniyan A.A. Optimal reconfiguration of radial distribution networks using improved genetic algorithm // *Nigerian Journal of Technological Development*. 2019. Vol. 16. Iss. 1. P. 10-16. <https://doi.org/10.4314/njtd.v16i1.2>.
7. Pereira B.R.J., Cossi A.M., Contreras J., Mantovani J.R.S. Multiobjective multistage distribution system planning using tabu search // *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2014. Vol. 8. Iss. 1. P. 35-45. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2013.0115>.
8. Abdelaziz A.Y., Osama R.A., El-Khodary S.M. Reconfiguration of distribution systems for loss reduction using the hyper-cube ant colony optimisation algorithm // *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2012. Vol. 6. Iss. 2. P. 176-187. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2011.0281>.
9. Chang Chung-Fu. Reconfiguration and capacitor placement for loss reduction of distribution systems by ant colony search algorithm // *IEEE Transactions on Power System*. 2008. Vol. 23. Iss. 4. P. 1747-1755. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2008.2002169>.

10. Kavousi-Fard A., Niknam T., Khooban M.H. Intelligent stochastic framework to solve the reconfiguration problem from the reliability view // IET Science, Measurement & Technology. 2014. Vol. 8. Iss. 5. P. 245–259. <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2013.0106>.
11. Wu Wu-Chang, Tsai Men-Shen. Application of enhanced integer coded particle swarm optimization for distribution system feeder reconfiguration // IEEE Transactions on Power Systems. 2011. Vol. 26. Iss. 3. P. 1591–1599. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2010.2094212>.
12. Minieka E., Dekker M. Optimization algorithms for networks and graphs. New York: John Wiley & Sons, 1979. 356 с.
13. Голуб И.И., Войтов О.Н., Болоев Е.В., Семенова Л.В. Алгоритм реконфигурации городской распределительной сети // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2020. № 5. С. 3–12. <https://doi.org/10.31857/S0002331020050052>.
14. Голуб И.И., Войтов О.Н., Болоев Е.В., Семенова Л.В. Выбор краткосрочной фиксированной конфигурации распределительной сети // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. № 9-10. С. 39–51. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-39-51>.
15. Zhang Dong, Fu Zhengcai, Zhang Liuchun. An improved TS algorithm for loss-minimum reconfiguration in large-scale distribution systems // Electric Power Systems Research. 2007. Vol. 77. Iss. 5-6. P. 685–694. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2006.06.005>.
16. Гамм А.З., Голуб И.И. Сенсоры и слабые места в электроэнергетических системах. Иркутск: СЭИ СО РАН, 1996. 99 с.
17. Войтов О.Н., Воропай Н.И., Гамм А.З., Голуб И.И., Ефимов Д.Н. Анализ неоднородностей электроэнергетических систем. Новосибирск: Наука, 256 с.
18. Агарков О.А., Войтов О.Н., Воропай Н.И., Гамм А.З., Голуб И.И. Два подхода к анализу слабых мест электроэнергетических систем. М.: Высшая школа, 1985. 536 с.
19. Белов Е.И. Исследование влияния параметров узлов и ветвей на сенсорность элементов электроэнергетической системы // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2018. № 2. С. 88–95.
20. Белов Е.И., Латманизова Ю.Н., Сорокин Е.В. Применение сингулярного анализа для определения сенсорных по току ветвей в электроэнергетических системах // Электроэнергия. Передача и распределение. 2018. № 4. С. 48–52.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Elena V. Karpova,**  
Postgraduate Student,  
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,  
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia  
✉ karpova.e.v.96@yandex.ru

**Irina I. Golub,**  
Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Leading researcher of the Department of Electric Power Systems,  
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,  
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia  
golub@isem.irk.ru

### Contribution of the authors

All authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

### Conflict of interests

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

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

### Information about the article

The article was submitted 05.10.2022; approved after reviewing 23.11.2022; accepted for publication 17.03.2023.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Карпова Елена Валерьевна,**  
аспирант,  
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия  
✉ karpova.e.v.96@yandex.ru

**Голуб Ирина Ивановна,**  
д.т.н, профессор,  
ведущий научный сотрудник отдела  
электроэнергетических систем,  
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия  
golub@isem.irk.ru

### 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 05.10.2022; одобрена после рецензирования 23.11.2022; принята к публикации 17.03.2023.

## ЭНЕРГЕТИКА



Научная статья

УДК 620.92(575.3)

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-83-93>

## Снижение генерации электрической энергии солнечными модулями в условиях запыленности местности

**И.М. Кирпичникова<sup>1✉</sup>, И.Б. Махсумов<sup>2</sup>, В.В. Шестакова<sup>3</sup>**<sup>1,3</sup>Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия<sup>2</sup>Институт энергетики Таджикистана, р-н Кушониён, Республика Таджикистан

**Резюме.** Цель – провести анализ производительности солнечных модулей в зависимости от климатических характеристик местности, химических и электрофизических свойств пыли; исследовать влияние загрязнения поверхности фотоэлектрических модулей на генерацию электрической энергии и определить срок покрытия поверхности пылью до критического значения по снижению выработки энергии. Эксперимент проводился в апреле 2022 года в двух регионах: Республике Таджикистан и Челябинской области Российской Федерации. При исследованиях были проанализированы работы ученых разных стран по влиянию загрязнения на генерацию модулей, проведены сравнительные натурные эксперименты по производительности солнечных модулей и их корреляция с метеорологическими данными регионов. Установлено, что концентрация пыли в Челябинской области составляет 12–19 мг/м<sup>3</sup>, что значительно меньше, чем в Таджикистане, но из-за мелкодисперсной структуры ее сложнее удалять с поверхности. Результаты экспериментов показали, что в Республике Таджикистан мощность запыленного модуля за первую декаду апреля (начало пылевых бурь) снизилась на 46,64% относительно заявленной производителем номинальной мощности солнечного модуля. Для условий г. Челябинск – крупного промышленного центра – выработка электроэнергии модулями за этот же период снизилась в среднем на 7,1%. Это свидетельствует об актуальности проблемы защиты фотоэлектрических модулей, которую необходимо решать для поддержания генерации электроэнергии в номинальных режимах в данном регионе. Установлено, что периодичность очистки для сохранения параметров модулей без специальных устройств защиты от загрязнений должна быть в среднем не реже одного раза в неделю для обоих регионов. Предложено устройство, предотвращающее запыление поверхности модулей на основе электронно-ионной технологии и использование голограммической пленки, защищающей модули не только от пылевых загрязнений, но и от действия инфракрасных лучей. Данные устройства являются предметом дальнейших работ по их усовершенствованию.

**Ключевые слова:** солнечная энергетика, фотоэлектрические модули, пылевые загрязнения, снижение генерации солнечных модулей, защита модулей

**Для цитирования:** Кирпичникова И.М., Махсумов И.Б., Шестакова В.В. Снижение генерации электрической энергии солнечными модулями в условиях запыленности местности // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 1. С. 83–93. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-83-93>.

## POWER ENGINEERING

Original article

## Reduced power generation efficiency of solar panels in dusty locations

**Irina M. Kirpichnikova<sup>1✉</sup>, Ilkhom B. Makhsumov<sup>2</sup>, Valeriya V. Shestakova<sup>3</sup>**<sup>1,3</sup>South Ural State University, Chelyabinsk, Russia<sup>2</sup>Institute of Energy of Tajikistan, Kushoniyon district, Republic of Tajikistan

**Abstract.** In this paper, we aim to investigate the performance of solar panels depending on the climate conditions of their location and the chemical and electrophysical characteristics of deposited dust. In particular, we study the effect of surface contamination of solar panels on their efficiency and determine the period of dust deposition that is critical in terms of power generation reduction. Experiments were conducted in April 2022 in the Republic of Tajikistan and the Chelyabinsk region of the Russian Federation. Both domestic and foreign publications on the impact of surface contamination on solar cell efficiency were reviewed. Comparative field experiments were carried out to investigate the performance of solar panels depending on environmental variables. It was found that the level of dust deposition in the Chelyabinsk region reached about  $12\text{--}19 \text{ mg/m}^3$ , which is significantly lower than that in Tajikistan. However, due to its fine disperse structure, this dust is harder to remove. In Tajikistan, the capacity of the solar panel covered with dust decreased by 46.64% relative to its nominal value in the first decade of April (the onset of dust storms). In the large industrial city of Chelyabinsk, the power output of the panels under study decreased by an average of 7.1% during this period. These findings confirm the importance of solar panel protection for maintaining the nominal values of solar power generation in the given regions. When no special protection devices are used, cleaning frequency for maintaining the required efficiency of solar panels should be, on average, not less than once a week for both regions. A device is proposed for preventing dusting of the solar panel surface based on electron-ion technology. In addition, holographic films can be used to protect solar panels not only from dust contamination, but also from IR radiation. These protection approaches are the subject of future research.

**Keywords:** solar energy, photovoltaic modules, dust pollution, reduction of solar module generation, module protection

**For citation:** Kirpichnikova I.M., Makhsumov I.B., Shestakova V.V. Reduced power generation efficiency of solar panels in dusty locations. *iPolytech Journal*. 2023;27(1):83-93. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-83-93>.

## ВВЕДЕНИЕ

На производительность фотоэлектрических систем сильно влияют внутренние и внешние факторы, такие как особенности конструкции, старение, радиация, затенение, температура окружающей среды, ветер, степень загрязнения и чистота. Любой тип климатических преобразований вызывает изменения солнечной радиации и температуры окружающей среды, что приводит к корректировке выходных характеристик солнечных фотоэлектрических систем [1].

На сегодняшний день экономические последствия пылевого загрязнения в результате изменения климата стали одним из важнейших вопросов, решаемых правительствами большинства стран мира. Пыль можно определить как измельченную форму мельчайших частиц размером менее 500 мкм. Пыль может попадать в окружающую среду из различных источников, таких как строительные площадки, промышленные предприятия и пыльные бури. Пыль состоит из видимых и невидимых плавающих и упавших частиц твердого материала [1]. Под термином «пылевые частицы» обычно подразумеваются аэрозольные частицы в атмосфере, которые являются причиной искусственного или естественного загрязнения воздуха. К категории естественных источников в засушливых, полузасушливых или подвергшихся эрозии

районах относятся пыльные бури, которые производят частицы различного размера, как правило, крупнее искусственных частиц. В большинстве случаев эти источники не действуют локально и могут экспортировать частицы на несколько километров [2–4].

Искусственные источники загрязнения в основном находятся в городских районах с промышленными сооружениями. Они производят мелкие частицы пыли, действующие локально и оказывающие наиболее негативное воздействие на окружающую среду.

Целью работы является определение влияния загрязнения поверхности фотоэлектрических модулей на генерацию электрической энергии и определение срока покрытия поверхности пылью до критического значения при сравнительных испытаниях для регионов с разными климатическими условиями.

## ВЛИЯНИЕ ПЫЛИ НА РАБОТУ СОЛНЕЧНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ

Степень снижения КПД фотоэлектрического модуля зависит от удельной массы и размера частиц пыли, появившихся на его поверхности. По мере увеличения массы пылевых отложений выходная мощность и эффективность модуля уменьшаются, с уменьшением размера пылевых частиц выходная мощность также становится меньше, поскольку наиболее мелкие частицы блокируют

больше излучения на поверхности фотоэлектрического модуля. Различные отложения загрязняющих веществ могут включать красную почву, золу, песок, карбонат кальция, кремнезем и т.д. Наличие загрязнения воздуха может значительно ухудшить выход энергии фотоэлектрических панелей; даже после короткого периода пребывания панелей на открытом воздухе (например, 2 мес.) без очистки это может уменьшить производство энергии примерно на 6,5% [5].

В пустынной местности накопление пыли на поверхности фотоэлектрических панелей является значительным и может привести к снижению поступления солнечных лучей на нее примерно на 40%, что требует постоянной очистки поверхности [6, 7].

Исследователи Д.С. Раджпут и К. Судхакар в своем научном труде [8] экспериментально определили влияние осевших частиц пыли на электрические характеристики фотоэлектрических модулей. В эксперименте учитывались такие параметры, как поступающая радиация, эффективные стратегии работы, конструкция и размеры фотоэлектрических систем. Исследование показало, что среднее значение ежедневных потерь энергии в течение года, вызванных пылью, оседающей на поверхности фотоэлектрического модуля, составляет около 4,4%. В длительные периоды без дождя ежедневные потери энергии могут превышать 20% [8].

Структура пыли, ее физико-химические свойства также влияют на эффективность работы солнечных модулей. Частицы пыли различаются по фазе, сорту, химическим и физическим свойствам в зависимости от многих условий окружающей среды. Воздух, влажность и температура в дополнение к скорости ветра играют важную роль в распределении пыли по поверхности и в том, как она будет собираться на фотоэлементе [9, 10]. Такой конструктивный элемент, как прозрачное покрытие солнечных модулей, в значительной мере определяет их эффективность. Нормальное пропускание стекла сильно зависит от плотности осаждения пыли в сочетании с углом наклона модуля, а также от ориентации поверхности по отношению к преобладающему направлению ветра. Было

обнаружено, что наклон оптимальной прямой линии, проходящей через точки измерения солнечного элемента, установленного под углом 45° к югу, предполагает снижение выходной мощности примерно на 17,4% в месяц [11].

От материала фотоэлектрических элементов солнечных панелей зависит их производительность при загрязнении. Наиболее глубоко такие исследования проводились учеными в условиях Пакистана, климатические условия в которых сходны с условиями Республики Таджикистан [12, 13].

Результаты исследований показали, что при равных условиях для монокристаллических модулей наблюдалось более быстрое снижение производительности, чем для поликристаллических. За 18 дней неблагоприятной погоды, сопровождающейся запылением модулей, их производительность упала на 13%, а поликристаллических – на 11,2%. Модуль из аморфного кремния показал наиболее стабильное значение выработки энергии. Ученые даже ставят под сомнение вопрос признанного преимущества монокристаллических модулей по эффективности.

С. Мехилеф и его соавторы установили корреляцию между толщиной пыли, собранной на фотоэлектрическом модуле, и различиями в эффективности в сложном климате. Они пришли к выводу, что при накоплении тяжелых слоев пыли происходит значительное снижение мощности фотоэлектрического модуля, примерно на 10–20% [14].

Исследования, проведенные в Кракове, одном из самых загрязненных городов Европы, касались определения воздействия естественного осаждения пыли на стеклянную поверхность фотоэлектрического модуля, на его производительность в загрязненной городской местности [15].

Проведенный анализ литературных источников по данному направлению показал, что исследователи принимали во внимание в основном только какой-то один из параметров, влияющих на генерацию электроэнергии при запыленности солнечных модулей.

В нашем исследовании постарались изучить влияние различных составов пыли в регионах с разными климатическими условиями

и предложить методы защиты от загрязнений в зависимости от места и условий эксплуатации.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования были проведены для Таджикистана, для которого характерны естественные загрязнения воздушной среды, пылевые бури и высокие температуры воздуха и промышленного Челябинска с большим количеством объектов с выбросами искусственных загрязнителей воздушной среды. При исследованиях были использованы климатические характеристики обоих регионов с данными по инсоляции солнечной энергии в весенний период года, а также данные исследований, представленные в библиографическом списке. Выбор этого периода года для исследований обусловлен тем, что в Средней Азии в это время наступает период пылевых бурь, а в условиях Урала после схода снега наблюдается увеличение как естественных, так и искусственных источников загрязнения. Экспериментальные исследования проводились на комплексной солнечной электростанции (СЭС) мощностью 30 кВт Института энергетики Таджикистана при кафедре «Нетрадиционные возобновляемые источники энергии и тепловая энергетика» в г. Бохтар. Местность, в которой было проведено исследование работы солнечной электростанции, расположена на высоте 419 м над уровнем моря, широта – 37,872, долгота – 68,724. Фотоэлектрические преобразователи были установлены под углом наклона 45° к стороне юго-запада на 12°. В эксперименте использовались два фотоэлектрических модуля типа SOLARMODUL ALEOS19 HE 300W Supercharged. Поверхность одного из модулей была запылена естественным образом, поверхность другого модуля перед измерением электрических параметров постоянно очищалась с целью сравнения вырабатываемой мощности и определения влияния электрических свойств пыли на работу солнечных модулей. С помощью инфракрасного термометра фиксировалась температура передней и задней поверхностей модулей каждый час в течение дня. Для измерения температуры и влажно-

сти наружного воздуха окружающей среды применялись термометр и смартфон с доступом в интернет. Для того чтобы оценить влияние пылевых загрязнений на работу СЭС, была определена выработка электроэнергии для всех модулей, которые были задействованы в эксперименте.

Аналогичные эксперименты были проведены для другой зоны, характеризующейся промышленными выбросами пыли, – г. Челябинск, для которого пылевые бури и высокие температуры воздуха не характерны, но при этом имеется ряд факторов, которые могут значительно снижать выработку электроэнергии солнечным модулем. Концентрация пыли на территории Челябинской области составляет 12–19 мг/м<sup>3</sup>, что значительно меньше, чем на территории Таджикистана. Однако следует учитывать, что Уральский регион является «промышленным центром» страны, поэтому в составе пыли, выбрасываемой предприятиями, часто присутствуют различные мелкодисперсные примеси, которые могут оказывать серьезное воздействие на работу и усложнять очистку солнечных модулей при их накоплении на поверхности за счет сил адгезии и проникновения пыли во внутреннюю структуру модуля.

Экспериментальные исследования проводились в апреле 2022 г. (сухой, пыльный сезон) в будние дни в одно и то же время (с 13:00 до 14:00) на промышленной базе одного из районов г. Челябинск. Местность расположена на высоте 260 м над уровнем моря, климат – континентальный, широта – 55,098, долгота – 61,361, среднее количество солнечных часов – 2089 ч/год. В течение эксперимента фотоэлектрические преобразователи были установлены под углом наклона 55° (в соответствии с географической широтой региона) и ориентированы на юго-запад. В эксперименте были использованы солнечные модули модели bps 32-100 бренда JING-YANGPV (Китай).

Аналогично эксперименту в г. Бохтар, запыление поверхности одного из солнечных модулей происходило естественным образом, второй же очищался в течение эксперимента с целью определения их вырабатываемой мощности и изучения влияния запы-

лennosti поверхности на их работу.

Для определения температуры и влажности наружного воздуха окружающей среды использовались данные из интернета. Для определения солнечной инсоляции был использован люксметр модели ТКА-ПКМ (г. Санкт-Петербург), который был установлен на поверхности солнечного модуля и находился под тем же углом, что и поверхность модуля.

Значения тока и напряжения определялись по цифровому мультиметру модели APPA 62, который подключался поочередно к каждому из солнечных модулей в соответствии с техническими рекомендациями.

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА В РЕСПУБЛИКЕ ТАДЖИКИСТАН

Термин «пыльная буря» используется для описания атмосферного явления переноса большого объема пыли с поверхности земли с помощью ветра. Всемирная метеорологическая организация описала пыльные бури как явление, вызванное ветром вблизи земли, в результате чего частицы поднимаются с поверхности и задерживаются в воздухе, снижая видимость менее чем до 1000 м.

В Средней Азии наблюдаются большие сезонные изменения выбросов пыли, такие

явления характерны и для Таджикистана. По данным ученых Физико-технического института им. С.У. Умарова АН Республики Таджикистан в последнее десятилетие прошлого века в республике наблюдались продолжительные (до 8 ч) пылевые бури высокой интенсивности, которые снижали горизонтальную видимость до 50 м [16]. Наблюдения ученых за период 2008–2009 гг. показали, что сильные пылевые бури происходят преимущественно в г. Бохтар, возможно, из-за особенностей географического расположения города. В условиях пылевых бурь, помимо ухудшения дальности горизонтальной видимости, снижается интенсивность солнечной инсоляции, следовательно, происходит уменьшение попадания видимой части солнечного спектра на фотоэлектрические модули даже при ясной погоде.

Для проведения исследования была создана экспериментальная установка (рис. 1). Эксперименты выполнялись с 5 апреля 2022 г. по 8 апреля 2022 г. (начало пыльного сезона) в период с 11:00 до 16:00. Напряжение и ток электрических нагрузок (три последовательно соединенные галогеновые лампы МАЯК 12V/60/80W), подключенные к обоим модулям, определялись с помощью цифрового мультиметра типа CHYVictorVC890D.

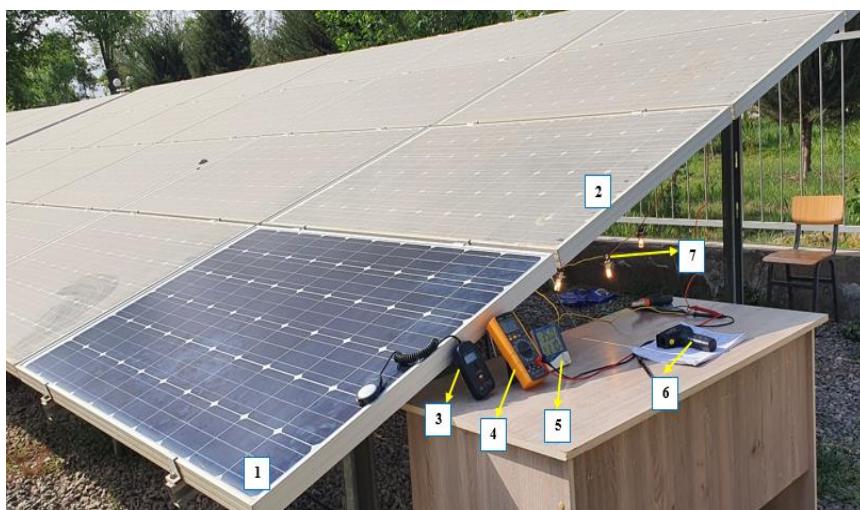


Рис. 1. Экспериментальная установка для определения генерации солнечного модуля в условиях г. Бохтар (Республика Таджикистан): 1 – очищенный солнечный модуль; 2 – запыленный солнечный модуль; 3 – цифровой люксметр MS6610; 4 – цифровой мультиметр CHYVictorVC890D; 5 – термометр/гигрометр TH90; 6 – инфракрасный термометр IR01D; 7 – галогенные лампы

Fig. 1. Experimental installation to determine solar module generation in the conditions of Bokhtar town (Republic of Tajikistan): 1 – cleaned solar module; 2 – dusty solar module; 3 – MS6610 digital illuminometer; 4 – CHYVictorVC890D digital multimeter; 5 – TH90 thermometer/hygrometer; 6 – IR01D infrared thermometer; 7 – halogen lamps

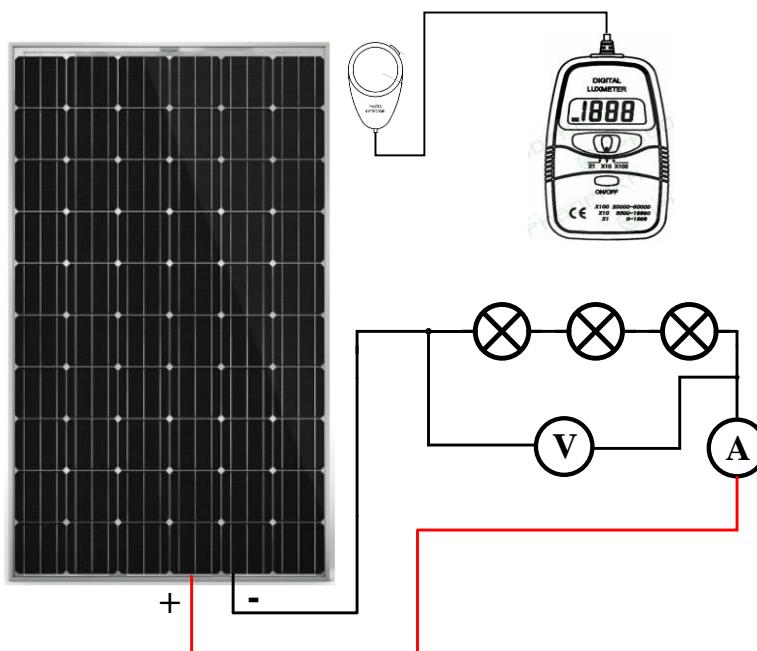


Рис. 2. Электрическая схема работы экспериментальной установки  
в условиях г. Бохтар (Республика Таджикистан)

Fig. 2. Electric circuit of experimental installation operation in the conditions of Bokhtar town (Republic of Tajikistan)

Электрическая схема для проведения эксперимента показана на рис. 2.

Результаты изменения мощности солнечных модулей показаны на рис. 3.

Из представленных на рис. 3 зависимостей видно, что при каждом измерении мощность чистого фотоэлектрического модуля была больше, чем запыленного модуля. Снижение мощности 06.04.2022 и 08.04.2022 г. было связано с общей облачно-

стью, однако среднее значение мощности для модуля составило 151,67 Вт. Мощность запыленного модуля за рассматриваемый период снизилась на 46,64% относительно заявленной производителем номинальной мощности солнечного модуля. При проведении экспериментов учитывалось влияние поступления солнечной радиации в течение светового дня на генерацию солнечного модуля с помощью цифрового люксметра.

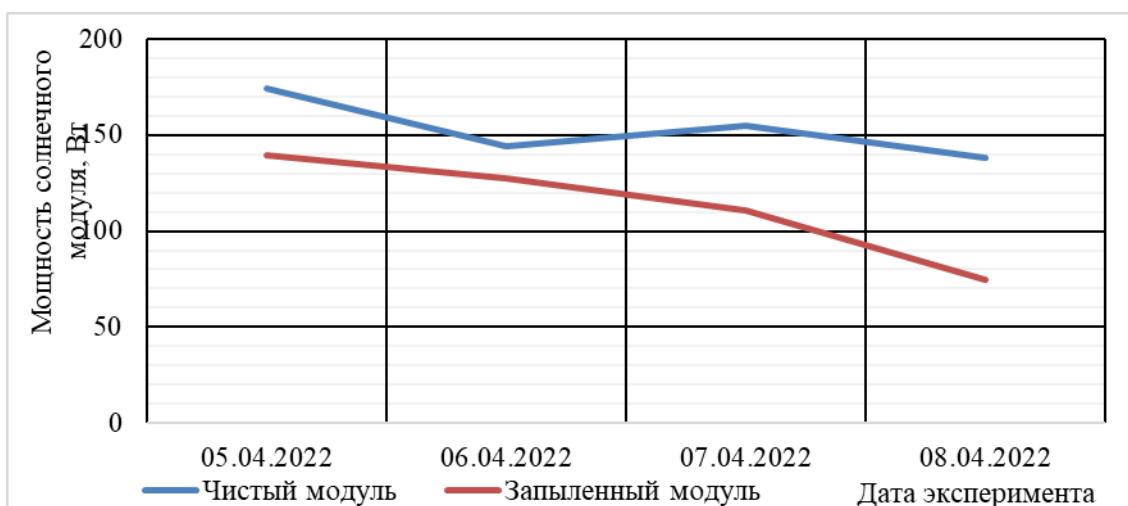


Рис. 3. Изменение мощности солнечных модулей в зависимости от уровня запыленности  
Fig. 3. Solar module power vs dust level

Таким образом, в регионе с повышенной запыленностью (высокая вероятность пылевых и песчаных бурь при условии высокой засушливости и солнечной инсоляции) необходима систематическая очистка солнечных модулей для сохранения их работоспособности и солнечной электростанции в целом. Установлено, что при ежемесячной очистке модули могут терять от 17 до 20% производительности. При увеличении периодов между очисткой этот процент может составлять более 30. Следовательно, в сезон пылевых бурь рекомендуемый период очистки поверхности от загрязнений составляет минимум один раз в неделю. Полученные результаты эксперимента говорят о том, что защита поверхности солнечного модуля от загрязнений для рассматриваемого региона является очень актуальной. В сочетании с повышенными температурами, характеризующими данную местность, она только увеличивается и требует необходимого решения. Комплексным решением вопроса защиты модулей от перегрева и загрязнения может быть использование голограммической пленки на основе призмаконов, устройство которой описано в работах [17–19]. Принцип действия пленки

заключается в том, что, отражая инфракрасные составляющие электромагнитного спектра излучения, она не допускает перегрева поверхности модуля. Миниатюрные призматические концентраторы в структуре пленки, увеличивая концентрацию световых лучей видимого диапазона спектра, повышают генерацию электроэнергии солнечными элементами. В то же время наличие пленки на поверхности модуля защищает ее от загрязнения и механических повреждений в случае попадания песчаных и других абразивных частиц. Такое решение будет достаточно эффективным для рассмотренных регионов.

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СОЛНЕЧНОГО МОДУЛЯ В УСЛОВИЯХ ПРОМЫШЛЕННОГО ГОРОДА

Вид экспериментальной установки показан на рис. 4.

На рис. 5. показаны полученные в ходе эксперимента зависимости изменения мощности с течением времени для обоих модулей. К старту эксперимента (19 апреля 2022 г.) один из модулей (№ 1) был уже значительно запылен в течение месяца, в период с 19 марта по 19 апреля 2022 г. (см. рис. 4).

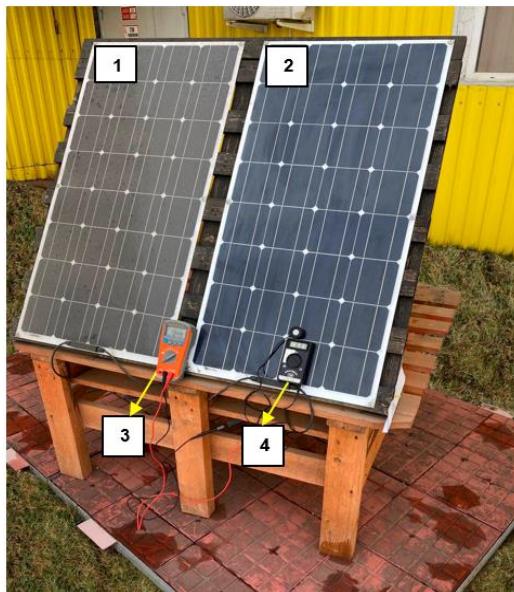


Рис. 4. Экспериментальная установка для определения генерации солнечного модуля в Челябинске:  
1 – солнечный модуль №1; 2 – контрольный солнечный модуль № 2 (очищенный);  
3 – цифровой мультиметр APPA 62; 4 – люксметр ТУ 4215-003-16796024-04

Fig. 4. Experimental installation to determine solar module generation in Chelyabinsk city:  
1 – solar module No. 1; 2 – control solar module No. 2 (cleaned); 3 – APPA 62 digital multimeter;  
4 – TU 4215-003-16796024-04 illuminometer

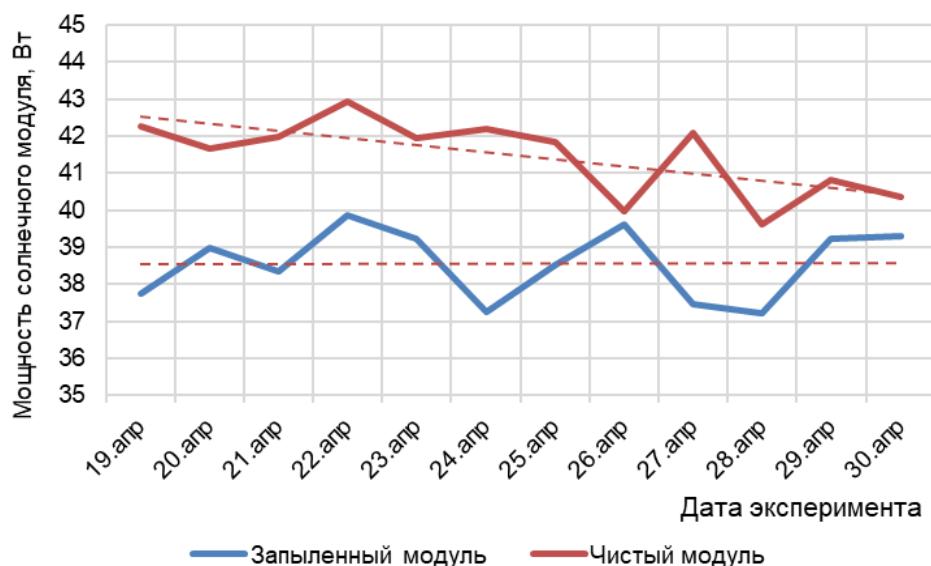


Рис. 5. Снижение выработки мощности солнечными модулями в течение эксперимента  
Fig. 5. Reduction in solar module power generation during the experiment

Анализ скопившейся пыли на поверхности солнечного модуля № 1 показал, что в состав в основном входит растительная пыль (древесная), земля, а также незначительное количество металлической пыли (железная, алюминиевая). Эта пыль обладает хорошей адгезией и способна проникать глубоко в структуру модуля.

Результаты исследования показали, что с течением времени выработка электроэнергии солнечными модулями значительно снижается из-за запыления поверхности, в среднем она снизилась на 7,1% по сравнению с регулярно очищаемым модулем.

Нами были проанализированы десятки публикаций по вопросу загрязнений солнечных модулей. Эти обзоры включают сотни исследований, которые касаются проблем загрязнения для разных стран и условий эксплуатации. Большая часть работ посвящена способам очистки уже загрязненных пылью модулей и их характеристикам. И практически нет работ по предотвращению запыления и устройствам защиты. В одной из обзорных статей авторы предложили использовать специальную гидрофобную пленку или химическое покрытие [20]. Такое покрытие не позволяет пыли прилипать к поверхности модуля, но в этом случае требуется очищать само покрытие. Таким образом, чтобы этот метод был эффективным, необходимо наличие до-

ждя или воды для смытия слоя пыли с самой пленки.

Таким образом, для районов, где наблюдаются те или иные виды загрязнения, проблема снижения генерации энергии солнечными модулями является очень актуальной, требующей решения не только за счет очистки поверхностей модулей, но и за счет разработки высокоэффективных средств защиты и предотвращения модулей от загрязнения.

На основе проведенного литературного обзора, экспериментальных исследований и полученных в связи с этим выводов, был предложен способ предотвращения загрязнения поверхностей солнечных модулей с использованием устройств на базе электронно-ионной технологии улавливания частиц пыли силами электрического поля устройства [21]. В настоящее время идет оформление патента на данный способ.

В сочетании устройств защиты модулей от загрязнения с регулярной (не менее одного раза в месяц) очисткой солнечных модулей возможно сохранение их работоспособности на заявляемом производителями устройств уровне.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной проблемой, снижающей генерацию электроэнергии солнечными модуля-

ми, является их загрязнение пылевыми частицами. В зависимости от региона это загрязнение проявляется по-разному. В странах, находящихся вблизи пустынь и песчаных районов, преобладают крупнодисперсные пылевые частицы, для промышленных же районов характерно наличие мелкодисперсной пыли, выбрасываемой предприятиями. Но и в том и в другом случае происходит затенение поверхности модулей из-за пылевого слоя, снижающего проникновение солнечных лучей. При длительных перерывах между очистками производительность солнечных модулей может снижаться в среднем от 7% до 46% в зависимости от степени загрязнения и региона.

Полученные экспериментальные результаты по исследованию периодов загрязнения и снижению эффективности работы модулей в условиях г. Челябинск и г. Бахтар не явля-

ются усредненными и не распространяются на остальные территории данных регионов, но считаются показательными в отношении проблем снижения генерации солнечными модулями из-за влияния основных видов загрязнений.

Для обеспечения стабильной выработки электроэнергии энергоустановками необходима не только их очистка, но, прежде всего, разработка и использование устройств, предотвращающих запыление поверхности модулей. При этом необходимо учитывать химические и электрофизические свойства пыли, их дисперсность и адгезию. Устройства защиты должны быть просты в эксплуатации, безопасны, не создавать дополнительного затенения модулей, обеспечивать максимальную чистоту поверхности модуля и снизить периодичность очистки.

#### **Список источников**

1. Hussain A., Batra A., Pachauri R. An experimental study on effect of dust on power loss in solar photovoltaic module // *Renewables*. 2017. Vol. 4. Iss. 9. <https://doi.org/10.1186/s40807-017-0043-y>.
2. Zarei T., Abdolzadeh M., Yaghoub M. Comparing the impact of climate on dust accumulation and power generation of PV modules: a comprehensive review // *Energy for Sustainable Development*. 2022. Vol. 66. P. 238–270. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2021.12.005>.
3. Goudie A.S. Dust storms: recent developments // *Journal of Environmental Management*. 2009. Vol. 90. Iss. 1. P. 89–94. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.07.007>.
4. Goudie A.S. Desert dust and human health disorders // *Environment International*. 2014. Vol. 63. P. 101–113. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.10.011>.
5. Sarver T., Al-Qaraghuli A., Kazmerski L.L. A comprehensive review of impact of dust on the use of solar energy: history, investigations, results, literature and mitigation approaches // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. Vol. 22. P. 698–733. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.065>.
6. Kumar S., Chaurasia P.B.L. Experimental study on the effect of dust deposition on solar photovoltaic panel in Jaipur (Rajasthan) // *International Journal of Science and Research*. 2014. Vol. 3. Iss. 6. P. 1690–1693.
7. Adinoyi M.J., Said S.A.M. Effect of dust accumulation on the power outputs of solar photovoltaic modules // *Renewable Energy*. 2013. Vol. 60. P. 633–636. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.06.014>.
8. Rajput D.S., Sudhakar K. Effect of dust on performance of solar PV panel // *International Journal of ChemTech Research*. 2013. Vol. 5. Iss. 2. P. 1083–1086. <https://ipolytech.ru>
9. Darwish Z.A., Kazem H.A., Sopian K., Alghoul M.A., Chaichan M.T. Impact of some environmental variables with dust on solar photovoltaic (PV) performance: review and research status // *International Journal of Energy and Environment*. 2013. Vol. 7. Iss. 4. P. 152–159.
10. Mani M., Pillai R. Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: research status, challenges and recommendations // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010. Vol. 14. Iss. 9. P. 3124–3131. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.065>.
11. Elminir H.K. Effect of dust on the transparent cover of solar collectors // *Energy Conversion and Management*. 2006. Vol. 47. Iss. 18-19. P. 3192–3203. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.02.014>.
12. Al-hasan A.Y., Ghoneim A.A. A new correlation between photovoltaic panel's efficiency and amount of sand dust accumulated on their surface // *International Journal of Sustainable Energy*. 2005. Vol. 24. Iss. 4. P. 187–197. <https://doi.org/10.1080/14786450500291834>.
13. Ali H.M., Zafar M.A., Bashir M.A., Nasir M.A., Ali M., Siddiqui A.M. Effect of dust deposition on the performance of photovoltaic modules in Taxila, Pakistan // *Thermal Science*. 2017. Vol. 21. Iss. 2. P. 915–923. <https://doi.org/10.2298/TSCI140515046A>.
14. Mekhilef S., Saidur R., Kamisarvestani M. Effect of Dust, Humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012. Vol. 16. Iss. 5. P. 2920–2925. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.012>.
15. Jaszczur M., Teneta J., Styszko K., Hassan Q., Burzyńska P., Marcinek E., et al. The field experiments and model of the natural dust deposition effects on photovoltaic module efficiency // *Environmental Science and*

- Pollution Research. 2019. Vol. 26. P. 8402–8417. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1970-x>.
16. Назаров Б.И., Абдуллаев С.Ф., Маслов В.А., Абдурасурова Н.А., Абдуллаева М.С. О температурных эффектах пыльной мглы // Доклады академии наук Республики Таджикистан. 2010. Т. 53. № 6. С. 454–459.
17. Kirpichnikova I.M., Makhsumov I.B. Investigation of surface temperature of solar modules using holographic overheating protection // IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (Magnitogorsk, 4–5 October 2019). Magnitogorsk: IEEE, 2019. P. 80–84. <https://doi.org/10.1109/PEAMI.2019.8915414>.
18. Кирпичникова И.М., Махсумов И.Б. Повышение энергетической эффективности работы солнечных модулей за счет снижения температуры поверхности //

- Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 2. С. 489–499.
19. Kirpichnikova I.M., Sudhakar K., Makhsumov I.B., Martyanov A.S., Priya S.S. Thermal model of photovoltaic module with heat protective film // Case Studies in Thermal Engineering. 2022. Vol. 30. P. 101744. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101744>.
20. Deb D., Brahmabhatt N.L. Review of yield increase of solar panels through soiling prevention, and a proposed water-free automated cleaning solution // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 82. Part 3. P. 3306–3313. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.014>.
21. Kirpichnikova I.M., Shestakova V.V. Electron-Ion technology as protection of solar modules from contamination // International Russian Automation Conference. 2019. Vol. 641. P. 554–562. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-39225-3\\_60](https://doi.org/10.1007/978-3-030-39225-3_60).

### References

1. Hussain A., Batra A., Pachauri, R. An experimental study on effect of dust on power loss in solar photovoltaic module. *Renewables*. 2017;4(9). <https://doi.org/10.1186/s40807-017-0043-y>.
2. Zarei T., Abdolzadeh M., Yaghoub M. Comparing the impact of climate on dust accumulation and power generation of PV modules: a comprehensive review. *Energy for Sustainable Development*. 2022;66:238–270. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2021.12.005>.
3. Goudie A.S. Dust storms: recent developments. *Journal of Environmental Management*. 2009;90(1):89–94. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.07.007>.
4. Goudie A.S. Desert dust and human health disorders. *Environment International*. 2014;63:101–113. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.10.011>.
5. Sarver T., Al-Qaraghuli A., Kazmerski L.L. A comprehensive review of impact of dust on the use of solar energy: history, investigations, results, literature and mitigation approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013;22:698–733. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.065>.
6. Kumar S., Chaurasia P.B.L. Experimental study on the effect of dust deposition on solar photovoltaic panel in Jaipur (Rajasthan). *International Journal of Science and Research*. 2014;3(6):1690–1693.
7. Adinoyi M.J., Said S.A.M. Effect of dust accumulation on the power outputs of solar photovoltaic modules. *Renewable Energy*. 2013;60:633–636. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.06.014>.
8. Rajput D.S., Sudhakar K. Effect of dust on performance of solar PV panel. *International Journal of ChemTech Research*. 2013;5(2):1083–1086.
9. Darwish Z.A., Kazem H.A., Sopian K., Alghoul M.A., Chaichan M.T. Impact of some environmental variables with dust on solar photovoltaic (PV) performance: review and research status. *International Journal of Energy and Environment*. 2013;7(4):152–159.
10. Mani M., Pillai R. Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: research status, challenges and recommendations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010;14(9):3124–3131. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.065>.
11. Elminir H.K. Effect of dust on the transparent cover of solar collectors. *Energy Conversion and Management*. 2006;47(18–19):3192–3203. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.02.014>.
12. Al-hasan A.Y., Ghoneim A.A. A new correlation between photovoltaic panel's efficiency and amount of sand dust accumulated on their surface. *International Journal of Sustainable Energy*. 2005;24(4):187–197. <https://doi.org/10.1080/14786450500291834>.
13. Ali H.M., Zafar M.A., Bashir M.A., Nasir M.A., Ali M., Siddiqui A.M. Effect of dust deposition on the performance of photovoltaic modules in Taxila, Pakistan. *Thermal Science*. 2017;21(2):915–923. <https://doi.org/10.2298/TSCI140515046A>.
14. Mekhilef S., Saidur R., Kamisarvestani M. Effect of Dust, Humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012;16(5):2920–2925. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.012>.
15. Jaszcjur M., Teneta J., Styszko K., Hassan Q., Burzyńska P., Marcinek E., et al. The field experiments and model of the natural dust deposition effects on photovoltaic module efficiency. *Environmental Science and Pollution Research*. 2019;26:8402–8417. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1970-x>.
16. Nazarov B.I., Abdullaev S.F., Maslov V.A., Abdurasulova N.A., Abdullaeva M.S. On temperature effects of dusty haze. *Doklady akademii nauk respubliki Tadzhikistan*. 2010;53(6):454–459. (In Russ.).
17. Kirpichnikova I.M., Makhsumov I.B. Investigation of surface temperature of solar modules using holographic overheating protection. In: *IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice*. 4–5 October 2019, Magnitogorsk. Magnitogorsk: IEEE; 2019, p. 80–84. <https://doi.org/10.1109/PEAMI.2019.8915414>.
18. Kirpichnikova I.M., Makhsumov I.B. Increasing energy efficiency of work of solar modules by decreasing surface

temperature. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of the Tula State University.* 2020;2:489-499. (In Russ.).  
19. Kirpichnikova I.M., Sudhakar K., Makhsumov I.B., Martyanov A.S., Priya S.S. Thermal model of photovoltaic module with heat protective film. *Case Studies in Thermal Engineering.* 2022;30:101744. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101744>.  
20. Deb D., Brahmabhatt N.L. Review of yield increase of

solar panels through soiling prevention, and a proposed water-free automated cleaning solution. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2018;82(3):3306-3313. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.014>.

21. Kirpichnikova I.M., Shestakova V.V. Electron-Ion technology as protection of solar modules from contamination. *International Russian Automation Conference.* 2019;641:554-562. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-39225-3\\_60](https://doi.org/10.1007/978-3-030-39225-3_60).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Кирпичникова Ирина Михайловна,**  
д.т.н., профессор,  
профессор кафедры электрических станций,  
сетей и систем электроснабжения,  
Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет),  
454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, Россия  
✉ kirpichnikovaim@susu.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-4078-8790>

**Махсумов Илхом Бурхонович,**  
к.т.н.,  
ст. преподаватель, заведующий кафедрой  
нетрадиционных возобновляемых источников  
энергии и теплоэнергетики,  
Институт энергетики Таджикистана,  
733036, р-н Кушониён, ул. Н. Хусрава, 73,  
Республика Таджикистан  
messi.ilhom@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0001-7985-1315>

**Шестакова Валерия Вячеславовна,**  
аспирант,  
Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет),  
454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, Россия  
mrsshestakova@mail.ru

**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 23.10.2022; одобрена после рецензирования 22.12.2022; принята к публикации 17.02.2023.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Irina M. Kirpichnikova,**  
Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Professor of the Department  
of Power Plants, Networks and Power Supply Systems,  
South Ural State University,  
76, Lenin pr., Chelyabinsk 454080, Russia  
✉ kirpichnikovaim@susu.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-4078-8790>

**Ilhom B. Makhsumov,**  
Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer,  
Head of the Department of  
Unconventional Renewable Energy Sources  
and Thermal Power Engineering,  
Institute of Energy of Tajikistan,  
73, N. Khusrava St., Kushoniyon district,  
733036, Tajikistan  
messi.ilhom@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0001-7985-1315>

**Valeriya V. Shestakova,**  
Postgraduate Student,  
South Ural State University,  
76, Lenin pr., Chelyabinsk 454080, Russia  
mrsshestakova@mail.ru

**Contribution of the authors**  
All authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

**Conflict of interests**  
The authors declare no conflict of interests.

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

**Information about the article**  
The article was submitted 23.10.2022; approved after reviewing 22.12.2022; accepted for publication 17.02.2023.

## ЭНЕРГЕТИКА



Научная статья

УДК 621.316.99

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-94-108>

## Анализ и совершенствование методов расчёта сопротивлений заземляющих устройств подстанций

А.В. Ляхомский<sup>1</sup>, С.В. Кузьмин<sup>2✉</sup>, А.П. Кудряшов<sup>3</sup>, Р.С. Кузьмин<sup>4</sup>,  
И.С. Кузьмин<sup>5</sup>, В.А. Меньшиков<sup>6</sup>

<sup>1</sup>НИТУ МИСиС, г. Москва, Россия

<sup>2,4,6</sup>Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

<sup>3</sup>ООО «СУЭК-Хакасия», г. Черногорск, Россия

<sup>4,5,6</sup>ООО ГК «Рутас», г. Красноярск, Россия

**Резюме.** Цель – анализ и уточнение результатов расчета сопротивления заземляющих устройств подстанций с учетом факторов эксплуатации. Для оценки сопротивления заземляющего устройства подстанции использовались различные методы: расчетные (методы коэффициентов использования, обобщенных параметров и наведенных потенциалов) и инструментальные (метод «амперметра-вольтметра»). Установлено, что в процессе эксплуатации систем заземления сопротивление заземляющих устройств возрастает по сравнению с расчетными значениями, что снижает эффективность ее работы. Проведенные экспериментальные измерения сопротивления заземляющих устройств подстанций по методу «амперметра-вольтметра» показали, что относительная погрешность рассмотренных расчетных методов может достигать %, соответственно: 48, 46,7 и 28,6. Для повышения точности расчета сопротивления заземляющих устройств по методу наведенных потенциалов предложено использовать коэффициент эксплуатации заземляющего устройства. Установлено, что при сроках эксплуатации подстанций до 10 лет, от 10 лет до 20 лет и более 20 лет за счет коррозии конструкции заземляющего устройства и его сопротивления возрастет в 1,02–1,1 раза. Показано, что монтаж заземляющего устройства приводит к росту его сопротивления в 1,02 раза, а проверка целостности конструкции и функционирования заземляющего устройства увеличивает его сопротивление в 1,05 раза, если периодичность проверки более 6 лет. Грозовая активность и токи короткого замыкания влияют на интенсивность коррозии конструкции заземляющего устройства и, соответственно, приводят к росту его величины в 1,01–1,03 раза и 1,03–1,05 раза. Таким образом, величина коэффициента эксплуатации может изменяться в диапазоне от 1,115 до 1,274, а практика применения коэффициента эксплуатации в расчетах сопротивления заземляющего устройства по методу наведенных потенциалов позволила повысить точность расчетов: относительная погрешность не превысила 3%. Это соответствует требованиям нормативно-технической документации Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы России.

**Ключевые слова:** методы расчета, сопротивление заземляющих устройств, подстанция, экспериментальное измерение, относительная погрешность, коэффициент эксплуатации

**Для цитирования:** Ляхомский А.В., Кузьмин С.В., Кудряшов А.П., Кузьмин Р.С., Кузьмин И.С., Меньшиков В.А. Анализ и совершенствование методов расчёта сопротивлений заземляющих устройств подстанций // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 1. С. 94–108. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-94-108>.

## Analysis and improvement of methods for calculating the resistance of substation earthing equipment

Aleksandr V. Lyakhomskiy<sup>1</sup>, S.V. Kuzmin<sup>3✉</sup>, Aleksey P. Kudryashov<sup>3</sup>,  
Roman S. Kuzmin<sup>4</sup>, Ilya S. Kuzmin<sup>5</sup>, Vitaliy A. Menshikov<sup>6</sup>

<sup>1</sup>National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia

<sup>2,4,6</sup>Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

<sup>3</sup>LLC «SUEK-Khakassia», Chernogorsk, Russia

<sup>4,5,6</sup>Group of companies «Rutas» LLC, Krasnoyarsk, Russia

**Abstract.** In this study, we analyze the results of calculating the resistance of substation earthing equipment taking operational factors into account. The resistance of a substation earthing system was estimated using both calculation (methods of equipment operating factors, generalized parameters and induced potentials) and instrumental (ammeter-voltmeter) methods. During operation, the resistance of the studied earthing system was found to increase in comparison with the rated values, thus reducing its overall efficiency. The resistance of substation earthing equipment measured experimentally by the ammeter-voltmeter method showed the relative error of the considered calculation methods to reach 48, 46.7 and 28.6%, respectively. With the purpose of increasing the calculation accuracy of earthing equipment resistance by the method of induced potentials, it was proposed to use an operating factor. Thus, during the substation operation period of 10, 10–20 and over 20 years, the resistance of the earthing system increases by 1.02–1.1 times due to corrosion. It was shown that the installation procedure and maintenance checks (conducted at least every six years) increase the resistance of earthing systems by 1.02 and 1.05 times, respectively. Lightning discharges and short-circuit currents affect the corrosion rate of earthing systems, thereby increasing their resistance by 1.01–1.03 and 1.03–1.05 times, respectively. Therefore, the operating factor value may range from 1.115 to 1.274. The use of the operating factor in calculating the resistance of an earthing system by the induced potentials method increased the overall calculation accuracy, with the relative error not exceeding 3%. This corresponds to the normative and technical requirements stipulated by the Federal Grid Company of the Unified Energy System of Russia.

**Keywords:** calculation methods, resistance of grounding devices, substation, experimental measurement, relative error, operating ratio

**For citation:** Lyakhomskiy A.V., Kuzmin S.V., Kudryashov A.P., Kuzmin R.S., Kuzmin I.S., Menshikov V.A. Analysis and improvement of methods for calculating the resistance of substation earthing equipment. *iPolytech Journal*. 2023;27(1):94-108. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-94-108>.

### ВВЕДЕНИЕ

Современные заземляющие устройства подстанции 35–220 кВ выполняют три основных функции:

- рабочее заземление, предназначенное для обеспечения работоспособности электрооборудования, систем релейной защиты и автоматики, устройств сбора и передачи информации, приборов учета электроэнергии;
- защитное заземление, обеспечивающее электробезопасность при эксплуатации электрооборудования и электроустановок;
- молниезащитное заземление, предназначенное для эффективного отвода в землю токов молний с молниевыводов, разрядников и нелинейных ограничителей перенапряжений.

Основополагающим параметром, обуславливающим эффективность заземляющих устройств (ЗУ), является сопротивление распределения тока (далее сопротивление ЗУ).

Опыт эксплуатации подстанций показывает, что ЗУ эффективно выполняют вышеперечисленные функции, если величина сопротивления ЗУ не превышает нормируемое значение. В частности, для подстанций напряжением 110 кВ и выше сопротивление ЗУ не должно превышать 0,5 Ом для каждого времени года и для любых климатических поясов, а для подстанций напряжением 6–35 кВ сопротивление ЗУ не должно превышать значения, рассчитанного по формуле (1), но не более 10 Ом<sup>7</sup> [1]:

$$R_{3y} < \frac{250}{J_{033}}, \quad (1)$$

где  $J_{033}$  – расчетный ток замыкания на землю.

В связи с вышеизложенным, точность определения сопротивления ЗУ является актуальной задачей.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Определение сопротивления ЗУ выполняется расчетными методами<sup>8,9</sup> [2–6] или экспериментальными с помощью непосредственных измерений<sup>10</sup> [7–10].

Расчетные методы определения сопротивления ЗУ используются на стадии проектирования подстанций, а также на действующих подстанциях, расположенных в плотной городской застройке с наличием в земле различного рода металлических трубопроводов, кабельных линий и других металлических коммуникаций, которые могут приводить к недопустимому увеличению погрешности при измерении сопротивления ЗУ [7].

В связи с этим для оценки точности методов расчета сопротивления ЗУ были выбраны десять подстанций напряжением 110–220 кВ, расположенных на открытой местности вне городов в разных климатических поясах, что исключает влияние различных металлических (расположенных в земле) коммуникаций на результаты измерений сопротивления ЗУ.

Точность методов расчета сопротивления ЗУ определялась с помощью сравнивания расчетных и измеренных величин.

В табл. 1 приведены параметры заземляющих устройств подстанций, для которых были рассчитаны сопротивления ЗУ различными инженерными методами.

ЗУ выбранных подстанций имеют прямоугольную форму ( $L_{max} \times L_{min}$ ), что минимизирует погрешность расчетов их сопротивлений

[2, 3].

В табл. 1 приведены следующие обозначения:

- $\rho_1$  и  $\rho_2$  – удельное электрическое сопротивление первого и второго слоев грунта применительно к двухслойной модели грунта, Ом·м;
- $\rho_{\text{экв}}$  – эквивалентное удельное электрическое сопротивление грунта, Ом·м;
- $h_1$  – толщина первого слоя грунта, м;
- $t$  – глубина погружения вертикального электрода от поверхности земли, м;
- $\ell_B$  – длина вертикального электрода, м;
- $m_B$  – количество вертикальных электродов, шт.;
- $S_B$  – поперечное сечение вертикального электрода,  $\text{мм}^2$ ;
- $a$  – среднее расстояние между электродами, м;
- $L_{max}$  – длина большей стороны ЗУ, м;
- $L_{min}$  – длина меньшей стороны ЗУ, м;
- $n_{max}$  и  $n_{min}$  – количество горизонтальных заземлителей с длиной  $L_{max}$  и  $L_{min}$ , шт.;
- $L_{\Sigma}$  – суммарная протяженность горизонтальных заземлителей, м;
- $S_{\Gamma}$  – поперечное сечение горизонтальных заземлителей,  $\text{мм}^2$ ;
- $S_{3y}$  – площадь ЗУ,  $\text{м}^2$ .

В настоящее время используются три основных инженерных метода расчета сопротивлений ЗУ подстанции:

- коэффициентов использования [2];
- обобщенных параметров [2];
- наведенных потенциалов [3].

**Метод коэффициентов использования** заключается в расчете собственных проводимостей отдельных элементов сложного заземляющего устройства, таких как горизонтальные заземлители ( $g_{\Gamma}$ ) и вертикальные электроды

<sup>7</sup>Правила устройства электроустановок ПУЭ [Электронный ресурс]. URL: [https://www.elec.ru/viewer?url=/library/direction/rue\\_7.pdf](https://www.elec.ru/viewer?url=/library/direction/rue_7.pdf) (10.06.2022).

<sup>8</sup>ГОСТ 9.602-2016. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. М.: Стандартинформ, 2016.

<sup>9</sup>СТО 59947007-29.130.15.105-2011. Методические указания по контролю состояния заземляющих устройств электроустановок [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200088448> (10.06.2022).

<sup>10</sup>Васильев П.Ф. Методы снижения сопротивления заземляющих устройств в много летнемёрзлых грунтах: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02. Томск, 2012.

Таблица 1. Параметры заземляющих устройств подстанций  
 Table 1. Parameters of substation grounding devices

№	Наименование и регион расположения подстанций	$\rho_1$ , Ом·м	$\rho_2$ , Ом·м	$\rho_{3KB}$ , Ом·м	$h_1$ , м	$t$ , м	$\ell_B$ , м	$n_B$ , шт.	Диаметр вертикального электрода, $\varnothing$ , мм	Сечение вертикального электрода, $S_B$ , мм <sup>2</sup>	$a$ , м	$L_{max}$ , м	$n_{max}$ , шт.	$L_{min}$ , м	$n_{min}$ шт.	$L_{\Sigma}$ , мм <sup>2</sup>	$S_{3Y}$ , мм <sup>2</sup>	
1	ПС 110/10кВ «Кедровская тяговая», угольный разрез «Кедровский», Кемеровская область	24	16	18,8	1,5	0,8	5	38	12	113	12	51	6	44	7	614	200	2244
2	ПС 110/35/10/6 кВ «ТРП-7»; угольный разрез «Восточный», Республика Казахстан	45	85	67,1	5,0	0,8	5	200	28	615	9	225	16	107	15	5205	250	24075
3	ПС 110/10кВ «Кулаково», Тюменская область	26	48	39,0	3,0	0,8	5	24	16	201	3	36	6	28	7	412	200	1008
4	ПС 110/10кВ «НПС-2», Богучанский район Красноярского края	270	405	368,0	2,0	0,8	5	63	18	254	16	184	19	120	23	6256	250	22080
5	ПС 110/6кВ «Ерунаковская-Северная», угольный разрез «Талдинский», Кемеровская область	24	50	40,0	5,0	0,8	3	28	16	201	12	54	5	32	9	558	160	1728
6	ПС 220/10кВ «НПС-6» г. Усть-Кут	16	110	72,0	2,0	0,7	5	100	16	201	14	149	11	111	12	2971	250	16539
7	ПС 220/110/10кВ «Приангарская», п. Богучаны Красноярского края	78	104	84,5	1,6	0,6	5	200	16	201	6	325	10	156	29	7774	200	50700
8	ПС 220/110/10кВ «Шушенская опорная», Красноярский край	23	207	110,0	3,5	0,6	5	181	Труба $\varnothing$ 18мм	245	10	240	14	210	18	7140	200	50400
9	ПС 220/110/10кВ «Горячинская», п. Горячинск, Республика Бурятия	65	260	171,5	8,0	0,8	12	250	30	706	10	255	20	236	22	10292	200	60180
10	ПС 220/35/10кВ «Туран», Республика Тыва	11	127	75,0	1,5	0,6	5	117	16	200	8	200	8	99	12	2788	200	1980

Примечание: ПС – подстанция.

( $g_B$ ) с учетом их взаимного влияния на результатирующие сопротивления ЗУ посредством коэффициента использования ( $\eta$ ).

Сопротивление ЗУ по методу коэффициентов использования определяется по формуле:

$$R_{\text{расч}} = (\eta \times \sum_{i=1}^n g_i)^{-1}, \quad (2)$$

где  $\eta$  – коэффициент использования;  $g_i$  – проводимость отдельного элемента ЗУ, см<sup>-1</sup>.

Недостатком данного метода является большая трудоемкость в определении коэффициента использования, эквивалентного удельного электрического сопротивления грунта для вертикальных электродов, сопротивлений растекания тока отдельных элементов ЗУ.

Коэффициент использования является сложной интегральной функцией, отражающей взаимное потенциальное влияние элементов ЗУ с учетом влияния параметров электрической структуры земли.

Для сложных современных ЗУ с развитой внутренней структурой, имеющей заземляющие сетки и вертикальные электроды внутри ЗУ, значение коэффициента использования определяется с помощью специальных компьютерных программ. Причем в этом случае относительная погрешность метода будет находиться в пределах 38–48%.

Это связано с тем, что требуется определить отдельно эквивалентное удельное электрическое сопротивление грунта как для горизонтальных заземлителей, так и для вертикальных электродов.

Для вертикальных электродов эквивалентное удельное электрическое сопротивление грунта определяется по формуле:

$$\rho_{\text{экв.в.}} = \frac{\rho_1 \times \rho_2 \times \hbar \ell_B}{\rho_1 \times (t + \hbar \ell_B - h_1) + \rho_2 (h_1 - t)}, \quad (3)$$

где  $\hbar = 1$  при  $\rho_1 > \rho_2$  и  $\hbar = 1,2$  при  $\rho_1 < \rho_2$ .

Значение эквивалентного удельного электрического сопротивления грунта двухслойной земли для горизонтальных заземлителей  $\rho_{\text{экв.г.}}$  находят с помощью линейной интерполяции по данным табл. 8.1, приведенной в [2].

Значения проводимостей отдельных вертикальных электродов и отдельных горизонтальных заземлителей, соответственно, определяются по формулам (3) и (4):

$$g_B = \left[ \frac{\rho_{\text{экв.в.}}}{2\pi \ell_B^2} \left[ \left( \ell_B \ln \frac{2\ell_B}{r_0} + (\ell_B + t) \ln \frac{\ell_B + t}{\ell_B + 2t} + t \times \ln \frac{2t}{\ell_B + 2t} - 0,307\ell_B \right) \right] \right]^{-1}; \quad (4)$$

$$g_R = \left[ \frac{\rho_{\text{экв.г.}}}{2\pi \ell_R^2} \left[ \ln \frac{\ell_R^2}{2r_0 t} + \frac{2t}{\ell_R} - 0,5 \left( \frac{2t}{\ell_R} \right)^2 - 0,61 \right] \right]^{-1}. \quad (5)$$

В формулах (4) и (5)  $r_0$  – это радиус окружности эквивалентного поперечного сечения вертикального электрода и горизонтального заземлителя. Определяется по формуле:

$$r_0 = \left( \frac{S_{\text{экв}}}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

где  $S_{\text{экв}}$  – площадь поперечного сечения,  $\text{м}^2$ .

Таким образом, большой объем вычислений при расчете сопротивления сложных ЗУ, имеющих значительное число горизонтальных элементов с разными длинами и плотно заполняющих пространство внутри замкнутого контура ЗУ, обусловливает увеличение относительной погрешности и ограничивает область применения метода коэффициентов использования заземляющими устройствами с простой геометрией, исключающей заполнение пространства внутри ЗУ.

В последнем случае относительная погрешность расчетов сопротивления ЗУ не превышает 2% [2].

**Метод обобщенных параметров** разработан для двух основных типов сложных заземлителей, широко применяемых в электроустановках напряжением выше 1 кВ в сетях с изолированными и эффективно заземленными нейтралями. Первый тип – сложные комбинированные заземлители, имеющие в плане форму замкнутого или разомкнутого контура с развитыми внутренними горизонтальными перемычками и с вертикальными электродами, расположенными лишь по периметру контура. Второй тип – заземляющие сетки, состоящие почти исключительно из горизонтальных элементов и так же, как и первый тип, имеющие в плане форму замкнутого или разомкнутого контура с развитыми внутренними перемычками. Единичные вертикальные электроды, имеющиеся у заземляющих сеток, например, для целей молниезащиты, при расчете электрических характеристик в установившихся режимах не учитывают.

В конструкции современных заземляющих устройств подстанций широко используются вертикальные электроды, как по периметру ЗУ, так и внутри замкнутого контура ЗУ, поэтому на практике преимущественно

используют первый вариант метода обобщенных параметров.

Согласно исследованиям, приведенным в [2], основными конструктивными параметрами сложных заземлителей, оказывающими заметное влияние на сопротивление ЗУ, являются:  $S$  – площадь заземляющего устройства,  $\text{м}^2$ ;  $\ell_{\text{в}}$  – длина вертикальных электродов, м;  $L_{\Sigma}$  – общая длина всех горизонтальных элементов, м;  $a$  – среднее расстояние между соседними вертикальными электродами. Сильное влияние на сопротивление ЗУ оказывают также отношение удельного сопротивления верхнего и нижнего слоев  $\rho_1/\rho_2$  и толщина верхнего слоя  $h$ .

Если  $0,5 \leq \rho_1/\rho_2 \leq 2$ , то обобщенный параметр ( $T_1$ ) определяется по формуле:

$$T_1 = \ell_{\text{в}} \times L_{\Sigma} \left( a \times \sqrt{S} \right)^{-1}. \quad (7)$$

В случае  $\rho_1/\rho_2 > 2$ , на сопротивление ЗУ сильное влияние оказывает относительное проникновение вертикальных электродов в нижний слой грунта, поэтому обобщенный параметр  $T_2$  определяется по формуле:

$$T_2 = (t + \ell_{\text{в}} - h_1) \times L_{\Sigma} \times \left( a \times \sqrt{S} \right)^{-1}. \quad (8)$$

Сопротивление ЗУ по данному методу определяется по формуле:

$$R_{\text{расч}} = \rho_2 \times B \times \left( T^{\beta} \times \sqrt{S} \right)^{-1}, \quad (9)$$

где  $B$  и  $\beta$  – коэффициенты, величина которых определяется соответствующим образом:

$$B = C_B \times (\rho_1/\rho_2)^{E_B} \text{ и } \beta = C_{\beta} \times (\rho_1/\rho_2)^{E_{\beta}}, \quad (10)$$

где параметры  $C_B$ ,  $E_B$ ,  $C_{\beta}$ ,  $E_{\beta}$  определяются по табл. 8.4, приведенной в [2], и справедливы при следующих основных условиях:  $0,5 \leq T_1 \leq 40$ ;  $0,05 \leq T_2 \leq 40$ ;  $5 \leq \ell_{\text{в}} \leq 20$  м;  $0,5 \leq a/\ell_{\text{в}} \leq 4$ ;  $0,5 \leq t \leq 0,8$ ;  $4 \leq L_{\Sigma}/\sqrt{S} \leq 40$ ;  $1 \leq L_{\text{max}}/L_{\text{min}} \leq 2$ , что объясняет ограниченную область применения данного метода.

Наиболее универсальным методом, не имеющим ограничений и обладающим минимальными затратами при расчете сопротивления ЗУ, является **метод наведенных потенциалов** [3, 11].

Сопротивление ЗУ определяется по выражению:

$$R_{\text{расч}} = A \times \rho_{\text{ЭКВ}} \times \left( \frac{1}{\sqrt{S}} + \frac{1}{L_{\Sigma} + m \cdot \ell_{\text{в}}} \right), \quad (11)$$

где коэффициент  $A$  рассчитывается по формулам:

$$\left. \begin{array}{l} A = 0,444 - 0,84t_{\text{отн}}, \text{ при } 0 \leq t_{\text{отн}} \leq 0,1 \\ A = 0,385 - 0,25t_{\text{отн}}, \text{ при } 0,1 < t_{\text{отн}} \leq 0,5 \end{array} \right\}. \quad (12)$$

В свою очередь, параметр  $t_{\text{отн}}$  определяется следующим образом:

$$t_{\text{отн}} = \frac{(\ell_{\text{в}} + t)}{\sqrt{S}}. \quad (13)$$

Основным показателем эффективности расчетного метода является его точность. Для инженерных методов в качестве критерия точности оценки сопротивления ЗУ принята относительная погрешность результатов расчета по сравнению с измеренным значением сопротивления ЗУ:

$$\delta = \frac{R_{\text{расч.}} - R_{\text{изм}}}{R_{\text{расч.}}}. \quad (14)$$

Для подстанций, указанных в табл. 1, проведены расчеты и экспериментальные определения сопротивлений ЗУ.

Измерения сопротивления ЗУ осуществлялись по методу «амперметра-вольтметра», который рекомендован Федеральной сетевой компанией Единой энергетической системы как основной метод для определения сопротивления ЗУ на подстанции напряжением 110 кВ и выше [8].

В табл. 2 приведены результаты измерений и расчетов сопротивлений ЗУ подстанций, указанных в табл. 1.

**Таблица 2.** Относительная погрешность расчетных методов определения сопротивления заземляющих устройств подстанций**Table 2.** Relative error of calculation methods for determining substation grounding device resistances

№	Наименование подстанции	$R_{изм}$ , Ом	Метод коэффициентов использования		Метод обобщенных параметров		Метод наведенных потенциалов	
			$R_{расч}$ , Ом	$\delta$ , %	$R_{расч}$ , Ом	$\delta$ , %	$R_{расч}$ , Ом	$\delta$ , %
1	ПС 110/10кВ Кедровская тяговая	0,22	0,426	48,0	0,150	-46,7	0,180	-22,2
2	ПС 110/35/10/6кВ ТРП-7	0,23	0,434	47,0	0,163	-36,9	0,193	-19,2
3	ПС 110/10кВ Кулаково	0,63	1,020	38,2	0,473	-33,2	0,498	-28,6
4	ПС 110/10кВ НПС-2	1,23	2,270	45,8	0,908	-35,5	1,074	-14,5
5	ПС 110/6кВ Ерунаковская-Северная	0,53	0,840	36,9	0,408	-29,9	0,429	-23,5
6	ПС 220/10кВ НПС-6	0,27	0,520	48,1	–	–	0,249	-8,4
7	ПС 220/110/10кВ Приангарская	0,19	0,371	48,8	0,147	-29,3	0,168	-13,1
8	ПС 220/110/10кВ Шушенская опорная	0,26	0,492	47,2	–	–	0,221	-17,6
9	ПС 220/110/10кВ Горячинская	0,35	0,642	45,5	–	–	0,313	-11,8
10	ПС 220/35/10кВ Туран	0,31	0,558	44,4	–	–	0,248	-25,0

Расчет сопротивлений ЗУ методом обобщенных параметров для подстанции ПС 220/10кВ НПС-6, ПС 220/110/10кВ Шушенская опорная, ПС 220/110/10кВ Горячинская не выполнялся, т.к. отношение  $\rho_1/\rho_2$  для перечисленных подстанций, соответственно, равно 0,145; 0,111; 0,25; 0,087 и меньше 0,5. Это не позволяет достоверно определить обобщенный параметр  $T_1$ , следовательно, и сопротивление ЗУ.

Анализ табл. 2 показывает, что относительная погрешность расчетов сопротивления ЗУ по методу коэффициентов использования положительная и находится в диапазоне от 37 до 49%.

Положительное значение относительной погрешности указывает на то, что расчетное значение сопротивления ЗУ превышает измеренную величину. Превышение расчетных значений по сравнению с измеренными величинами обусловлено физической идеей данного метода, основанной на том, что взаимное влияние растекания токов с отдельных элементов ЗУ приводит к увеличению плотности тока, стекающего в землю с ЗУ, что

уменьшает поперечное сечение условного проводника и приводит к росту его сопротивления.

Значительная погрешность данного метода, как было отмечено выше, связана прежде всего со сложностью определения коэффициента использования применительно к современным заземляющим устройствам.

Относительная погрешность метода обобщенных параметров отрицательная и находится в диапазоне 30–46,7%. Отрицательное значение относительной погрешности указывает на то, что расчетные значения сопротивления ЗУ меньше измеренных величин. Данная тенденция связана с тем, что метод обобщенных параметров не учитывает растекание тока с вертикальных электродов, размещенных во внутренней зоне ЗУ подстанции. Следовательно, плотность тока, стекающего с ЗУ, будет меньше реальной плотности тока, а уменьшение плотности тока подобно увеличению поперечного сечения условного проводника, что ведет к снижению сопротивления.

Наиболее точным методом из трех рассмотренных методов расчета сопротивления

ЗУ является метод наведенных потенциалов.

Данный метод учитывает влияние вертикальных электродов и горизонтальных заземлителей, расположенных по периметру и во внутренней зоне ЗУ, на величину его сопротивления. Однако данный метод не учитывает влияние продольных сопротивлений горизонтальных заземлителей и вертикальных электродов и переходные сопротивления в конструкции ЗУ.

В связи с этим относительная погрешность находится в диапазоне 8,4–28,6%.

Отрицательное значение относительной погрешности связано с невозможностью учета неравномерности растекания тока с ЗУ, что в физическом смысле снижает плотность тока, стекающего с ЗУ в землю, а, следовательно, приводит к заведомому снижению расчетного значения по сравнению с измеренным.

Согласно нормативно-технической документации (НТД), относительная погрешность расчетных методов определения сопротивления ЗУ подстанций напряжением 110 кВ и выше не должна отличаться от реального значения сопротивления ЗУ на  $\pm 5\%$  [8].

Таким образом, существующие методы расчетов сопротивления ЗУ не в полной мере отвечают требованиям НТД.

В работах профессора Л.В. Гладилина указывается на то, что переходное и продольное сопротивление в конструкции заземляющих устройств и сетей заземления может оказывать существенное влияние на величину сопротивления ЗУ [13–15].

Если на подстанции для снижения сопротивления ЗУ используются выносные заземляющие устройства (ВЗУ), тогда на сопротивление ЗУ существенное влияние оказывает продольное сопротивление заземляющих проводников, связывающих центральное заземляющее устройство (ЦЗУ) подстанции с ВЗУ [15]. В частности, применительно к подстанциям 120/10(6) кВ и 35/6 кВ, эксплуатируемых на открытых горных работах, протяженность заземляющих проводников между ЦЗУ и ВЗУ ограничена 2 км, если удельное сопротивление грунта свыше 200 Ом·м [16]. Продольное сопротивление горизонтальных заземлителей и вертикальных электродов, используемых в конструкции ЦЗУ, в основном

зависит от длины, поперечного сечения указанных элементов, от проводимости материала, из которого они изготовлены, и от переходного сопротивления в местах соединений отдельных элементов ЗУ.

При постоянстве длины отдельных элементов конструкции ЗУ определяющими факторами, влияющими на изменение продольного сопротивления горизонтальных заземлителей и вертикальных электродов, служат поперечное сечение и продольное сопротивление, которые сильно зависят от интенсивности коррозии материала, из которого они изготовлены.

Интенсивность коррозии зависит не только от коррозийных характеристик грунта [8] и срока эксплуатации подстанции, но и от плотности протекающего по элементам ЗУ тока, который резко возрастает в режимах однофазного КЗ и при прямом ударе молнии в молниеприемник подстанции [4–6].

Доля уменьшения поперечного сечения горизонтальных заземлителей и вертикальных электродов выполняется на основе оценки глубины коррозии, определяемой при периодических проверках ЗУ путем частичного вскрытия и осмотра отдельных элементов конструкции ЗУ подстанции.

В случае критического снижения поперечного сечения элементов конструкции ЗУ обосновывается их замена, что приведет к повышению эффективности растекания тока с ЗУ.

Следовательно, определение расчетных значений переходных и продольных сопротивлений отдельных элементов ЗУ на действующей подстанции – трудоемкий и длительный процесс.

В то же время влияние переходных и продольных сопротивлений отдельных элементов конструкции ЗУ на сопротивление ЗУ можно определить по косвенным параметрам, к которым относятся следующие: срок эксплуатации подстанции, качество монтажных работ при сооружении ЗУ, периодичность проверки ЗУ, величина тока однофазного короткого замыкания на землю в сетях 110 кВ и выше, грозовая активность.

Влияние вышеперечисленных факторов на сопротивление ЗУ определено на основании диагностики систем заземления,

включающей 110 подстанций в 12 регионах. В табл. 1 и 2 приведены выборочные подстанции.

С увеличением срока эксплуатации ЗУ возрастает степень коррозийности отдельных элементов конструкции ЗУ, что приводит к уменьшению поперечного сечения горизонтальных заземлителей и вертикальных электродов и, как следствие, к росту сопротивления ЗУ.

В табл. 3 на основании экспериментальных исследований приведены данные о сроках эксплуатации подстанций, указанных в табл. 1, и относительная погрешность расчетов сопротивления ЗУ. Анализ результатов табл. 3 показывает, что с увеличением срока эксплуатации подстанции реальное (измеренное) значение сопротивления ЗУ возрастает и приводит к росту относительной погрешности расчетных значений.

Срок эксплуатации ЗУ подстанции принимался равным с даты последней реконструкции ЗУ до даты последнего измерения сопротивления ЗУ.

Исследования показывают, что при эксплуатации подстанции до 10 лет сопротивление возрастает в среднем на 2%. Если подстанция эксплуатируется от 10 до 20 лет, тогда сопротивление ЗУ может возрасти как минимум на 6%, а при эксплуатации более 20 лет сопротивление ЗУ увеличивается на 10% и более, что подтверждается результатами, приведенными в табл. 4.

Измерения сопротивления ЗУ на новых подстанциях после сооружения ЗУ пока-

зывают, что расчетное значение и измеренная величина отличаются на 1–3% в большую сторону. Очевидно, что подобное несовпадение объясняется качеством монтажных работ и наличием переходных сопротивлений в местах соединения отдельных элементов в конструкции ЗУ.

Диагностика заземляющих устройств подстанций, расположенных в одинаковых климатических зонах, с близкими значениями срока эксплуатации, аналогичными параметрами электропроводности грунтов и площадями подстанций показывает, что на величину сопротивления ЗУ оказывает влияние периодичность проверки состояния ЗУ. Если периодичность проверки ЗУ составляла менее 6 лет, отличия измеренных значений сопротивления ЗУ для подстанций не превышают 3%, а при сроках проверки более 6 лет состояние ЗУ указанное отличие может достигать 5%.

Заземляющие устройства подстанций подвергаются воздействию электромагнитных полей переменного тока, что приводит к протеканию по элементам ЗУ переменного тока. Исследования в данной области [5, 6] показывают, что в безаварийном режиме эксплуатации подстанции плотность тока, протекающего по элементам ЗУ, находится в диапазоне от 20 мА/дм<sup>2</sup> до 180 мА/дм<sup>2</sup>, что не превышает допустимое значение 200 мА/дм<sup>2</sup>. Следовательно, блюжающие переменные токи в безаварийном режиме эксплуатации подстанции не увеличивают интенсивность коррозии ЗУ.

**Таблица 3.** Влияние срока эксплуатации подстанции на величину относительной погрешности расчетных значений сопротивления заземляющих устройств

**Table 3.** Influence of substation operating life on the magnitude of relative error of calculated values of grounding device resistances

Наименование подстанции	Срок эксплуатации заземляющих устройств, год	Относительная погрешность
ПС 110/10кВ Кулаково	36	28,6
ПС 220/35/10кВ Туран	32	25,0
ПС 110/6кВ Ерунковская-Северная	29	23,5
ПС 110/10кВ Кедровская тяговая	27	22,2
ПС 110/35/6кВ ТРП-7	25	19,2
ПС 220/110/10кВ Шушенская опорная	14	17,6
ПС 220/10кВ НПС-2	3	14,5
ПС 220/110/10кВ Приангарская	3	13,1
ПС 220/110/10кВ Горячинская	2	11,8
ПС 220/10кВ НПС-6	Менее 1	8,4

Таблица 4. Влияние срока эксплуатации заземляющих устройств подстанции на интенсивность увеличения сопротивления заземляющих устройств

Table 4. Influence of substation grounding device service life on intensity of grounding device resistance increase

№	Наименование подстанции	Строительство или последняя реконструкция заземляющих устройств	Последнее измерение сопротивления заземляющих устройств	Срок эксплуатации, год	Интенсивность увеличения сопротивления заземляющих устройств $R_{изм2}/R_{изм1}$	Среднее значение интенсивности	
1	ПС 220/10кВ НПС-2	2016	1,205	2019	1,23	3	1,0207
2	ПС 220/110/10кВ Приангарская	2016	0,186	2019	0,19	3	1,0220
3	ПС 220/110/10кВ Горячинская	2016	0,340	2018	0,35	2	1,0290
4	ПС 220/10кВ НПС-6	2017	0,265	2018	0,27	1	1,0190
5	ПС 220/110/10кВ Шушенская опорная	2007	0,245	2021	0,26	14	1,0610
6	ПС 110/35/6кВ ТРП-7	1991	0,215	2016	0,23	25	1,0700
7	ПС 110/10кВ Кедровская тяговая	1989	0,200	2016	0,22	27	1,1000
8	ПС 110/6кВ Ерунаковская Северная	1991	0,480	2020	0,53	29	1,1040
9	ПС 220/35/10кВ Туран	1989	0,280	2021	0,31	32	1,1070
10	ПС 110/10кВ Кулаково	1980	0,560	2016	0,63	36	1,1250

В режиме однофазного короткого замыкания на землю в сетях 110 кВ и выше и при прямых ударах молнии в молниеотводы, установленные на подстанции, по элементам ЗУ будут протекать импульсные токи молний величиной до 100 кА, а также кратковременные переменные токи частотой 50 Гц, измеряемые в кА.

В этом случае плотность тока, протекающего по элементам ЗУ, возрастает, что может спровоцировать более интенсивные коррозийные процессы в ЗУ и, как следствие, приводить к росту сопротивления ЗУ. Если плотность тока возрастает до 5 А/дм<sup>2</sup>, скорость коррозии увеличивается в 7,5 раза [4, 6].

Исследования, проведенные на вышеуказанных подстанциях, показывают, что при прочих равных условиях, но при различных токах однофазного короткого замыкания наблюдаются различия измеренных значений сопротивления ЗУ. При токах однофазного короткого замыкания до 10 кА, от 10 кА до 15 кА, более 15 кА, отличие измеренных значений сопротивлений ЗУ от расчетных в среднем составляло, соответственно, 3, 4 и 5%.

В случае расположения подстанций в районе с грозовой активностью до 50 ч в год – от 50 до 80 ч в год и при более 80 ч в год, одинаковых площадях ЗУ, электропроводности

грунтов, сроков эксплуатации и сроков ЗУ, а также больших значениях токов КЗ отличие измеренных значений сопротивлений ЗУ составляет в среднем 1, 2 и 3%.

Мультипликативное воздействие выше рассмотренных факторов может приводить к росту сопротивления ЗУ до 27,4%, а при аддитивном воздействии указанных факторов сопротивление ЗУ может возрасти до 25% по сравнению с расчетными значениями. Величина относительных погрешностей расчетных значений, приведенных в табл. 2, может достигать 28,6%. Это указывает на то, что выше рассмотренные факторы действуют на ЗУ и его сопротивление мультипликативно. Следовательно, учет указанных факторов в расчетах сопротивления ЗУ позволит повысить точность определения его величины.

Учет влияния указанных условий (факторов) может быть определен с применением обобщенного мультипликативного коэффициента.

В роли обобщенного коэффициента предлагаются использовать коэффициент эксплуатации ЗУ, составляющие которого определены на основании экспериментальных исследований:

$$K_3 = K_K \times K_M \times K_{\Pi} \times K_{\Gamma} \times K_{K3}, \quad (15)$$

где  $K_K = 1,02$  – коэффициент, учитывающий влияние коррозии металла на работоспособность ЗУ со сроком эксплуатации после капитального ремонта (реконструкции) до 10 лет,  $K_K = 1,06$  и  $K_K = 1,1$ , если срок эксплуатации ЗУ, соответственно, составляет от 10 до 20 лет и более 20 лет;

$K_M = 1,02$  – коэффициент, учитывающий качество монтажных работ;

$K_{\Pi}$  – коэффициент, учитывающий периодичность проверки заземляющего устройства:  $K_{\Pi} = 1,03$  – периодичность проверки до 6 лет,  $K_{\Pi} = 1,05$  – периодичность проверки выше 6 лет;

$K_{\Gamma}$  – коэффициент, учитывающий грозовую активность в районе, где расположена подстанция:  $K_{\Gamma} = 1,01$ , если грозовая активность

не превышает 50 ч в год,  $K_{\Gamma} = 1,02$ , если грозовая активность находится в диапазоне 51÷80 ч в год,  $K_{\Gamma} = 1,03$ , если грозовая активность более 80 ч в год;

$K_{K3}$  – коэффициент, учитывающий величину тока однофазного КЗ в сетях напряжением выше 110 кВ и более:  $K_{K3} = 1,03$ , если ток однофазного КЗ не превышает 10 кА,  $K_{K3} = 1,04$ , если ток однофазного КЗ находится в диапазоне 10–15 кВ и  $K_{K3} = 1,05$ , если ток однофазного КЗ выше 15 кА.

В этом случае сопротивление ЗУ будет определяться по формуле:

$$R_{3y} = K_3 \times R_{\text{расч}}, \quad (16)$$

где  $K_3$  – коэффициент эксплуатации;  $R_{\text{расч}}$  – сопротивление ЗУ, рассчитанное по формуле (11).

**Таблица 5.** Значения сопротивлений заземляющих устройств подстанций 110–220 кВ с учетом коэффициента эксплуатации и относительной погрешности

**Table 5.** Resistance values of 110-220 kV substation grounding devices taking into account the operating ratio and relative error

№	Наименование подстанций	Коррозия металла		Качество монтажных работ	Периодичность проверки		Грозовая активность		Ток однофазного короткого замыкания		$K_3$	$R_0, \text{Ом}$	$R_{3y}, \text{Ом}$	$R_{\text{изм}}, \text{Ом}$	$\delta, \%$
		$T_3, \text{год}$	$K_K$		$K_M$	$T_{\Pi}, \text{год}$	$K_{\Pi}$	$T_{\Gamma}, \text{ч}$	$K_{\Gamma}$	$J_{K3}^{(1)}, \text{kA}$					
1	ПС 110/10кВ Кедровская тяговая	27	1,10	1,02	12	1,05	60	1,02	0,576	1,03	1,238	0,180	0,223	0,22	1,30
2	ПС 110/35/10/6 кВ ТРП-7	25	1,10	1,02	до 6	1,03	40	1,01	3,200	1,03	1,202	0,193	0,232	0,23	0,86
3	ПС 110/10кВ Кулаково	36	1,10	1,02	12	1,05	60	1,02	8,550	1,03	1,238	0,498	0,617	0,63	- 2,10
4	ПС 110/10 кВ НПС-2	3	1,02	1,02	до 6	1,03	40	1,01	1,550	1,03	1,115	1,070	1,193	1,23	- 3,10
5	ПС 110/6кВ Ернаковская-Северная	29	1,10	1,02	12	1,05	60	1,02	9,510	1,03	1,238	0,429	0,531	0,53	0,19
6	ПС 220/10кВ НПС-6	менее 1	1,02	1,02	до 6	1,03	40	1,01	4,500	1,03	1,115	0,249	0,278	0,27	2,88
7	ПС 220/110/10кВ Приангарская	3	1,02	1,02	до 6	1,03	40	1,01	3,600	1,03	1,115	0,168	0,187	0,19	- 1,60
8	ПС 220/110/10кВ Шушенская опорная	14	1,06	1,02	12	1,05	40	1,01	9,760	1,03	1,181	0,221	0,261	0,26	0,38
9	ПС 220/110/10кВ Горячинская	2	1,02	1,02	до 6	1,03	40	1,01	6,600	1,03	1,115	0,313	0,349	0,35	- 0,28
10	ПС 220/35/10кВ Туран	32	1,10	1,02	12	1,05	60	1,02	1,725	1,03	1,238	0,248	0,307	0,31	- 0,98

В табл. 5 приведены данные по учету в определении сопротивления ЗУ значений коэффициентов, обусловливающих его изменение в условиях эксплуатации, для подстанций (представленных в табл. 1) с учетом коэффициента эксплуатации.

Анализ данных табл. 5 показывает, что относительная погрешность расчетных и измеренных значений сопротивления ЗУ не превышает 3,1%, что соответствует требованиям НТД [8] и подтверждает достоверность формулы (15).

Таким образом, применение коэффициента эксплуатации позволяет повысить точность метода наведенных потенциалов при определении сопротивления ЗУ до вышеуказанного требуемого значения в 5%.

Усовершенствованный метод расчета сопротивления ЗУ позволит на стадии проектирования более точно определять параметры конструкции ЗУ подстанций, а также его можно использовать для оценки сопротивления ЗУ, где не представляется возможным измерить сопротивление ЗУ, например, если подстанции расположены в плотной городской застройке.

Применение коэффициента  $K_3$  позволяет уточнять в процессе эксплуатации значения фактического сопротивления ЗУ для оценки эффективности систем заземления в обеспечении безопасной работы электроустановок.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании вышеизложенного материала можно сделать следующие основные выводы:

1. Относительная погрешность рассмотренных инженерных методов расчета сопротивления ЗУ подстанций напряжением 110 кВ и выше может находиться в диапазоне от 8,4 до 48,8%, что не удовлетворяет требованиям нормативно-технической документации, т.к. превышает допустимую точность расчетов равную 5%.

2. Наиболее точным из рассмотренных инженерных методов расчета сопротивления ЗУ является метод наведенных потенциалов, т.к. относительная погрешность расчетных значений сопротивления ЗУ не превышает 28,6%, а относительная погрешность метода коэффициентов использования и метода обобщенного параметра, соответственно, может достигать 48,8 и 46,7%.

3. Коэффициент эксплуатации ЗУ подстанций учитывает влияние срока эксплуатации, качество монтажных работ, периодичность проверки, грозовую активность и величину токов однофазного КЗ на состояние ЗУ, а, следовательно, и на величину сопротивления ЗУ. Использование коэффициента эксплуатации позволяет снизить относительную погрешность расчета сопротивления ЗУ методом наведенных потенциалов до 3%, что соответствует требованиям НТД.

4. Применение коэффициента  $K_3$  позволяет уточнять в процессе эксплуатации значения фактического сопротивления ЗУ для оценки эффективности систем заземления в обеспечении безопасной работы электроустановок.

## Список источников

1. Reshetnyak S., Bondarenko A. Analysis of technological performance of the extraction area of the coal mine // 3rd International Innovative Mining Symposium: E3S Web of Conferences. 2018. Vol. 41. P. 01014.  
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184101014>.
2. Бургдорф В.В., Якобс А.И. Заземляющие устройства электроустановок. М.: Энергоатомиздат, 1987. 400 с.
3. Долин П.А. Основы техники безопасности в электроустановках. М.: Энергоатомиздат, 1984. 448 с.
4. Wang Junping, Liew A.C., Darveniza M. Extension of dynamic model of impulse behavior of concentrated grounds at high currents // IEEE Transactions on Power Delivery. 2005. Vol. 20. Iss. 3. P. 2160–2165.  
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.839645>.
5. Шевырев Ю.В., Шевырева Н.Ю., Плехов А.С., Титов Д.Ю. Применение компьютерных моделей для выбора регуляторов качества электроэнергии при работе электроприводов с полупроводниковыми преобразователями: монография. Нижний Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева, 2018. 180 с.
6. Pecherkin V., Vasilyak L., Vetchinin S. P., Panov V., Son E., Danilin A., et al. Optical investigations of pulsed sparks in soil near electrode // Journal of Physics: Conference Series. 2015. Vol. 653. P. 012151.  
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/653/1/012151>.
7. Коструба С.И. Измерение электрических параметров земли и заземляющих устройств. М.: Энергоатомиздат, 1983. 166 с.
8. Данилин А.Н., Ивонин В.В. Экспериментальные исследования импульсных характеристик сопротивления земли и заземляющих устройств. М.: Энергоатомиздат, 1983. 166 с.

- точенных заземлителей // Труды Кольского научного центра РАН. 2014. № 3. С. 27–32.
9. Шишигин С.Л., Смирнов И.Н., Шишигин Д.С. Высокочастотный метод измерения сопротивления заземления опоры воздушной линии в высокоомном грунте // Известия ТулГУ. Технические науки. 2020. № 10. С. 296–301.
10. Шишигин С.Л., Черепанов А.В., Шишигин Д.С. Импульсный метод измерения сопротивления заземлителей // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 2. С. 30–41.
11. Шишигин С.Л., Шишигин Д.С. Расчёт заземлителей: монография. Вологда: ВоГУ, 2020. 219 с.
12. Нестеров С. Сопротивление электролитического заземлителя // Новости ЭлектроТехники. 2020. № 1-2. С. 72–77. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.news.elteh.ru/pics/121/Net\\_121-122\\_12\\_Nesterov.pdf](http://www.news.elteh.ru/pics/121/Net_121-122_12_Nesterov.pdf) (10.06.2022).
13. Гладилин Л.В., Щуцкий В.И. К расчёту защитных заземлений шахтных и карьерных электроустановок // Горный журнал. 1973. № 12. С. 63–66.
14. Гладилин Л.В., Якуба Ю.Ф. Непрерывность общей сети электроустановок шахт и карьеров основное условие обеспечения электробезопасности // Горный журнал. 1974. № 10. С. 129–132.
15. Гладилин Л.В., Щуцкий В.И., Бацежев Ю.Г., Чеботаев Н.И. Электробезопасность в горно-добывающей промышленности. М.: Недра, 1977. 327 с.
16. Щуцкий В.И., Маврицын А.М., Сидоров А.И., Ситчинин Ю.В. Электробезопасность на открытых горных работах. М.: Недра, 1983. 192 с.
17. Sekioka S., Lorentzou M.I., Philippakou M.P., Prousalidis J.M. Current-dependent grounding resistance model based on energy balance of soil ionization // IEEE Transactions on Power Delivery. 2006. Vol. 21. Iss. 1. P. 194–201. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2005.852337>.
18. Alipio R., Visacro S. Modeling the frequency dependence of electrical parameters of soil // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2014. Vol. 56. Iss. 5. P. 1163–1171. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2014.2313977>.
19. Анненков В.З. Метод расчёта импульсного сопротивления стержневого заземлителя // Электричество. 1997. № 8. С. 59–66.
20. Анненков В.З. Искрообразование в земле вокруг заземлителей молниезащиты // Электричество. 1993. № 12. С. 15–20. <http://doi.org/10.24160/0013-5380-2018-12-22-27>.

### References

1. Reshetnyak S., Bondarenko A. Analysis of technological performance of the extraction area of the coal mine. In: *3rd International Innovative Mining Symposium: E3S Web of Conferences*. 2018;41:01014. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184101014>.
2. Burgsdorf V.V., Yakobs A.I. *Grounding devices of electrical installations*. Moscow: Energoatomizdat; 1987, 400 p. (In Russ.).
3. Dolin P.A. *Fundamentals of safety in electrical installations*. Moscow: Energoatomizdat; 1984, 448 p. (In Russ.).
4. Wang Junping, Liew A.C., Darveniza M. Extension of dynamic model of impulse behavior of concentrated grounds at high currents. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2005;20(3):2160–2165. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.839645>.
5. Shevyrev Yu.V., Shevyreva N.Yu., Plekhov A.S., Titov D.Yu. *Using computer models for the selection of power quality regulators when operating electric drives with semiconductor converters: monograph*. Nizhniy Novgorod: Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev; 2018, 180 p. (In Russ.).
6. Pecherkin V., Vasilyak L., Vetchinin S.P., Panov V., Son E., Danilin A., et al. Optical investigations of pulsed sparks in soil near electrode. *Journal of Physics: Conference Series*. 2015;653:012151. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/653/1/012151>.
7. Kostruba S.I. *Measurement of earth and grounding device electrical parameters*. Moscow: Energoatomizdat; 1983. 166 p. (In Russ.)
8. Danilin A.N., Ivonin V.V. Experimental studies of lumped ground electrode impulse characteristics. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN = Transactions Kola Science* Centre. 2014;3:27-32. (In Russ.).
9. Shishigin S.L., Smirnov I.N., Shishigin D.S. High-frequency method for measuring the resistance of the grounding system of the transmission line tower in high-resistance soil. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. = Proceedings of the Tula State University*. 2020;10:296–301. (In Russ.).
10. Shishigin S.L., Cherepanov A.V., Shishigin D.S. Pulse method for measuring the resistance of earth electrode. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Estestvennye i inzhenernye nauki = Global Energy. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*. 2019;25(2):30–41. (In Russ.).
11. Shishigin S.L. *Calculation of earth electrode systems*. Vologda: Vologda State University; 2020, 219 p. (In Russ.).
12. Nesterov S. Electrolytic ground electrode resistance. *Novosti elektrotehniki*. Available from: [http://www.news.elteh.ru/pics/121/Net\\_121-122\\_12\\_Nesterov.pdf](http://www.news.elteh.ru/pics/121/Net_121-122_12_Nesterov.pdf) [Accessed 10th June 2022]. (In Russ.).
13. Gladilin LV, Shchutskii VI. To protective grounding calculation for mine and open pit electrical installations. *Gornyi zhurnal*. 1973;12:63–66. (In Russ.).
14. Gladilin L.V., Yakuba Y.F. General network continuity of electrical installations of mines and open pits as the main condition for ensuring electrical safety. *Gornyi zhurnal*. 1974;10:129–132. (In Russ.).
15. Gladilin L.V., Shuckij V.I., Bacezhev Yu.G., Chebotaev N.I. *Electrical safety in mining industry*. Moscow: Nedra; 1977, 327 p. (In Russ.).
16. Shutskii V.I., Mavritsyn A.M., Sidorov A.I., Sitchikhin

- Y.V. *Electrical safety in open pit mining*. Moscow: Nedra; 1983, 192 p. (In Russ.).
17. Sekioka S., Lorentzou M.I., Philippakou M.P., Prousalidis J.M. Current-dependent grounding resistance model based on energy balance of soil ionization. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2006;21(1):194-201. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2005.852337>.
18. Alipio R., Visacro S. Modeling the frequency dependence of electrical parameters of soil. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2014;56(5):1163-1171. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2014.2313977>.
19. Annenkov V.Z. Calculation method of rod ground electrode impulse resistance. *Elektrichestvo*. 1997;8:59-66. (In Russ.).
20. Annenkov V.Z. Sparking in the ground around lightning protection earth electrodes. *Elektrichestvo*. 1993;12:15-20. (In Russ.). <http://doi.org/10.24160/0013-5380-2018-12-22-27>.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Ляхомский Александр Валентинович,**  
д.т.н., профессор,  
заведующий кафедрой энергетики и  
энергоэффективности горной промышленности,  
НИТУ МИСиС,  
119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4/1, Россия  
mggu.eegp@mail.ru

**Кузьмин Сергей Васильевич,**  
к.т.н., доцент,  
доцент кафедры электрификации  
горно-металлургического производства,  
Сибирский федеральный университет,  
660025, г. Красноярск, пер. Вузовский, 3, Россия  
✉ rutas2004@mail.ru

**Кудряшов Алексей Петрович,**  
главный энергетик,  
ООО «СУЭК-Хакасия»,  
655162, г. Черногорск, ул. Советская, 40,  
Республика Хакасия  
kudriashovap@suek.ru

**Кузьмин Роман Сергеевич,**  
к.т.н., доцент,  
доцент кафедры электрификации  
горно-металлургического производства,  
Сибирский федеральный университет,  
660025, г. Красноярск, пер. Вузовский, 3, Россия  
rutas2004@mail.ru

**Кузьмин Илья Сергеевич,**  
генеральный директор,  
ООО ГК «Рутас»,  
660064, г. Красноярск, ул. Вавилова, 2ж, Россия  
is@rutas.group

**Меньшиков Виталий Алексеевич,**  
к.т.н., доцент,  
доцент кафедры электрификации  
горно-металлургического производства,  
Сибирский федеральный университет,  
660025, г. Красноярск, пер. Вузовский, 3, Россия  
rutas2004@mail.ru

**Вклад авторов**  
Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Aleksandr V. Lyakhomskiy,**  
Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Head of the Department of Power Engineering  
and Energy Efficiency of Mining Industry,  
National University of Science and Technology MISIS,  
4-1, Leninsky pr., Moscow 119049, Russia  
mggu.eegp@mail.ru

**Sergey V. Kuzmin,**  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of  
Electrification of Mining and Metallurgy Industry,  
Siberian Federal University,  
3, Vuzovskiy Pereulok, Krasnoyarsk 660025, Russia  
✉ rutas2004@mail.ru

**Aleksey P. Kudryashov,**  
Chief Power Engineer,  
LLC «SUEK-Khakassia»,  
40, Sovetskaya St., Chernogorsk 655162, Russia  
kudriashovap@suek.ru

**Roman S. Kuzmin,**  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of  
Electrification of Mining and Metallurgy Industry,  
Siberian Federal University,  
3, Vuzovskiy Pereulok, Krasnoyarsk 660025, Russia  
rutas2004@mail.ru

**Ilya S. Kuzmin,**  
Chief Executive Officer,  
Group of companies «Rutas» LLC,  
2ж, Vavilov St., Krasnoyarsk 660064, Russia  
is@rutas.group

**Vitaliy A. Menshikov,**  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of  
Electrification of Mining and Metallurgy Industry,  
Siberian Federal University,  
3, Vuzovskiy Pereulok, Krasnoyarsk 660025, Russia  
rutas2004@mail.ru

**Contribution of the authors**  
The authors contributed equally to the preparation of the article.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

**Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 12.07.2022; одобрена после рецензирования 05.10.2022; принята к публикации 27.02.2023.

**Conflict of interests**

The authors declare no conflict of interests.

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

**Information about the article**

The article was submitted 12.07.2022; approved after reviewing 05.10.2022; accepted for publication 27.02.2023.

## ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 620.91:330.15

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-109-122>

## Оценка суммарной солнечной радиации с суточной детализацией на основе регрессионных моделей

И.Н. Маленкова<sup>1✉</sup>, В.А. Шакиров<sup>2</sup><sup>1</sup>Братский государственный университет, г. Братск, Россия<sup>2</sup>Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Россия

**Резюме.** Цель – на основе анализа опубликованных данных по разработке регрессионных моделей оценки потока суммарной солнечной радиации предложить новые регрессионные модели с использованием доступных метеорологических данных. Представлены основные этапы разработки регрессионных моделей и подходы к их реализации. Разработка и сравнение точности моделей выполнены на основе метеорологических данных (максимальная и минимальная температура, влажность воздуха, общая и нижняя облачность) г. Иркутск за период 2007–2019 гг. При калибровке и валидации моделей использовались открытые базы данных наземных измерений метеостанций. В результате проведенного анализа литературных источников представлены основные этапы разработки регрессионных моделей и подходы к их реализации. Проведена калибровка и валидация 10 известных и 7 новых регрессионных моделей, в том числе 3 на основе метода опорных векторов. Показано, что наибольшую точность для оценки суммарной солнечной радиации с суточной детализацией показали новые модели, использующие данные о температуре и влажности воздуха, атмосферном давлении, общей и нижней облачности. Минимальная средняя абсолютная ошибка рассмотренных известных моделей при оценке суточных значений суммарной солнечной радиации за период 2016–2019 гг. составила 627,52 Вт·ч/м<sup>2</sup>·сут, новых предложенных регрессионных моделей – 504,7 Вт·ч/м<sup>2</sup>·сут, регрессионных моделей на основе метода опорных векторов – 463,2 Вт·ч/м<sup>2</sup>·сут. На основе анализа средней ошибки смещения определены модели, имеющие наибольшую точность для оценки месячных и годовых сумм суммарной солнечной радиации: известная регрессионная модель, использующая данные о влажности воздуха, а также регрессионная модель на основе метода опорных векторов.

**Ключевые слова:** солнечная радиация, регрессионная модель, метод опорных векторов, валидация, калибровка, метеорологические параметры

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0004) программы фундаментальных исследований РФ на 2021–2030 гг. с использованием ресурсов ЦКП «Высокотемпературный контур» (Минобрнауки России, проект № 13.ЦКП.21.0038).

**Для цитирования:** Маленкова И.Н., Шакиров В.А. Оценка суммарной солнечной радиации с суточной детализацией на основе регрессионных моделей // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 1. С. 109–122. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-109-122>.

## POWER ENGINEERING

Original article

## Evaluation of total solar radiation with daily breakdown based on regression models

Inessa N. Malenkova<sup>1✉</sup>, Vladislav A. Shakirov<sup>2</sup><sup>1</sup>Bratsk State University, Bratsk, Russia<sup>2</sup>Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia

**Abstract.** The study aims to propose new regression models using available weather data by analyzing the data published on the development of regression models for evaluating the flux of total solar radiation. Following an analysis of literature sources, primary stages in developing regression models and approaches to their implementation are described. Models are developed and compared for accuracy based on weather data (maximum and minimal temperature, air humidity, overall and lower cloudiness) in Irkutsk over 2007–2019. For calibration and validation of the models, open databases of ground measurements of weather stations were used. Ten known and seven new regression models were calibrated and validated, including three models based on the support vector method. The new models based on air temperature and humidity, atmospheric pressure, as well as overall and lower cloudiness, showed the highest accuracy in evaluating the total solar radiation with daily breakdown. The maximum mean absolute error in evaluating daily total solar radiation over 2016–2019 comprised 627.52 W·h/m<sup>2</sup>·day for the analyzed known models, 504.7 W·h/m<sup>2</sup>·day for the newly proposed regression models, and 463.2 W·h/m<sup>2</sup>·day for the regression models based on the support vector method. The conducted analysis of the mean bias error revealed models having the highest accuracy in evaluating monthly and annual sums of total solar radiation were determined. These include a known regression model using air humidity data and a regression model based on the support vector method.

**Keywords:** solar radiation, regression model, support vector machine, validation, calibration, meteorological parameters

**Acknowledgements:** The research was carried out under the State Assignment Project (no. FWEU-2021-0004) of the Fundamental Research Program of the Russian Federation for the period from 2021 to 2030 using the resources of the High-Temperature Circuit Multi-Access Research Center (Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project no. 13. ЦКП.21.0038).

**For citation:** Malenkova I.N, Shakirov V.A. Evaluation of total solar radiation with daily breakdown based on regression models. *iPolytech Journal*. 2023;27(1):109-122. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-109-122>.

## ВВЕДЕНИЕ

С каждым годом в мире растет актуальность использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ). На начало 2022 г. установленная мощность солнечных электростанций (СЭС) Единой энергетической системы России составила 1960,62 МВт<sup>3</sup>. Основные объемы мощностей СЭС были введены в период с 2015 г. в рамках реализации механизма государственной поддержки – договора о предоставлении мощности квалифицированных генерирующих объектов, функционирующих на основе использования ВИЭ. В октябре 2021 г. Правительством Российской Федерации было принято решение продлить действующую программу поддержки ВИЭ до 2035 г. с выделением 360 млрд руб. для обеспечения строительства дополнительных 6,7 ГВт новой мощности ВИЭ [1, 2]. В изолированных и труднодоступных районах в последние годы также наблюдается устойчивая тенденция вовлечения солнечной генерации для снижения расхода топлива на дизельных электростанциях. Дальнейшее развитие генерации ВИЭ отвечает целям стратегии социально-экономи-

ческого развития России с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года<sup>4</sup>. <https://www.wildberries.ru/lk/basket>

Несмотря на стремительное развитие и внедрение технологий преобразования солнечной энергии, проблема оценки поступающей солнечной радиации все еще остается актуальной для многих регионов мира. Это связано с высокой стоимостью измерительного оборудования и сложностью его эксплуатации. На интенсивность солнечной радиации (СР) оказывают влияние различные природно-климатические факторы. Это влияние положено в основу построения регрессионных моделей, которые представляют собой зависимость потока солнечной радиации от определенного набора метеорологических, географических и геометрических параметров [3].

Благодаря простоте и при этом достаточной точности регрессионные модели широко применяются во всем мире для оценки СР [4]. На сегодняшний день нет единственной оптимальной модели, набор параметров которой можно было бы считать универсальным, а ее применение давало бы точный результат в

<sup>3</sup>Единая энергетическая система России: промежуточные итоги: оперативные данные за январь 2022 года. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/ups-review/2022/ups\\_review\\_0122.pdf](https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/ups-review/2022/ups_review_0122.pdf) (01.04.2022).

<sup>4</sup>Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года. Утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации № 3052-р от 29.10.2021.

любом регионе мира. Необходимо отметить, что точность модели не может зависеть от ее структуры и многообразия входных параметров. Часто упрощенные модели показывают более точные результаты. Это было подчеркнуто многими исследователями [5–8]. Поэтому при разработке регрессионных моделей необходимо обеспечить компромисс между точностью и сложностью модели, а также доступностью исходных данных.

Авторами статьи были проанализированы исследования по разработке и сравнению точности регрессионных моделей оценки СР в таких странах, как Китай, Индия, Иран, Фиджи, Мексика. Проведенный обзор научных работ позволяет выявить основные закономерности и влияющие факторы при разработке регрессионных моделей оценки СР.

Так, в работе [9] представлен широкий обзор 294 моделей, использующих разнообразные метеорологические и географические параметры для оценки солнечной радиации в различных регионах мира. Исследование показывает, что модели, основанные на данных о продолжительности солнечного сияния, как правило, более точны, чем модели, основанные на данных о температуре, влажности воздуха или других метеорологических параметрах. При этом выбор модели для конкретного региона зависит от природно-климатических условий и доступных данных.

В исследовании [10] для оценки СР с суточной детализацией в Китае во внимание принимаются климатические особенности региона, учитывается тропический климат, для которого характерны период засухи и сезон дождей. На основе анализа точности моделей по статистическим показателям были выделены наиболее эффективные регрессионные модели как для года в целом, так и для характерных сезонов. Исследование показало, что разработка сезонных моделей позволяет повысить точность оценки СР [10].

В работе [11] по оценке солнечной радиации для территории Фиджи также отмечается необходимость учета климатических особенностей региона. Выбор регрессионных моделей осуществлен на основе наиболее доступных для региона метеорологических параметров. Наибольшую точность оценки солнечной

радиации обеспечили модели, учитывающие продолжительность солнечного сияния, среднемесячную продолжительность дня, влажность и температуру воздуха.

Из-за ограниченности данных измерений метеостанций в исследовании [12] для полуострова Юкатан были предложены модели на основе наиболее доступных метеорологических параметров: температуры, продолжительности солнечного сияния, количества осадков, облачности, а также географических параметров: долготы, высоты над уровнем моря. Результаты исследования показали, что наибольшую точность обеспечивают регрессионные модели на основе данных о количестве осадков, относительной влажности, температуре. Разработаны модели оценки СР на основе ограниченного набора данных – только температуры, температуры и количества осадков.

Во многих исследованиях для оценки солнечной радиации используются методы машинного обучения. В большинстве случаев они обеспечивают наибольшую точность, но связаны с необходимостью подготовки большого объема данных и сложностью настройки параметров моделей. Наиболее целесообразно использование таких подходов к оценке солнечной радиации в районах с антропогенным влиянием. В целом ряде работ была отмечена высокая точность регрессионных моделей на основе метода опорных векторов (Support vector machine) [3, 13].

В результате анализа вышеупомянутых исследований авторами работы было установлено, что на сегодняшний день очень сложно дать оценку СР, базируясь на конкретной регрессионной модели или группе моделей. Для каждого региона необходимо принимать во внимание определенный набор факторов, который будет учитывать его природно-климатические, географические и экологические особенности.

Целями исследования является описание основных этапов разработки регрессионных моделей и моделей на основе метода опорных векторов; разработка на примере г. Иркутск группы регрессионных моделей, а также моделей на основе метода опорных векторов и сравнение их по точности.

## МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОТОКА СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ

Для того чтобы установить зависимость между метеорологическими, географическими, геометрическими параметрами и потоком СР в исследуемом районе, необходимо выполнить ряд этапов разработки регрессионных моделей (рис. 1).

Разработка регрессионных моделей начинается с анализа природно-климатических особенностей исследуемого района. Необходимо обратить внимание на тип климата и выявить присущие ему закономерности: температурный режим и режим осадков в зависимости от времени года. Следует учитывать, что климатический режим может изменяться в зависимости от различных факторов: близости к крупным водным объектам, горной местности, объектам антропогенного влияния и др. Учет особенностей исследуемого района важен для определения необходимости построения нескольких регрессионных моделей для различных сезонов.

Также на первом этапе проводится сбор метеорологических данных для исследуемого района с использованием открытых баз данных. Одним из основных источников данных о СР является Мировой центр радиационных данных (МЦРД)<sup>5</sup>. Данные за период с 1964 г. по настоящее время представлены с суточной детализацией по следующим показателям: суммарная и рассеянная СР, радиационный баланс земной поверхности, продолжительность солнечного сияния. Данные во многих пунктах имеют пропуски продолжительностью от суток до нескольких лет.

Многолетние архивы метеорологических наблюдений за температурой и влажностью воздуха, облачностью и атмосферным давлением доступны на сайте «Расписание погоды»<sup>6</sup>. Этот источник данных представляет информацию о фактической погоде, полученную с наземных метеостанций в форматах SYNOP и METAR. В табл. 1 представлены доступные параметры, наиболее часто используемые при разработке регрессионных моделей оценки солнечной радиации.

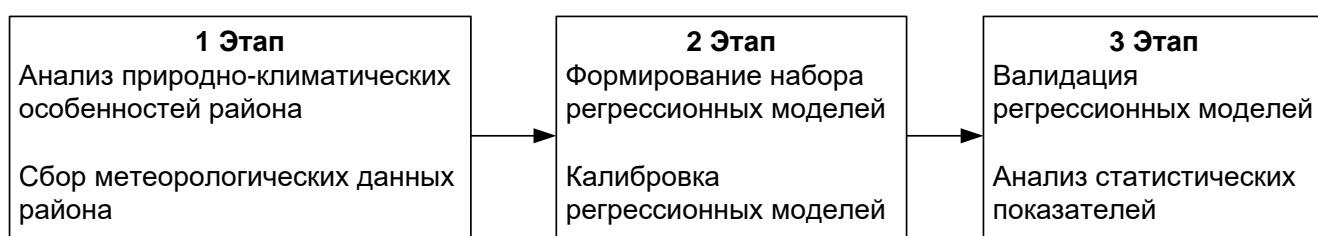


Рис. 1. Этапы разработки регрессионных моделей  
Fig. 1. Development stages of regression models

Таблица 1. Параметры, используемые для построения регрессионных моделей  
Table 1. Parameters used to build regression models

Параметр	Единица измерения	Обозначение
Общая облачность	балл	$C_t$
Нижняя облачность	балл	$C_l$
Температура	°C	$T$
Относительная влажность	%	$RH$
Давление	Па	$P$

<sup>5</sup>Мировой Центр радиационных данных [Электронный ресурс]. URL: <http://wrdc.mgo.rssi.ru/> (14.04.2022).

<sup>6</sup>Расписание погоды [Электронный ресурс]. URL: <https://rp5.ru/> (14.04.2022).

Как отмечалось ранее, не все метеостанции оснащены оборудованием для регистрации полного комплекса метеорологических параметров. Например, на большинстве метеостанций не проводится измерение продолжительности солнечного сияния. Этот параметр является одним из ключевых при построении регрессионных моделей. Данная проблема повышает актуальность определения альтернативного набора доступных параметров, который будет обеспечивать высокую точность модели.

На втором этапе (см. рис. 1) проводится формирование набора регрессионных моделей и их калибровка.

Регрессионные модели могут представлять собой как линейную, так и нелинейную зависимость ряда метеорологических, географических, геометрических параметров от потока солнечной радиации. Достаточно высокую точность, как правило, позволяет обеспечить линейная модель [14]:

$$\frac{H}{H_0} = \sum_{i=1}^n k_i \cdot x_i, \quad (1)$$

где  $H$  – поток суммарной СР;  $H_0$  – поток внеатмосферной СР;  $k_i$  – параметры модели;  $n$  – количество параметров;  $x_i$  – коэффициенты линейной регрессии.

Поток внеатмосферной СР определяется по формуле (2):

$$H_0 = \frac{12 \cdot 360 \cdot G_{sc}}{\pi} \cdot \left[ 1 + 0,033 \cos\left(\frac{360 \cdot N}{365}\right) \cdot \left\{ \cos(L) \cdot \cos(\delta) \cdot [\sin(h_2) - \sin(h_1)] + \left[ \frac{\pi \cdot (h_2 - h_1)}{180} \right] \cdot \frac{1}{2} \sin(L) \cdot \sin(\delta) \right\} \right], \quad (2)$$

где  $G_{sc}$  – солнечная постоянная, равная 1367 Вт/м<sup>2</sup>;  $N$  – порядковый номер дня от 1 до 365;  $L$  – широта местности, рад;  $\delta$  – угол склонения солнца, рад;  $h_2$  и  $h_1$  – часовые углы солнца, соответствующие интервалу оценки, рад.

В зависимости от набора доступных параметров на основе ранее выполненных исследований [3, 9, 11] может быть сформирован набор регрессионных моделей. Также могут

быть предложены и новые модели на основе комбинации известных зависимостей или путем добавления дополнительных параметров.

Определение коэффициентов линейной регрессии (калибровка модели) осуществляется на основе большей части доступных данных (до 80%) наземных измерений метеостанций.

Коэффициенты линейной регрессионной модели могут быть определены с помощью средств автоматизации расчетов Microsoft Excel с использованием модуля «Поиск решений».

На третьем этапе (см. рис. 1) проводится оценка точности моделей по части данных, оставленных для валидации. Этот процесс сопровождается расчетом разнообразных статистических показателей. Одними из наиболее часто используемых являются показатели средней абсолютной ошибки (MAE от англ. Mean Absolute Error) и средней ошибки смещения (MBE от англ. Mean Bias Error) [15].

$$MAE = \frac{1}{t} \cdot \sum_{i=1}^t |H_i - H_m|, \quad (4)$$

где  $t$  – количество измерений СР, по которым проводится сравнение;  $H_i$  – расчетное значение потока СР;  $H_m$  – измеренное значение потока СР.

Чем ниже значение MAE, тем выше точность модели [11].

MBE является индикатором среднего отклонения расчетных значений от измеренных и описывает систематическую ошибку или погрешность:

$$MBE = \frac{1}{t} \cdot \sum_{i=1}^t (H_i - H_m). \quad (5)$$

Положительные значения MBE указывают на завышение моделью оценок СР, а отрицательные – на их занижение [11].

В результате валидации определяется наиболее точная регрессионная модель оценки СР. В случае, если точность модели недостаточна, может быть рассмотрен вариант определения моделей для отдельных сезонов года.

## РЕГРЕССИОННЫЕ МОДЕЛИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ОПОРНЫХ ВЕКТОРОВ

Регрессионные модели на основе метода опорных векторов показали высокую эффективность для оценки солнечной радиации в сравнении с другими методами машинного обучения [3, 13]. Рассмотрим подробнее специфику метода машин опорных векторов для его применения в рамках проводимого исследования.

Метод опорных векторов представляет собой мощную и универсальную модель машинного обучения с учителем, которую можно применять в задачах классификации и регрессии. В ходе обучения вычисляется важность каждой точки данных с точки зрения определения решающей границы между классами. Точки, которые лежат на границе между классами и наиболее сильно влияющие на решение называются «опорными векторами». Модель регрессии или классификации строится на основе измерения расстояний от новых точек до каждого опорного вектора с учетом важности опорных векторов, полученных в процессе обучения [15]. Метод опорных векторов использует технику ядер, что позволяет проецировать данные в пространство с большей размерностью [16]. Пространство определяется полиномиальными и гауссовыми базисными функциями, благодаря чему появляется возможность аппроксимировать нелинейные зависимости с помощью линейного классификатора [16]. Благодаря процедуре «kernel trick» обучение на преобразованных с помощью ядра данных можно провести неявно, без построения полного  $N$ -мерного представления ядерной проекции [16]. В этом состоит преимущество регрессии на основе метода опорных векторов.

Основные виды ядер или преобразующих функций: линейное, полиномиальное, гауссово ядро с радиальной базовой функцией (radial basis function), сигмоидное.

В исследовании построение регрессионных моделей на основе метода опорных векторов проводилось с использованием библиотеки машинного обучения «scikit-learn python». Для преобразования данных было выбрано гауссово ядро с радиальной базовой

функцией. Расстояние между точками данных измеряется с помощью функции<sup>7</sup>:

$$k_{rbf}(x_i, x_j) = e^{-\gamma \|x_i - x_j\|^2}, \quad (6)$$

где  $x_i, x_j$  – точки данных;  $\|x_i - x_j\|$  – евклидово расстояние между точками;  $\gamma$  – параметр, регулирующий ширину гауссового ядра.

Настройка регрессионных моделей осуществлялась выбором двух параметров –  $C$  и  $\gamma$ .

Параметр  $\gamma$  входит в формулу (6) и определяет степень близости расположения точек. Небольшое значение  $\gamma$  соответствует большому радиусу гауссового ядра и означает, что многие точки рассматриваются как близкорасположенные. Это приводит к получению очень гладких границ принятия решений, что соответствует моделям низкой сложности [14]. Параметр  $C$  представляет собой параметр регуляризации, устанавливает баланс между допустимой величиной ошибки и сложностью класса функций, в котором проводится поиск решения. Увеличение значения  $C$  позволяет точкам оказывать более сильное влияние на модель и делает решающую границу более изогнутой.

Выбор параметров  $C$  и  $\gamma$  оказывает большое влияние на точность регрессионной модели.

## РАЗРАБОТКА РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ СУММАРНОЙ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ НА ОСНОВЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ДАННЫХ Г. ИРКУТСК

Регрессионная модель позволяют оценить СР для достаточно большой территории относительно той локации, климатические данные которой использовались для ее калибровки. Границы применимости регрессионных моделей с обеспечением высокой точности оценки могут достигать десятков и сотен километров при однородных природно-климатических условиях территории.

Рассмотрим этапы разработки и выбора наиболее точной регрессионной модели для оценки суммарной солнечной радиации по климатическим данным г. Иркутск. Выбор города обусловлен наличием архива наземных

измерений СР за многолетний период в базе данных МЦРД. Разработка регрессионной модели суммарной СР позволит выполнить соответствующие оценки в ближайших районах и выделить из них наиболее перспективные для внедрения технологий преобразования солнечной энергии.

В соответствии с первым этапом методики (см. рис. 1) анализируются климатические особенности исследуемого района, и проводится сбор метеорологических данных.

Иркутск – административный центр Иркутской области. Географические координаты города: 50° 17' северной широты и 104° 16' восточной долготы. Климат Иркутска резко континентальный со значительными суточными и годовыми колебаниями температур воздуха, с малой облачностью и небольшим количеством атмосферных осадков, которые выпадают главным образом в теплое время года [17].

Разница летних и зимних температур может превышать 70°C. Среднегодовое сияние солнца составляет 318 дней [17]. Отрицательная температура в Иркутске устанавливается в конце октября и сохраняется до начала апреля. Зима суровая и продолжительная, весна сухая и короткая. Лето в первой полу-

вине жаркое и сухое, на вторую половину приходятся затяжные дожди. Осень теплая и сухая, характерны резкие суточные перепады температур<sup>8</sup>. На теплый период года (май–сентябрь) приходится 78% всех осадков, на холодный – 22% [18]. Среднегодовая влажность воздуха умеренная, составляет 72% [18].

Сбор метеорологических данных выполнен с использованием базы МЦРД и сайта «Расписание погоды»<sup>6</sup> за период 2007–2019 гг. Для калибровки регрессионных моделей используются данные за период с 2007 по 2015 гг. Валидация моделей осуществляется по данным за период с 2016 по 2019 гг.

На втором этапе методики выполняется формирование набора моделей. На основе анализа научных публикаций [11, 19, 20] авторами выделено десять регрессионных моделей (табл. 2).

Авторами были дополнительно предложены для рассмотрения четыре модели. Они отличаются от известных дополнительным учетом параметра нижней облачности  $C_t$ , давления  $P$ , синуса максимального за месяц угла высоты солнца  $\sin\alpha$ .

**Таблица 2.** Выбранные известные регрессионные модели оценки уровня суммарной солнечной радиации  
 Table 2. Selected known regression models for global solar radiation level estimation

Модель	Обозначение	Формула	Переменные	Ссылка
Модель 1	M1	$H/H_0 = x_1 + x_2 \cdot RH$	$H_0, RH$	[19]
Модель 2	M2	$H/H_0 = x_1 + x_2 \cdot T_{max} + x_3 \cdot T_{min} + x_4 \cdot (T_{max} - T_{min}) + x_5 \cdot RH$	$H_0, T_{max}, T_{min}, RH$	[19]
Модель 3	M3	$H/H_0 = x_1 + x_2 \cdot (T_{max} - T_{min})$	$H_0, T_{max}, T_{min}$	[11]
Модель 4	M4	$H/H_0 = x_1 + x_2 \cdot (T_{max} - T_{min})^{0,5}$	$H_0, T_{max}, T_{min}$	[11]
Модель 5	M5	$H/H_0 = x_1 + x_2 \cdot (T_{max}/T_{min}) + x_3 \cdot (T_{max}/T_{min})^2$	$H_0, T_{max}, T_{min}$	[11]
Модель 6	M6	$H/H_0 = x_1 + x_2 \cdot T_{max} + x_3 \cdot T_{min}$	$H_0, T_{max}, T_{min}$	[11]
Модель 7	M7	$H/H_0 = x_1 + x_2 \cdot T_{max} + x_3 \cdot T_{min} + x_4 \cdot P$	$H_0, T_{max}, T_{min}, P$	[11]
Модель 8	M8	$H/H_0 = x_1 + x_2 \cdot C_t$	$H_0, C_t$	[20]
Модель 9	M9	$H/H_0 = x_1 + x_2 \cdot C_t + x_3 \cdot C_t^2$	$H_0, C_t$	[20]
Модель 10	M10	$H/H_0 = x_1 + x_2 \cdot (T_{max} - T_{min})^{0,5} + x_3 \cdot C_t$	$H_0, T_{max}, T_{min}, C_t$	[20]

<sup>7</sup>МФ ВСЕГЕИ. N-48-XXXIII. Электронное издание Государственной геологической карты масштаба 1:200000 [Электронный ресурс]. URL: geo.mfvsegei.ru (28.09.2021).

<sup>8</sup>Мюллэр А., Гвидо С. Введение в машинное обучение с помощью Python. Руководство для специалистов по работе с данными / пер. с англ. СПб.: Альфа-книга, 2017. 480 с.

**Таблица 3.** Предлагаемые регрессионные модели оценки суммарной солнечной радиации  
**Table 3.** Proposed regression models for global solar radiation estimation

Модель	Обозначение	Формула	Переменные
Модель 11	M11	$H/H_0 = x_1 + x_2 \cdot P + x_3 \cdot RH + x_4 \cdot T + x_5 \cdot C_l + x_6 \cdot C_t + x_7 \cdot \text{Sina}$	$H_0, P, RH, T, C_l, C_t, \text{Sina}$
Модель 12	M12	$H/H_0 = x_1 + x_2 \cdot (T_{\max}/T_{\min}) + x_3 \cdot C_t + x_4 \cdot C_l$	$H_0, T_{\max}, T_{\min}, C_l, C_t$
Модель 13	M13	$H/H_0 = x_1 + x_2 \cdot (T_{\max}/T_{\min}) + x_3 \cdot P + x_4 \cdot C_t + x_5 \cdot C_l$	$H_0, T_{\max}, T_{\min}, C_l, C_t, P$
Модель 14	M14	$H/H_0 = x_1 + x_2 \cdot (T_{\max} + T_{\min}) + x_3 \cdot RH + x_4 \cdot C_t + x_5 \cdot C_l$	$H_0, T_{\max}, T_{\min}, C_l, C_t, RH$

**Таблица 4.** Предлагаемые регрессионные модели на основе метода опорных векторов  
**Table 4.** Proposed regression models based on the support vector machine

Модель	Обозначение	Параметры модели	Переменные
Модель 15	M15	$C = 5000; gamma = 1$	$H_0, C_l, C_t, \text{Sina}$
Модель 16	M16	$C = 5000; gamma = 1$	$H_0, C_l, C_t, \text{Sina}, RH,$
Модель 17	M17	$C = 5000; gamma = 1$	$H_0, C_l, C_t, \text{Sina}, RH, T_{\max}, T_{\min}$

В табл. 4 представлена информация о составе параметров регрессионных моделей на основе метода опорных векторов.

Результаты калибровки моделей представлены в табл. 5. В табл. 6 показаны результаты оценки погрешности моделей.

Наиболее точные результаты оценки СР для исследуемого района представлены моделями M11-M17. Эти модели включают такие параметры, как температура, относительная влажность воздуха, общая и нижняя облачность, давление, максимальная месячная высота солнца. Из регрессионных моделей в виде функциональной зависимости модель M14 показала самую высокую точность (MAE = 505 Вт·ч/м<sup>2</sup>·сут), что, по мнению авторов,

является результатом комплексного учета климатических параметров. Из регрессионных моделей на основе метода опорных векторов наиболее точной является модель M17 (MAE = 463 Вт·ч/м<sup>2</sup>·сут). Средняя абсолютная ошибка известных регрессионных моделей варьируется от 627 до 1153 Вт·ч/м<sup>2</sup>·сут.

Однако отдельные из предложенных моделей имеют сравнительно высокие ошибки смещения. Так, МВЕ моделей M11-M14, M16 находятся в диапазоне от -226 до -365 Вт·ч/м<sup>2</sup>·сут. Для анализа влияния большой погрешности смещения моделей в табл. 7 показаны результаты оценки годовых сумм СР в сравнении с данными наземных измерений.

**Таблица 5.** Результаты калибровки регрессионных моделей  
**Table 5.** Regression model calibration results

Название модели	Обозначение	Формула
Модель 1	M1	$H/H_0 = 0,8833 - 0,0062 \cdot RH$
Модель 2	M2	$H/H_0 = 0,5619 - 0,003 \cdot T_{\max} + T_{\min} + 0,0185 \cdot (T_{\max} - T_{\min}) - 0,004 \cdot RH$
Модель 3	M3	$H/H_0 = 0,2298 + 0,023 \cdot (T_{\max} - T_{\min})$
Модель 4	M4	$H/H_0 = 0,0073 + 0,1471 \cdot (T_{\max} - T_{\min})^{0,5}$
Модель 5	M5	$H/H_0 = 0,4701 - 0,0003 \cdot (T_{\max}/T_{\min}) - 1,6152 \cdot (T_{\max}/T_{\min})^2$
Модель 6	M6	$H/H_0 = 0,213 + 0,0238 \cdot T_{\max} - 0,0259 \cdot T_{\min}$
Модель 7	M7	$H/H_0 = -3,671 + 0,0254 \cdot T_{\max} - 0,0248 \cdot T_{\min} + 0,005 \cdot P$
Модель 8	M8	$H/H_0 = 0,7623 - 0,0396 \cdot C_t$
Модель 9	M9	$H/H_0 = 0,595 + 0,0425 \cdot C_t - 0,007 \cdot C_t^2$
Модель 10	M10	$H/H_0 = 0,3779 + 0,0958 \cdot (T_{\max} - T_{\min})^{0,5} - 0,0283 \cdot C_t$
Модель 11	M11	$H/H_0 = -0,0598 + 0,0013 \cdot P - 0,0032 \cdot RH + 0,0022 \cdot T - 0,0231 \cdot C_l - 0,0201 \cdot C_t - 0,1277 \cdot \text{Sina}$
Модель 12	M12	$H/H_0 = 0,611 + 0,0078 \cdot (T_{\max} - T_{\min}) - 0,0202 \cdot C_t - 0,0236 \cdot C_l$
Модель 13	M13	$H/H_0 = 1,508 - 0,0003 \cdot (T_{\max}/T_{\min}) - 0,001 \cdot P - 0,0232 \cdot C_t - 0,0293 \cdot C_l$
Модель 14	M14	$H/H_0 = 0,8064 + 0,0034 \cdot (T_{\max} + T_{\min}) - 0,0023 \cdot RH - 0,0199 \cdot C_t - 0,0223 \cdot C_l$

**Таблица 6.** Оценка погрешности моделей по показателям MAE и MBE, Вт·ч/м<sup>2</sup>·сут  
**Table 6.** Model error estimation in terms of MAE and MBE, W·h/m<sup>2</sup>·day

Модель	2016 г.		2017 г.		2018 г.		2019 г.		Оценка модели за 2016–2019 гг.		Ранг MAE
	MAE	MBE	MAE	MBE	MAE	MBE	MAE	MBE	MAE	MBE	
M1	669	146	707	-32	717	21	780	-237	718	-25	14
M2	553	-23	627	-185	605	-138	725	-438	627	-196	8
M3	616	-29	715	-173	700	-61	835	-325	716	-147	13
M4	1071	-28	1126	-122	1151	-91	1264	-422	1153	-166	17
M5	935	-120	1078	-302	1023	-192	1181	-479	1054	-273	16
M6	607	-123	723	-273	680	-205	852	-534	716	-284	12
M7	583	-89	693	-238	662	-198	815	-510	688	-259	11
M8	716	-119	866	-212	699	-165	867	-455	787	-238	15
M9	592	-89	666	-187	699	-117	769	-425	682	-205	10
M10	527	-59	830	128	526	116	714	-426	658	-182	9
M11	448	-100	501	-186	471	-222	613	-506	508	-253	4
M12	496	-190	548	-271	515	-277	721	-598	570	-333	5
M13	544	-225	597	-299	560	-309	768	-624	617	-365	7
M14	437	-101	500	-191	462	-206	620	-508	505	-252	3
M15	571	-18	588	-82	518	-32	677	-372	588	-126	6
M16	446	-95	462	-142	413	-149	622	-519	486	-226	2
M17	430	-35	473	-93	417	-88	534	-413	463	-157	1

**Таблица 7.** Оценка годовых сумм солнечной радиации, кВт·ч/м<sup>2</sup>·год  
**Table 7.** Estimation of annual amounts of solar radiation, kW·h/m<sup>2</sup>·year

№	2016 г.		2017 г.		2018 г.		2019 г.					
	модель	МЦРД	δ, %	модель	МЦРД	δ, %	модель	МЦРД	δ, %	модель	МЦРД	δ, %
M1	1213		6,2	1217		4,2	1190		2,8	1205		3,8
M2	1150		1,1	1162		0,3	1134		1,9	1133		9,6
M3	1145		0,7	1165		0,1	1144		1,0	1132		9,7
M4	1145		0,7	1179		1,1	1147		0,7	1136		9,4
M5	1112		2,1	1113		4,5	1112		3,8	1113		11,2
M6	1111		2,2	1128		3,2	1009		4,1	1095		12,6
M7	1123		1,1	1142		2,1	1112		3,7	1104		11,9
M8	1110		2,2	1145		1,7	1125		2,7	1124		10,3
M9	1121		1,3	1155		0,9	1142		1,2	1137		9,3
M10	1133		0,3	1179		1,1	1143		1,1	1135		9,4
M11	1119		1,5	1159		0,6	1107		4,3	1109		11,5
M12	1086		4,4	1126		3,4	1086		6,1	1074		14,3
M13	1073		5,6	2372		50,8	1074		7,1	1064		15,1
M14	1119		1,5	1157		0,7	1111		3,8	1109		11,6
M15	1147		0,9	1193		2,3	1175		1,6	1157		7,7
M16	1121		1,4	1172		0,5	1133		2	1105		11,9
M17	1144		0,6	1193		2,3	1155		0,1	1144		8,8

По результатам расчета годовой суммарной СР наиболее точными моделями являются M1, M15, M17.

На рис. 2–4 показаны графики, отражающие разброс рассчитанных с помощью регрессионных моделей суточных оценок

относительно измеренных значений для наиболее точных моделей M14, M17, M1. Точки, расположенные ближе к прямой линии, соответствуют более точным оценкам относительно измеренных на метеостанции.

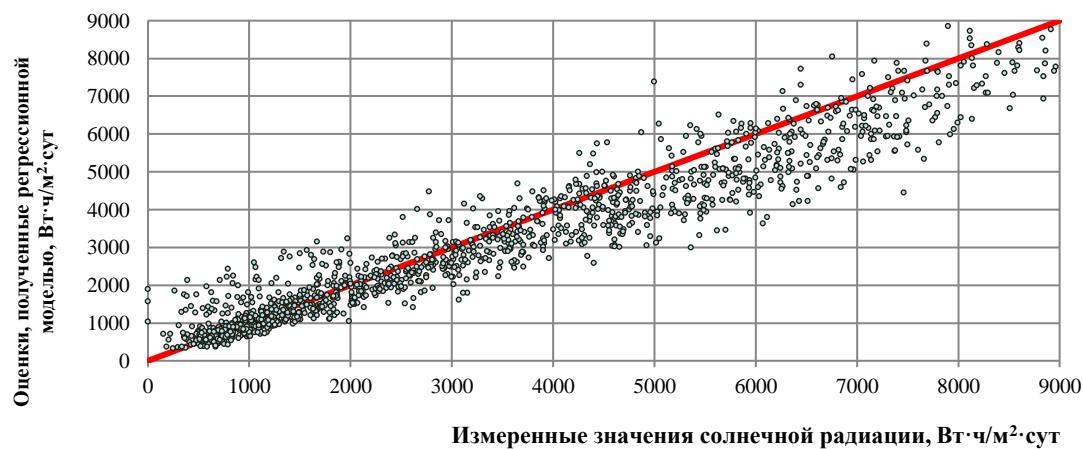


Рис. 2. Разброс измеренных и рассчитанных значений для модели M14  
Fig. 2. Scatter of measured and calculated estimates for the model M14



Рис. 3. Разброс измеренных и рассчитанных значений для модели M17  
Fig. 3. Scatter of measured and calculated estimates for the model M17

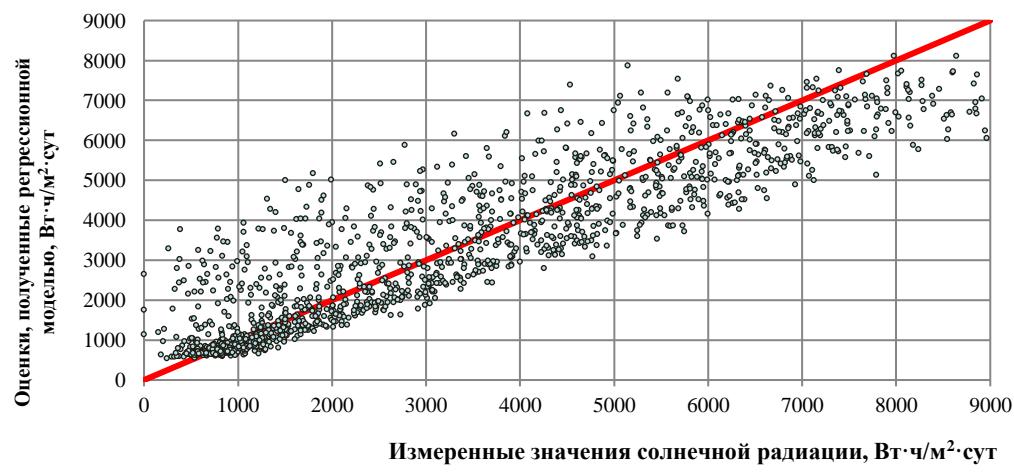


Рис. 4. Разброс измеренных и рассчитанных значений для модели M1  
Fig. 4. Scatter of measured and calculated estimates for the model M1

Сравнение точности моделей по статистическим показателям и годовым суммам СР позволили сделать следующие выводы:

- наиболее высокую точность при оценке СР с суточной детализацией показали модели с большим набором параметров;
- предложенные авторами новые модели показали наибольшую точность при оценке суточных значений СР в сравнении с известными рассмотренными регрессионными моделями;
- регрессионные модели на основе метода опорных векторов имеют высокие пока-

затели точности, как по абсолютной средней ошибке, так и по средней ошибке смещения. Это позволяет использовать их как для оценки суточных, так и месячных и годовых сумм солнечной радиации.

На рис. 5, 6 показаны графики суточных оценок суммарной СР моделей M1, M14, M17 и измеренных значений из базы данных МЦРД за 2019 г. Рисунки показывают, что оценки моделей M14 и M17 в высокой степени соответствуют измеренным значениям солнечной радиации.

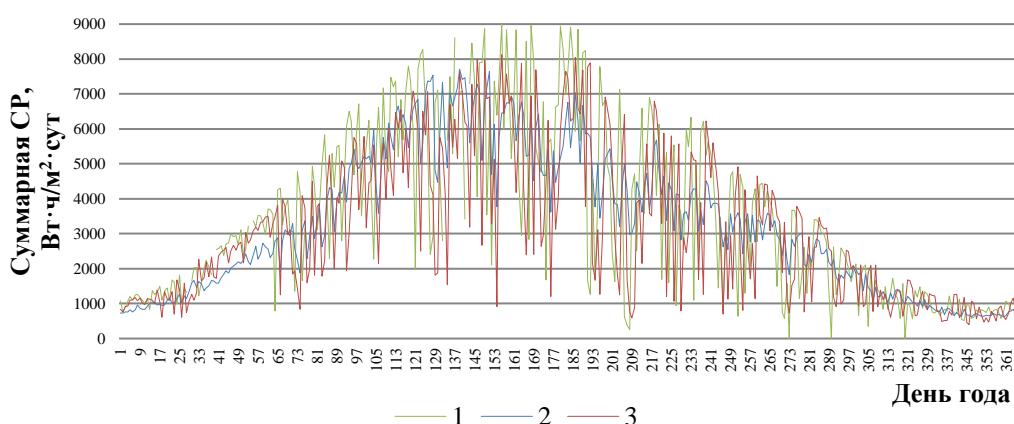


Рис. 5. Графики изменения измеренных и рассчитанных суточных значений солнечной радиации за 2019 г. М14 и М1

Fig. 5. Variation graphs of measured and calculated daily values of solar radiation for 2019 according to the models M14 and M1

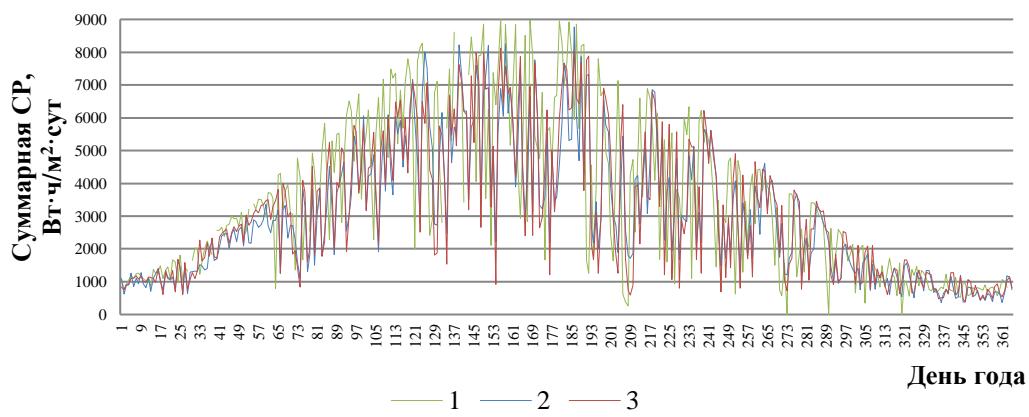


Рис. 6. Графики изменения измеренных и рассчитанных суточных значений солнечной радиации за 2019 г. для моделей М14 и М17 (кривая 1 – измеренные значения; кривая 2 – оценка модели М14; кривая 3 – оценка модели М17)

Fig. 6. Variation graphs of measured and calculated daily values of solar radiation for 2019 according to the models M14 and M17 (curve 1 – measured values; curve 2 – estimation according to M14 model; curve 3 – estimation according to M17 model)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлен обзор исследований по проблеме оценки СР с использованием регрессионных моделей и рассмотрены основные этапы разработки регрессионных моделей, в том числе на основе метода опорных векторов. С использованием открытых источников данных о климатических параметрах и СР было выполнено сравнение точности ряда известных и новых моделей для оценки суточных значений СР в г. Иркутск. Основные результаты исследований можно представить следующим образом:

1. При оценке потока СР возникают трудности, связанные с неполнотой и ограниченной доступностью данных на метеостанциях. Тем не менее, существуют регрессионные модели, ориентированные на использование ограниченных и повсеместно доступных метеорологических параметров.

2. В данном исследовании было рассмотрено 17 регрессионных моделей, 10 из которых были отобраны на основе обзора исследований других авторов по критерию доступности используемых данных. Было предложено 4 новых модели, а также разработано 3 модели на основе метода опорных векторов. В рамках исследования были использованы данные МЦРД и сайта «Расписание погоды» для г. Иркутск за период 2007–2019 гг.

3. Сравнение точности моделей проводились с использованием статистических

показателей МАЕ и МВЕ. Наиболее высокие результаты оценки СР с суточной детализацией для исследуемого района представлены новыми моделями М14, М17. Модель М14 представлена функциональной зависимостью потока солнечной радиации от параметров внеатмосферной солнечной радиации максимальной и минимальной температуры, влажности воздуха, общей и нижней облачности. Средняя абсолютная ошибка модели М14 при валидации за период 2016–2019 гг. составила 504,7 Вт·ч/м<sup>2</sup>·сут. Модель М17 получена на основе метода опорных векторов, включает дополнительно параметр максимальной высоты солнца, показала среднюю абсолютную ошибку 463,2 Вт·ч/м<sup>2</sup>·сут.

4. Результаты сравнения моделей по точности оценки годовых сумм СР показали, что наиболее точными являются модели М1, М15 и М17. Модель М1 показала наименьшую ошибку смещения МВЕ = -25,56 Вт·ч/м<sup>2</sup>·сут за период 2016–2019 гг. Дополнительным преимуществом модели М1 является использование только одного параметра – относительной влажности воздуха. Новые регрессионные модели М15 и М17 показали среднюю ошибку смещения 126 и 157 Вт·ч/м<sup>2</sup>·сут при валидации за аналогичный период.

5. Модели М14, М17 целесообразно использовать для оценки суточных значений СР, а модель М1 – для оценки месячных и годовых сумм СР.

## Список источников

1. Кваша Н.В., Бондарь Е.Г. Распределенная и цифровая энергетика как инновационные элементы четвертого энергоперехода // π-Economy. 2021. Т. 14. Вып. 6. С. 133. <https://doi.org/10.18721/JE.14605>.
2. Кулапин А.И. Энергетический переход: Россия в глобальной повестке // Энергетическая политика. 2021. № 7. С. 10–15.
3. Jia Dongyu, Yang Liwei, Lv Tao, Liu Weiping, Gao Xiaoqing, Zhou Jiaxin. Evaluation of machine learning models for predicting daily global and diffuse solar radiation under different weather/pollution conditions // Renewable Energy. 2022. Vol. 187. P. 896–906. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.02.002>.
4. Zhang Jianyuan, Zhao Li, Deng Shuai, Xu Weicong, Zhang Ying. A critical review of the models used to estimate solar radiation // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 70. P. 314–329. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.124>.
5. Hassan M.A., Khalil A., Kaseb S., Kassem M.A. Independent models for estimation of daily global solar radiation: a review and a case study // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 82. Part 1. P. 1565–1575. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.002>.
6. Li Huashan, Ma Weibin, Lian Yongwang, Wang Xianlong, Zhao Liang. Global solar radiation estimation with sunshine duration in Tibet, China // Renewable Energy. 2011. Vol. 36. Iss. 11. P. 3141–3145. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.019>.
7. Yıldırım H.B., Teke A., Antonanzas-Torres F. Evaluation of classical parametric models for estimating solar radiation in the Eastern Mediterranean region of Turkey // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 82. Part 3. P. 2053–2065. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.033>.
8. Chukwujindu N.S. A comprehensive review of empirical models for estimating global solar radiation in Africa // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 78. P. 955–995. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.101>.
9. Chen Ji-Long, He Lei, Yang Hong, Ma Maohua, Chen

- Qiao, Wu Sheng-Jun, et al. Empirical models for estimating monthly global solar radiation: a most comprehensive review and comparative case study in China // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019. Vol. 108. P. 91–111. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.03.033>.
10. Li Mao-Fen, Guo Peng-Tao, Dai Shengpei, Luo Hongxia, Liu Enping, Li Yiping. Empirical estimation of daily global solar radiation with contrasting seasons of rain and drought characterize over tropical China // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 266. P. 121915. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121915>.
11. Oyewola O.M., Patchali T.E., Ajide O.O., Satyanand S., Matthew O.J. Global solar radiation predictions in Fiji Islands based on empirical models // Alexandria Engineering Journal. 2022. Vol. 61. Iss. 11. P. 8555–8571. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.01.065>.
12. Quej V.H., Almorox J., Ibrakhimov M., Saito L. Empirical models for estimating daily global solar radiation in Yucatán Peninsula, Mexico // Energy Conversion and Management. 2016. Vol. 110. P. 448–456. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.12.050>.
13. Nematchoua M.K., Orosa J.A., Afafia M. Prediction of daily global solar radiation and air temperature using six machine learning algorithms: a case of 27 European countries // Ecological Informatics. 2022. Vol. 69. P. 101643. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101643>.
14. Naserpour S., Zolfaghari H., Firouzabadi P. Calibration and evaluation of sunshine-based empirical models for estimating daily solar radiation in Iran // Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2020. Vol. 42. P. 100855. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100855>.
15. Besharat F., Dehghan A.A., Faghih A.R. Empirical models for estimating global solar radiation: a review and case study // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013. Vol. 21. P. 798–821. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.043>.
16. Елагина Е.А., Маргун А.А. Исследование методов машинного обучения в задаче идентификации клеток крови // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21. № 6. С. 903–911. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-6-903-911>.
17. Винокуров М.А., Суходолов А.П. Экономика Иркутской области: в 4 т. Иркутск: БГУПЭ, 1998. Т. 1. 203 с.
18. Кузеванов В.Я., Сизых С.В. Ресурсы ботанического сада Иркутского государственного университета: образовательные, научные и социально-экологические аспекты. Иркутск: Иркутский государственный университет, 2005. С. 30–31.
19. Bounoua Z, Chahidi L.O., Mechaqrane A. Estimation of daily global solar radiation using empirical and machine-learning methods: a case study of five Moroccan locations // Sustainable Materials and Technologies. 2021. Vol. 28. P. e00261. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00261>.
20. Ahamed M.S., Guo Huiqing, Tanino K. Cloud cover-based models for estimation of global solar radiation: a review and case study // International Journal of Green Energy. 2022. Vol. 19. Iss. 2. <https://doi.org/10.1080/15435075.2021.1941043>.

## References

1. Kvasha N.V., Bondar' E.G. Distributed and digital energy as innovative elements of the fourth energy transition. *π-Economy*. 2021;14(6):133. (In Russ.).
2. Kulapin A.I. Energy transition: Russia on the global agenda. *Energeticheskaya politika = Energy policy*. 2021;7:10-15. (In Russ.). <https://doi.org/10.18721/JE.14605>.
3. Jia Dongyu, Yang Liwei, Lv Tao, Liu Weiping, Gao Xiaoqing, Zhou Jiaxin. Evaluation of machine learning models for predicting daily global and diffuse solar radiation under different weather/pollution conditions. *Renewable Energy*. 2022;187:896–906. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.02.002>.
4. Zhang Jianyuan, Zhao Li, Deng Shuai, Xu Weicong, Zhang Ying. A critical review of the models used to estimate solar radiation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;70:314–329. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.124>.
5. Hassan M.A., Khalil A., Kaseb S., Kassem M.A. Independent models for estimation of daily global solar radiation: a review and a case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018;82(1):1565–1575. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.002>.
6. Li Huashan, Ma Weibin, Lian Yongwang, Wang Xianlong, Zhao Liang. Global solar radiation estimation with sunshine duration in Tibet, China. *Renewable Energy*. 2011;36(11):3141–3145. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.019>.
7. Yıldırım H.B., Teke A., Antonanzas-Torres F. Evaluation of classical parametric models for estimating solar radiation in the Eastern Mediterranean region of Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018;82(3):2053–2065. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.033>.
8. Chukwujindu N.S. A comprehensive review of empirical models for estimating global solar radiation in Africa. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;78:955–995. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.101>.
9. Chen Ji-Long, He Lei, Yang Hong, Ma Maohua, Chen Qiao, Wu Sheng-Jun, et al. Empirical models for estimating monthly global solar radiation: a most comprehensive review and comparative case study in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019;108:91–111. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.03.033>.
10. Li Mao-Fen, Guo Peng-Tao, Dai Shengpei, Luo Hongxia, Liu Enping, Li Yiping. Empirical estimation of daily global solar radiation with contrasting seasons of rain and drought characterize over tropical China. *Journal of Cleaner Production*. 2020;266:121915. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121915>.
11. Oyewola O.M., Patchali T.E., Ajide O.O., Satyanand S., Matthew O.J. Global solar radiation predictions in Fiji Islands based on empirical models. *Alexandria Engineering Journal*. 2022;61(11):8555–8571. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.01.065>.
12. Quej V.H., Almorox J., Ibrakhimov M., Saito L. Empirical models for estimating daily global solar radiation in Yucatán Peninsula, Mexico. *Energy Conversion and Management*. 2016;110:448–456.

- [https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.12.050.](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.12.050)
13. Nematchoua M.K., Orosa J.A., Afafia M. Prediction of daily global solar radiation and air temperature using six machine learning algorithms: a case of 27 European countries. *Ecological Informatics*. 2022;69:101643. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101643>.
14. Naserpour S., Zolfaghari H., Firouzabadi P. Calibration and evaluation of sunshine-based empirical models for estimating daily solar radiation in Iran. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2020;42:100855. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100855>.
15. Besharat F., Dehghan A.A., Faghah A.R. Empirical models for estimating global solar radiation: a review and case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013;21:798-821. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.043>.
16. Elagina E.A., Margun A.A. Research of machine learning methods in the problem of identification of blood cells. *Nauchno-tehnicheskij vestnik informacionnyh tekhnologij, mehaniki i optiki = Scientific and Technical Journal of* *Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2021;21(6):903-911. (In Russ.). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-6-903-911>.
17. Vinokurov M.A., Suhodolov A.P. *Economy of the Irkutsk region*. Irkutsk: Baikal State University of Economics and Law; 1998, vol. 1, 203 p. (In Russ.).
18. Kuzevanov V.Ya., Sizikh S.V. *Resources of botanic garden of the Irkutsk State University: educational, scientific and socio-ecological aspects*. Irkutsk: Irkutsk State University Press; 2005, 243 p. (In Russ.).
19. Bounoua Z., Chahidi L.O., Mechaqane A. Estimation of daily global solar radiation using empirical and machine-learning methods: a case study of five Moroccan locations. *Sustainable Materials and Technologies*. 2021;28:e00261. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00261>.
20. Ahamed M.S., Guo Huiqing, Tanino K. Cloud cover-based models for estimation of global solar radiation: a review and case study. *International Journal of Green Energy*. 2022;19(2). <https://doi.org/10.1080/15435075.2021.1941043>.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Маленкова Инесса Николаевна,

аспирант,  
Братский государственный университет,  
665709, г. Братск, ул. Макаренко, 40, Россия  
✉ 1m.inessa13@yandex.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-3176-2422>

### Шакиров Владислав Альбертович,

к.т.н.,  
старший научный сотрудник лаборатории  
энергоснабжения децентрализованных  
потребителей,  
Институт систем энергетики  
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия  
shakirov@isem.irk.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-8629-9549>

### 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 08.08.2022; одобрена после рецензирования 16.11.2022; принятая к публикации 22.02.2023.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Inessa N. Malenkova,

Postgraduate Student,  
Bratsk State University  
40 Makarenko St., Bratsk 665709, Russia  
✉ 1m.inessa13@yandex.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-3176-2422>

### Vladislav A. Shakirov,

Cand. Sci. (Eng.),  
Senior Researcher of the Laboratory  
of Power Supply of Decentralized Consumers,  
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,  
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia  
shakirov@isem.irk.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-8629-9549>

### Contribution of the authors

The authors contributed equally to the preparation of the article.

### Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

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

### Information about the article

The article was submitted 08.08.2022; approved after reviewing 16.11.2022; accepted for publication 22.02.2023.

## ЭНЕРГЕТИКА



Научная статья

УДК 621.311

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-123-133>

## Выбор оптимальных режимов электропотребления локальной энергосистемы Республики Алтай на основе возобновляемых и альтернативных источников энергии

**В.З. Манусов<sup>1</sup>✉, А.В. Каланакова<sup>2</sup>**<sup>1,2</sup>*Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия*

**Резюме.** Цель – разработка системы оптимального планирования электропотребления в локальной энергосистеме Республики Алтай на основе значительной доли возобновляемых и альтернативных генерирующих источников энергии. Исследования выполнены на основе метода линейного программирования режимов электропотребления генерирующими потребителями. В качестве исходной информации для решения задачи использованы графики потребления электроэнергии по сезонам и почасовые ретроспективные ряды метеорологических данных по скорости ветрового потока и солнечной инсоляции за 2021 год. В качестве объектов локального электроснабжения для расчетов выработки электроэнергии были рассмотрены ветроэнергетические установки, солнечные фотоэлектрические станции, гидроэлектростанции и накопители энергии. В статье приведены результаты расчетов выработки электроэнергии для зимнего сезона, так как в этот период наблюдается наибольший дефицит электроэнергии. Показано, что электропотребители исследуемого региона в связи с дефицитом электроэнергии могут самостоятельно устанавливать дополнительные генерирующие источники энергии в виде ветроэнергетических установок, солнечных фотоэлектрических станций и накопителей энергии. Тем самым их совместное производство смягчает некоторую непредсказуемость генерации мощности возобновляемых источников энергии. Основным новым результатом является разработка методики, дающей возможность генерирующему потребителю минимизировать свои материальные и финансовые затраты, а также снизить «углеродный след» электроэнергетики. Значимость представленных в статье результатов исследований состоит в обосновании гибридной системы электроснабжения с большой долей возобновляемых и альтернативных источников энергии, которая реализована на конкретном примере в Республике Алтай и может быть продуцирована в других локальных энергосистемах с подобными метеорологическими условиями.

**Ключевые слова:** локальная энергосистема, возобновляемые источники энергии, оптимизация электропотребления, ветроустановка, солнечные фотоэлектрические станции, накопители энергии

**Для цитирования:** Манусов В.З., Каланакова А.В. Выбор оптимальных режимов электропотребления локальной энергосистемы Республики Алтай на основе возобновляемых и альтернативных источников энергии // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 1. С. 123–133. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-123-133>.

## POWER ENGINEERING

Original article

## Selecting optimal power consumption patterns in the Republic of Altai local grid system based on renewable and alternative power sources

**Vadim Z. Manusov<sup>1</sup>✉, Aysulu V. Kalanakova<sup>2</sup>**<sup>1,2</sup>*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

**Abstract.** The authors develop a system of optimal planning of power consumption in the Republic of Altai local grid system based on a large proportion of renewable and alternative generating power sources. The studies were carried out using the linear programming method for power consumption patterns used by generating consumers. Power consumption charts by seasons and hourly retrospective rows of weather data by wind current velocity and solar insolation over 2021 were used as source data. Wind turbines, solar photovoltaic facilities, hydro-power plants, and energy accumulators were considered as local power consumption facilities to calculate electricity generation. The article provides calculation results for electricity generation in winter, since this is when a higher power deficiency is observed. It was shown that power consumers in the region under study can independently install additional generating power sources in the form of wind turbines, solar photovoltaic facilities, hydro-power plants, and energy accumulators due to electricity deficiency. Their combined generation mitigates the unpredictability of power generation by renewable sources. The authors propose a method that allows generating consumers to minimize their material and financial expenses and reduce the carbon footprint. The significance of the study consists in the substantiation of a hybrid power supply system with a high proportion of renewable and alternative power sources, which is implemented in the Republic of Altai and can be reproduced in other local energy systems with similar weather conditions.

**Keywords:** local energy system, renewable energy sources, optimization of electrical consumption, wind turbine, solar photovoltaic (PV) power plants, energy storage devices

**For citation:** Manusov V.Z., Kalanakova A.V. Selecting optimal power consumption patterns in the Republic of Altai local grid system based on renewable and alternative power sources. *iPolytech Journal*. 2023;27(1):123-133. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-123-133>.

## ВВЕДЕНИЕ

Для большинства стран мира возобновляемые и альтернативные источники энергии являются приоритетным направлением энергетической политики, тем самым являясь актуальной, и в тоже время дискуссионной темой. Современные энергетические системы переживают период серьезных изменений, связанных с переходом от централизованных структур с большой зависимостью от ископаемого топлива к децентрализованным, экологически чистым энергетическим структурам [1–7].

Оптимальное проектирование гибридной энергосистемы на основе возобновляемых источников энергии – сложная задача, включающая в себя технико-экономическое обоснование, моделирование процессов, а также интеграцию нескольких гибридных возобновляемых источников энергии, системы хранения энергии и контроллера для автоматизации с целью обеспечения надежности электроснабжения [8–11].

Авторы ряда работ [12–14] используют теорию дополнения гидро- и солнечной энергий, позволяющую решить проблему прерывистой и нестабильной выработки солнечной энергии. В работах [15, 16] для повышения надежности энергосистемы дополнительно применяются накопители энергии. Из-за нестабильности ветровых ресурсов ученые объединили гидроаккумулирующие электростанции с ветроэлектростанциями, стремясь к

оптимальному режиму взаимодополняемой работы. В научном труде [17] представлена экономическая целесообразность крупномасштабной гибридной гидроэлектростанции, включая передачу энергии на большие расстояния. Кроме того, ряд научных трудов посвящен задачам оптимизации работы систем электроснабжения генерирующих электростанций, использующих возобновляемые и альтернативные источники энергии [18–20]. Такой подход позволяет на региональном уровне выявить те направления, для которых необходимо провести детальную оценку использования и экономически целесообразные и технологически возможные варианты энергоснабжения. Исследования, проведенные на примере различных регионов, позволяют сформировать перспективные направления в данной области, оценить экономически привлекательные проекты и масштабы рынка оборудования.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной статье рассмотрено локальное электроснабжение Республики Алтай за счет возобновляемых и альтернативных источников энергии. Применены ветроэнергетические установки (ВЭУ), солнечные фотоэлектрические станции (СФЭС), гидроэлектростанции (ГЭС) и накопители энергии (НЭ).

Для сравнения с потребляемой мощностью используется суточный график нагрузки зимнего сезона, представленный на рис. 1.

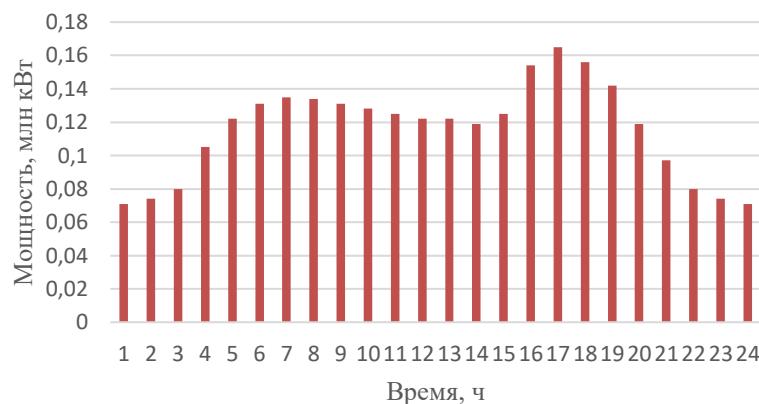


Рис. 1. Суточный график нагрузки для зимы  
 Fig. 1. Winter daily load schedule

В данной статье приведены результаты исследований более подробно для зимнего времени, так как дефицит энергии в это время года является наибольшим в связи с тем, что гидростанции ограничены выработкой мощности. Аналогичным образом проведены расчеты для весеннего, осеннего и летнего сезонов.

## РАСЧЕТ ВЫРАБОТКИ ОТ СОЛНЕЧНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Рассчитаем количество выработанной энергии в каждый час по формуле (1) на примере зимнего дня:

$$W_{\text{час1}} = P_{\text{час}} \cdot t, \quad (1)$$

где  $W_{\text{час1}}$  – энергия, выработанная за час, кВт·ч;  $P_{\text{час}}$  – мощность, вырабатываемая солнечными панелями за час, кВт;  $t$  – время, ч.

Поскольку солнечные лучи не всегда падают на солнечные батареи под углом 90°, то каждый час домножается на выработанную энергию на процент инсоляции по формуле (2):

$$W_{\text{час}} = W_{\text{час1}} \cdot И, \quad (2)$$

где  $W_{\text{час}}$  – энергия, выработанная за час с учетом инсоляции, кВт·ч;  $W_{\text{час1}}$  – энергия, выработанная за час без учета инсоляции, кВт·ч;  $И$  – инсоляция, %.

Выработанная энергия за сутки рассчитывается по формуле (3):

$$W_{\text{сум}} = \sum_1^t W_{\text{час}}, \quad (3)$$

где  $W_{\text{сум}}$  – энергия, выработанная за сутки с учетом инсоляции, кВт·ч;  $W_{\text{час}}$  – энергия, выработанная за час с учетом инсоляции, кВт·ч;  $t$  – время, ч.

Результаты расчета приведены в табл. 1.

Из полученных значений построен график выработки солнечных электростанций для зимнего сезона.

Исходя из графика на рис. 2 видно, что потребление энергии больше, чем выработка всех действующих солнечных электростанций (именно 0,696 млн кВт·ч для зимнего сезона). В определенные часы выработка от солнечных фотоэлектрических станций может покрыть потребление, но для полного обеспечения потребуется увеличение мощности либо дополнительный источник выработки в ночные времена суток.

## РАСЧЕТ ВЫРАБОТКИ ОТ СОЛНЕЧНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Поскольку на территории Республики Алтай нет действующих ВЭУ, то используем 10 ветроустановок с ветрогенераторами Vestas V-164. Данные агрегаты имеют мощность 10 МВт каждый, размах трех лопастей 164 м, ометаемую площадь 21124 м<sup>2</sup> и высоту мачты 140 м. Ветроустановки размещаются в районе пос. Еланда.

**Таблица 1.** Выработка и потребление электрической энергии за сутки для зимы  
**Table 1.** Generation and consumption of electrical energy per day in winter

Время, ч	Вырабатываемая энергия для зимы, млн кВт·ч	Потребление энергии для зимы, млн кВт·ч
1	0	0,071
2	0	0,074
3	0	0,08
4	0	0,105
5	0	0,122
6	0	0,131
7	0	0,135
8	0,036	0,134
9	0,048	0,131
10	0,06	0,128
11	0,072	0,125
12	0,084	0,122
13	0,096	0,122
14	0,084	0,119
15	0,072	0,125
16	0,06	0,154
17	0,048	0,165
18	0,036	0,156
19	0	0,142
20	0	0,119
21	0	0,097
22	0	0,08
23	0	0,074
24	0	0,071

Рассчитаем выработанную энергию за сутки для зимнего дня для одной ветроустановки по формуле (4):

$$W_{cym} = (\rho \cdot S \cdot V^3)/2. \quad (4)$$

Поскольку солнечная станция не может полностью покрыть потребление, используем комплексную выработку от СФЭС и ВЭУ для каждого часа в табл. 2.

Как и в случае с солнечными электростанциями, эффективность выработки от ветрогенераторов можно повысить, увеличив число ветроустановок, следовательно, подняв мощность всего ветропарка.

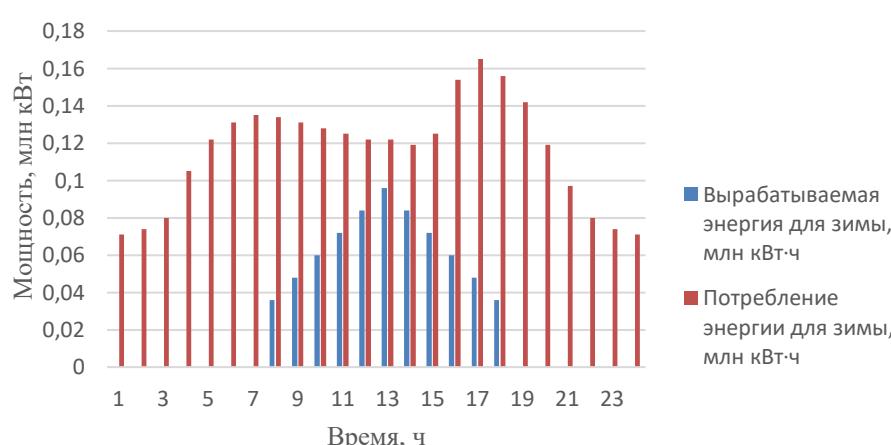
### КОМПЛЕКСНАЯ ВЫРАБОТКА ОТ СОЛНЕЧНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ, ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК И ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Для расчета гидроэлектростанции использованы данные Новосибирской ГЭС, в котором учитываются 4 турбины по 70 МВт, следовательно, мощностью 280 МВт. Расположим нашу станцию южнее пос. Еланда, как показано на рис. 5.

Для расчета нам потребуются значения расхода через турбину ( $495 \text{ м}^3/\text{с}$ ), расчетный напор (17 м), КПД турбины (93%) и КПД генератора (97,4%). Вычисления будем производить по формуле (5):

$$W_1 = 9.81 \cdot Q \cdot H \cdot \eta_{турб} \cdot \eta_{ген}, \quad (5)$$

где  $W_1$  – мощность одной турбины, Вт;  $Q$  – расход через турбину,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $H$  – напор воды, м;  $\eta_{турб}$  – КПД турбины, %;  $\eta_{ген}$  – КПД генератора, %.



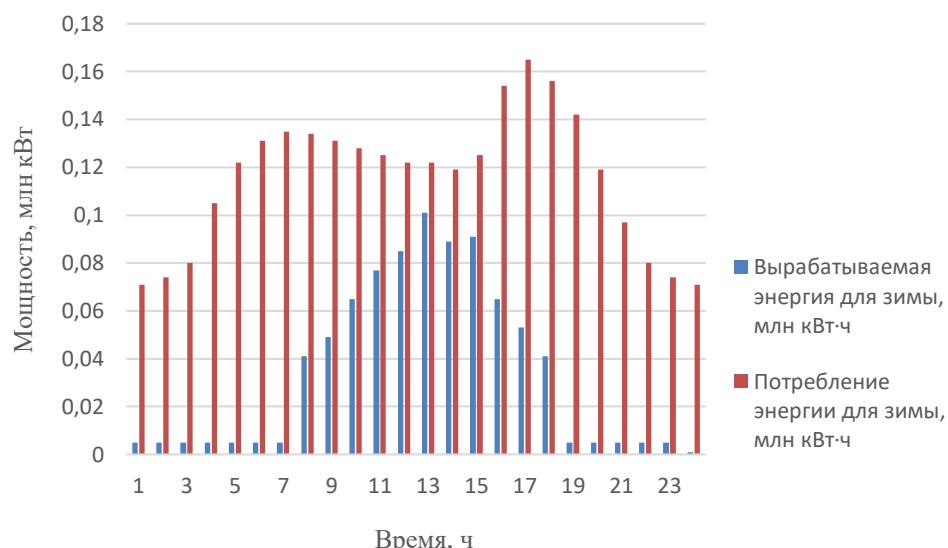
**Рис. 2. Выработка солнечной энергии и потребление энергии для зимы**  
**Fig. 2. Solar power generation and consumption in winter**



Рис. 3. Место расположения ветроэнергетических установок  
Fig. 3. Location of wind mills

Таблица 2. Выработка электроэнергии от солнечных фотоэлектрических станций и ветроэнергетических установок  
Table 2. Electrical energy generation by solar photovoltaic power plants and wind mills

Время, ч	Скорость ветра для зимы, м/с	Вырабатываемая энергия для зимы, млн кВт·ч
1	3,4	0,005
2	3,4	0,005
3	3,4	0,005
4	3,4	0,005
5	3,4	0,005
6	3,4	0,005
7	3,4	0,005
8	3,4	0,041
9	1,7	0,049
10	3,4	0,065
11	3,4	0,077
12	1,7	0,085
13	3,4	0,101
14	3,4	0,089
15	5,1	0,091
16	3,4	0,065
17	3,4	0,053
18	3,4	0,041
19	3,4	0,005
20	3,4	0,005
21	3,4	0,005
22	3,4	0,005
23	3,4	0,005
24	1,7	0,001



*Рис. 4. Выработка электроэнергии солнечными электростанциями и ветроэнергетическими установками и потребление энергии для зимы*  
*Fig. 4. Electrical energy generation by solar photovoltaic power plants and wind mills and energy consumption in winter*



*Рис. 5. Место расположения гидроэлектростанции*  
*Fig. 5. Location of a hydroelectric power plant*

Выработка энергии от ГЭС для лета, осени и весны одинаковая, зимой выработка опускается до 20% (0,06 млн кВт·ч) из-за отсутствия притоков воды и таяния ледников.

Построим графики комплексной выработки электроэнергии от СФЭС, ВЭУ и ГЭС (табл. 3) и сравним их с потреблением.

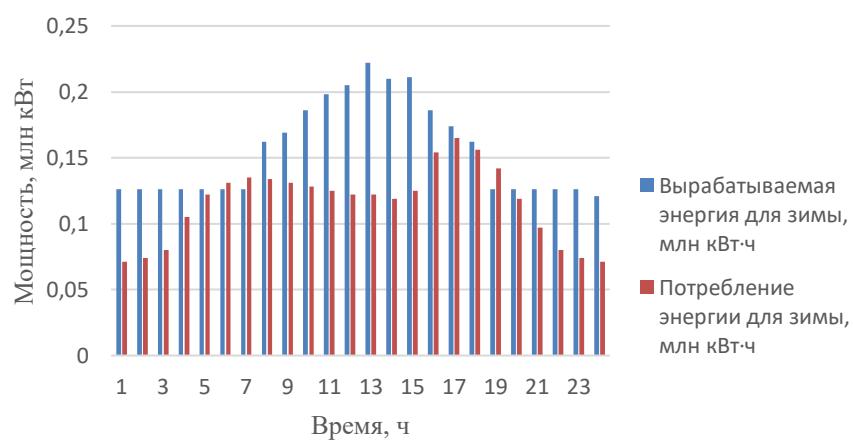
Как видно из графика на рис. 6,

комплексной выработки с учетом гидроресурсов в зимний сезон также недостаточно. Для решения данной проблемы использованы литий-ионные аккумуляторы для накопления энергии в течение летнего, осеннего и весеннего периодов. Общая нехватка энергии за весь зимний период равна 63,09 млн кВт·ч. Полученные значения приведены в табл. 4.

**Таблица 3.** Комплексная выработка электроэнергии от солнечных фотоэлектрических станций, ветроэнергетических установок и гидроэлектростанции

**Table 3.** Integrated generation of electrical energy from solar photovoltaic power plants, wind mills and a hydroelectric power plant

Время, ч	Потребляемая энергия для зимы, млн кВт·ч	Вырабатываемая энергия для зимы, млн кВт·ч	Недостаток энергии, млн кВт·ч
1	0,071	0,126	0
2	0,074	0,126	0
3	0,08	0,126	0
4	0,105	0,126	0
5	0,122	0,126	0
6	0,131	0,126	0,005
7	0,135	0,126	0,009
8	0,134	0,162	0
9	0,131	0,169	0
10	0,128	0,186	0
11	0,125	0,198	0
12	0,122	0,205	0
13	0,122	0,222	0
14	0,119	0,21	0
15	0,125	0,211	0
16	0,154	0,186	0
17	0,165	0,174	0
18	0,156	0,162	0
19	0,142	0,126	0,016
20	0,119	0,126	0
21	0,097	0,126	0
22	0,08	0,126	0
23	0,074	0,126	0
24	0,071	0,121	0



**Рис. 6. Выработка энергии солнечными электростанциями, ветряными турбинами, гидроэлектростанциями и потребление энергии в зимний период**

**Fig. 6. Electrical energy generation by solar photovoltaic power plants, wind mills, hydroelectric power plants and energy consumption in winter**

Для данной гибридной системы примем сетевые накопители энергии (СНЭ) компании «Лиотех» с возможностью накопления до 1000 кВт·ч электричества. Для определения количества сетевых накопителей (6):

$$n = \frac{W_H}{W_{СНЭ}}, \quad (6)$$

где  $n$  – количество системных накопителей;  $W_H$  – количество энергии, которой не хватает

потребителю, Вт;  $W_{СНЭ}$  – количество энергии, которую может накопить один СНЭ, Вт.

$$n = \frac{0,03}{0,001} = 30.$$

Таким образом, потребуется 30 СНЭ на 1000 кВт каждый. График выработки и потребления энергии для зимнего месяца с учетом накопителей представлен на рис. 7.

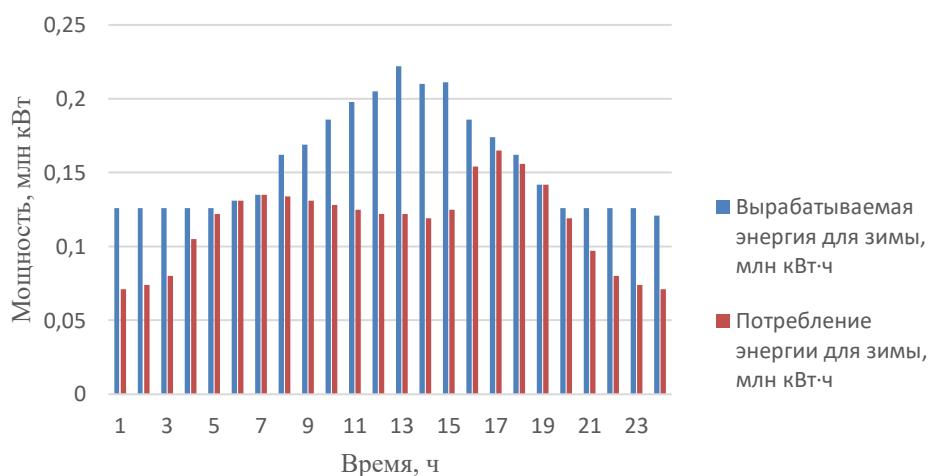


Рис. 7. Выработка и потребление энергии с учетом системы накопления энергии  
Fig. 7. Generation and consumption of energy taking into account the energy storage system

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ режимов энергопотребления представленного локального региона Республики Алтай показывает, что для сезонного управления электропотреблением необходимо в качестве ключевых исходных данных выбрать наиболее загруженные рабочие дни для каждого из сезонов года. При этом комплексная выработка с учетом гидроресурсов полностью обеспечивает потребителей электроэнергией в летний, осенний и весенний периоды, однако в зимний сезон выработки недостаточно. Для решения данной проблемы использованы накопители энергии.

В настоящее время имеющиеся в наличии 8 солнечных станций, 2 малых ГЭС и 10 небольших дизельных электростанций не могут полностью обеспечить население Республики

Алтай необходимым количеством энергии, вследствие чего в ряде случаев осуществляется внене отключение. Как показывает тенденция, потребление электрической энергии в регионе растет с каждым годом и предполагается, что оно повысится к 2030 году на 20%. Перспектива по возведению ГЭС мощностью 280 МВт и создание небольшого ветропарка из 10 ветроустановок по 10 МВт вполне реализуемы. Если рассматривать перспективу локального комплекса электроснабжения за счет возобновляемых и альтернативных ресурсов на более длительный промежуток, то достаточно будет добавить к уже имеющейся концепции дополнительное количество сетевых накопителей для покрытия потребления в пиковые моменты. Наряду с этим следует отметить, что для повышения уровня

достоверности результатов оптимизации целесообразно использовать прогнозирование мощности, генерируемой возобновляемыми и альтернативными источниками энергии на основе искусственных нейронных сетей.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Для локальной энергосистемы на примере Республики Алтай получено оптимальное соотношение генерации энергии возобновляемыми и альтернативными источниками от суточного электропотребления.

2. Показано, что в качестве возобновляемых источников энергии приняты гидроресурсы региона, включая малые реки. В качестве альтернативных источников энергии приняты ветроресурсы и солнечная энергия, а

именно – скорость ветрового потока и солнечная инсоляция.

3. В связи с некоторой непредсказуемостью метеорологических факторов и впоследствии выработкой мощности возобновляемых и альтернативных источников энергии обоснована необходимость накопителя энергии, в качестве которого, учитывая горный рельеф местности региона, можно рекомендовать строительство гидроаккумулирующей станции.

4. Предложена методика оптимизации энергопотребления для минимизации эксплуатационных и финансовых затрат на суточном интервале времени и повышения экономической жизнеспособности интегрированных систем возобновляемой энергетики.

## **Список источников**

1. Jurasz J., Canales F.A., Kies A., Guezgouz M., Beluco A. A review on the complementarity of renewable energy sources: concept, metrics, application and future research directions // Solar Energy. 2020. Vol. 195. P. 703–724. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.087>.
2. Feddaoui O., Toufouti R., Labed D., Meziane S. Control of an isolated microgrid including renewable energy resources // Serbian Journal of Electrical Engineering. 2020. Vol. 17. Iss. 3. P. 297–312. <https://doi.org/10.2298/SJEE2003297F>.
3. Bhatti H.J., Danilovic M. Making the world more sustainable: enabling localized energy generation and distribution on decentralized smart grid systems // World Journal of Engineering and Technology. 2018. Vol. 6. No. 2. P. 350–382. <https://doi.org/10.4236/wjet.2018.62022>.
4. Манусов В.З., Назаров М.Х. Оптимизация режимов электропотребления автономной электрической системы с возобновляемыми и альтернативными источниками энергии // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 4. С. 810–820. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-4-810-820>.
5. Sekretarev Yu.A., Sultonov Sh.M., Nazarov M.Kh. Optimization of long-term modes of hydropower plants of the energy system of Tajikistan // 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. 2016. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2016.7911428>.
6. Асанов М.С., Кокин С.Е., Жабудаев Т.Ж., Дмитриев С.А., Обозов А. Дж., Сафаралиев М. Х. [и др.]. Структурная модель алгоритма расчета микро-ГЭС с учетом гидрологических параметров малых водотоков горных рек в центральной Азии // Альтернативная энергетика и экология. 2020. № 34-36. С. 22–36. <https://doi.org/10.15518/isjaee.2020.34-36.022-036>.
7. Ausfelder F., Beilmann C., Bertau M., Bräuninger S., Heinzel A., Hoer R., et al. Energy storage as part of a secure energy supply // ChemBioEng Reviews. 2017. Vol. 4. P. 144–210. <https://doi.org/10.1002/cben.201700004>.
8. Lawan S.M., Abidin W.A.W.Z. A review of hybrid renewable energy systems based on wind and solar energy: modeling, design and optimization // Wind Solar Hybrid Renewable Energy System. 2018. <https://doi.org/10.5772/intechopen.85838>.
9. Аюев Б.И., Давыдов В.В., Ерохин П.М. Оптимационные модели ближайших предельных режимов электрических систем // Электричество. 2011. № 3. С. 1–9.
10. Frangopoulos C.A., Spakovsky M.R., Sciubba E. A brief review of methods for the design and synthesis optimization of energy systems // International Journal Applied Thermodynamics. 2002. Vol. 5. No. 4. P. 151–160. <https://doi.org/10.5541/ijot.97>.
11. Королев М.Л., Макеев В.А., Суханов О.А., Шаров Ю.В. Оптимизация режимов электроэнергетических систем на основе моделирования // Электричество. 2006. № 3. С. 2–16.
12. Jurasz J., Dabek P.B., Kazmierczak B., Kies A., Wdowikowski M. Large scale complementary solar and wind energy sources coupled with pumped-storage hydroelectricity for Lower Silesia (Poland) // Energy. 2018. Vol. 161. P. 183–192. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.085>.
13. Koulias I., Szabó S., Monforti-Ferrario F., Huld T., Bódis K. A methodology for optimization of the complementarity between small-hydropower plants and solar PV systems // Renewable Energy. 2016. Vol. 87. Part 2. P. 1023–1030. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.09.073>.
14. Li He, Liu Pan, Guo Shenglian, Ming Bo, Cheng Lei, Yang Zhikai. Long-term complementary operation of a large-scale hydro-photovoltaic hybrid power plant using explicit stochastic optimization // Applied Energy. 2019. Vol. 238. P. 863–875. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.111>.
15. Parastegari M., Hooshmand R.-A., Khodabakhshian A.,

- Zare A.-H. Joint operation of wind farm, photovoltaic, pump-storage and energy storage devices in energy and reserve markets // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2015. Vol. 64. P. 275–284.  
[https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.06.074.](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.06.074)
16. Манусов В.З., Ганиев З.С., Султонов Ш.М. Оценка доступности энергетических ресурсов за счет солнечной радиации в Республике Таджикистан // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2018. № 1. С. 174–177.  
[https://doi.org/10.17212/1814-1196-2020-1-189-203.](https://doi.org/10.17212/1814-1196-2020-1-189-203)
17. Гулов Д.Ю., Давлатов А.М., Горт М.В. Эффективность электроснабжения горных районов Таджикистана // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 1. С. 61–66.  
[https://doi.org/10.23670/IJ.2021.103.1.008.](https://doi.org/10.23670/IJ.2021.103.1.008)
18. Удалов С.Н., Манусов В.З. Моделирование ветроэнергетических установок и управление ими на основе нечеткой логики: монография. Новосибирск: НГТУ, 2013. 200 с.
19. Шакиров В.А., Артемьев А.Ю. Выбор площадки размещения ветроэлектростанции с использованием компьютерного моделирования рельефа местности и ветрового потока // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 11. С. 133–143.  
[https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-11-133-143.](https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-11-133-143)
20. Aza-Gnandji M., Fifatin F.-X., Hounnou A.H.J., Dubas F., Chamagne D., Espanet C., et al. Complementarity between solar and wind energy potentials in Benin Republic // Advanced Engineering Forum. 2018. Vol. 28. P. 128–138.  
[https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AEF.28.128.](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AEF.28.128)

### References

1. Jurasz J., Canales F.A., Kies A., Guezgouz M., Beluco A. A review on the complementarity of renewable energy sources: concept, metrics, application and future research directions. *Solar Energy*. 2020;195:703–724.  
[https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.087.](https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.087)
2. Feddaoui O., Toufouti R., Labed D., Meziane S. Control of an isolated microgrid including renewable energy resources. *Serbian Journal of Electrical Engineering*. 2020;17(3):297–312.  
[https://doi.org/10.2298/SJEE2003297F.](https://doi.org/10.2298/SJEE2003297F)
3. Bhatti H.J., Danilovic M. Making the world more sustainable: enabling localized energy generation and distribution on decentralized smart grid systems. *World Journal of Engineering and Technology*. 2018;6(2):350–382.  
[https://doi.org/10.4236/wjet.2018.62022.](https://doi.org/10.4236/wjet.2018.62022)
4. Manusov V.Z., Nazarov M.Kh. Optimisation of power consumption modes for an autonomous electrical system with renewable and alternative energy sources. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(4):810–820. (In Russ.).  
[https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-4-810-820.](https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-4-810-820)
5. Sekretarev Yu.A., Sultonov Sh.M., Nazarov M.Kh. Optimization of long-term modes of hydropower plants of the energy system of Tajikistan. In: *2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*. 2016.  
[https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2016.7911428.](https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2016.7911428)
6. Asanov M.S., Kokin S.E., Zhabudaev T.Z., Dmitriev S.A., Obozov A.J., Safaraliev M.K., Asanova S.M., Ghulomzoda A.H. Structural model of the micro hydro power plant calculation algorithm based on the hydrological parameters of small watercourses of mountain rivers in central Asia. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya = Alternative Energy and Ecology (ISJAAE)*. 2020;(34-36):22–36. (In Russ.).  
[https://doi.org/10.15518/isjaae.2020.34-36.022-036.](https://doi.org/10.15518/isjaae.2020.34-36.022-036)
7. Ausfelder F., Beilmann C., Berta M., Bräuninger S., Heinzel A., Hoer R., et al. Energy storage as part of a secure energy supply. *ChemBioEng Reviews*. 2017;4:144–210. <https://doi.org/10.1002/cben.201700004>.
8. Lawan S.M., Abidin W.A.W.Z. A review of hybrid renewable energy systems based on wind and solar energy: modeling, design and optimization. *Wind Solar Hybrid Renewable Energy System*. 2018.  
[https://doi.org/10.5772/intechopen.85838.](https://doi.org/10.5772/intechopen.85838)
9. Ayuev B.I., Davydov V.V., Erohin P.M. Optimization models of the nearest limiting regimes of electrical systems. *Elektrichestvo*. 2011;3:1–9. (In Russ.).
10. Frangopoulos C.A., Spakovsky M.R., Sciubba E. A brief review of methods for the design and synthesis optimization of energy systems. *International Journal Applied Thermodynamics*. 2002;5(4):151–160.  
[https://doi.org/10.5541/ijot.97.](https://doi.org/10.5541/ijot.97)
11. Korolev M.L., Makeechev V.A., Sukhanov O.A., Sharov Yu.V. Simulation-based optimization of electric power system modes. *Electricity*. 2006;3:2–16. (In Russ.).
12. Jurasz J., Dabek P.B., Kazmierczak B., Kies A., Wdowikowski M. Large scale complementary solar and wind energy sources coupled with pumped-storage hydroelectricity for Lower Silesia (Poland). *Energy*. 2018;161:183–192.  
[https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.085.](https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.085)
13. Koulias I., Szabó S., Monforti-Ferrario F., Huld T., Bód K. A methodology for optimization of the complementarity between small-hydropower plants and solar PV systems. *Renewable Energy*. 2016;87(2):1023–1030.  
[https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.09.073.](https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.09.073)
14. Li He, Liu Pan, Guo Shenglian, Ming Bo, Cheng Lei, Yang Zhikai. Long-term complementary operation of a large-scale hydro-photovoltaic hybrid power plant using explicit stochastic optimization. *Applied Energy*. 2019;238:863–875.  
[https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.111.](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.111)
15. Parastegari M., Hooshmand R.-A., Khodabakhshian A., Zare A.-H. Joint operation of wind farm, photo-voltaic, pump-storage and energy storage devices in energy and reserve markets. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2015;64:275–284.  
[https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.06.074.](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.06.074)
16. Manusov V.Z., Ganiev Z.S., Sultonov Sh.M. Estimation of energy resources availability by solar radiation in the Republic of Tajikistan. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i*

- Dal'nego Vostoka. 2018;1:174-177. (In Russ.).  
<http://doi.org/10.17212/1814-1196-2020-1-189-203>.
17. Gulov D.Yu., Davlatov A.M., Gort M.V. Efficiency of electricity supply in mountainous Regions of Tajikistan. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal*. 2021;1:61-66.  
<https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.103.1.008>.
18. Udalov S.N., Manusov V.Z. *Wind farm modeling and control based on fuzzy logic*. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University; 2013, 200 p. (In Russ.).
19. Shakirov V.A., Artemiev A.Yu. Wind farm siting using computer modeling of terrain relief and wind flow. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2017;21(11):133-143. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-11-133-143>.
20. Aza-Gnandji M., Fifatin F.-X., Houmou A.H.J., Dubas F., Chamagne D., Espanet C., et al. Complementarity between solar and wind energy potentials in Benin Republic. *Advanced Engineering Forum*. 2018;28:128-138  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AEF.28.128>.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Манусов Вадим Зиновьевич,**  
к.т.н., профессор,  
профессор кафедры системы электроснабжения  
предприятий,  
Новосибирский государственный технический  
университет,  
630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20, Россия  
✉ Manusov36@mail.ru

**Каланакова Айсулу Владимировна,**  
аспирант,  
Новосибирский государственный технический  
университет,  
630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20, Россия  
aysulu.kalanakova@yandex.ru

### Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

### Информация о статье

Статья поступила в редакцию 06.09.2022; одобрена после рецензирования 25.11.2022; принята к публикации 03.02.2023.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Vadim Z. Manusov,**  
Cand. Sci. (Eng.), Professor,  
Professor of the Department of Industrial Power Supply  
Systems,  
Novosibirsk State Technical University,  
20 Prospekt K. Marks, Novosibirsk 630073, Russia  
✉ Manusov36@mail.ru

**Aysulu V. Kalanakova,**  
Postgraduate Student,  
Novosibirsk State Technical University,  
20 Prospekt K. Marks, Novosibirsk 630073, Russia  
aysulu.kalanakova@yandex.ru

### Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

### Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

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

### Information about the article

The article was submitted 06.09.2022; approved after reviewing 25.11.2022; accepted for publication 03.02.2023.

## ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 620.91

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-134-146>

## Исследование влияния температуры окружающей среды на функционирование фотоэлектрической установки

Н.П. Местников<sup>1</sup>\*, П.Ф. Васильев<sup>2</sup>, Г.И. Давыдов<sup>3</sup>, А.М. Хоютанов<sup>4</sup>,  
А.М.-Н. Альзаккар<sup>5</sup>, А.А. Лобашев<sup>6</sup>

<sup>1,2</sup>Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия

<sup>1-4</sup>Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, г. Якутск, Россия

<sup>5</sup>Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

<sup>6</sup>Сколковский институт науки и технологий, г. Москва, Россия

**Резюме.** Цель – определение влияния низких и высоких температур окружающей среды на функционирование фотоэлектрической установки с приведением графических интерпретаций и закономерностей. При проведении исследований использован метод определения электроэнергетической эффективности фотоэлектрической установки при широком диапазоне температуры окружающей среды с приведением графических интерпретаций и описанием порядка проведения натурных исследований. Использованы закономерности определения среднестатистических показателей снижения и повышения электроэнергетической эффективности фотоэлектрической установки для определенного диапазона температуры окружающей среды. Данные исследования проведены в течение зимнего периода 2021 года на базе лаборатории материаловедения Института физико-технических проблем Севера СО РАН им. В.П. Ларионова с применением стационарной климатической камеры. Получены контрольные параметры изменения величины генерирующей мощности фотоэлектрической установки (в интервале температур от -60°C до +60°C), которые могут применяться при моделировании эксплуатационных процессов и инженерных расчетах режимов работы солнечных электростанций. Выявлено, что при одинаковых показателях освещенности и температуре среды -60°C фотоэлектрическая панель генерирует максимальную энергию и минимальную энергию при температуре +60°C, снижение удельной мощности при данном диапазоне температуры составило 19%. Значительное уменьшение удельной мощности фотоэлектрической установки достигается при температуре от +30°C и более вследствие увеличения внутреннего сопротивления установки. При температуре менее -40°C достигается незначительное увеличение удельной мощности исследуемой установки вследствие уменьшения внутреннего сопротивления установки. Полученные показатели изменения генерирующей мощности фотоэлектрической установки при широком диапазоне температуры окружающей среды могут быть применены при разработке методики по оценке влияния температуры среды и ее различных диапазонов на функционирование фотоэлектрических панелей для более точного определения энергетического потенциала солнечной генерации при определенном виде климата. В перспективе планируется выполнение натурных исследований по идентификации характера влияния двух и более климатических факторов на функционирование фотоэлектрической установки.

**Ключевые слова:** фотоэлектрическая установка, температура, генерирующая мощность, климатическая камера, холодный климат, Арктика

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

**Для цитирования:** Местников Н.П., Васильев П.Ф., Давыдов Г.И., Хоютанов А.М., Альзаккар А.М.-Н., Лобашев А.А. Исследование влияния температуры окружающей среды на функционирование фотоэлектрической установки // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 1. С. 134–146. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-134-146>.

## Investigating the effects of ambient temperature on photoelectric unit operation

Nikolay P. Mestnikov<sup>1</sup>✉, Pavel F. Vasilyev<sup>2</sup>, Gennadiy I. Davydov<sup>3</sup>, Aleksandr M. Khoyutanov<sup>4</sup>,  
Ahmad M.-N. Alzakkar<sup>5</sup>, Aleksandr A. Lobashev<sup>6</sup>

<sup>1,2</sup>M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

<sup>1-4</sup>V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk, Russia

<sup>5</sup>Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

<sup>6</sup>The Skolkovo Institute of Science and Technology (Skoltech), Moscow, Russia

**Abstract.** In this paper, effects of low and high ambient temperatures on the operation of a photoelectric unit are investigated. The research methodology consisted in determination of the energy efficiency of a photoelectric unit across a wide range of ambient temperatures, providing graphical interpretations and describing the procedure of field observations. Regularities in determining the average statistical indicators of energy efficiency rise and drop in a photoelectric unit were applied for a particular range of ambient temperatures. These studies were undertaken during the winter of 2021 in the Materials Science Laboratory of V.P. Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, using a fixed climate chamber. Reference parameters were obtained for changes in the photoelectric unit generating capacity (within -60°C to +60°C), which can be applied in modeling operational processes and engineering calculations of operating conditions of solar power plants. It was found that, at the same illumination and ambient temperature values, a photoelectric panel generates the maximum energy at -60°C and minimal energy at +60 °C, with the specific power drop for this temperature range being 19%. A significant drop in the specific power of the photoelectric unit was achieved at +30 °C and higher due to the increased internal resistance of the unit. For temperatures below -40°C, the specific power of the analyzed unit increased insignificantly due to the decreased internal resistance of the unit. The obtained values of the generating capacity of a photoelectric unit within a wide range of ambient temperatures can be used in developing a procedure for evaluating the effects of ambient temperature and its various ranges on the operation of photoelectric units, as well as for a more accurate determination of the solar generation energy potential under certain climate conditions. In future studies, field observations are planned to identify the nature of the effect of two and more climatic factors on the operation of a photoelectric unit.

**Keywords:** photovoltaic installation, temperature, generating capacity, climate chamber, cold climate, Arctic

**Acknowledgements:** The research results presented in the article were obtained as a part of the state assignment for the project "Research on methods to improve 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 2021-2030 in the priority direction "Fundamentals of the effective development and operation of energy systems on a new technological basis under globalization including the issues 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., Lobashev A.A. Investigating the effects of ambient temperature on photoelectric unit operation. *iPolytech Journal*. 2023;27(1):134-146. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-134-146>.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящий момент электроснабжение Северо-Восточных регионов России производится посредством эксплуатации автономных систем энергоснабжения, представляющих собой дизель-генераторные, газотурбинные, парогазовые, тепловые установки, которые функционируют на основе сжигания дорогостоящего привозного топлива.

К примеру, в Северном энергетическом районе Республики Саха (Якутия) задейство-

вано более 140 дизельных электростанций [1], где среднее годовое потребление дизельного топлива составляет более 122,214 тыс. т условного топлива, что эквивалентно выбросу более 265,448 т углекислого газа в атмосферу, влияющего на повышение среднегодовой температуры на территории Севера и Арктики с последующим изменением климата. Северо-Восточные регионы России имеют слаборазвитую транспортную инфраструктуру, которая приводит к повышению

удельной стоимости ГСМ на 200% при сроках доставки в отдаленные населенные пункты до 2,5 лет [2].

В данных регионах активно внедряются технологии гелиоэнергетики, где по состоянию на конец 2021 года в Якутии эксплуатируется более 21 солнечной электростанции со среднегодовой выработкой электроэнергии до 1,25 МВт·ч при среднегодовой экономии топлива до 356,66 т натурального топлива, что эквивалентно снижению выбросов СО<sub>2</sub> до 1 123 т. В соответствии с Программой инновационного развития ПАО «РусГидро» на 2020–2024 гг. с перспективой до 2029 года, предполагается строительство около 60 новых объектов возобновляемых источников энергии (ВИЭ) (солнечные и ветровые ЭС) на территории Северного энергетического района Якутии с автономной системой электроснабжения.

Таким образом, изучение влияния значительного диапазона температур (высоких и низких) является одним из важнейших параметров окружающей среды наряду с солнечной, активной при функционировании фотоэлектрических установок [3, 4]. В связи с развитием гибридных систем электроснабжения с применением ВИЭ в удаленных и труднодоступных территориях Севера и Арктики указанная задача является актуальной и востребованной.

## АНАЛИЗ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

На примере моделирования физических процессов работы фотоэлектрической панели установлено, что при температуре -2°C показатель тока практически не изменяется, а напряжение и мощность панели растут на 11%. В диапазоне отрицательных температур (при -20°C) показатель тока фотоэлектрической панели увеличивается на 2%, напряжение увеличивается на 20% и мощность – на 22%, что показывает увеличение общей энергоэффективности панели в условиях низких температур [5].

В рамках натурных испытаний автономной солнечной системы энергоснабжения на антарктической станции «Восток» установлено, что система показала работоспособность в летний период при температуре -45°C и сохранность фотоэлектрических панелей после

трех зимних периодов при температурах ниже -80°C. В условиях крайне низких температур фотоэлектрические панели сохранили свои рабочие характеристики, но были частично занесены снежным покровом [6].

В источниках [7–9] проведены работы по исследованию дополнительных покрытий для фотоэлектрической панели, где установлено, что генерирующая мощность панели увеличивается вследствие снижения температуры нагрева самой панели. Температура нагрева поверхности панели и выработка электроэнергии значительно зависят от температуры воздушной среды и влажности воздуха. Задокументировано, что изменения показателей тока и напряжения зависимы от поступления солнечной радиации на поверхность принимающей площадки. Вследствие влияния высоких температур от +30°C генерирующая мощность фотоэлектрической панели снижается.

Проведены экспериментальные исследования в целях определения влияния отрицательных и положительных температур среды на работу фотоэлектрических панелей, где установлено, что в случае снижения температуры поверхности панели на 10°C его КПД увеличивается на 5% при непрямом охлаждении. В случае снижения температуры поверхности панели на 10°C КПД также увеличивается на 10%. Обеспечение непрямого охлаждения фотоэлектрических панелей при эксплуатации в условиях тропического и жаркого климата является одной из главных задач функционирования объектов гелиоэнергетики [10–13].

Известны натурные исследования [14–17], где определено, что поверхностная температура фотоэлектрической панели зависит не только от интенсивности попадания солнечного излучения на поверхность панели, но и от внешних климатических факторов (пылевое загрязнение, снеговой покров и др.). Предложены технические способы и методы по снижению влияния данных факторов на функционирование фотоэлектрической панели, в том числе на ее поверхностную температуру.

Таким образом, целью исследования является определение показателей влияния годовых естественных температур окружающей

среды Северо-Восточной части России на функционирование фотоэлектрической панели при отсутствии влияния других внешних факторов.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Экспериментальные исследования проводились на базе лаборатории Института физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, в рамках которых применялись климатическая камера «М-75/150-1000 КТВХ», стационарный источник света и фотоэлектрическая установка [18], состоящая из фотоэлектрической панели, контроллера заряда, аккумуляторной батареи, вспомогательной нагрузки, измерительных приборов и программного обеспечения для обработки данных.

На рис. 1 представлен внешний вид фотоэлектрической установки внутри климатической камеры.

Определена методика проведения экспериментальных работ по изучению влияния широкого диапазона отрицательных и положительных температур воздушной среды на функционирование фотоэлектрической панели при отсутствии влияния других внешних факторов, которая имеет следующий порядок:

– размещение фотоэлектрической панели и стационарного источника света внутри

климатической камеры;

– включение стационарного источника света и климатической камеры и получение минимальной температуры  $-60^{\circ}\text{C}$ ;

– 30-минутное ожидание промерзания поверхности фотоэлектрической панели;

– включение вспомогательной нагрузки, регистрация электрических параметров работы фотоэлектрической установки в режиме реального времени;

– изменение температуры внутри климатической камеры с шагом в  $1^{\circ}\text{C}$  с последующим измерением электрических параметров;

– получение экспериментальных данных работы фотоэлектрической установки в диапазоне от  $-60^{\circ}\text{C}$  до  $+60^{\circ}\text{C}$ ;

– обработка экспериментальных данных;

– оформление результатов обработки экспериментальных данных в виде графических интерпретаций;

– выведение закономерностей функционирования фотоэлектрической установки при различных температурах окружающей среды.

Исходной точкой в рамках определения доли снижения удельной мощности принимается среднегодовая температура воздуха в центральной части Якутии, которая составляет ориентировочно  $12^{\circ}\text{C}$  [19].



Рис. 1. Внешний вид фотоэлектрической установки внутри климатической камеры  
Fig. 1. External view of the photovoltaic installation inside the climate chamber

Порядок определения удельной мощности в относительных единицах производится по формуле (1):

$$P_{\text{отн.}i} = \frac{P_{\text{факт}i}}{P_{\text{начальный}}}, \quad (1)$$

где  $P_{\text{отн.}i}$  – относительная удельная мощность фотоэлектрической установки при температуре  $i$ , %;  $P_{\text{факт}i}$  – удельная мощность фотоэлектрической установки при температуре  $i$ , Вт/м<sup>2</sup>;  $P_{\text{начальный}}$  – начальная удельная мощность фотоэлектрической установки при температуре -12°C, Вт/м<sup>2</sup>;  $i$  – определенная температура среды, °C.

Предполагается, что кривая зависимости удельной мощности фотоэлектрической установки имеет полиномиальную зависимость. В целях автоматического определения статистической значимости коэффициентов полиномиальной функции применен метод бутстрэпа (от англ. Bootstrap – начальная загрузка). В случайном порядке подбираются  $M = 45$  точек из существующих  $N = 120$ . Ошибка измерения температуры принимается равной 0,5°C. Ошибка измерения удельной мощности составляет 0,002 Вт/м<sup>2</sup>. В общем случае существуют  $\text{Binomial}(120, 45) = 2,25 \cdot 10^{33}$  способов

сделать данный выбор, где  $\text{Binomial}(N, M) = N!/(M!(N-M)!)$  – значение соответствующего биномиального коэффициента. В работе выбор ограничивается  $5 \cdot 10^5$  вариантом, для каждого из них определяются коэффициенты полиномиальной функции. Изначальным предположением является то, что зависимость удельной мощности от температуры среды описывается полиномиальной функцией степени не выше 5-й по формуле (2):

$$P(T) = \alpha_5 \cdot T^5 + \alpha_4 \cdot T^4 + \alpha_3 \cdot T^3 + \alpha_2 \cdot T^2 + \alpha_1 \cdot T + \alpha_0, \quad (2)$$

где  $P(T)$  – функция зависимости удельной мощности фотоэлектрической установки;  $\alpha_i$  – биномиальный коэффициент в зависимости степени  $i$ ;  $T$  – температура среды, °C;  $i$  – значение степени от 0 до 5.

На рис. 2 представлены кривые плотности вероятностей коэффициентов полиномиальной функции 5-й степени.

Так как с учетом применения критерия Андерсона – Дарлинга [20] распределения вероятностей для коэффициентов полиномиальной регрессии имеют вид нормального

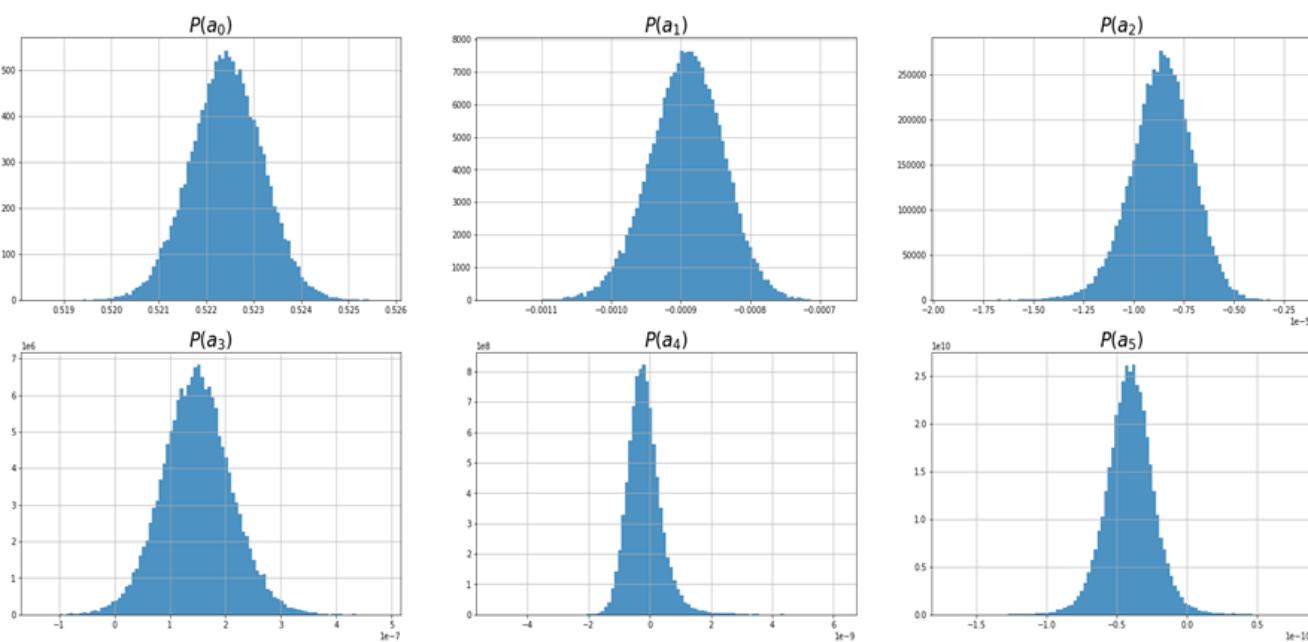


Рис. 2. Кривые распределения вероятностей коэффициентов полиномиальной функции 5-й степени  
Fig. 2. Probability distribution curves for the 5<sup>th</sup> order polynomial function coefficients

распределения, для определения статистической значимости коэффициентов применяется  $t$ -критерий Стьюдента.  $T$ -статистика Стьюдента, равная отношению среднего значения коэффициента к его стандартному отклонению, вычисляется по распределению вероятностей, полученному методом бутстрэпа, и далее сравнивается с критическим значением 2,58 на уровне значимости 1%.

В табл. 1 представлены значения  $t$ -статистики Стьюдента для коэффициентов полиномиальной регрессии 5-й степени.

Анализ вышеуказанных рис. 2 и табл. 1 показывает, что искомая зависимость удельной мощности от температуры является квадратичной в интервале температур от  $-60^{\circ}\text{C}$  до  $+60^{\circ}\text{C}$ . Значения коэффициентов квадратичной функции и их стандартное отклонение приведены в табл. 2. Статистический анализ проведен с применением языка Python.

На рис. 3 и 4 представлены графики зависимости удельной мощности фотоэлектрической установки от температуры среды в фактических ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) и относительных единицах (о.е.), соответственно, где малые показатели удельной мощности обоснованы искусственным световым излучением.

Анализ данных, представленных на вышеуказанном рис. 4, показывает, что зависимость удельной мощности фотоэлектрической установки от температуры среды имеет полиномиальную зависимость, представленную в формуле (4). Среднестатистическая интерполяция фактических и расчетных данных удельной мощности в относительных единицах на всем температурном промежутке составляет 0,022 о.е. В условиях отрицательных температур фотоэлектрическая установка показывает более эффективную работу, где

нную в формуле (3). Среднестатистическая интерполяция фактических и расчетных данных удельной мощности на всем температурном промежутке составляет 1,27%. В условиях отрицательных температур фотоэлектрическая установка показывает более эффективную работу, где удельная мощность при минимальной ( $-60^{\circ}\text{C}$ ) температуре повышается на 1,46%, а при максимальной ( $+60^{\circ}\text{C}$ ) температуре снижается на 17,8% относительно исходной расчетной температуры ( $-12^{\circ}\text{C}$ ):

$$P_{\Phi\text{П}} = -9 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 0,008 \cdot T + 5,227, \quad (3)$$

где  $P_{\Phi\text{П}}$  – удельная мощность фотоэлектрической установки,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;  $T$  – температура среды,  $^{\circ}\text{C}$ .

Анализ данных, представленных на вышеуказанном рис. 4, показывает, что зависимость удельной мощности фотоэлектрической установки от температуры среды имеет полиномиальную зависимость, представленную в формуле (4). Среднестатистическая интерполяция фактических и расчетных данных удельной мощности в относительных единицах на всем температурном промежутке составляет 0,022 о.е. В условиях отрицательных температур фотоэлектрическая установка показывает более эффективную работу, где

**Таблица 1.** Значения  $t$ -статистики Стьюдента для коэффициентов полиномиальной регрессии 5-й степени  
**Table 1.** Student's  $t$ -statistic values for the 5th order polynomial regression coefficients

Номер коэффициента	0	1	2	3	4	5
Значение $t$ -статистики	685,0	16,9	5,56	2,37	0,29	2,35
Статистически значим на уровне 1%	да	да	да	нет	нет	нет

**Таблица 2.** Значения коэффициентов полиномиальной регрессии 2-й степени для зависимости удельной мощности от температуры и их стандартное отклонение

**Table 2.** The values of the 2nd order polynomial regression coefficients for specific power dependence on temperature and their standard deviation

Номер коэффициента	0	1	2
Значение коэффициента	$0,5227$	$-7,93 \cdot 10^{-3}$	$-9,2 \cdot 10^{-5}$
Стандартное отклонение коэффициента	$0,00015$	$0,44 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$

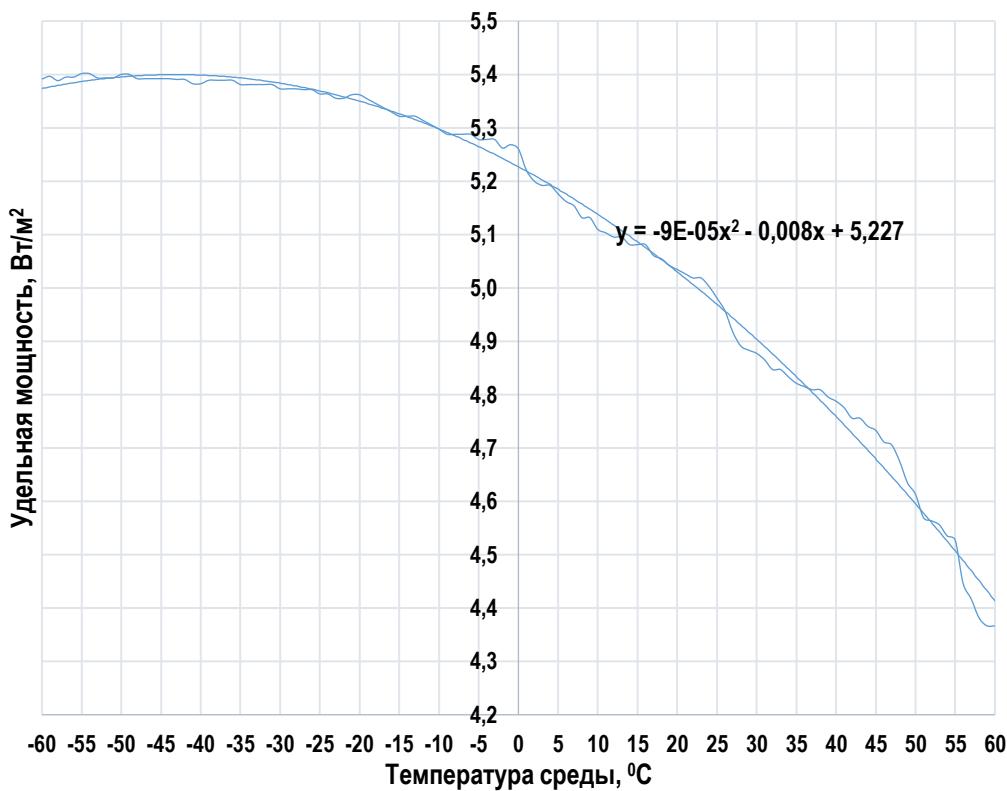


Рис. 3. Зависимость удельной мощности фотоэлектрической установки от температуры среды  
Fig. 3. Photovoltaic installation specific power vs environment temperature

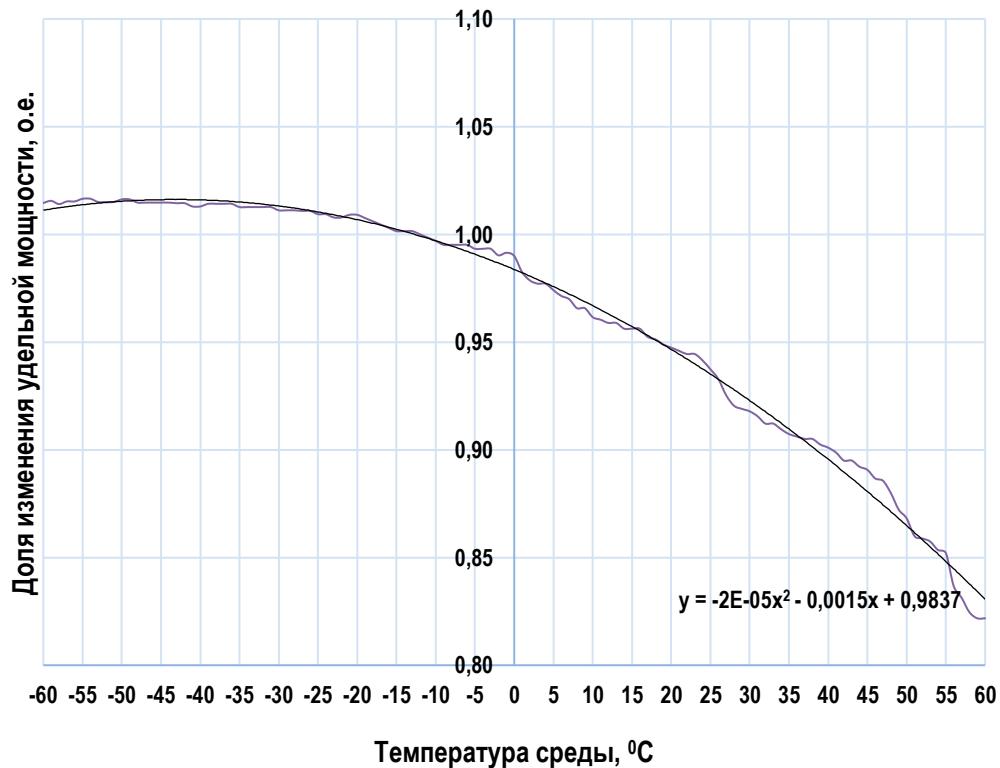


Рис. 4. Зависимость удельной мощности фотоэлектрической установки от температуры среды в относительных единицах  
Fig. 4. Photovoltaic installation specific power vs environment temperature in relative units

удельная мощность в относительных единицах при минимальной (-60°C) температуре повышается на 1,46%, а при максимальной (+60°C) температуре снижается на 17,82% относительно исходной расчетной температуры (-12°C):

$$P_{\text{ФП.о.е.}} = -2 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 0,0015 \cdot T + 0,9837, \quad (4)$$

где  $P_{\text{ФП.о.е.}}$  – удельная мощность фотоэлектрической установки в относительных единицах, о.е.;  $T$  – температура среды, °C.

На рис. 5 представлен график сравнения фактической удельной мощности фотоэлектрической установки с прогнозируемыми показателями с применением полученной закономерности (4) и паспортной закономерностью изменения удельной мощности в

относительных единицах.

На вышеуказанном рис. 5 анализ показывает, что кривые фактической (кривая желтого цвета) и прогнозируемой (кривая черного цвета) доли удельной мощности имеют полиномиальную зависимость и практически соответствуют по всем координатам, где среднестатистическая интерполяция составляет порядка 0,055%. Кривая паспортного изменения (кривые синего и коричневого цветов) доли удельной мощности имеет линейную зависимость, но при сравнении с кривыми фактической и прогнозируемой долей удельной мощности зафиксировано среднестатистическое отклонение на 2,45% и 2,20% при диапазоне температуры от -60°C до -40°C; соответственно, на 2,20% и 1,63% при диапазоне температуры от -40°C до 0°C; на 1,63% и 8,48% при диапазоне температуры от 0°C до +60°C.

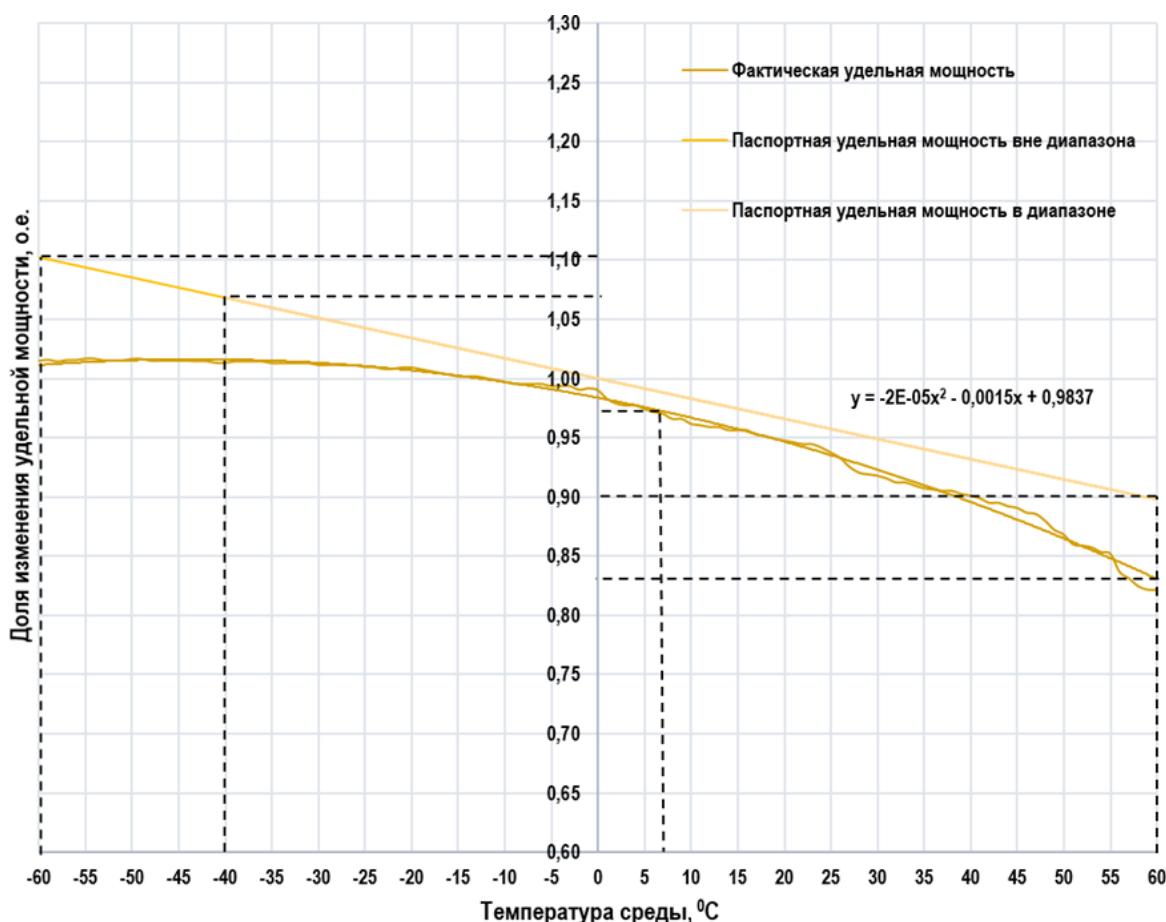


Рис. 5. График сравнения фактической, прогнозируемой и паспортной удельной мощности фотоэлектрической установки в относительных единицах

Fig. 5. Comparison graph of the actual, predicted and nameplate specific power of a photovoltaic installation in relative units

**Таблица 3.** Показатели изменения удельной мощности фотоэлектрической установки при различных диапазонах температуры среды**Table 3.** Indicators of changes in the specific power of a photovoltaic installation at different temperature ranges of the environment

Показатель	Единица изменения	Температура, °C	Показатели изменения, %
Удельная мощность	Вт/м <sup>2</sup>	от -60 до -40	-0,163
		от -40 до -20	-0,389
		от -20 до 0	-1,912
		от -60 до 0	-2,464
		от 0 до +10	-2,838
		от +10 до +20	-1,412
		от +20 до +30	-2,957
		от +30 до +40	-1,686
		от +40 до +50	-3,281
		от +50 до +60	-4,641
		от 0 до +60	-16,816
		от -60 до +60	-19,281

В табл. 3 представлены показатели изменения удельной мощности фотоэлектрической установки при различных диапазонах температуры среды.

Данные, приведенные в табл. 3, показывают значительное снижение удельной мощности фотоэлектрической установки при положительных температурах, где в диапазоне от 0°C до +60°C снижение составило 16%. Наиболее значительное снижение удельной мощности приходится при температуре от +40°C.

Данное явление обосновывается тем, что с повышением температуры создается внутреннее сопротивление внутри фотоэлектрической панели, что снижает его эффективность. С ростом температуры среды поток электронов внутри исследуемой панели возрастает, что вызывает увеличение силы тока и падение напряжения. Однако падение напряжения значительно больше, чем увеличение показателя силы тока. В этой связи удельная мощность фотоэлектрической панели уменьшается, что приводит к снижению ее электроэнергетической эффективности.

Полученные результаты и методика определения влияния температуры среды на работу фотоэлектрических панелей могут быть применены в проведении уточненных натурных испытаний новых видов фотоэлектрических панелей в условиях различных типов климата, сопровождающихся резкими пере-

падами температуры среды.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Малая изученность влияния диапазона годовых естественных температур окружающей среды на работу фотоэлектрических установок приводит к возможным ошибкам при проведении прогнозов выработки проектируемой солнечной электростанции, в особенности на территории Северо-Востока России.

В результате проведения экспериментальных исследований обнаружена разница между показателями паспортного и фактического изменения мощности фотоэлектрической установки, которая составила до 8,48% (см. рис. 5).

Показатели снижения удельной мощности фотоэлектрической установки в диапазоне температуры окружающей среды от -60°C до +60°C без изменения других внешних параметров составили более 19%, что доказывает возможность работы данной установки в условиях крайне низких температур окружающей среды.

Данные обстоятельства приводят к необходимости проведения дальнейших исследований и разработке методики по оценке влияния температуры среды при различных ее диапазонах для более точного установления энергетического потенциала солнечной генерации при определенной температуре среды.

### Список источников

1. Местников Н.П., Васильев П.Ф., Альхадж Ф.Х. Разработка гибридных систем электроснабжения для энергоснабжения удаленных потребителей в условиях Севера и Арктики // Международный технико-экономический журнал. 2021. № 1. С. 47–56. <https://doi.org/10.34286/1995-4646-2021-76-1-47-56>.
2. Местников Н.П., Васильев П.Ф., Давыдов Г.И., Хоютанов А.М., Альзаккар А.М.-Н. Исследование возможности применения фотоэлектрических солнечных установок внутри купольного строения в условиях Севера // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 4. С. 435–449. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-435-449>.
3. Bekryaev R.V., Polyakov I.V., Alexeev V.A. Role of polar amplification in long-term surface air temperature variations and modern arctic warming // Journal of Climate. 2010. Vol. 23. Iss. 14. P. 3888–3906. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3297.1>.
4. 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>.
5. Литвин Н.В. Моделирование физических процессов работы солнечных фотоэлектрических батарей // Мониторинг. Наука и технологии. 2020. № 1. С. 46–53. <https://doi.org/10.25714/MNT.2020.43.007>.
6. Соловей В.А., Захаров А.А., Карлов Д.С., Булат С.А., Семенихин В.И. Система обеспечения электропитания автономной удаленной автоматической станции для сбора космической пыли на станции Восток в Антарктиде // Гелиогеофизические исследования в Арктике: сборник трудов II Всероссийской конференции (г. Мурманск, 24–26 сентября 2018 г.). Мурманск: Полярный геофиз. ин-т, 2018. С. 85–87. <https://doi.org/10.25702/KSC.978-5-91137-381-8.85-87>.
7. Кирличникова И.М., Махсумов И.Б. Исследование температуры поверхности солнечных модулей с использованием голографической защиты от перегрева // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2019. Т. 15. № 4. С. 19–29. <https://doi.org/10.17122/1999-5458-2019-15-4-19-29>.
8. Skoplaki E., Palyvos J.A. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: a review of efficiency/power correlations // Solar Energy. 2009. Vol. 83. Iss. 5. P. 614–624. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.10.008>.
9. Coelho R.F., Concer F.M., Martins D.C. A MPPT approach based on temperature measurements applied in PV systems // Proceedings of the IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies. 2010. <https://doi.org/10.1109/INDUSCON.2010.5740006>.
10. Philibert C. The present and future use of solar thermal energy as a primary source of energy // International Energy Agency. 2005. [Электронный ресурс]. URL: <http://philibert.cedric.free.fr/Downloads/solarthermal.pdf> (19.03.2021).
11. Aljamali N.M., Kadhim A.J., Al-Jelehawy A.H.J. Review in protection of laboratory and electrical equipment in laboratories and institutions // Journal of Controller and Converters. 2021. Vol. 6. Iss. 1. P. 24–30.
12. Muhsin N.M.B., Alhamdo M.H. Study experiential and numerical for investigation the efficiency inside building structure // European Journal of Molecular & Clinical Medicine. 2020. Vol. 7. Iss. 6. P. 1917–1936.
13. Abed Q.A., Badesu V. Some solar energy technologies and applications // Energy Science and Technology. Vol. 5. Solar Engineering - 1 (Applications) Chapter / Editors S.R. Sivakumar, U.C. Sharma, R. Prasad. Studium Press LLC, 2015.
14. Пат. № 2645444, Российская Федерация, С1, МПК H01L 31/024, H01L 31/042. Устройство и способ автоматизированной очистки солнечной панели / Ф.Р. Исмагилов, И.Х. Хайруллин, В.Е. Вавилов, Р. Д. Каримов; заявитель и патентообладатель Уфимский государственный авиационный технический университет. № 2017102270. Заявл. 24.01.2017; опубл. 21.02.2018.
15. Панченко В.А., Сангаджиев М.М., Дегтярев К.С. Влияние пыли и песка на возобновляемые источники энергии в Калмыкии // Инновации в сельском хозяйстве. 2017. № 1. С. 176–183.
16. Амиров Д.И., Зацаринная Ю.Н., Логачева А.Г., Федотов Е.А. Исследование электрических двигателей для автоматизированных систем очистки солнечных панелей // Труды Академэнерго. 2020. № 4. С. 74–85.
17. Зацаринная Ю.Н., Амиров Д.И., Земскова Л.В., Рахматуллин Р.Р. Исследование эффективности работы солнечной панели при воздействии на нее загрязнителей // Труды Академэнерго. 2019. № 1. С. 81–92.
18. Местников Н.П., Бурянина Н.С., Королюк Ю.Ф., Васильев П.Ф. Исследование эксплуатации комбинированной системы электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии на Дальнем Востоке России // Вопросы электротехнологии. 2021. № 2. С. 68–81.
19. Mestnikov N., Alzakkar A., Valeev I., Maksimov V.V. Assessment of the performance of the solar power plant with a capacity 150W // International Russian Automation Conference (RusAutoCon). 2021. <https://doi.org/10.1109/RusAutoCon52004.2021.9537318>.
20. Anderson T.W., Darling D.A. Asymptotic theory of certain "goodness of fit" criteria based on stochastic processes // Annals of Mathematical Statistics. 1952. Vol. 23. Iss. 2. P. 193–212. <https://doi.org/10.1214/aoms/1177729437>.

### References

1. Mestnikov N.P., Vasilyev P.F., Al'hadzh F. H. Development of hybrid power supply systems for power supply of remote consumers in north and Arctic conditions. Mezhdunarodnyj tekhniko-ekonomiceskij zhurnal. 2021;1:47-56. <https://doi.org/10.34286/1995-4646-2021-76-1-47-56>.

2. Mestnikov N.P., Vasilyev P.F., Davydov G.I., Khoyutnov A.M., Alzakkar A.M. Applicability of photoelectrical solar units inside domical structures in northern conditions. *iPolytech Journal*. 2021;25(4):435-449. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-435-449>.
3. Bekryaev R.V., Polyakov I.V., Alexeev V.A. Role of polar amplification in long-term surface air temperature variations and modern arctic warming. *Journal of Climate*. 2010;23(14):3888-3906. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3297.1>.
4. Vasilyev P.F., Mestnikov N.P. Research of the effect of the sharply continental climate of Yakutia on the functioning of solar panels. *Mezhdunarodnyj tekhniko-ekonomicheskij zhurnal*. 2021;1:57-64. <https://doi.org/10.34286/1995-4646-2021-76-1-57-64>.
5. Litvin N.V. Modeling of physical processes of solar photovoltaic batteries operation. *Monitoring. Nauka i tekhnologii = Monitoring. Science and Technologies*. 2020;1:46-53. <https://doi.org/10.25714/MNT.2020.43.007>.
6. Solovey V.A., Zakharov A.A., Karlov D.S., Bulat S.A., Semenikhin V.I. Power supply system of a stand-alone remote automatic station for cosmic dust collection at Vostok station in Antarctica. In: *Geliogeofizicheskie issledovaniya v Arktike: sbornik trudov. Vserossijskoj konferencii = Helio-geographical studies in Arctic: collected papers*. 24–26 September 2018, Murmansk. Murmansk: Polar Geophysical Institute; 2018, p. 85-87. <https://doi.org/10.25702/KSC.978-5-91137-381-8.85-87>.
7. Kirpichnikova I.M., Mahsumov I.B. Investigation of surface temperature of solar modules using holographic overheating protection. *Elektrotehnicheskie i informacionnye kompleksy i sistemy = Electrical facilities and systems*. 2019;15(4):19-29. <https://doi.org/10.17122/1999-5458-2019-15-4-19-29>.
8. Skoplaki E., Palyvos J.A. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: a review of efficiency/power correlations. *Solar Energy*. 2009;83(5):614-624. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.10.008>.
9. Coelho R.F., Concer F.M., Martins D.C. A MPPT approach based on temperature measurements applied in PV systems. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies*. 2010. <https://doi.org/10.1109/INDUSCON.2010.5740006>.
10. Philibert C. The present and future use of solar thermal energy as a primary source of energy. *International Energy Agency*. 2005. Available from: <http://philibert.cedric.free.fr/Downloads/solarthermal.pdf> [Accessed 19th March 2021].
11. Aljamali N.M., Kadhim A.J., Al-Jelehawy A.H.J. Review in protection of laboratory and electrical equipment in laboratories and institutions. *Journal of Controller and Converters*. 2021;6(1):24-30.
12. Muhsin N.M.B., Alhamdo M.H. Study experiential and numerical for investigation the efficiency inside building structure. *European Journal of Molecular & Clinical Medicine*. 2020;7(6):1917-1936.
13. Abed Q.A., Badescu V. Some solar energy technologies and applications. In: S. R. Sivakumar, U. C. Sharma, R. Prasad (eds.). *Energy Science and Technology. Vol. 5. Solar Engineering - 1 (Applications) Chapter*. Studium Press LLC; 2015.
14. Ismagilov F.R., Hajrullin I.H., Vavilov V.E., Karimov R.D. *Solar panel design and automated cleaning method*. Patent RF, no. 2645444; 2018. (In Russ.).
15. Panchenko V.A., Sangadzhiev M.M., Degtyarev K.S. Effect of dust and sand on renewable energy sources in Kalmykia. *Innovacii v sel'skom hozyajstve*. 2017;1:176-183. (In Russ.).
16. Amirov D.I., Zatsarinnaya Yu.N., Logacheva A.G., Fedotov E.A. Study of electric motors for automated solar panel cleaning systems. *Trudy Akademenergo*. 2020;4:74-85.
17. Zatsarinnaya Yu.N., Amirov D.I., Zemskova L.V., Rakhmatullin R.R. Research of efficiency of work of the solar panel under impact on pollutants. *Trudy Akademenergo*. 2019;1:81-92. (In Russ.).
18. Mestnikov N.P., Buryanina N.S., Korolyuk Yu.F., Vasil'ev P.F. Researching the operation of combined power supply systems based on renewable energy sources in the Far East of Russia. *Voprosy elektrotehnologii*. 2021;2:68-81. (In Russ.).
19. Mestnikov N., Alzakkar A., Valeev I., Maksimov V. V. Assessment of the performance of the solar power plant with a capacity 150W. In: *International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. 2021. <https://doi.org/10.1109/RusAutoCon52004.2021.9537318>.
20. Anderson T.W., Darling D.A. Asymptotic theory of certain "goodness of fit" criteria based on stochastic processes. *Annals of Mathematical Statistics*. 1952;23(2):193-212. <https://doi.org/10.1214/aoms/1177729437>.

## 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  
им. В.П. Ларионова СО РАН,  
677007, г. Якутск, ул. Кулаковского, 42,

## 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 Electric Power Engineering  
Department,  
V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical  
Problems of the North SB RAS  
42 Kulakovskiy St., Yakutsk 677007,

Республика Саха (Якутия)  
✉ sakhacase@bk.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-7090-4839>

**Васильев Павел Филиппович,**  
к.т.н.,  
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  
им. В.П. Ларионова СО РАН,  
677007, г. Якутск, ул. Кулаковского, 42,  
Республика Саха (Якутия)  
kb-8@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-4108-176X>

**Даевыдов Геннадий Иванович,**  
научный сотрудник Отдела электроэнергетики,  
Институт физико-технических проблем Севера  
им. В.П. Ларионова СО РАН,  
677027, г. Якутск, ул. Октябрьская, 1,  
Республика Саха (Якутия)  
dav\_gen@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-8543-0867>

**Хоютанов Александр Михайлович,**  
научный сотрудник Отдела электроэнергетики,  
Институт физико-технических проблем Севера  
им. В.П. Ларионова СО РАН,  
677027, г. Якутск, ул. Октябрьская, 1,  
Республика Саха (Якутия)  
shuriklater@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-1917-6976>

**Альзаккар Ахмад Мухаммед-Насер,**  
аспирант,  
Казанский государственный энергетический  
университет,  
420066, г. Казань, ул. Яруллина, 6, Россия  
ahmadalzakkar86@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0002-8355-189X>

**Лобашев Александр Алексеевич,**  
аспирант,  
Сколковский институт науки и технологий,  
121205, г. Москва, Большой б-р, 30/1, Россия  
lobashevalexander@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0002-9522-9996>

Republic of Sakha (Yakutia)  
✉ sakhacase@bk.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-7090-4839>

**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,  
V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical  
Problems of the North SB RAS  
42 Kulakovskiy St., Yakutsk 677007, Republic of Sakha  
(Yakutia)  
kb-8@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-4108-176X>

**Gennadiy I. Davyдов,**  
Researcher of the Electric Power Engineering  
Department,  
V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical  
Problems of the North SB RAS  
1 Oktyabrskaya St., Yakutsk 677027, Republic of Sakha  
(Yakutia)  
dav\_gen@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-8543-0867>

**Aleksandr M. Khoyutanov,**  
Researcher of the Electric Power Engineering  
Department,  
V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical  
Problems of the North SB RAS  
1 Oktyabrskaya St., Yakutsk 677027, Republic of Sakha  
(Yakutia)  
shuriklater@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-1917-6976>

**Ahmad M.-N. Alzakkar,**  
Postgraduate Student,  
Kazan State Power Engineering University,  
6 Yarullin St., Kazan 420066, Russia  
ahmadalzakkar86@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0002-8355-189X>

**Aleksandr A. Lobashev,**  
Postgraduate Student,  
The Skolkovo Institute of Science and Technology  
(Skoltech),  
30/1, Bolshoy Boulevard, Moscow 121205, Russia  
lobashevalexander@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0002-9522-9996>

**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 01.02.2022; одобрена после рецензирования 12.05.2022; принята к публикации 25.01.2023.

**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 01.02.2022; approved after reviewing 12.05.2022; accepted for publication 25.01.2023.

## ЭНЕРГЕТИКА



Научная статья

УДК 621.18

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-147-160>

## Разработка технических решений по выбору схемы замены барабанов, выработавших ресурс

**А.В. Охлопков<sup>1✉</sup>, Н.В. Попов<sup>2</sup>, Д.О. Моисеев<sup>3</sup>, В.Д. Битней<sup>4</sup>**<sup>1,3</sup>НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия<sup>1,2,4</sup>ПАО «Мосэнерго», г. Москва, Россия

**Резюме.** Замена барабана является сложным технологическим решением и может включать в себя различные варианты технического перевооружения (реконструкции), в зависимости от множества факторов, таких как результатов обследования, наличия подъемной техники, качества подъездных путей, компоновки котельного отделения главного корпуса и ряда экономических вопросов. А также несет в себе, как экономически, так и технически сложную задачу, связанную с возможностью замены устройства, которое расположено на самой высокой отметке в котельном отделении. Компанией ПАО «Мосэнерго» в рамках научно-исследовательской работы для обеспечения максимально длительного срока эксплуатации паровых энергетических котлов при замене главного сепарационного устройства были выделены три варианта замены сепарационного устройства: аналогичный барабан, выполненный из стали импортного производства марки WB36; альтернативная схема с малым барабаном и батареей выносных циклонов; установка безбарабанной схемы, основанной на многоступенчатой схеме испарения и состоящей из батареи циклонов. Также проведен анализ материалов, которые используются в сепарационных устройствах на данный момент, такими являются сталь 16 ГНМ и 16 ГНМА, и их сравнение со сталью импортного производства WB36. Каждый из вариантов имеет свой ряд преимуществ и недостатков, которые будут проанализированы по следующим критериям: массогабаритные характеристики, предполагаемая необходимость в подъемной технике; гидравлические потери, предполагаемые изменения в автоматике котла; относительные затраты на выполнение проекта, анализ и управление рисками. В данной статье будут представлены рекомендации по выбору варианта решения замены барабана, которое может стать основополагающим в дальнейшем продлении ресурса и осуществлении надежной и безопасной работы котельного оборудования.

**Ключевые слова:** эксплуатация энергетических котлов, замена барабана, сепарационное устройство, батарея циклонов, схемы испарения, работа котельного оборудования

**Для цитирования:** Охлопков А.В., Попов Н.В., Моисеев Д.О., Битней В.Д. Разработка технических решений по выбору схемы замены барабанов, выработавших ресурс // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 1. С. 147–160. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-147-160>.

## ENERGY INDUSTRY

Original article

## Technical solutions for selecting an option for replacing overaged boiler steam drums

**Andrey V. Okhlopkov<sup>1✉</sup>, Nikolai V. Popov<sup>2</sup>, Danil O. Moiseev<sup>3</sup>, Vladislav D. Bitney<sup>4</sup>**<sup>1,3</sup>National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia<sup>1,2,4</sup>PJSC "Mosenergo", Moscow, Russia

**Abstract.** This work investigates possible options for replacing the main separator of steam power boilers to ensure their maximal service life. Separators of drum-type boilers are reviewed in terms of their advantages and disadvantages. An analysis of two steels – WB36 and 16GNMA – is carried out by comparing their performance characteristics, chemical composition, and welding procedures. Possible technical solutions for replacing overaged drum boilers are analyzed from the technical and economic perspectives. Three options were selected for replacing the separator: a similar drum made of imported grade WB36 steel; an alternative option with a small drum and a bank of off-mounted cyclones; a drumless option based on a multi-stage evaporation cycle and a bank of cyclones. The materials currently used in separators, i.e., 16GNM and 16GNMA, are compared with imported WB36 steel. It was found that each option had its own advantages and disadvantages, which should be analyzed according to the following parameters: weight and dimensions; assumed need in lifting equipment; hydraulic losses; assumed changes in automatic boiler equipment; relative costs associated with designing, analysis, and risk management. Therefore, the presented recommendations for selecting a drum replacement option are essential for extending the service life and ensuring the reliable and safe operation of boiler equipment.

**Keywords:** power-generating boiler operation, drum replacement, separating device, cyclone battery, evaporation schemes, boiler equipment operation

**For citation:** Okhlopkov A.V., Popov N.V., Moiseev D.O., Bitney V.D. Technical solutions for selecting an option for replacing overaged boiler steam drums. *iPolytech Journal*. 2023;27(1):147-160. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-147-160>.

## ВВЕДЕНИЕ

Барабан – это цилиндрический сосуд, часть оборудования котлов, элемент тепловой схемы, предназначенный для сбора и дальнейшей раздачи рабочего тела, для разделения пароводяной смеси на воду и насыщенный пар. Так как это устройство, работающее под высоким давлением, то ключевым требованием к эксплуатации такого вида оборудования является безопасность. На котлах, которые эксплуатируются более сорока лет, особенно остро стоит вопрос альтернативной и грамотной замены корпуса барабана [1]. Основной задачей данной работы является сравнительный анализ возможных решений по замене сепарационных устройств, отслуживших свой срок службы, с учетом экономических и технических условий [2, 3].

Чтобы обеспечить максимально длительный срок эксплуатации паровых энергетических котлов при замене главного сепарационного устройства, были предложены альтернативные варианты:

- замена барабана на аналогичный барабан;
- замена барабана на альтернативную схему с малым барабаном;
- замена барабана на батарею циклонов.

## АНАЛИЗ РАБОТЫ

**Сепарационные устройства.** Надежность работы барабанных котлов во многом определяется устойчивой работой внутрибарабанных и выносных сепарационных устройств.

Сепарационные устройства котлов предназначены для защиты внутренних поверхностей пароперегревателя от образования отложений, вызванных содержанием в паре различных примесей. В барабанных котлах применяются по отдельности или в различных исполнениях сепарационных устройств. В них используются такие принципы сепарации пара, как гравитационная, инерционная, циклонная, пленочная и комбинированная [5, 6]. При подборе сепарационных устройств в части работы контуров циркуляции особо важным является расчет гидравлического сопротивления сепараторов [7]. При увеличении сопротивления труда добиваться стабильной (нормальной) работы контуров. Высокое сопротивление в основном создают циклоны, но возможно получение достаточно большого сопротивления и в других элементах сепараторов. К тому же важно заметить, что конструктивные особенности котлов также влияют на выбор сепарационных механизмов. Наибольшими являются следующие: размеры барабана (диаметр и длина); размещение подводящих и отводящих, опускных и подъемных труб; подвод питательной воды; размеры лазов и их размеры; наличие пароперегревателя; тип топочного устройства и вид топлива. Все это влияет из-за наличия гидравлических потерь.

**Внутрибарабанные устройства.** Необходимый уровень сухости пара достигается за счет уменьшения кинетической энергии пароводяных струй, выходящих из пароподводящих труб экранных панелей топки,

равномерной раздачи пара площади, называемой зеркалом испарения (поверхность воды, с которой происходит испарение пара), и его осушкой на жалюзийной решетке или циклонах. Схемы внутрибарабанных устройств котлов значительно типизированы и приведены на рис. 1.

Равномерное распространение пара во всем объеме барабана и пароотводящих труб обусловлено установкой погруженных дырчатых щитов в водяном пространстве барабана котлов среднего и низкого давлений и парораспределительных решеток в паровом объеме барабана котлов высокого давления. Широкое применение нашли жалюзийные сепараторы, схемы расположения которых в барабанах показаны на рис. 2.

**Внутрибарабанные центробежные сепараторы пара.** Начальное разделение пароводяной смеси, выходящей из экранов топки, гашение ее кинетической энергии, а также двухступенчатая сепарация пара,

которая в основном используется в барабанах котлов высокого давления, осуществляются в циклонах. Типовая схема представлена на рис. 3. Эти устройства используются для первичной сепарации, что позволяет уменьшить пенообразование котловой воды и устраниить захват пара в водоопускные трубы. Первая ступень сепарации – центробежная, созданная за счет тангенциальной подвода пароводяной смеси в циклон, вторая же ступень выполняется осадительной, что достигается установкой жалюзийного сепаратора в верхней части циклона [8].

Конструкция, размеры и элементы, расположенные внутри барабанных циклонов, выбираются согласно следующим требованиям – с учетом расчетов гидравлических потерь выбирают ширину патрубка, включающего циклоны, а также из условий сопротивлений в пределах надежности циркуляции. На рис. 4 рассмотрена сепарационная схема с внутрибарабанными циклонами.

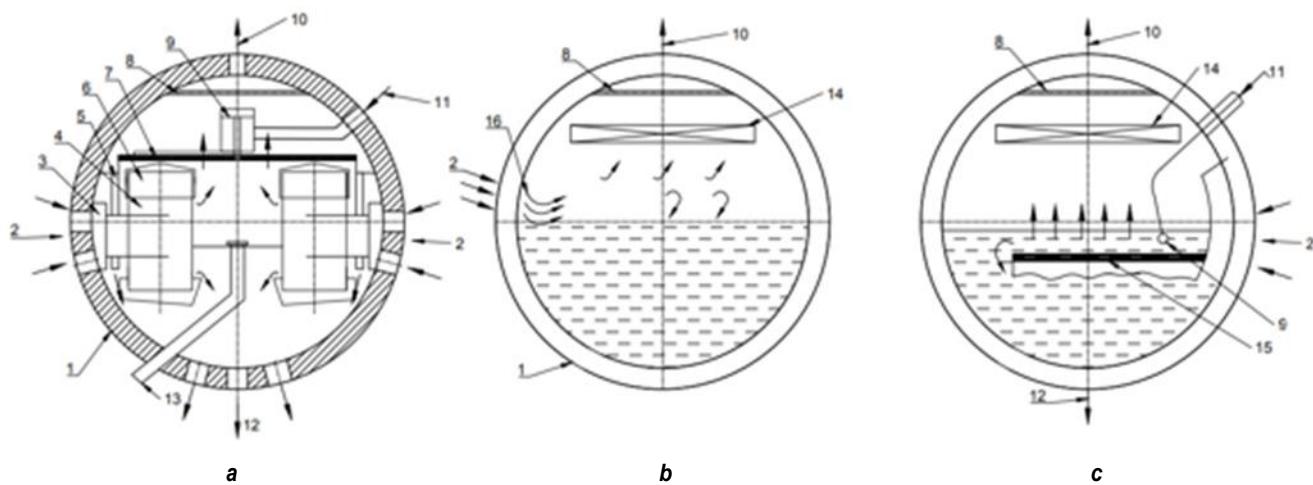


Рис. 1. Типовые схемы внутрибарабанных устройств котлов высокого (а), среднего (б) и низкого (в) давления:  
 а – для котлов высокого давления с внутрибарабанными циклонами; б и в – для котлов среднего и низкого давления с отбойными щитками и погруженным дырчатым щитом, соответственно; 1 – барабан; 2 – ввод пароводяной смеси; 3 – короб; 4 – циклон; 5 – сливной короб; 6 – крышка; 7 – дырчатый лист промывочного устройства; 8 – парораспределительная решетка; 9 – раздающий короб питательной воды; 10 – пароотводящие трубы; 11 – подвод питательной воды; 12 – опускные трубы; 13 – труба аварийного слива воды; 14 – жалюзийный сепаратор; 15 – затопленный дырчатый щит; 16 – отбойные подушки

Fig. 1. Typical diagrams of drum internals for high (a), medium (b) and low (c) pressure boilers: a – for high-pressure boilers with drum internal cyclones; b and c – for medium and low pressure boilers with baffle plates and a submerged perforated plate, respectively; 1 – drum; 2 – steam-water mixture inlet; 3 – casing; 4 – cyclone; 5 – drain tank; 6 – cover; 7 – perforated distributor of the flushing device; 8 – steam distribution grate; 9 – feed water dispensing box; 10 – steam discharge pipes; 11 – feed water inlet; 12 – downcomers; 13 – water emergency discharge pipe; 14 – louvered separator; 15 – submerged perforated plate; 16 – baffle pads

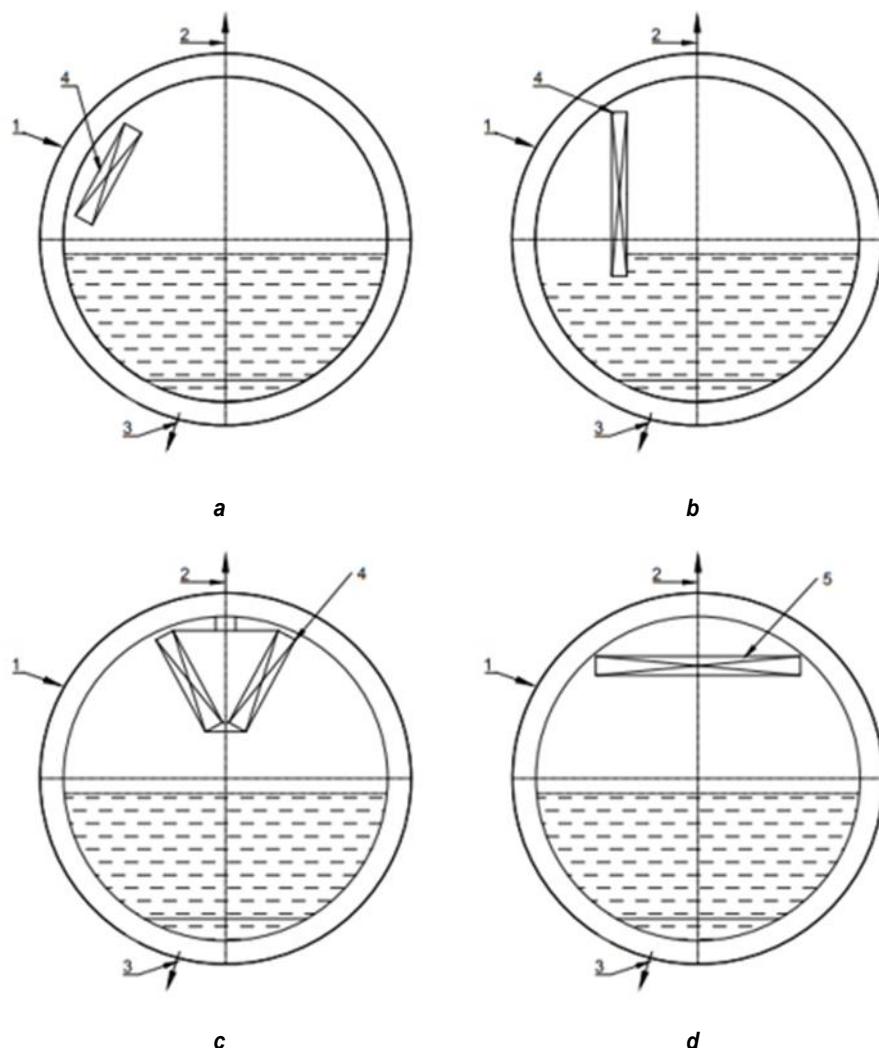


Рис. 2. Схемы расположения жалюзи в барабане котла (1 – ввод пароводяной смеси, 2 – отбор пароводяной смеси, 3 – отвод воды, 4 – жалюзи, 5 – жалюзиный потолок): а – входные; б – промежуточные; в – выходные; г – выходные горизонтальные

Fig. 2. Diagrams of louver location in the boiler drum (1 – steam-water mixture inlet, 2 – steam-water mixture outlet, 3 – water drainage, 4 – louvers, 5 – louvered ceiling): a – input louvers; b – intermediate louvers; c – output louvers; d – output horizontal louvers

**Выносные центробежные сепараторы пара.** Отличия в конструкциях различных сепараторов, а также всевозможные способы присоединения реализуют различающиеся условия работы. Что, в свою очередь, дает разную эффективность отделения влаги от пара. При ступенчатом испарении пар последней ступени осушается в выносных циклонах.

Ряд плюсов и минусов работы выносных циклонов отмечен в таблице.

**Анализ эксплуатационных характеристик сталей WB36 И 16ГНМА.** На ТЭС России в эксплуатации более 700 барабанов котлов высокого давления. Большая часть из них выполнена из стали 22К. Кроме того, барабаны

изготавливались из сталей 15М (16М), 16ГНМ, 16ГНМА. Сталь 16ГНМА пришла на замену стали 16ГНМ в связи с выявлением трещин в теле барабана в местах отверстий для водопускных труб, что приводило к повышению эксплуатационных расходов на ремонт [9]. Процентное соотношение использования различных марок стали для изготовления барабанов котлов представлено на рис. 6.

Как видно из рис. 6, на данный период времени большинство барабанов в России изготовлено из сталей 22К, 15М (16М), 16ГНМ, их замена приведет к большим капиталовложениям. Со временем в процессе эксплуатации в металле барабанов котлов появляются дефекты в

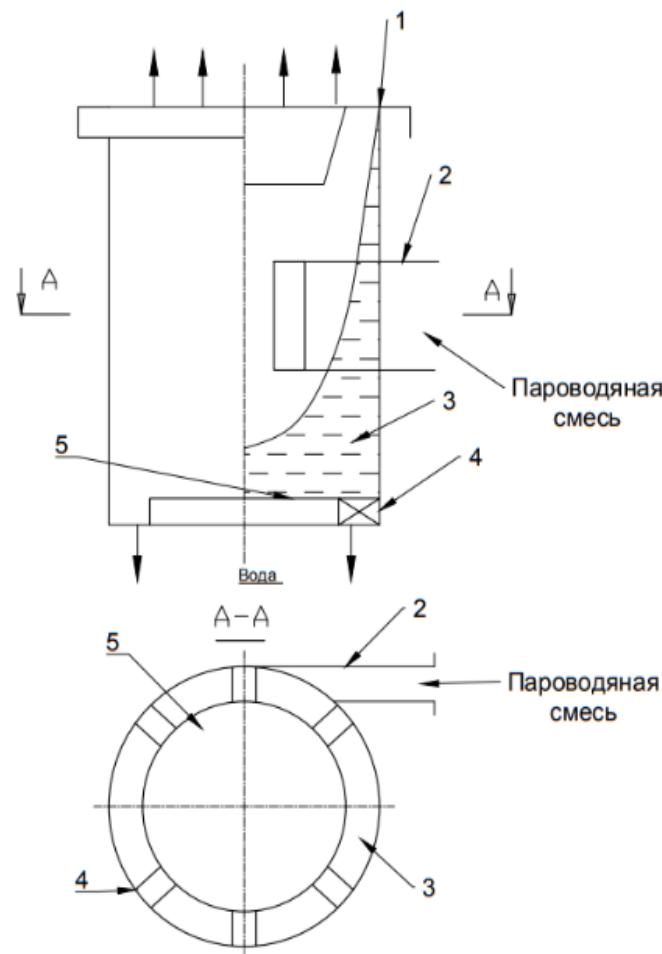


Рис. 3. Внутрибарабанный циклон (1 – крышка, 2 – подводящий патрубок, 3 – цилиндрический корпус, 4 – направляющие лопатки, 5 – донышко)  
 Fig. 3. Drum internal cyclone (1 – cover, 2 – inlet pipe, 3 – cylindrical body, 4 – guide vanes, 5 – bottom)

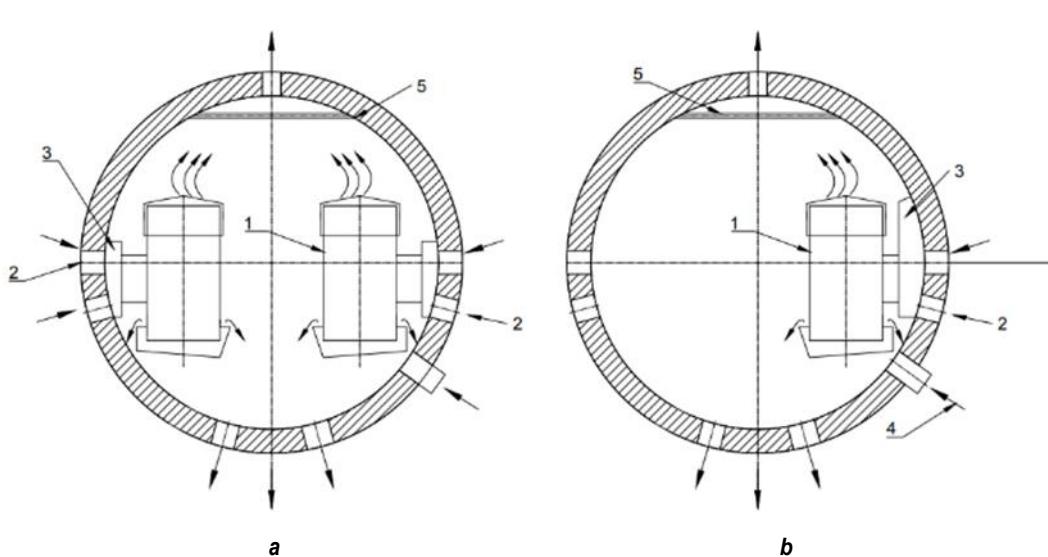


Рис. 4. Сепарационная схема с циклонами внутри барабана (1 – внутрибарабанный циклон, 2 – трубы, подводящие пароводяную смесь, 3 – подводящие короба, 4 – водоопускные трубы, 5 – парораспределительная решетка): а – при двустороннем подводе пароводяной смеси; б – при одностороннем подводе  
 Fig. 4. Separation diagram with drum internal cyclones (1 – drum internal cyclone, 2 – steam-water mixture supplying pipes, 3 – supply boxes, 4 – water downcomers, 5 – steam distribution grate): a – under two-way supply of the steam-water mixture; b – under one-way supply of the steam-water mixture

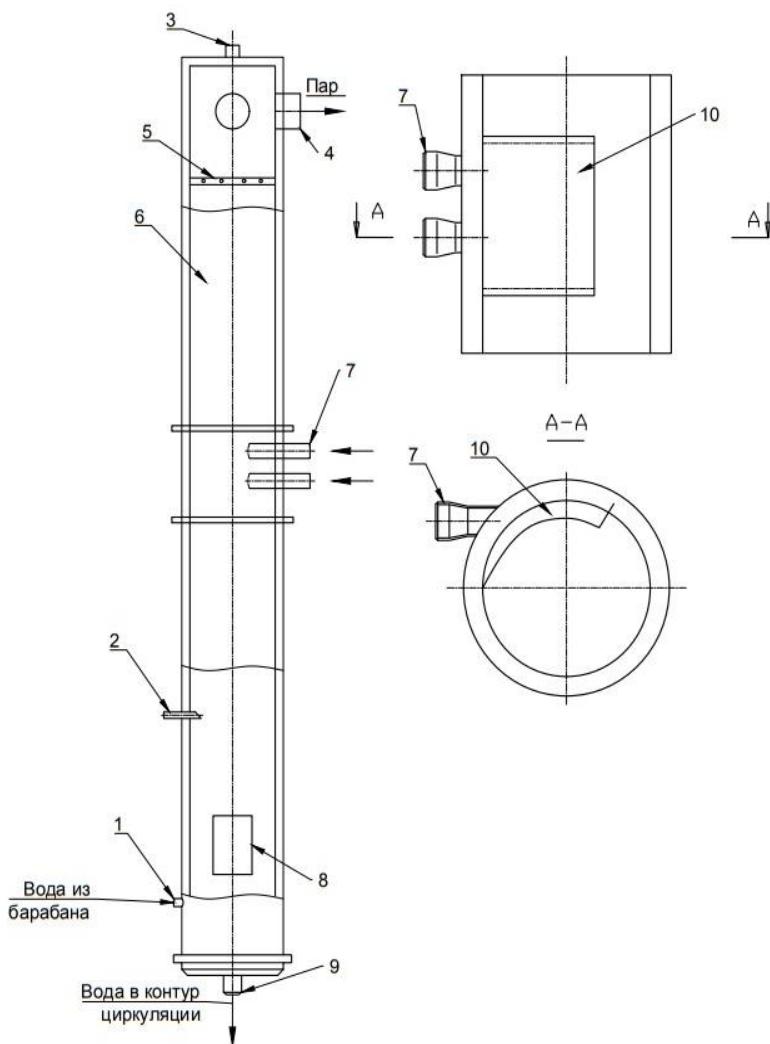


Рис. 5. Эскиз принципиального выносного циклона (1 – штуцер для трубопровода, подводящего котловую воду, 2 – штуцер для трубопровода непрерывной продувки, 3 – штуцер для воздушника, 4 – штуцер для пароотводящего трубопровода, 5 – пароприемный дырчатый щит, 6 – корпус, 7 – штуцера для трубопровода пароводяной смеси, 8 – крестовина, 9 – штуцер для водоопускной трубы, 10 – вставка для образования улитки)

Fig. 5. A sketch of a basic outside cyclone (1 – fitting for a boiler water supplying pipeline, 2 – fitting for a continuous blow-down pipeline, 3 – fitting for an air vent, 4 – fitting for a steam outlet pipeline, 5 – steam intake perforated plate, 6 – body, 7 – fittings for a steam-water mixture pipeline, 8 – crosspiece, 9 – fitting for the water downcomer, 10 – insert for volute formation)

виде трещин и коррозионных язв<sup>5</sup>. Накопление указанных дефектов зависит от уровня культуры эксплуатации (соблюдение допустимой разницы температур между верхом и низом металла барабана, выдерживание требуемой скорости подъема давления пара при пусках, качество питательной воды) и действия циклических нагрузок, зависящих от режима работы (пиковый, полупиковый, базовый). Циклические нагрузки ведут к уменьшению пластичности

металла барабана в области концентрации напряжений и появлению в нем трещин. Схема, представленная на рис. 7, отражает конструкционно-технологические и эксплуатационные факторы, влияющие на разрушение целостности барабанов и их взаимосвязь.

Можно выделить несколько ключевых причин увеличения вероятности хрупких разрушений [10, 11]. Первая – это большие габариты изделия. Объемные напряжения или так

<sup>5</sup>СО 153-34.17.469-2003. Инструкция по продлению срока безопасной эксплуатации паровых котлов с рабочим давлением до 4,0 МПа включительно и водогрейных котлов с температурой воды выше 115°C. Введ. 24.06.2003.

называемое состояние «плоской деформации» происходят при нагружении толстостенных деталей [12]. Еще один фактор, связанный с большими габаритами изделия – это сложность технологии изготовления, а также сварки листов из толстостенного металла и необходимость термообработки после сварки.

Внутрибарабанные устройства привариваются без термообработки к стенкам барабана на монтаже в периоды проведения планового контроля металла, когда внутрибарабанные устройства демонтируются и монтируются вновь. Эти технологические факторы в случаях отклонения от заданных значений могут привести к формированию и сохранению высокого уровня остаточных напряжений в зонах сварных соединений. Дефекты, образован-

ные посредством производственно-технологических факторов, перерастают в эксплуатационные факторы, приводящие к последующим развитиям этих дефектов.

Распространение трещин происходит по коррозионно-усталостному механизму. Некоторыми факторами, способствующими этому процессу, являются высокий уровень действующих напряжений и воздействие на металл среды рабочего тела. Высокий уровень напряжений обусловлен следующими причинами:

- конструктивной концентрацией напряжений;
- остаточными напряжениями;
- пониженным запасом прочности;
- отклонениями от штатных режимов эксплуатации.

#### Плюсы и минусы работы выносных циклонов

Pros and cons of outside cyclones

Преимущества	Недостатки
<ul style="list-style-type: none"><li>– выносные циклоны в 5 раз более эффективны в сравнении с внутрибарабанными за счет большей высоты;</li><li>– процесс управляемый;</li><li>– более приемлемые монтажные работы</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>– высота по паровому пространству;</li><li>– при переходе с режима на режим возможен захват пара в опускной участок и вынос пара в экранные поверхности нагрева, что грозит их перегревом и разрушением</li></ul>

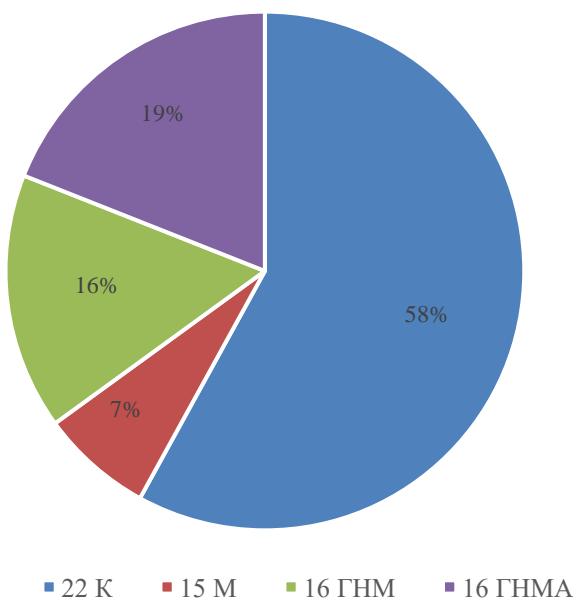


Рис. 6. Доля эксплуатируемых барабанов котлов, изготовленных из различных марок сталей  
Fig. 6. Proportion of operating boiler drums made of different steel grades

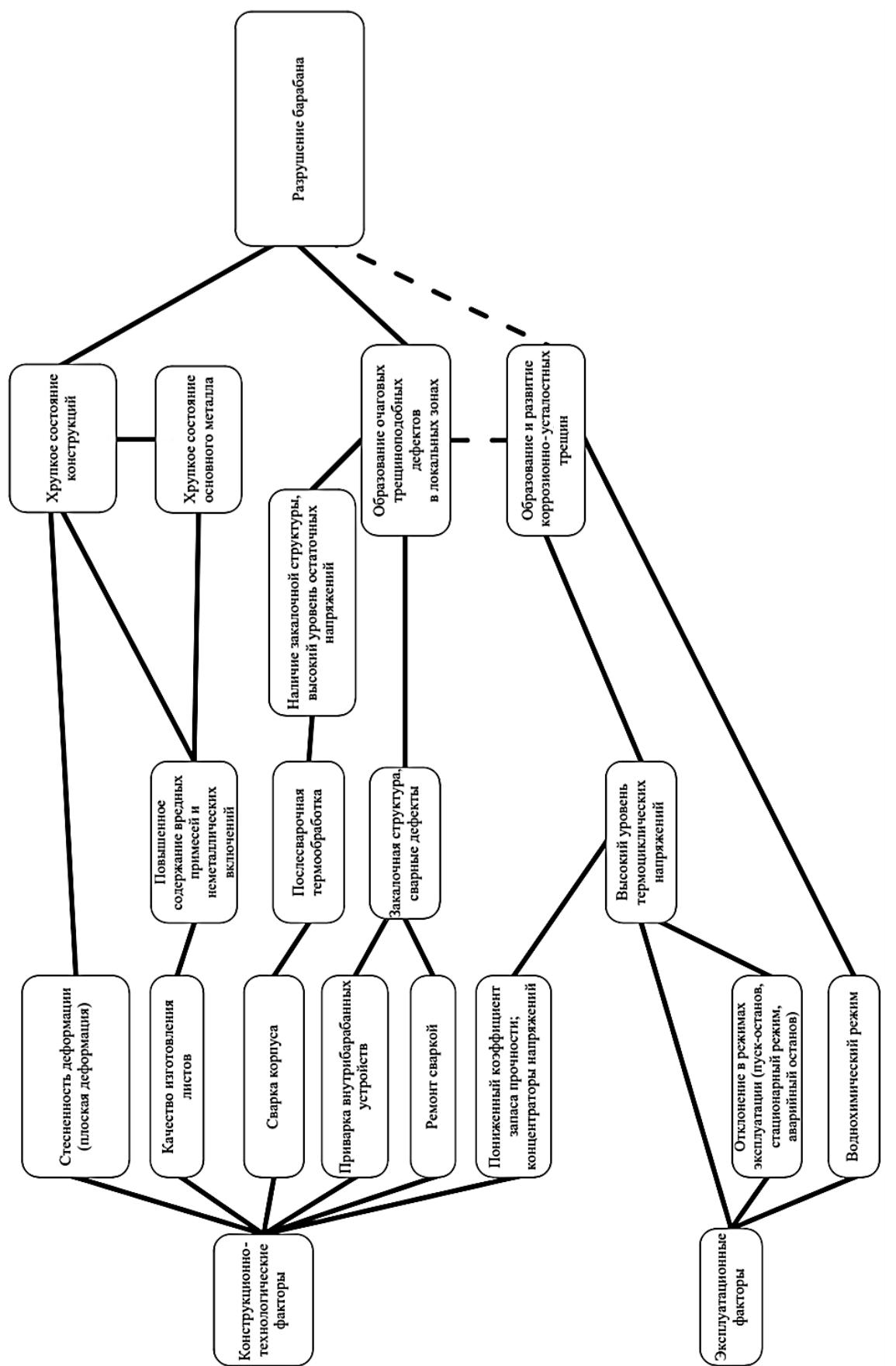


Рис. 7. Совокупность факторов, ответственных за разрушение барабанов котлов высокого давления  
Fig. 7. A combination of factors causing failures of high-pressure boiler drums

Из рис. 7. следует, что конструкционно-технологические факторы являются ключевыми в процессе формирования дефектов, вызывающих разрушение барабанов. При этом такие факторы, как производственные (конструкционные) и эксплуатационные, могут быть взаимосвязаны. К тому же, технологические дефекты могут развиваться в процессе эксплуатации при воздействии рабочих напряжений и среды теплоносителя одновременно. Поэтому огромное количество подверженных данным факторам барабанов стоит заменить в ближайшем будущем либо производить ремонты, которые будут также иметь огромные капиталовложения.

**Сравнительные характеристики сталей 16ГНМА и WB36.** Стали 16ГНМА и WB36 обладают очень близким химическим составом, за исключением наличия меди в WB36. Нормальная микроструктура данных сталей состоит из бейнита и феррита. При отпуске медь осаждается в виде мелких частиц и служит в качестве упрочняющего элемента. За счет этого сталь WB36 обладает повышенными прочностными характеристиками, что позволяет снизить толщину стенки барабана по сравнению со сталью 16ГНМА на 18–20% при расчете толщины стенки барабана котла по нормам РД 10-249-98. Сталь 16ГНМ при изготовлении барабанов была заменена на сталь 16ГНМА, отвечающую повышенным требованиям к качеству листов для изготовления барабанов котлов высокого давления<sup>6</sup>. Кроме того, была увеличена толщина стенки барабана с расчетных 92–95 мм до 115 мм.

В процессе эксплуатации трубопроводов и барабанов, изготовленных из стали WB36, были выявлены повреждения трубопроводов и разрушения барабанов котлов<sup>7</sup>. Анализ случаев выявил в качестве причины упрочнение материала, вызванное осаждением остатков растворенной меди при длительной эксплуатации при температуре 320–350°C. Это также приводит к уменьшению ударной вязкости и

дает существенный сдвиг вверх критической температуры металла. Вышеприведенные данные дают основания к тому, чтобы при расчете барабана из стали WB36 закладывать повышенный коэффициент запаса прочности.

Технология производства барабанов котлов подразумевает использование сварки для соединения элементов конструкции барабанов и при дальнейшей их эксплуатации. В связи с этим необходимо отметить наличие отработанной и проверенной технологии сварки элементов из стали 16ГНМА [13–21]. Для стали WB36 также существует разработанная и испытанная за рубежом технология сваривания элементов из этого материала. В большинстве своем используются запатентованные материалы и технологии.

## **КРАТКОЕ ОБОБЩЕНИЕ ПРЕДЛАГАЕМЫХ ВАРИАНТОВ ЗАМЕНЫ**

Замена барабана является непростым технологическим решением и может видоизменяться в зависимости от множества факторов [1]. Например, от наличия подъемной техники, от качества подъездных путей, котельного отделения главного корпуса, от ряда экономических факторов.

Наиболее явным вариантом замены барабана, отработавшего свой ресурс, представляется замена на аналогичный барабан, выполненный из подобных материалов. Перевозка, демонтажное обслуживание, работы по подъему столь тяжелого и негабаритного изделия в условиях действующей электростанции приведут к серьезным материальным затратам. В некоторых случаях такая замена не является возможной по условиям компоновки котельного отделения, отсутствия в нем штатных ГПМ.

Второй рассматриваемый вариант – замена барабана на барабан из более прочной стали. Это приведет к уменьшению массы изделия за счет утончения стенок, однако все внутрикорпусные устройства будут

<sup>6</sup>ОСТ 108.030.118-78. Листы из стали марки 16ГНМА для барабанов котлов высокого давления. Технические условия.

<sup>7</sup>Интеллектуальная диагностика и предиктивный анализ – основа цифровой энергетики / Интеграл [Электронный ресурс]. URL: <https://integral-russia.ru/2017/10/06/intellektualnaya-diagnostika-i-prediktivnyj-analiz-osnova-tsifrovoj-energetiki> (12.03.2022).

выполнены из тех же материалов. Можно предположить, что по схеме включения при такой замене изменений не будет. Новый барабан будет находиться на штатном месте и включаться по двухступенчатой или трехступенчатой схеме испарения в зависимости от типа котла. При замене барабана возможность улучшения качества котловой воды и насыщенного пара не рассматривается.

Третий вариант – замена барабана на альтернативную схему с малым барабаном, задачей которой является упрощение набора технологических мероприятий при замене барабана, минимизация изменения в конструкции и эксплуатации котла, улучшение качества котловой воды. Смысл модернизации состоит в организации устойчивого тока котловой воды по длине барабана, что увеличивало бы число ступеней испарения и, как следствие, повышало бы качество котловой воды и насыщенного пара.

Техническая реализация схемы с малым барабаном представляет собой барабан уменьшенной длины, но при этом стандартного диаметра, к которому подключается батарея циклонов, представленная на рис. 8. Циклоны в данной схеме могут быть соединены в различном порядке и зависеть от следующих факторов:

- паропроизводительности котла;
- длины малого барабана (площади зеркала испарения малого барабана);

- возможности компоновки малого барабана и батареи циклонов на верху котла;
- числа ступеней испарения.

Можно констатировать факт, что схема «барабан-циклон» с двумя или тремя ступенями испарения благополучно работает на всех котельных агрегатах. Наиболее распространенной является двухступенчатая схема испарения с четырьмя циклонами, включенными попарно справа и слева от барабана.

Замена барабана на батарею циклонов, с одной стороны, представляется наиболее перспективной, а с другой – требует проведения достаточно большого объема экспериментальных работ для исследования номинальных и переходных режимов эксплуатации котла, изменения автоматики агрегата.

Плюсы безбарабанной схемы при доставке и монтаже оборудования:

- логистика батарей циклонов;
- простота подъема циклонов;
- возможность сварки по месту установки циклонов.

Преимуществом безбарабанной схемы при эксплуатации котла является его повышенная маневренность в связи с уменьшением металлоемкости сепарационных устройств.

Минусы безбарабанной схемы:

- отсутствие данных исследований;
- сложность работы автоматических систем / удорожание работ по наладке;

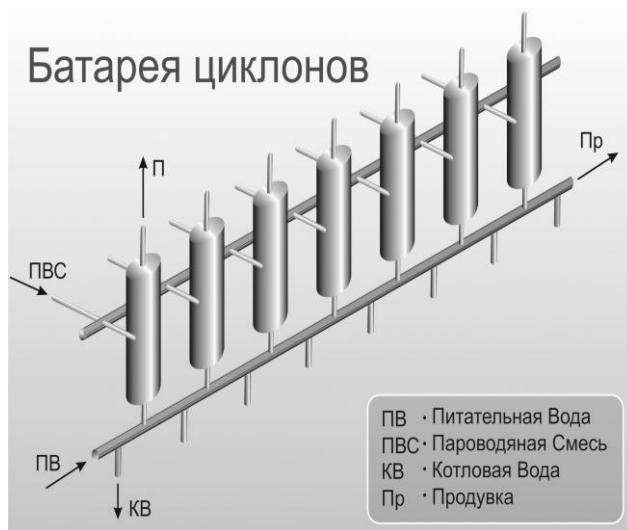


Рис. 8. Эскиз батареи циклонов  
Fig. 8. A sketch of a cyclone battery

– невозможность определения или оценки поведения уровня в циклонах при растопке котла, останове или при переходе с одного режима на другой, что связано с изменением формы мениска раздела фаз при центробежной сепарации.

Существует несколько технически возможных вариантов соединения батарей: параллельные, последовательные и последовательно-параллельные. Из этих вариантов могут формироваться секционные схемы.

Комбинация количества циклонов и их способ соединения в батарею зависят от следующих факторов:

– гидравлическое сопротивление – градиент давления по раздающему коллектору обусловлен большим количеством циклонов, к которым непосредственно происходит подача питательной воды;

– возможности попадания в «непродуваемые зоны» – в основном этот фактор надо учитывать при проектировании точки раздачи питательной воды;

– конструкции конкретного котла.

«Основные недостатки батарейных схем:

– меньшее зеркало испарения по сравнению с существующим барабаном (по расчетам ВТИ, зеркало испарения составляет меньшую в 17,5 раза площадь);

– аккумулирующая способность котла уменьшается по причине отсутствия запаса воды в барабане;

– в переходных режимах возникают угрозы уноса влаги в пароперегреватель или захвата

пара в опускную трубу за счет сложности регулирования уровней в циклонах;

– может возникать солевое запирание при неправильной подаче питательной воды;

– в батарейных схемах не предусмотрена возможность промывки пара» [1].

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Цель данной статьи состоит в проведении подробного анализа возможных технических решений при замене барабанов котлов, отработавших свой индивидуальный ресурс. Анализ технических решений проводился по двум главным категориям – технической и экономической.

В настоящее время для изготовления барабанов котлов используется сталь 16ГНМА, однако в современных котлах-utiлизаторах, импортируемых из-за рубежа, для изготовления барабана применяется сталь WB36. Таким образом, при замене барабана появляется возможность выбора материала изготовления. Ограничивающими параметрами при замене барабана являются три группы показателей: затраты на монтажные работы, изменение методов и способов эксплуатации котла после проведения замены (см. также [22]), а также качество котловой воды и перегретого пара.

По всему вышеизложенному можно сделать вывод, что при выборе технического решения по замене барабана рекомендуется выбирать альтернативную схему с малым барабаном.

## **Список источников**

1. Зройчиков Н.А., Горбуров Д.В. Комплексное обоснование замены барабанов, отработавших свой срок // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тез. докл. XVII Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (г. Москва, 2 марта 2017 г.). М.: МЭИ, 2011. Т. 3. С. 98.
2. Байдакова Н.В., Афонин А.В., Благочиннов А.В. Разработка алгоритма реализации ремонтной программы паровых котлов и турбин ТЭС по техническому состоянию энергетического оборудования // Надежность и безопасность энергетики. 2021. Т. 14. № 1. С. 40–44. <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2021-14-1-40-44>.
3. Попов А.Б. О предельных сроках эксплуатации энергетического оборудования // Энергетик. 2021. № 2. С. 8–14. <https://doi.org/10.34831/EP.2021.18.78.002>.
4. Федоров А.И., Петров И.П., Тоболь Д.А. Анализ влияния конструкции и состояния внутrikотловых устройств на надежность работы барабанных котлов // Электрические станции. 2006. № 6. С. 65–73.
5. Ларькин И.С., Овчинникова С.М. Анализ принципов сепарации в котлоагрегатах с точки зрения энергетической эффективности // Огарев-Online. 2014. № 23. [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-printsipov-separatsii-v-kotloagregatah-s-tochki-zreniya-energeticheskoy-effektivnosti> (12.03.2022).
6. Молдареева М.Д. Обзор сепарационных устройств барабанных котлов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тез. докл. XXVII Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (г. Москва, 11–12 марта 2021 г.). М.: Радуга, 2021. С. 877.
7. Мынкин К.П. Сепарационные устройства паровых котлов. М.: Энергия, 1971. 192 с.

8. Бузников Е.Ф. Циклонные сепараторы в паровых котлах. М.: Энергия, 1969. 248 с.
9. Ланин А.А., Дьяков Ю.Г., Рева В.В. Влияние технологии сварочного ремонта на хрупкую прочность барабанов высокого давления // Энергетик. 2018. № 4. С. 14–17.
10. Sultanov M.M., Baidakova N.V., Afonin A.V. Analysis of the technical condition of the equipment of generating systems // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2020. Vol. 1035. P. 012004. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1035/1/012004>.
11. Гринь Е.А. Хрупкие разрушения барабанов котлов высокого давления – основные причины и способы предотвращения // Теплоэнергетика. 2008. № 2. С. 40–45.
12. Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. М.: Машиностроение, 1981. 272 с.
13. Гринь Е.А., Анохов А.Е., Зеленский А.В., Федина И.В. Исследование металла барабанов паровых котлов из стали 16ГНМ после длительной эксплуатации // Теплоэнергетика. 2010. № 6. С. 37–42.
14. Ожигов Л.С., Митрофанов А.С., Толстолуцкая Г.Д., Василенко Р.Л., Руденко А.Г., Ружицкий В.В. [и др.]. Комплексные исследования металла барабанов котлов тепловых электростанций // Теплоэнергетика. 2017. № 5. С. 40–47. <https://doi.org/10.1134/S004036361705006X>.
15. Султанов М.М., Байдакова Н.В., Афонин А.В. Анализ оценки технического состояния оборудования генерирующих систем // Альтернативная и интеллектуальная энергетика: матер. II Междунар. науч.-практ. конф. (г. Воронеж, 16–18 сентября 2020 г.). Воронеж: ВГТУ, 2020. С. 312–313.
16. Косинов Ю.П., Романов А.А., Трофимов Ю.В. Совершенствование ремонта энергетического оборудования для обеспечения надежной его эксплуатации за пределами паркового ресурса и сроков службы / Тригенерация [Электронный ресурс]. URL:
- <http://www.combienergy.ru/stat/691-Sovershenstvovanie-remontaenergeticheskogo-oborudovaniya> (12.03.2022).
17. Grabchak E.P. Assessment of technical condition of power equipment in digital economy // Safety and reliability of the electric power industry. 2017. Vol. 10. Iss. 4. P. 268–274. <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2017-10-4-268-274>.
18. Kuryanov V.N., Sultanov M.M., Kuryanova E.V., Skopova E.M. Mathematical model of the processes of restoration of power equipment in power systems by criterion of the index of technical condition // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1683. P. 042041. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1683/4/042041>.
19. Sultanov M.M., Tyagunov M.G., Baydakova N.V. Procedure for assessment of technical condition of equipment of generating systems taking into account control effects on the basis of data management complex of monitoring and diagnostics system // Journal of Physics Conference Series. 2020. Vol. 1683. Iss. 4. P. 042035. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1683/4/042035>.
20. Kokorin E.L., Khalyasmaa A.I. Electrical equipment condition based maintenance strategy // International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering. 2016. <https://doi.org/10.1109/ICEPE.2016.7781439>.
21. Султанов М.М., Аракелян Э.К., Шестопалова Т.А., Смирнов А.А., Горбань Ю.А. Усовершенствование информационного обеспечения надежности и безопасности энергетического оборудования современных генерирующих систем на основе цифровой технологии «Блокчейн» // Новое в российской электроэнергетике. 2019. № 1. С. 6–13.
22. Моисеев Д.О., Охлопков А.В. Исследование особенностей эксплуатации паровых энергетических котлов при замене главного сепарационного устройства // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тез. докл. XXVIII Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (г. Москва, 17–19 марта 2022 г.). М.: Радуга, 2022. С. 705.

## References

1. Zrojchikov N.A., Gorburov D.V. Comprehensive justification for expired service life drum replacement. *Radioelektronika, elektrotekhnika i energetika: tezisy dokladov XVII Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii studentov i aspirantov = Radioelectronics, electrical engineering and power engineering: report abstracts of the 17<sup>th</sup> International scientific and technical conference of students and postgraduate students*. 2 March 2017, Moscow. Moscow: Moscow Power Engineering Institute; 2011, vol. 3, p. 98. (In Russ.).
2. Baidakova N.V., Afonin A.V., Blagochinnov A.V. Development of an implementation algorithm of CHP steam boiler and turbine repair program based on technical condition of power equipment. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry*. 2021;14(1):40-44. (In Russ.). <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2021-14-1-40-44>.
3. Popov A.B. On service life limits of power equipment. *Energetik*. 2021;2:8–14. (In Russ.). <https://doi.org/10.34831/EP.2021.18.78.002>.
4. Fedorov A.I., Petrov I.P., Tobol' D.A. Analysis of the influence of inter-boiler device design and state on drum boiler operation reliability. *Elektricheskie stantsii*. 2006;6:65-73. (In Russ.).
5. Larkin I.S., Ovchinnikova S.M. An analysis of separation principles in boilers in terms of energy efficiency. *Ogarev-Online*. 2014;23. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-printipov-separatsii-v-kotloagregatah-s-tochki-zreniya-energeticheskoy-effektivnosti> [Accessed 12th March 2022]. (In Russ.).
6. Moldareeva M.D. Review of separation devices for drum boilers. In: *Radioelektronika, elektrotekhnika i energetika: tezisy dokladov XXVII Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii studentov i aspirantov = Radioelectronics, electrical engineering and power engineering: report abstracts of the 27<sup>th</sup> International scientific and technical conference of students and postgraduate students*. 2019. № 1. С. 10–11. (In Russ.). <https://doi.org/10.1109/ICEPE.2019.9000001>.

- conference of students and postgraduate students. 11–12 March 2021, Moscow. Moscow: Raduga; 2021, p. 877. (In Russ.).
7. Mynkin K.P. *Separation devices of steam boilers*. Moscow: Energiya; 1971, 192 p. (In Russ.).
8. Buznikov E.F. *Cyclone separators in steam boilers*. Moscow: Energiya; 1969, 248 p. (In Russ.).
9. Lanin A.A., D'yakov Yu.G., Reva V.V. The effect of welding technology on the brittle strength of high-pressure drums. *Energetik*. 2018;4:14-17. (In Russ.).
10. Sultanov M.M., Baidakova N.V., Afonin A.V. Analysis of the technical condition of the equipment of generating systems. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020;1035:012004. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1035/1/012004>.
11. Grin E.A. Brittle fractures of the drums of high-pressure boilers: main causes and methods for preventing them *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2008;2:40-45. (In Russ.).
12. Makhutov N.A. *Deformation criteria of destruction and strength calculation of structural elements*. Moscow: Mashinostroenie; 1981, 272 p. (In Russ.).
13. Grin E.A., Anokhov A.E., Zelenskii A.B., Fedina I.V. Studying the metal of steam boiler drums made of grade 16GNM steel after its long-term operation. *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2010;6:37-42. (In Russ.).
14. Ozhigov L.S., Mitrofanov A.S., Tolstolutskaya G.D., Vasilenko R.L., Rudenko A.G., Ruzhytskyi V.V., et al. Comprehensive investigation of the metal in drums of boilers at thermal power stations. *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2017;5:40-47. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S004036361705006X>.
15. Sultanov M.M., Bajdakova N.V., Afonin A.V. Analysis of the technical condition assessment of generating system equipment. *Al'ternativnaya i intellektual'naya energetika: materialy II Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Alternative and intelligent power engineering: materials of the 2<sup>nd</sup> International scientific and practical conference*. 16–18 September 2020. Voronezh, Voronezh State Technical University; 2020;312-313. (In Russ.).
16. Kosinov Yu.P., Romanov A.A., Trofimov Yu. V. Improving power equipment repair to ensure its reliable operation beyond the fleet life and service life. *Trigeneratsiya*. Available from: <http://www.combienergy.ru/stat/691-Sovershenstvovanie-remontaenergeticheskogo-oborudovaniya> [Accessed 12th March 2022]. (In Russ.).
17. Grabchak E.P. Assessment of technical condition of power equipment in digital economy. *Safety and reliability of the electric power industry*. 2017;10(4):268-274. <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2017-10-4-268-274>.
18. Kuryanov V.N., Sultanov M.M., Kuryanova E.V., Skopova E.M. Mathematical model of the processes of restoration of power equipment in power systems by criterion of the index of technical condition. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1683:042041. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1683/4/042041>.
19. Sultanov M.M., Tyagunov M.G., Baydakova N.V. Procedure for assessment of technical condition of equipment of generating systems taking into account control effects on the basis of data management complex of monitoring and diagnostics system. *Journal of Physics Conference Series*. 2020;1683(4):042035. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1683/4/042035>.
20. Kokorin E.L., Khalyasmaa A.I. Electrical equipment condition based maintenance strategy. In: *International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering*. 2016. <https://doi.org/10.1109/ICEPE.2016.7781439>.
21. Sultanov M.M., Arakelyan E.K., Shestopalova T.A., Smirnov A.A., Gorban Yu.A. Improving information support of reliability and safety of modern generating system power equipment based on Blockchain digital technology. *Novoe v rossiskoj elektroenergetike*. 2019;1:6-13. (In Russ.).
22. Moiseev D.O., Okhlopkov A.V. Studying operation features of steam power boilers under main separator replacement. In: *Radioelektronika, elektrotehnika i energetika: tezisy dokladov XXVIII Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii studentov i aspirantov = Radio electronics, electrical engineering and energy: abstracts of the 28<sup>th</sup> International Scientific and Technical Conference of students and postgraduates*. 17–19 March 2022, Moscow, Moscow: Raduga; 2022, p. 705. (In Russ.).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Охлопков Андрей Владимирович,**  
ассистент кафедры теоретических основ  
теплотехники им М.П. Вукаловича,  
НИУ «МЭИ»,  
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14/1,  
Россия;  
начальник службы экспертизы и технического  
развития,  
ПАО «Мосэнерго»,  
115280, г. Москва, ТЭЦ-9, ул. Автозаводская, 12/1,  
Россия  
✉ [OhlopkovAV@mosenergo.ru](mailto:OhlopkovAV@mosenergo.ru)  
<http://orcid.org/0000-0002-0973-3863>

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Andrey V. Okhlopkov,**  
Assistant Professor of the M.P. Vukalovich Department  
of Theoretical Foundations of Heat Engineering,  
National Research University "Moscow Power  
Engineering Institute",  
14/1, Krasnokazarmennaya St., Moscow 111250,  
Russia;  
PJSC "Mosenergo",  
12/1, Avtozavodskaya St., CHP-9, Moscow 115280,  
Russia  
✉ [OhlopkovAV@mosenergo.ru](mailto:OhlopkovAV@mosenergo.ru)  
<http://orcid.org/0000-0002-0973-3863>

**Попов Николай Витальевич,**  
эксперт службы экспертизы и технического развития,  
ПАО «Мосэнерго»,  
115280, г. Москва, ТЭЦ-9, ул. Автозаводская, 12/1,  
Россия  
Popov\_NV@mosenergo.ru

**Моисеев Данил Олегович,**  
студент,  
НИУ «МЭИ»,  
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14/1,  
Россия  
MoiseevDO@mosenergo.ru

**Битней Владислав Дмитриевич,**  
эксперт службы экспертизы и технического развития,  
ПАО «Мосэнерго»,  
115280, г. Москва, ТЭЦ-9, ул. Автозаводская, 12/1,  
Россия  
BitneyVD@mosenergo.ru  
<http://orcid.org/0000-0003-2814-6709>

**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 31.01.2022; одобрена  
после рецензирования 28.06.2022; принята к  
публикации 08.02.2023.

**Nikolai V. Popov,**  
Expert of Expertise and Technical Development Service,  
PJSC "Mosenergo",  
12/1, Avtozavodskaya St., CHP-9, Moscow 115280,  
Russia  
Popov\_NV@mosenergo.ru

**Danil O. Moiseev,**  
Student,  
National Research University "Moscow Power  
Engineering Institute",  
14/1, Krasnokazarmennaya St., Moscow 111250, Russia  
MoiseevDO@mosenergo.ru

**Vladislav D. Bitney,**  
Expert of Expertise and Technical Development Service,  
PJSC "Mosenergo",  
12/1, Avtozavodskaya St., CHP-9, Moscow 115280,  
Russia  
BitneyVD@mosenergo.ru  
<http://orcid.org/0000-0003-2814-6709>

**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 31.01.2022; approved after  
reviewing 28.06.2022; accepted for publication  
08.02.2023.

## МЕТАЛЛУРГИЯ

Научная статья

УДК 544.6

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-161-173>

## Обоснование термофизического воздействия на электродную массу для получения равномерной структуры электродов из игольчатого кокса для руднотермических печей

В.Ю. Бажин<sup>1</sup>✉, К.А. Крылов<sup>2</sup>, Ф.Ю. Шариков<sup>3</sup><sup>1-3</sup>Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

**Резюме.** Цель – разработка технологии получения электродной массы из игольчатого кокса при термофизическом воздействии в контуре экструдера для получения углеррафитовых электродов с заданной структурой и свойствами для руднотермических печей. Для изучения свойств и составов электродных масс и электродов применялись порошковая рентгеновская дифрактометрия, электронная микроскопия, инфракрасная спектроскопия, калориметрия. Для оценки поведения электродов при нагреве в расплаве использовались методы математического и статистического анализа. Обработка данных выполнялась с использованием стандартных программных пакетов MSOffice. Эксперименты с углеррафитовыми материалами проводились в калориметрической лаборатории на базе Научного центра «Проблемы переработки минеральных и техногенных ресурсов» и кафедры металлургии Санкт-Петербургского горного университета с использованием разработанного и запатентованного прототипа экструдера. Определены и научно обоснованы условия и технологические параметры процесса обработки электродных масс (скорости экструзии и потока электродной массы, давление, скорость нагрева в заданном интервале температур для получения устойчивых структурных показателей электрода). Предлагаемый авторами способ термофизической обработки электродной массы через специальный экструдер в интервале температур 550–620°C и давлении на матрицу 60–80 МПа обеспечивает получение равномерно направленной структуры игольчатого кокса со средней толщиной игл 12–20 нм и длиной игольчатых фаз 5–10 мм, что подтверждается данными рентгеноструктурного анализа. Проведены испытания образцов электродов в расплаве печи в интервале температур 1500–1700°C. Полученные результаты подтверждают устойчивые показатели коэффициента термического расширения ( $0,3 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ), удельного электросопротивления (4,5–6,0 мкОм·м), что проявляется в снижении сублимации электрода, низких потерях общей массы на торце электрода, уменьшении степени окисления и количества разрушений его боковой поверхности. При полученной структуре электродов обеспечиваются устойчивые показатели тепло- и электропроводности наряду с высокими значениями теплопроводности, не уступающими показателям электродов и электродных масс импортного производства.

**Ключевые слова:** игольчатый кокс, электрод, руднотермическая печь, структура, трещиноустойчивость, электропроводность

**Для цитирования:** Бажин В.Ю., Крылов К.А., Шариков Ф.Ю. Обоснование термофизического воздействия на электродную массу для получения равномерной структуры электродов из игольчатого кокса для руднотермических печей // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 1. С. 161–173. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-161-173>.

## METALLURGY

Original article

## Substantiation of thermophysical action over electrode paste to achieve an even structure of electrodes of needle coke for thermal furnaces

Vladimir Yu. Bazhin<sup>1</sup>✉, Kirill A. Krylov<sup>2</sup>, Felix Yu. Sharikov<sup>3</sup><sup>1-3</sup>St. Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

**Abstract.** The aim was to develop a procedure for obtaining an electrode paste of needle coke in case of thermophysical action in the extruder circuit to produce graphitized carbon electrodes with the required structure and properties for thermal furnaces. To study the properties and composition of electrode pastes and electrodes, X-ray powder diffraction, electron microscopy, infrared spectroscopy, and calorimetry analysis were used. To evaluate the electrode behavior upon its heating in a melt, mathematical and statistical analysis was used. The data were processed using standard MS Office programs. Experiments with graphitized carbon materials were conducted in a calorimetric laboratory at the Scientific Center for Problems of Processing Mineral and Man-Made Resources, Department of Metallurgy, Saint Petersburg Mining University (Russia), using a developed proprietary prototype of the extruder. The conditions and technological parameters for processing electrode pastes were defined and substantiated (rate of extrusion and electrode paste flow, pressure, and heating rate within the defined temperature range to achieve stable structural indicators of electrodes). According to XRD data, the proposed method of thermophysical processing of an electrode paste via a special extruder within 550–620°C and a die pressure of 60–80 MPa provides an evenly directed structure of needle coke with an average needle thickness of 12–20 nm and a length of needle phases of 5–10 mm. The behavior of electrode samples was examined in the furnace melt within 1500–1700°C. The obtained stable levels of the thermal-expansion coefficient ( $0.3 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) and specific electrical resistance (4.5–6.0  $\mu\text{mOhm} \cdot \text{m}$ ) were manifested in reduced electrode sublimation, low losses of overall weight at the electrode end, decreased oxidation, and reduced damage on its side. The proposed electrode structure ensures stable heat and electrical conductivity, as well as high heat capacity, which levels are equivalent to those of imported electrodes and electrode pastes.

**Keywords:** needle coke, electrode, thermal furnace, structure, crack resistance, electrical conductivity

**For citation:** Bazhin V.Yu., Krylov K.A., Sharikov F.Yu. Substantiation of thermophysical action over electrode paste to achieve an even structure of electrodes of needle coke for thermal furnaces. *iPolytech Journal*. 2023;27(1):161-173. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-161-173>.

## ВВЕДЕНИЕ

Электроды как расходный продукт переработки игольчатого кокса и нефтяного кокса подвергаются технологическому обжигу и графитации с целью получения свойств и качеств, необходимых для высокой проводимости тока, химической и механической стойкости при дальнейшей эксплуатации в печах [1, 2]. Заданная структура, как и состав электродов, обеспечивает устойчивую работу электрических печей, повышает производительность и снижает энергопотребление [3, 4]. Повышение энергетической эффективности химико-металлургических производств является первостепенной задачей промышленности любого государства наряду с получением продукции высокого качества [5, 6]. В существующих технологиях производства металлов в руднотермических печах существует проблема эксплуатации электродов из игольчатого кокса, связанная непосредственно с повышением срока их службы [7, 8]. В некоторых случаях на руднотермических печах по этим причинам при снижении производительности процесса увеличивается расход электроэнергии на 20–30% [9]. Так, во время нагрева шихтовых материалов и их плавления происходит разрушение электродов, которое проявляется в виде образования микротрещин, выгорания и осыпания боковой

поверхности в результате химической эрозии, механического износа торцевых частей на протяжении всего периода эксплуатации печи [10, 11].

Спрос на продукцию со стороны отечественных и мировых производителей графитированных электродов очень высок, потребность составляет более 150 тыс. т/год. Мировые цены на игольчатый кокс в 2021–2022 гг. повысились, что привело к росту цен на электроды на 25–27% [12]. Таким образом, на сегодняшний день в России отсутствует промышленное производство игольчатого кокса на электродных заводах [13, 14], исследования в этой области проводятся в недостаточной степени.

Попытки создания новых технологий в рамках импортозамещения, основанных на использовании новых типов катализаторов и различных органических добавок, а также изменение режимов полуококсования без дополнительного физического воздействия на последней стадии не привели к качественному улучшению свойств отечественных электродных масс на основе игольчатого кокса [15, 16]. В настоящее время при наличии в составе группы компаний «ЭНЕРГОПРОМ» трех электродных заводов (Новочеркасский завод – НЭЗ, Челябинский завод – ЧЭЗ, Новосибирский завод – НЭЗ) отсутствуют технологии

производства игольчатого кокса – основного компонента углекрафитового электрода. Для металлургических печей используются электроды, выполненные из импортного игольчатого кокса, поставляемого компаниями США, Японии и Китая. Передовые технологии производства высококачественного электродного кокса связаны с компаниями из США [17, 18]. Данные аналитического исследования подтверждают, что для большинства импортных электродных масс из игольчатого кокса при однородной толщине частиц характерно их значительное отклонение по длине иглообразных фаз, что может быть обусловлено несоответствием температуры обжига во всем объеме электродной массы и в отдельно взятой грануле кокса [19].

В свою очередь это приводит к появлению неравномерной структуры самого электрода с образованием зон с неоднородными полостями и дефектами. Существующие отечественные технологии, которые разрабатываются в рамках программы импортозамещения, не обеспечивают необходимую структуру и свойства электродных масс и самих

электродов [20]. Научно-технический интерес представляет разработка дополнительной стадии в виде термофизического воздействия на структуру и свойства углекрафитовых материалов и является актуальным обоснованием технологических основ в период формирования структуры на стадии обработки «зеленых масс» во вращающихся печах [21, 22] и в периодах полуоксования при последующей экструзии жидко-твёрдой массы игольчатого кокса при определении рациональных технологических параметров в заданном интервале [23].

На рис. 1 показана зависимость увеличения длины частиц кокса (зародышей иглообразных фаз) в зависимости от температуры обжига во вращающейся печи (материалы авторов).

Целью исследования является получение высококачественных структурированных электродов для металлургических печей. Для выполнения поставленной цели необходимо решить задачи, связанные с повышением электропроводности, химической и механической стойкости при улучшении структуры.

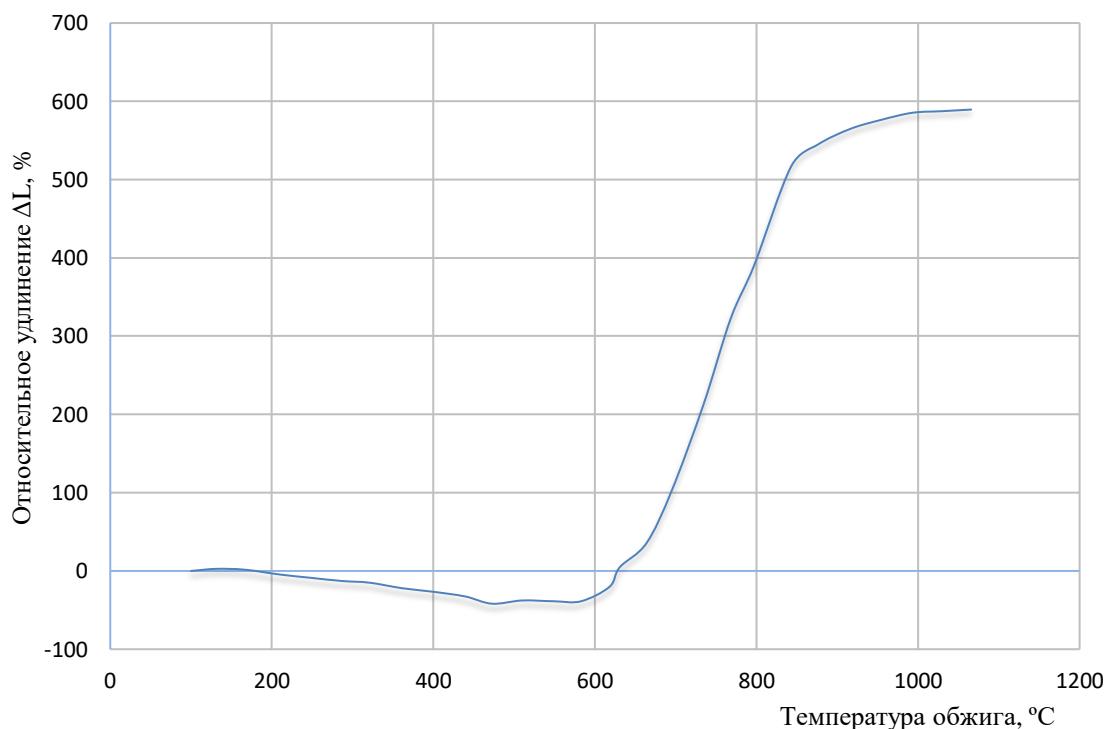


Рис. 1. Зависимость величины относительного удлинения частиц кокса в зависимости от температуры обжига  
Fig. 1. The value of coke grain relative elongation vs calcination temperature

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И ХОД ЭКСПЕРИМЕНТА

Предварительная обработка «зеленой» электродной массы во вращательных печах не обеспечивает необходимой структуры кокса, и, согласно данным рентгеноструктурного анализа, в ее образцах присутствуют сгустки связующего пека и зародыши игл различной длины и толщины [24, 25]. Межплоскостные расстояния между иглами также имеют различные расстояния. С другой стороны, во время обжига решаются задачи по снижению содержания серы, удалению металлоксодержащих фаз, внешней и внутренней влаги за счет перемешивания кокса в печи, что доказывает необходимость проведения данной технологической операции.

Для апробации предлагаемой технологии производства электродных масс из игольчатого кокса был разработан прототип экструдера (рис. 2 – материалы авторов) для физического воздействия на электродную массу [26]. Предварительные этапы работы показали возможность применения экструдера для прессования шихты электродной массы.

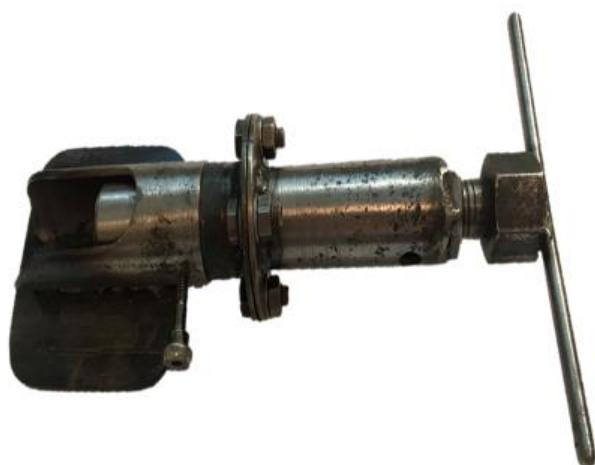


Рис. 2. Часть экструдера  
Fig. 2. Part of an extruder

Для решения вопроса по получению упорядоченной структуры для электродной массы из игольчатого кокса предложен способ производства игольчатого кокса с упорядоченной структурой, а также разработана и запатентована опытно-промышленная установ-

ка по производству игольчатого кокса, принцип работы которой позволяет проводить одновременно термическую (коксование) и физическую (экструзия под давлением) обработку предварительно обожженной электродной массы для ее последующего структурирования и придания необходимых свойств, соответствующих игольчатому коксу [27]. На рис. 3 представлена схема промышленного экструдера и часть его узлов для реализации получения игольчатого кокса при нагреве и одновременно наложенном давлении и перемешивании массы с получением игл заданной размерности с высокой плотностью упаковки.

В установку для получения игольчатого кокса, основным исполнительным органом которой является экструдер с движущимся шнеком для комплексного воздействия на обожженную электродную массу, входят следующие конструктивные элементы (см. рис. 3): 1 – бункер; 2 – нагревательная камера; 3 – кран-клапан; 4 – электродвигатель транспортирующего устройства; 5 – транспортирующее устройство; 6 – корпус шнека; 7 – шнек; 8 – упорно-радиальный подшипник; 9 – электродвигатель корпуса шнека; 10 – формующая насадка; 11 – формующие каналы; 12 – патрубок; 13 – двухрежимная передача; 14 – электродвигатель шнека; 15 – среднее основание; 16 – нижнее основание; 17 – верхнее основание; 18 – центробежный вентилятор; 19 – одновременная передача; 20 – воздухораспределительная система; 21 – воздуховыпускные каналы.

Экструзионная установка включает в себя корпус, формующую насадку на торце корпуса, установленный внутри корпуса шнек, электропривод для вращения шнека. При этом установка состоит из верхней, средней, нижней секций, которые соединены между собой с возможностью съема. К верхнему основанию крепится нагревательная камера с возможностью съема, в верхней стенке нагревательной камеры выполнены отверстия, в первое жестко закреплен переходник, к которому крепится с возможностью съема бункер, а в другое с возможностью съема установлен кран-клапан.

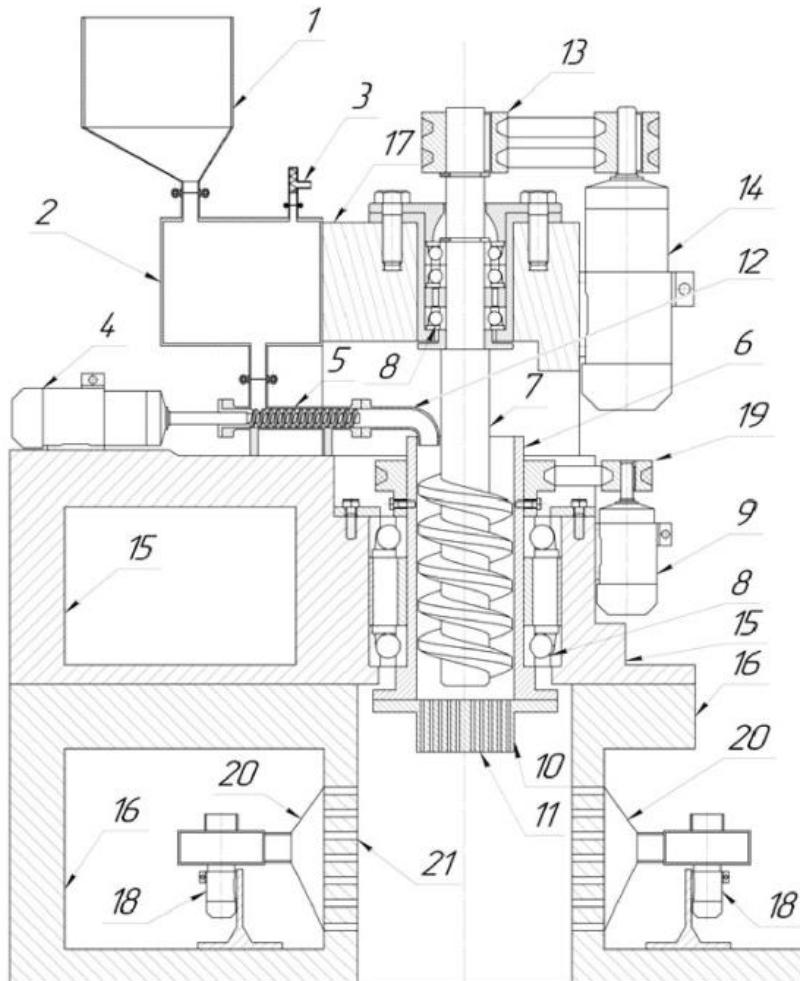


Рис. 3. Схема установки для производства игольчатого кокса [27]  
Fig. 3. Design of a needle coke production unit [27]

В нижней стенке нагревательной камеры выполнено отверстие, в которое установлен переходник, который соединен с возможностью съема транспортирующего устройства, соединенного с одного конца с электродвигателем транспортирующего устройства, а другой стороны – с патрубком, конец которого изогнут и закреплен сверху в корпусе шнека, установленного в жестко закрепленных в среднем основании упорнорадиальных подшипников, а корпус шнека через одноременную передачу соединен с электродвигателем корпуса шнека. После нагрева в бункере до температуры полукоксования 450–550°C [28] обожженная электродная масса может выпускаться направленно через насадку при выключенном шнеке под давлением плунжера 10–100 Па, придавая различную скорость выхода электродной массы из формующей насадки,

которая крепится снизу к корпусу шнека с возможностью съема. В насадке выполнены формующие каналы круглого сечения. Здесь корпус шнека также устанавливается в упорнорадиальных подшипниках, которые жестко закреплены в верхнем основании, а шнек через двухременную передачу соединяется с собственным электродвигателем. В боковых стенках средней и нижней секций, которые находятся друг напротив друга, не менее двух рядов воздуховыпускных каналов, внутри нижнего основания крепятся центробежные вентиляторы, сопла которых соединены с воздухораспределительной системой, установленной напротив воздуховыпускных каналов.

Подготовленная во вращающейся обжиговой печи необработанная масса при ее исходной температуре 150–250°C направляется в бункер 1 разработанной установки, откуда

будет осуществляться питание экструдера. Вся загруженная в бункер 1 масса самотеком транспортируется в нагревательную камеру 2, где производится ее нагрев до температуры коксования 550–620°C. Из нагревательной камеры 2 производится сброс образовывающегося газа через кран-клапан 3. Из нагревательной камеры 2 материал транспортирующим устройством 5, которое приводится в движение электродвигателем 4, перемещается в шнек 7, который транспортирует материал к формующей насадке 10 и выдавливается через формующие каналы 11. Корпус шнека 6 вращается в упорно-радиальных подшипниках 8 вместе с формующей насадкой 10 и шнеком 7. Корпус шнека 6 вращается электродвигателем корпуса шнека 9, который передает вращение через одноременную передачу 19. За счет вращения корпуса шнека 6 и формующей насадки 10, материал, выдавливаясь из формующих каналов 11, отклоняется к внутренним стенкам нижнего основания 16, вследствие чего дополнительно вытягивается. Шнек 7 вращается относительно верхнего основания 17 в упорно-радиальных подшипниках 8. Шнек 7 приводится в движение электродвигателем шнека 14 и передающей вращение двухременной передачей 13. Расположенные на нижнем основании 16 центробежные вентиляторы 18 нагнетают воздух в установку через воздухораспределительную систему 20 по воздуховыпускным каналам 21, при этом происходит охлаждение продукта. Данные вентиляторы нагнетают воздух в воздуховыпускные каналы, которые распределяют поток воздуха. Воздуховыпускные каналы 21 расположены по касательной во внутренней стенке нижнего основания 16 в зоне разгрузки продукта, что позволяет создать в зоне разгрузки вихревой поток, который не только охлаждает продукт, но и обеспечивает переплетение частиц игольчатого кокса между собой с образованием в результате более крупного готового продукта.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследования образцов электродной массы на различных стадиях обработки проводили методом сканирующей электронной

микроскопии (SEM от англ. Scanning Electron Microscope), которые были выполнены на Tescan Vega 3, оснащенном детекторами вторичных электронов (SE от англ. Secondary Electron) и обратно рассеянных электронов (BSE от англ. Backscattered Electron) сканирующим электронным микроскопе (оснащенным энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией (EDS от англ. Energy Dispersive X-ray Spectroscopy). Данный прибор использовался для изучения морфологии и композиционного распределения элементов поверхности углеродитовой электродной массы [29–31]. SEM-изображения были получены при 10 кВ и 20 мА с использованием детектора SE для низковакуумной SEM (UVD от англ. Ultra Variable-Pressure) и детектора BSE. В работах [32, 33] была изучена стадия технологического процесса подготовки электродной массы и созданы математические модели ее обработки во вращающихся печах. На рис. 4 (материалы авторов) приведены снимки исходной микроструктуры зеленой и обожженной массы в трубчатой вращающейся печи, на которой видны зародыши иглообразных фаз различного размера.

В разработанной конструкции экструдера была проведена обработка 5 образцов электродной массы при различных технологических параметрах. В результате проведенных опытов при заданных параметрах (температура коксования, давлении на матрицу, скорости вращения шнека) была получена структурированная электродная масса. Рентгеноструктурный анализ образцов обработанной массы показал наилучшие результаты и структуру матрицы в интервале температур 550–620°C при давлении 60–80 МПа. Заданные условия обеспечивают получение равномерно направленной структуры игольчатого кокса [34] со средним размером 12–20 нм и длиной игольчатых фаз 5–10 мм по всему объему электродной массы. На рис. 5 (материалы авторов) показаны типичные структуры для одного из образцов при различных вариантах работы экструдера.

В исходном состоянии (см. рис. 4 а) зародыши иглообразных фаз расположены неупорядоченно, имеются участки с большими

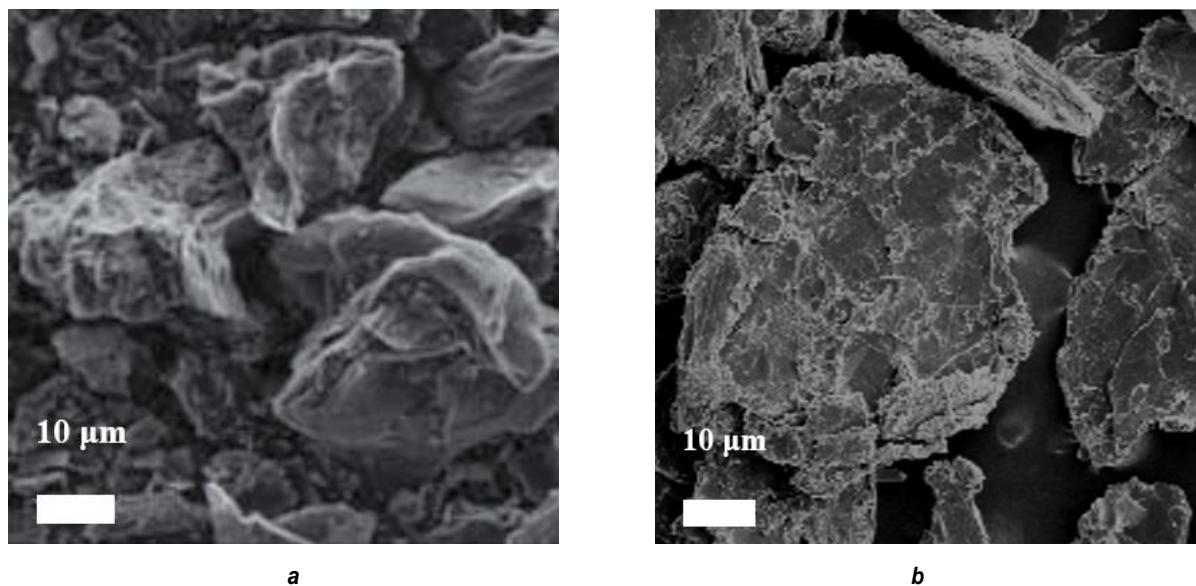


Рис. 4. Результаты SEM-анализа углекрафитовой электродной массы: а – «зеленая» масса перед загрузкой в печь; б – обожженная масса после 1000–1200 °C  
Fig. 4. Results of carbon graphite electrode mass SEM analysis: a – "Green" mass before loading into the furnace; b – mass roasted at 1000-1200 °C

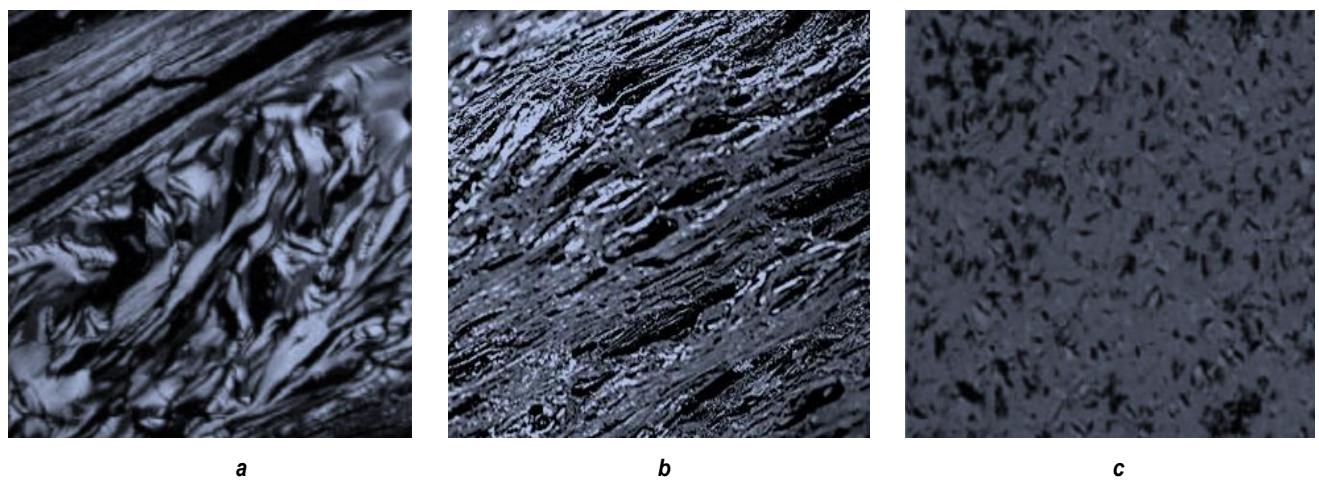


Рис. 5. Типичные структуры для одного из образцов при различных вариантах работы экструдера;  
а – исходное состояние после обжига во вращающейся печи; б – после нагрева в экструдере при выключенном шнеке; в – структура электродной массы после полной обработки в экструдере

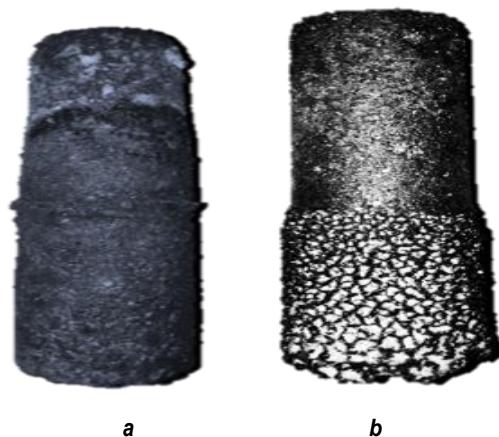
Fig. 5. Typical structures for one of the samples under different operating conditions of the extruder;  
a – initial state after calcination in the rotary kiln; b – state after heating in the extruder with the turned off screw feed;  
c – electrode mass structure after complete processing in the extruder

межплоскостными расстояниями. С другой стороны, после экструдера с выключенным шнеком (рис. 4 б) видно, что при наложенном давлении в режиме коксования (550–750 °C) формируется направленная структура электродной массы с плотной упаковкой из игл, минимальным расстоянием между иглами. При включенном шнеке (рис. 4 с) и при заданных скоростях экструзии размеры игл

становятся практически одинаковыми, и образуется равномерная структура игольчатого кокса. Таким образом, при помощи термофизического воздействия удалось улучшить структуру игольчатого кокса. Эти факторы влияют на показатели термического расширения и потенциальное качество электрода.

Полученные образцы углекрафитовых материалов (УГМ) после формовки и обжига

выдерживали в расплаве в температурном интервале от 700–1500°C, затем исследовали их структуру и свойства.



**Рис. 6. Внешний вид образцов сформованных из структурированной электродной массы (а) и из стандартного углеродграфитового материала (б) после выдержки в расплаве**

**Fig. 6. Exterior of samples formed from a structured electrode mass (a) and from a standard carbon graphite material (b) after the exposure to the melt**

Из полученной после термофизического структурирования электродной массы из игольчатого кокса производили образцы и помещали их в расплав при близких к промышленным условиям температурах 1400–1800°C в течение 24 ч. По сравнению со стандарт-

ными образцами электроды из структурированной массы имеют меньше разрушений, меньшее окисление поверхности и сохраняют заданную первоначально форму (рис. 6 – материалы авторов).

Для полученных образцов с наилучшими структурными показателями проводили тестирование для определения значений удельной электропроводности, предела прочности объемной плотности и коэффициента линейного термического расширения. В таблице представлены результаты испытаний для лучшего образца УГМ из структурированной массы по сравнению со стандартным образцом, вырезанным из углеродграфитового электрода на основе игольчатого кокса российского производства (марки «Энергопром»).

По показателям образцы из структурированной УГМ не уступают стандартным образцам<sup>4</sup>. В этой связи предлагается ввод новой стадии операции в рамках цикла производства углеродграфитовых электродов – термофизической обработки УГМ после обжига, обеспечивающей качественное улучшение структуры электродной массы в контуре экструдера – установки для производства игольчатого кокса. На стандартной технологической схеме (рис. 7 – материалы авторов) эта операция выделена зеленым цветом.

#### Качественные характеристики электродов Quality characteristics of electrodes

Наименование показателя	Углеродграфитовый материал	
	стандартный	структурный
Удельное электрическое сопротивление, мкОм·м	5,0	7,0
Предел прочности при изгибе, МПа	16,0	12,0
Объемная плотность, г/см <sup>3</sup>	1,75	1,60
Температурный коэффициент линейного расширения в интервале температур от 20 до 520°C, 10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup>	1,4	1,7

<sup>4</sup>Электродная масса // АО «ЭПМ-МЕНЕДЖМЕНТ» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.el6.ru/ru/klientam/produkcziya-i-tehnologii/produkcziya/uglerodnaya-massa/> (28.03.2022).



Рис. 7. Модернизированный цикл производства углеграфитовых электродов  
Fig. 7. Modernized carbon graphite electrode production cycle

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования доказывают целесообразность ввода операции термического и физического воздействий на электродную массу после обжига во вращающейся печи. Оригинальная конструкция установки повышает производительность и позволяет получать высококачественный игольчатый кокс с заданным размером иглообразных фаз (длины и толщины), который может применяться в производстве крупногабаритных графитированных электродов для электродуговых плавильных печей.

Проведенные исследования с электродными массами на разработанном экструдере показали, что при оптимально выбранных параметрах (температура коксования, давлении на матрицу, скорости вращения шнека) получается равномерно структурированная масса

игольчатого кокса:

- при давлении 50–70 Па обеспечивается устойчивое формирование иглообразных фаз;
- в интервале полукоксования происходит устойчивое разделение твердых иглообразных фаз и пекового остатка;
- при скорости вращения шнека 15–20 об/мин достигается устойчивая длина игл 10–155 мм по всему объему;
- при температуре на выходе из экструдера наблюдается срастание иглообразных фаз посредством тонких прослоек пека.

Таким образом, предлагаемый вариант переработки «зеленой» массы позволяет получить образцы электродов, которые соответствуют показателям в соответствии со стандартом качества ИСО 2000.

## Список источников

1. Мартынов С.А., Масько О.Н., Федоров С.Н. Перспективные системы управления энергетическим режимом рудно-термических печей // Цветные металлы. 2022. № 4. С. 87–94. <https://doi.org/10.17580/tsm.2022.04.11>.
2. Feshchenko R.Yu., Feschenko E.A., Eremin R.N., Erokhina O.O., Dydin V.M. Analysis of the anode paste charge composition // Metallurgist. 2020. Vol. 64. № 7. С. 615–622. <https://doi.org/10.1007/s11015-020-01037-1>.
3. Yoon Juhee, Moon Seongbak, Ha Son, Lim Hyung-Kyu, Jin Hyoung-Joon, Yun Young Soo. Nanoconfinement effect of nanoporous carbon electrodes for ionic liquid-based aluminum metal anode // Journal of Energy Chemistry. 2022. Vol. 74. P. 121–127. <https://doi.org/10.1016/j.jecchem.2022.06.048>.
4. Zhang Mingjiang, Liao Siyang, Xu Jian, Li Lingfang, Chen Yixuan, Zhu Xinchun, System static voltage stability analysis considering load characteristics of electrolytic aluminum // Energy Reports. 2022. Vol. 8. P. 1112–1121. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.02.162>.
5. Shestakov A.K., Sadykov R.M., Petrov P.A. Multifunctional crust breaker for automatic alumina feeding system of aluminum reduction cell // E3S Web Conferences. 2021. Vol. 266. P. 09002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126609002>.
6. Литвиненко В.С., Петров Е.И., Васильевская Д.В., Яковенко А.В., Наумов И.А., Ратников М.А. Оценка роли государства в управлении минеральными ресурсами // Записки Горного института. 2022. С. 1–17. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.100>.
7. Опалев А.С., Алексеева С.А. Методическое обоснование выбора оптимальных режимов работы оборудования схемы стадиального вывода концентрата при обогащении железных руд // Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 593–602. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.80>.
8. Шестаков А.К., Петров П.А., Николаев М.Ю. Автоматическая система обнаружения видимых выбросов в электролизном цехе алюминиевого завода на основе технического зрения и нейронной сети // Металлург. 2022. № 10. С. 105–112. [https://doi.org/10.52351/00260827\\_2022\\_10\\_105](https://doi.org/10.52351/00260827_2022_10_105).
9. Moghadam H.A., Jabbari M., Daneshmand S., Jazi S.R., Khosravi A. Effects of TiO<sub>2</sub>/SiC/SiO<sub>2</sub> coating on graphite electrode consumption in sublimation and oxidation states as determined by EAF simulation and experimental methods // Surface and Coatings Technology. 2021. Vol. 420. P. 127340. <https://doi.org/10.1016/j.surcoat.2021.127340>.
10. Горланов Е.С., Кавалла Р., Поляков А.А. Электролитическое производство алюминия. Обзор. Часть 2. Перспективные направления развития // Цветные металлы. 2020. № 10. С. 42–49. <https://doi.org/10.17580/tsm.2020.10.06>.
11. Горланов Е.С., Бричкин В.Н., Поляков А.А. Электролитическое производство алюминия. Обзор. Часть 1. Традиционные направления развития // Цветные металлы. 2020. № 10. С. 36–41. <https://doi.org/10.17580/tsm.2020.02.04>.
12. Литвиненко В.С., Цветков П.С., Двойников М.В., Бусланов Г.В. Барьера реализации водородных инициатив в контексте устойчивого развития глобальной энергетики // Записки Горного института. 2020. Т. 244. С. 428–438. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.4.5>.
13. Saevarsdottir G., Magnusson T., Kvande H. Reducing the carbon footprint: primary production of aluminum and silicon with changing energy systems // Journal of Sustainable Metallurgy. 2021. Vol. 7. P. 848–857. <https://doi.org/10.1007/s40831-021-00429-0>.
14. Габдулхаков Р.Р., Рудко В.А., Ефимов И.И., Спекторук А.А. Оценка качества игольчатого кокса для производства графитированных электродов металлургических печей // Цветные металлы. 2022. № 7. С. 46–56. <https://doi.org/10.17580/tsm.2022.07.05>.
15. Gabdulkhakov R.R., Rudko V.A., Pyagay I.N. Methods for modifying needle coke raw materials by introducing additives of various origin (review) // Fuel. 2022. Vol. 310. Part A. P. 122265. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122265>.
16. Mondal S., Yadav A., Pandey V., Sugumaran V., Bagai R., Kumar R., et al. Dissecting the cohesiveness among aromatics, saturates and structural features of aromatics towards needle coke generation in DCU from clarified oil by analytical techniques // Fuel. 2021. Vol. 304. P. 121459. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121459>.
17. Ying Liu, Dengpeng Chai, Wei Wang, Dongsheng Li, Junwei Wang, Yudong Liang, et al. Influences of heat treatment on the oxidation and corrosion behavior of Cu–Ni–Fe inert anodes for aluminium electrolysis // Journal of Alloys and Compounds. 2020. Vol. 832. P. 154848. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154848>.
18. Ouzilleau P., Gheribi A.E., Chartrand P. Prediction of CO<sub>2</sub>/CO formation from the (primary) anode process in aluminium electrolysis using an electrothermodynamic model (for coke crystallites) // Electrochimica Acta. 2018. Vol. 259. P. 916–929. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.10.175>.
19. Sharikov F.Y., Sharikov Y.V. The study of petroleum coke thermal stability and its further modification – experimental approach and modelling // WJERT. 2020. Vol. 6. Iss. 3. P. 113–126. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.wjert.org/admin/assets/article\\_issue/38042020/1588149831.pdf](https://www.wjert.org/admin/assets/article_issue/38042020/1588149831.pdf) (12.03.2022).
20. Фещенко Р.Ю., Ерохина О.О., Еремин Р.Н., Матыльский Б.Э. Анализ методов повышения устойчивости к окислению углеррафитовых изделий, используемых в металлургических и химических агрегатах // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 3. С. 380–390. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-380-390>.
21. Hu Wen-jia, Wang Qi, Zhao Xue-fei, Yang Song-tao, Wu Hu-lin, Zhang Song, et al. Relevance between various phenomena during coking coal carbonization. Part 3: Understanding the properties of the plastic layer during coal carbonization // Fuel. 2021. Vol. 292. P. 120371. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120371>.
22. Liu Jie, Shi Xue-mei, Cui Lou-wei, Fan Xiao-yong, Shi Jun-he, Hu Xian, et al. Effect of raw material composition on the structure of needle coke // Journal of Fuel Chemistry

- and Technology. 2021. Vol. 49. Iss. 4. P. 546–553. [https://doi.org/10.1016/S1872-5813\(21\)60026-9](https://doi.org/10.1016/S1872-5813(21)60026-9).
23. Li Mingfeng, Wang Yanjun, Yang Shanglu, Tao Wu, Zhang Guotao. Improving mechanical properties and electrode life for joining aluminum alloys with innovatively designated Newton ring electrode // Journal of Manufacturing Processes. 2021. Vol. 64. P. 948–959. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.02.001>.
24. Ismagilov Z.R., Sozinov S.A., Popova A.N., Zaporin V.P. Structural analysis of needle coke // Coke and Chemistry. 2019. Vol. 62. Iss. 4. P. 135–142. <https://doi.org/10.3103/S1068364X19040021>.
25. Cheng Junxia, Lu Zhenjie, Zhao Xuefei, Chen Xingxing, Liu Yuhong. Green needle coke-derived porous carbon for high-performance symmetric supercapacitor // Journal of Power Sources. 2021. Vol. 494. P. 229770. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.229770>.
26. Gutiérrez E., Salazar E., Salinas A., Deaquino R., Ponce A., Yacaman M., et al. Texture, microstructure and mechanical properties of AA7075-graphite composites produced through mechanical alloying and hot-extrusion // Materials Chemistry and Physics. 2023. Vol. 296. P. 127323. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.127323>.
27. Пат. № 2784238, Российская Федерация, С10В 55/00. Установка для получения игольчатого кокса / В.Ю. Бажин, И.И. Белоглазов, Е.С. Ильин, В.Б. Кусков, К.А. Крылов; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». Заявл. 31.03.2022; опубл. 23.11.2022. Бюл. № 33.
28. Yumeng Yang, Jiangzhong Liu, Mingyi Chen. Superfine comminution characteristics of low-rank coal pyrolysis semi-cokes and evolution of fragmentation fractal dimension // Fuel. 2022. Vol. 325. P. 124991.
29. Bangaru S.S., Wang Chao, Zhou Xu, Hassan Marwa. Scanning electron microscopy (SEM) image segmentation for microstructure analysis of concrete using U-net convolutional neural network // Automation in Construction. 2022. Vol. 144. P. 104602. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104602>.
30. Nohl J.F., Farr N.T.H., Sun Yige, Hughes G.M., Cussen S.A., Rodenburg C. Low-voltage SEM of air-sensitive powders: from sample preparation to micro/nano analysis with secondary electron hyperspectral imaging // Micron. 2022. Vol. 156. P. 103234. <https://doi.org/10.1016/j.micron.2022.103234>.
31. Asadi P., Beckingham L.E. Intelligent framework for mineral segmentation and fluid-accessible surface area analysis in scanning electron microscopy // Applied Geochemistry. 2022. Vol. 143. P. 105387. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105387>.
32. Sharikov Yu.V., Sharikov, F.Yu., Krylov, K.A. Mathematical model of optimum control for petroleum coke production in a rotary tube kiln // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2021. Vol. 55. P. 711–719. <https://doi.org/10.1134/S0040579521030192>.
33. Sharikov F.Yu., Sharikov Yu.V., Krylov K.A. Selection of key parameters for green coke calcination in a tubular rotary kiln to produce anode petcoke // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2020. Vol. 15. No. 23. P. 2904–2912.
34. Xu Xian, Cui Louwei, Shi Junhe, Liu Jiaoqiao, Zhu Yonghong, Tian Yafei, et al. Effects of co-carbonization of medium and low temperature refined pitch and high temperature refined pitch on the structure and properties of needle coke // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2023. Vol. 169. P. 105783. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2022.105783>.

## References

1. Martynov S.A., Masko O.N., Fedorov S.N. Innovative ore-thermal furnace control systems. *Chernye Metally*. 2022;4:87-94. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2022.04.11>.
2. Feshchenko R.Yu., Feschenko E.A., Eremin R.N., Erokhina O.O., Dydin V.M. Analysis of the anode paste charge composition. *Metallurgist*. 2020;64(7):615-622. <https://doi.org/10.1007/s11015-020-01037-1>.
3. Yoon Juhee, Moon Seongbak, Ha Son, Lim Hyung-Kyu, Jin Hyoung-Joon, Yun Young Soo. Nanoconfinement effect of nanoporous carbon electrodes for ionic liquid-based aluminum metal anode. *Journal of Energy Chemistry*. 2022;74:121-127. <https://doi.org/10.1016/j.jecchem.2022.06.048>.
4. Zhang Mingqiang, Liao Siyang, Xu Jian, Li Lingfang, Chen Yixuan, Zhu Xinchun, System static voltage stability analysis considering load characteristics of electrolytic aluminum. *Energy Reports*. 2022;8:1112-1121. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.02.162>.
5. Shestakov A.K., Sadykov R.M., Petrov P.A. Multifunctional crust breaker for automatic alumina feeding system of aluminum reduction cell. In: *E3S Web Conferences*. 2021;266:09002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126609002>.
6. Litvinenko V.S., Petrov E.I., Vasilevskaya D.V., Yakovchenko A.V., Naumov I.A., Ratnikov M.A. Assessment of the role of the state in the management of mineral resources. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2022;1-17. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.100>.
7. Opalev A.S., Alekseeva S.A. Methodological substantiation of the choice for optimal modes of equipment operation during the stage-wise concentrate removal in iron ores beneficiation. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2022;256:593-602. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.80>.
8. Shestakov A.K., Petrov P.A., Nikolaev M.Yu. Automatic system for detecting visible outliers in electrolysis shop of aluminum plant based on technical vision and a neural network. *Metallurg*. 2022;10:105-112. [https://doi.org/10.52351/00260827\\_2022\\_10\\_105](https://doi.org/10.52351/00260827_2022_10_105).
9. Moghadam H.A., Jabbari M., Daneshmand S., Jazi S.R.,

- Khosravi A. Effects of TiO<sub>2</sub>/SiC/SiO<sub>2</sub> coating on graphite electrode consumption in sublimation and oxidation states as determined by EAF simulation and experimental methods. *Surface and Coatings Technology*. 2021;420:127340. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127340>.
10. Gorlanov E.S., Kavalla R., Polyakov A.A. Electrolytic production of aluminium. Review. Part 2. Promising development trends. *Tsvetnye Metally*. 2020;10:42-49. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2020.10.06>.
11. Gorlanov E.S., Brichkin V.N., Polyakov A.A. Electrolytic production of aluminium. Review. Part 1. Conventional development trends. *Tsvetnye Metally*. 2020;10:36-41. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2020.02.04>.
12. Litvinenko V.S., Tsvetkov P.S., Dvoynikov M.V., Buslaev G.V. Barriers to implementation of hydrogen initiatives in the context of global energy sustainable development. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2020;244:428-438. <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.4.5>.
13. Saevardsdottir G., Magnusson T., Kvande H. Reducing the carbon footprint: primary production of aluminum and silicon with changing energy systems. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2021;7:848-857. <https://doi.org/10.1007/s40831-021-00429-0>.
14. Gabdulkhakov R.R., Rudko V.A., Efimov I.I., Spektoruk A.A. Quality assessment of needle coke used in the production of graphite electrodes for metallurgical furnaces. *Tsvetnye Metally*. 2022;7:46-56. <https://doi.org/10.17580/tsm.2022.07.05>.
15. Gabdulkhakov R.R., Rudko V.A., Pyagay I.N. Methods for modifying needle coke raw materials by introducing additives of various origin (review). *Fuel*. 2022;310(A):122265. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122265>.
16. Mondal S., Yadav A., Pandey V., Sugumaran V., Bagai R., Kumar R., et al. Dissecting the cohesiveness among aromatics, saturates and structural features of aromatics towards needle coke generation in DCU from clarified oil by analytical techniques. *Fuel*. 2021;304:121459. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121459>.
17. Ying Liu, Dengpeng Chai, Wei Wang, Dongsheng Li, Junwei Wang, Yudong Liang, et al. Influences of heat treatment on the oxidation and corrosion behavior of Cu–Ni–Fe inert anodes for aluminium electrolysis. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020;832:154848. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154848>.
18. Ouzilleau P., Gheribi A.E., Chartrand P. Prediction of CO<sub>2</sub>/CO formation from the (primary) anode process in aluminium electrolysis using an electrothermodynamic model (for coke crystallites). *Electrochimica Acta*. 2018;259:916-929. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.10.175>.
19. Sharikov F.Y., Sharikov Y.V. The study of petroleum coke thermal stability and its further modification – experimental approach and modelling. *WJERT*. 2020;6(3):113-126. Available from: [https://www.wjert.org/admin/assets/article\\_issue/38042020/1588149831.pdf](https://www.wjert.org/admin/assets/article_issue/38042020/1588149831.pdf) [Accessed 12th March 2022].
20. Feshchenko R.Yu., Erokhina O.O., Eremin R.N., Matylskiy B.E. Analysis of methods for increasing the oxidation resistance of carbon-graphite products used in metallurgical and chemical units. *iPolytech Journal*. 2021;25(3):380-390. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-380-390>.
21. Hu Wen-jia, Wang Qi, Zhao Xue-fei, Yang Song-tao, Wu Hu-lin, Zhang Song, et al. Relevance between various phenomena during coking coal carbonization. Part 3: Understanding the properties of the plastic layer during coal carbonization. *Fuel*. 2021;292:120371. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120371>.
22. Liu Jie, Shi Xue-mei, Cui Lou-wei, Fan Xiao-yong, Shi Jun-he, Hu Xian, et al. Effect of raw material composition on the structure of needle coke. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*. 2021;49(4):546-553. [https://doi.org/10.1016/S1872-5813\(21\)60026-9](https://doi.org/10.1016/S1872-5813(21)60026-9).
23. Li Mingfeng, Wang Yanjun, Yang Shanglu, Tao Wu, Zhang Guotao. Improving mechanical properties and electrode life for joining aluminum alloys with innovatively designated Newton ring electrode. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021;64:948-959. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.02.001>.
24. Ismagilov Z.R., Sozinov S.A., Popova A.N., Zaporin V.P. Structural analysis of needle coke. *Coke and Chemistry*. 2019;62(4):135-142. <https://doi.org/10.3103/S1068364X19040021>.
25. Cheng Junxia, Lu Zhenjie, Zhao Xuefei, Chen Xingxing, Liu Yuhong. Green needle coke-derived porous carbon for high-performance symmetric supercapacitor. *Journal of Power Sources*. 2021;494:229770. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.229770>.
26. Gutiérrez E., Salazar E., Salinas A., Deaquino R., Ponce A., Yacaman M., et al. Texture, microstructure and mechanical properties of AA7075-graphite composites produced through mechanical alloying and hot-extrusion. *Materials Chemistry and Physics*. 2023;296:127323. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.127323>.
27. Bazhin V.Yu., Beloglazov I.I., Il'in E.S., Kuskov V.B., Krylov K.A. *Installation for needle coke production*. Patent RF. no. 2784238; 2022. (In Russ.).
28. Yumeng Yang, Jiangzhong Liu, Mingyi Chen. Superfine comminution characteristics of low-rank coal pyrolysis semi-cokes and evolution of fragmentation fractal dimension. *Fuel*. 2022;325:124991. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124991>.
29. Bangaru S.S., Wang Chao, Zhou Xu, Hassan Marwa. Scanning electron microscopy (SEM) image segmentation for microstructure analysis of concrete using U-net convolutional neural network. *Automation in Construction*. 2022;144:104602. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104602>.
30. Nohl J.F., Farr N.T.H., Sun Yige, Hughes G.M., Cussen S.A., Rodenburg C. Low-voltage SEM of air-sensitive powders: from sample preparation to micro/nano analysis with secondary electron hyperspectral imaging. *Micron*. 2022;156:103234. <https://doi.org/10.1016/j.micron.2022.103234>.
31. Asadi P., Beckingham L.E. Intelligent framework for mineral segmentation and fluid-accessible surface area analysis in scanning electron microscopy. *Applied Geochemistry*. 2022;143:105387.

[https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105387.](https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105387)  
32. Sharikov Yu.V., Sharikov, F.Yu., Krylov, K.A. Mathematical model of optimum control for petroleum coke production in a rotary tube kiln. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2021;55:711-719.  
[https://doi.org/10.1134/S0040579521030192.](https://doi.org/10.1134/S0040579521030192)  
33. Sharikov F.Yu., Sharikov Yu.V., Krylov K.A. Selection of key parameters for green coke calcination in a tubular rotary

kiln to produce anode petcoke. *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2020;15(23):2904-2912.  
34. Xu Xian, Cui Louwei, Shi Junhe, Liu Jiaoqiao, Zhu Yong-hong, Tian Yafei, et al. Effects of co-carbonization of medium and low temperature refined pitch and high temperature refined pitch on the structure and properties of needle coke. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2023;169:105783. [https://doi.org/10.1016/j.jaap.2022.105783.](https://doi.org/10.1016/j.jaap.2022.105783)

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Бажин Владимир Юрьевич,**  
д.т.н., профессор,  
заведующий кафедрой металлургии,  
Санкт-Петербургский горный университет,  
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2, Россия  
✉ [bazhin-alfoil@mail.ru](mailto:bazhin-alfoil@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0001-8231-3833>

**Крылов Кирилл Андреевич,**  
аспирант,  
Санкт-Петербургский горный университет,  
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2, Россия  
[krylov-j@yandex.ru](mailto:krylov-j@yandex.ru)  
<https://orcid.org/0000-0002-0587-8192>

**Шариков Феликс Юрьевич,**  
д.т.н.,  
главный научный сотрудник,  
Санкт-Петербургский горный университет,  
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2, Россия  
[felix101t@mail.ru](mailto:felix101t@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0002-1139-3968>

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Vladimir Yu. Bazhin,**  
Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Head of the Metallurgy Department,  
Saint Petersburg Mining University,  
21 line 2, Vasilievsky Island, Saint Petersburg,  
199106, Russia  
✉ [bazhin-alfoil@mail.ru](mailto:bazhin-alfoil@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0001-8231-3833>

**Kirill A. Krylov,**  
Postgraduate Student,  
Saint Petersburg Mining University,  
21 line 2, Vasilievsky Island, Saint Petersburg  
199106, Russia  
[krylov-j@yandex.ru](mailto:krylov-j@yandex.ru)  
<https://orcid.org/0000-0002-0587-8192>

**Felix Yu. Sharikov,**  
Dr. Sci. (Eng.),  
Leading Chief Researcher,  
Saint Petersburg Mining University,  
21 line 2, Vasilievsky Island, Saint Petersburg  
199106, Russia  
[felix101t@mail.ru](mailto:felix101t@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0002-1139-3968>

**Contribution of the authors**  
The authors contributed equally to this article.

**Conflict of interests**  
The authors declare no conflict of interests.

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

**Information about the article**  
The article was submitted 12.12.2022; approved after reviewing 17.01.2023; accepted for publication 16.03.2023.

**Вклад авторов**  
Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

**Конфликт интересов**  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

**Информация о статье**  
Статья поступила в редакцию 12.12.2022; одобрена после рецензирования 17.01.2023; принятая к публикации 16.03.2023.

## МЕТАЛЛУРГИЯ



Научная статья

УДК 669.334.3

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-174-187>

## Исследования по перколяционному выщелачиванию меди и серебра из лежальных хвостов

**Л.М. Каримова<sup>1</sup>✉, Е.Т. Кайралапов<sup>2</sup>, Б.Е. Мансуров<sup>3</sup>**<sup>1-3</sup>ТОО «КазГидромедь», г. Караганда, Республика Казахстан

**Резюме.** Цель – проведение исследований по извлечению серебра методом перколяционного выщелачивания на окомкованной пробе лежальных хвостов с органическим связующим реагентом Alcotac® CB6. Для проведения лабораторных испытаний по перколяционному выщелачиванию использовалась колонна высотой 0,5 м и внутренним диаметром 56 мм. Окомкование проводили в грануляторе барабанного типа при расходе реагента Alcotac® CB6 (фирма BASF, Германия) 800 г/т, влажность гранул составляла 8–10% при крупности 8–10 мм. Определение состава проб определяли с учетом данных оптических и электронномикроскопических исследований, рентгеноструктурного, локального рентгеноспектрального, рентгенофлуоресцентного и масс-спектрометрии с индуктивно связанный плазмой. Объектом исследований явились лежальные хвосты Жезказганской обогатительной фабрики (Ульятауская область, Республика Казахстан), в которой основная часть меди представлена окисленными минералами – 78,47%, в сульфидных минералах содержится 21,53%. Продемонстрированы результаты физико-химических исследований с определением вещественного состава пробы и наблюдения по перколяционному выщелачиванию меди и серебра из лежальных хвостов Жезказгана. Исследования по выщелачиванию меди осуществляли в два этапа с использованием в качестве растворителя раствора серной кислоты. Последующей стадией являлся перевод серебра в раствор цианированием. Извлечение меди в раствор составило 88,55% с расходом серной кислоты 80,0 кг/т хвостов, серебра – 75,31% с расходом цианида натрия 0,55 кг/т. Проведенные исследования по выщелачиванию в два этапа показали эффективность применения предварительного окомкования лежальных хвостов с реагентом Alcotac® CB6. В процессе выщелачивания окомкованный материал обладает достаточной пористостью и проницаемостью и обеспечивает доступ цианистых растворов к поверхности благородных металлов.

**Ключевые слова:** окомкование, выщелачивание, колонна, раствор, извлечение, цианирование

**Для цитирования:** Каримова Л.М., Кайралапов Е.Т., Мансуров Б.Е. Исследования по перколяционному выщелачиванию меди и серебра из лежальных хвостов // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 1. С. 174–187. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-174-187>.

## METALLURGY

Original article

## Research into percolation leaching of copper and silver from aged tailings

**Lyutsiya M. Karimova<sup>1</sup>✉, Yerlan T. Kairalapov<sup>2</sup>, Berik E. Mansurov<sup>3</sup>**<sup>1-3</sup>KazHydroMed LLP, Karaganda, Kazakhstan

**Abstract.** This paper investigates the extraction of silver by percolation leaching of a pelletized sample of aged tailings with organic binder Alcotac® CB6. Laboratory studies of percolation leaching were conducted using a column with a height of 0.5 m and an internal diameter of 56 mm. Pelletization was performed in a drum-type pelletizer with the consumption of Alcotac® CB6 (BASF, Germany) of 800 g/t and the pellet moisture content of 8–10% and size of 8–10 mm. The sample composition was analyzed taking into account the data obtained by optical tests, electron microscopy, X-ray diffraction, local X-ray spectrometry, X-ray fluorescence analysis, and inductively coupled plasma mass spectrometry.

The research object was aged tailings of the Zhezkazgan processing plant (Ulytau region, the Republic of Kazakhstan), where copper is mostly represented by oxidized minerals (78.47%) and sulfide minerals (21.53%). The results of physical and chemical analyses conducted to determine the material composition of samples are presented, along with observations over percolation leaching of copper and silver from Zhezkazgan aged tailings. The copper leaching studies included two stages using a sulfuric acid solution as a solvent. The subsequent stage was silver dissolution by cyanide leaching. Copper extraction into the solution comprised 88.55% with a sulfuric acid consumption of 80.0 kg/t; silver extraction comprised 75.31% with a sodium cyanide consumption of 0.55 kg/t. The conducted studies showed the efficiency of using Alcotac® CB6 for percolation leaching of pre-pelletized aged tailings. During leaching, the pelletized material exhibits sufficient porosity and permeability, thus providing access of cyanic solutions to the surface of precious metals.

**Keywords:** pelletizing, leaching, column, solution, recovery, cyanidation

**For citation:** Karimova L.M., Kairalapov E.T., Mansurov B.E. Research into percolation leaching of copper and silver from aged tailings. *iPolytech Journal*. 2023;27(1):174-187. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-174-187>.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Для переработки сырья с низким содержанием золота, старых отвалов золотоизвлекательных предприятий применяют метод кучного выщелачивания. Технология кучного выщелачивания характеризуется многими достоинствами, а самыми важными являются минимальные эксплуатационные и капитальные затраты<sup>4</sup> [1–8].

Способ кучного выщелачивания позволил отрабатывать не только крупные месторождения бедных руд, но и вскрышные породы, техногенное золотосодержащее сырье (хвосты обогащения руд цветных и драгоценных металлов) и небольшие по запасам месторождения (от нескольких десятков килограммов до 1–2 т), расположенные в малоосвоенных районах [9, 10]. Кучное выщелачивание (КВ) является одним из эффективных методов извлечения золота из золотосодержащих руд и применяется для переработки бедных руд и отвалов. В экономическом отношении эффективно применение кучного выщелачивания для относительно богатых руд, небольших по запасам месторождений [4].

Одним из основных условий эффективной работы предприятий, применяющих кучное выщелачивание на месторождениях с высоким содержанием глинистых руд, является улучшение фильтрационных свойств выщелачиваемого массива. Выщелачивание глинистых и шламистых руд в результате их кольматации резко снижает просачивание раствора через слой руды, а иногда и полностью останавливает процесс. Для улучшения фильтрационных свойств штабеля кучного выщелачивания широко применяются техно-

логии окомкования глинистых руд [11–22]. Эти технологии нашли широкое применение при промышленной отработке золотосодержащих руд коры выветривания, отвалов россыпной и коренной золотодобычи с высоким содержанием глинистых фракций.

Считается, что для процесса окомкования применимы цемент, известь, отходы ряда производств и различные композиции на их основе. В работе [11] окомкование различных типов руд проводят при среднем расходе цемента на тонну руды 5–6 кг, хлорной извести – 3,5–4 кг. В результате прочность окомкованной руды с таким содержанием связующего материала составляет 73,5–78,4 кПа. Дальнейшее увеличение содержания связующего материала приводит к снижению проницаемости окомкованной руды, увеличению времени выщелачивания, а также ведет к удорожанию процесса рудоподготовки. Кроме этого, при окомковании глинистых руд и хвостов обогащения увеличение расхода цемента может приводить к обратному эффекту, проявляющемуся в снижении прочности окатышей [15].

Из окомкованного материала формируют штабеля и осуществляют просачивание через них цианидных растворов. В процессе окомкования сырья связываются композиции, сокращается продолжительность операции и расход воды или цианидного раствора. Для ряда сырьевых объектов продолжительность КВ такого вида сырья в сравнении с традиционным вариантом сокращается от 2 до 5 раз [22–25].

В работе<sup>5</sup> проводят кучное выщелачивание золота с использованием пероксида водорода и ацетата натрия для повышения

<sup>4</sup>Плаксин И.Н. Металлургия благородных металлов: учебник. М., 1958. С. 51–183.

скорости растворения и извлечения золота из окисленных малосульфидных руд месторождения Сари-Гунай. В их исследованиях по биохимическому кучному выщелачиванию бедных руд авторы работы [26] показали, что бактериальное вскрытие золота приводит к экономии цианида натрия.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Задачей исследований является интенсификация извлечения серебра методом кучного выщелачивания из лежальных медных хвостов Жезказганского месторождения.

Для изучения использовали лежальные хвосты Жезказганской обогатительной фабрики (ЖОФ) (Ультауская обл., Республика Казахстан). Результаты химического и фазового анализа по содержанию меди в сульфидных и окисленных минералах представлены в табл. 1, 2.

Содержание основных ценных компонентов составило: меди – 0,144%, серебра – 2,509 г/т.

Удельный вес хвостов составил 2,78 г/см<sup>3</sup>; насыпная плотность – 1,28 г/см<sup>3</sup>; пористость – 53,96%.

Из данных табл. 2 следует, что основная часть меди представлена окисленными минералами – 78,47%, в сульфидных минералах содержится 21,53% меди.

Результаты ситового анализа дробленой до крупности -2+0 мм пробы хвостов приведены в табл. 3.

Из рассмотренных ниже данных табл. 3 следует, что содержание класса -0,071 мм в

лежальных хвостах составляет 65,13%, из них 50,65% в классе -0,045+0. Наибольшее содержание меди составило 0,33% и серебра – 6,60 г/т наблюдается в классе +0,2 мм, а среднее содержание повышается в классах крупнее -0,045+0 мм: меди – 0,16%, серебра – 2,20 г/т. Для определения степени окисленности хвостов в различных классах крупности выполнен фазовый анализ меди по классам. Результаты представлены в табл. 4.

**Таблица 1.** Химический состав лежальных хвостов  
**Table 1.** Chemical composition of mature tailings

Компоненты	Содержание, %	Компоненты	Содержание, %	Компоненты	Содержание, %
Cu	0,144	As	0,002144	Cd	н.о
Au, г/т	н.о	Sn	н.о	Bi	н.о
Ag, г/т	2,509	P	0,0422	Sn	н.о
S	0,125	Pb	0,045	MgO	2,01
Fe	2,099	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,15	Mo	н.о
Zn	0,07	SiO <sub>2</sub>	59,12	CaO	4,84

**Таблица 2.** Фазовый анализ меди лежальных хвостов  
**Table 2.** Phase analysis of copper from mature tailings

Форма нахождения металла	Содержание Cu, % (абс.)	Распределение Cu, % (отн.)
Cu сульфидных минералов	0,031	21,53
Cu окисленных минералов	0,113	78,47
Итого:	0,144	100,0

Проба на 78,47% представлена окисленными минералами (из них на 44,44% – хризоколлой), на 21,53 – сульфидными. Наибольшее распределение окисленных форм отмечено в классе крупности -0,045+0 мм – 52,13% (или 66,44% всех окисленных минералов).

**Таблица 3.** Результаты ситового анализа  
**Table 3.** Screen analysis results

Класс крупности, мм	Выход %	Содержание, %				Распределение металлов, %			
		Cu	Fe	Ag, г/т	Si	Cu	Fe	Ag, г/т	Si
+0,2	3,82	0,33	2,33	6,60	66,58	8,74	4,24	10,05	4,30
-0,2+0,1	20,60	0,13	1,71	3,25	60,56	18,48	16,77	26,68	21,10
-0,1+0,071	10,45	0,11	1,87	2,05	65,61	7,71	9,31	8,54	11,60
-0,071+0,045	14,48	0,10	1,78	1,79	62,23	10,47	12,28	10,33	15,24
-0,045+0	50,65	0,16	2,38	2,20	55,74	54,60	57,41	44,41	47,75
Исходная проба	100,0	0,14	2,10	2,51	59,12	100,0	100,0	100,0	100,0

<sup>5</sup>Есенгараев Е.К. Интенсификация процесса кучного выщелачивания золота с применением различных реагентов и различных физико-химических методов: дис. ... д-ра философии (PhD): 6Д070900. Алматы, 2022. 117 с.

Таблица 4. Фазовый анализ меди по классам крупности

Table 4. Copper phase analysis by size class

Класс, мм	Выход, %	Содержание Cu, %				Распределение Cu, %			
		всего	суль-фиды	окисленные минералы		всего	суль-фиды*	окисленные минералы	
				всего	в т.ч.			всего	малахит хризоколла
-0,5+0,2	3,82	0,33	0,21	0,12	0,08	0,04	8,74	5,46	3,28 2,20 1,08
-0,2+0,1	20,60	0,13	0,05	0,08	0,03	0,05	18,48	6,73	11,75 4,73 7,02
-0,1+0,071	10,45	0,11	0,05	0,06	0,06	0,01	7,71	3,34	4,36 4,01 0,35
-0,071 +0,045	14,48	0,10	0,04	0,07	0,05	0,02	10,47	3,53	6,95 4,78 2,17
-0,045+0	50,65	0,16	0,01	0,15	0,05	0,10	54,60	2,47	52,13 18,32 33,82
Исходная проба	100,0	0,14	0,03	0,11	0,05	0,06	100,0	21,53	78,47 34,04 44,44

\*сульфидные минералы.

Минералогические исследования выполнены в отраженном свете на оптическом микроскопе OLYMPUS BX-53 с использованием видеокамеры SIMAGIS XS-3CU и программного обеспечения для анализа изображений Минерал С7 компании «SIAMS».

В процессе минералогических исследований установлено, что рудная минерализация лежальных хвостов не является существенной. Чаще всего встречается гематит. В значительно меньшем количестве отмечаются образования халькозина+дигенита, халькопирита, борнита, пирита, магнетита, ковеллина. Отмечено единичное зерно самородной меди.

При изучении брикетированного препарата отвальных хвостов довольно часто отмечались соединения, аналогичные по оптическим константам, соответствующие углеродистому веществу, образующему пористые или ячеистые, редко плотные агрегаты размером до 0,15 мм (рис. 1 а, б).

Гематит встречается в виде включений точечных (рис. 2 а) и неправильных форм размером от 0,001 мм до 0,05 мм, сконцентрированных в виде одиночной или многочисленной вкрапленности в обломках нерудного материала. Реже образует коррозионные структуры практически полного замещения магнетита с образованием псевдоморфоз мартита размером до 0,13 мм (рис. 2 б).

Халькозин+дигенит находятся в тесной ассоциации друг с другом, преимущественно в виде включений в нерудных обломках (рис. 3 а, б), очень редко в виде самостоятельных зерен. Размерность халькозина+дигенита составляет от первых микрон до 0,1 мм.

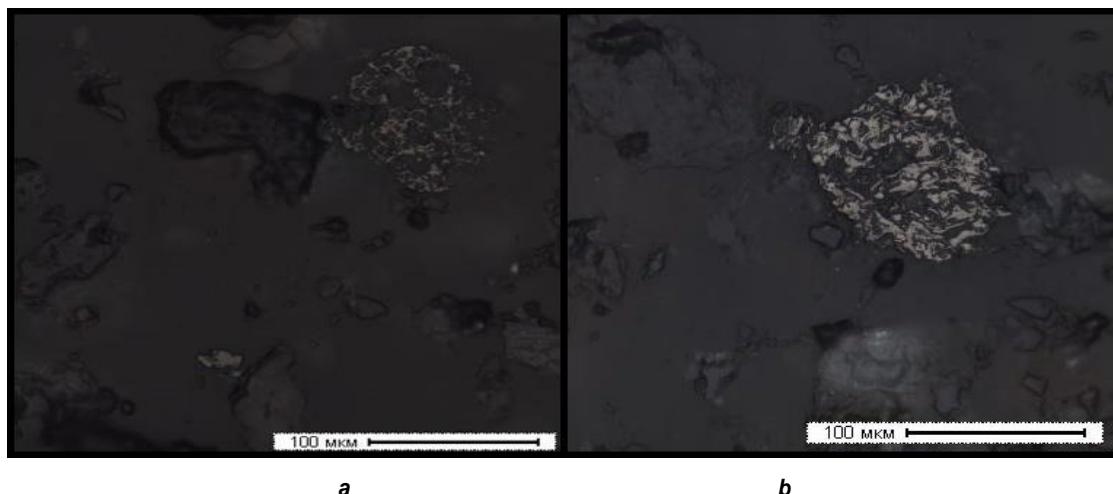


Рис. 1. Углеродистое вещество. Увеличение 200  
 Fig. 1. Carbonaceous matter. 200x magnification

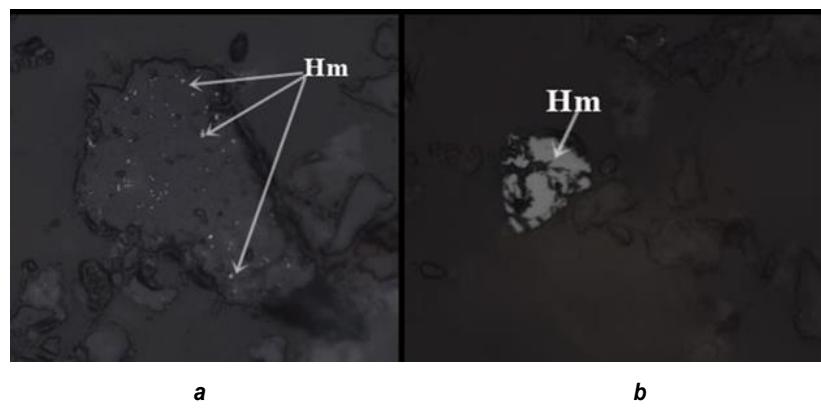


Рис. 2. Выделения гематита. Увеличение 200 (Hm – гематит)  
Fig. 2. Hematite segregations. 200×magnification (Hm – hematite)

Халькопирит образует тонкие, часто трещиноватые, в различной степени выщелоченные зерна неправильных форм, в основном в виде срастаний или включений в обломках нерудных минералов (рис. 4 а), реже наблюдаются его тонкие пластинчатые включения в борните (рис. 5 б), изредка встречается в свободном состоянии (рис.

6 б). Размерность включений халькопирита составляет от 0,001 мм до 0,11 мм.

Борнит встречается в виде зерен и их обломков в срастании с нерудными минералами (рис. 5 а, б), очень редко в свободном состоянии. Часто замещается вторичными сульфидами. Размерность включений борнита составляет от 0,001 мм до 0,1 мм.

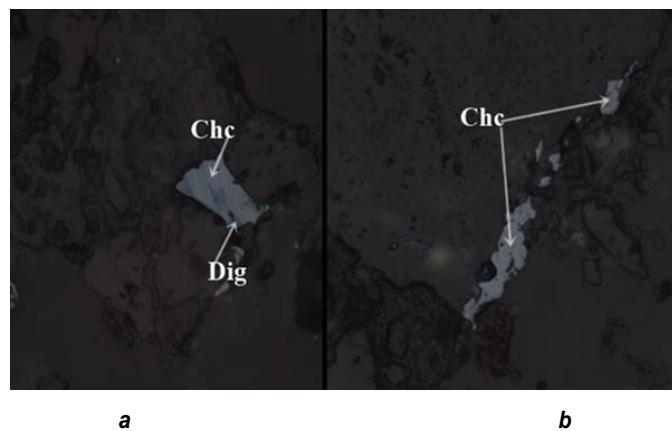


Рис. 3. Выделения халькозина+дигенита. Увеличение 200 (Chc – халькозин, Dig – дигенит)  
Fig. 3. Chalcosine-digenite segregations. 200×magnification (Chc – chalcosine, Dig – digenite)

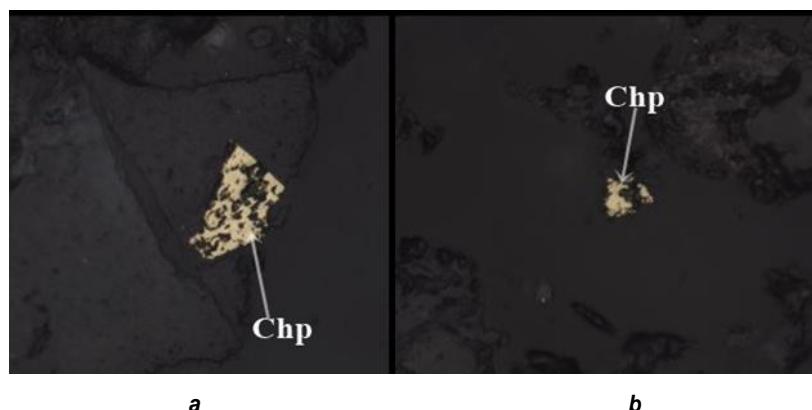


Рис. 4. Выделения халькопирита. Увеличение 200 (Chp – халькопирит)  
Fig. 4. Chalcopyrite segregations. 200×magnification (Chp – chalcopyrite)

Пирит встречается крайне редко, часто в виде трещиноватых или пористых обломков и зерен неправильных, угловатых редко идиоморфных или гипидиоморфных форм (рис. 6) размером от 0,001 мм до 0,058 мм, как в свободном виде, так и в виде микровключений в обломках нерудного материала.

Магнетит (мартиит) встречается в виде обломков изометрических или удлиненных форм мартиита размером от 0,01 до 0,1 мм, образовавшихся в результате полного замещения магнетита гематитом, как в свободном виде, так и в срастании с нерудными минералами. Зерна магнетита без следов окисления встречаются крайне редко, их размерность не превышает 0,03 мм (см. рис. 7).

Ковеллин отмечен преимущественно в виде тонких микроструктур частичного или полного коррозионного замещения как самостоятельно, так и совместно с халькозином (рис. 8).

Гидроксиды железа присутствуют в виде тонкодисперсной разности, пигментируя незначительное количество обломочного материала породообразующих минералов в красновато-буроватые цвета.

Единичное зерно самородной меди встречено с высокой отражательной способностью медно-красноватого цвета в виде тонкой пластиинки с неровными краями размером 0,012 мм (рис. 9).

Окисленные минералы меди ввиду высокой хрупкости и переизмельчения визуально не обнаружены, в связи с чем количественная оценка рудной минерализации минералогическими методами не представляется возможной. Содержание первичных, вторичных и окисленных медных минералов определено методом химического фазового анализа (см. табл. 2).



Рис. 5. Выделения борнита. Увеличение 200 (Bo – борнит, Chp – халькопирит)  
Fig. 5. Bornite segregations. 200×magnification (Bo – bornite, Chp – chalcopyrite)

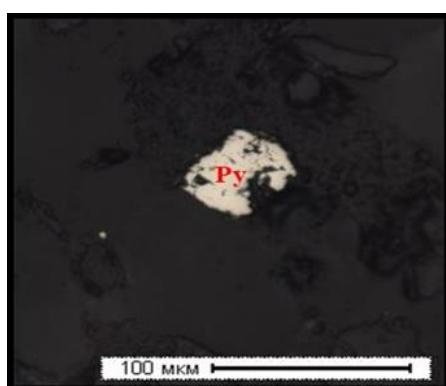


Рис. 6. Выделения пирита. Увеличение 200  
(Py – пирит)  
Fig. 6. Pyrite segregations. 200×magnification  
(Py – pyrite)

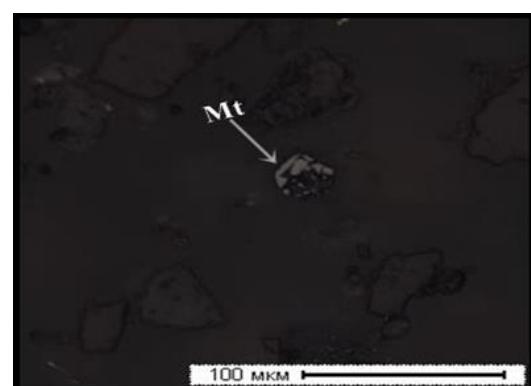


Рис. 7. Выделения магнетита. Увеличение 200  
(Mt – магнетит)  
Fig. 7. Magnetite segregations. 200×magnification  
(Mt – magnetite)

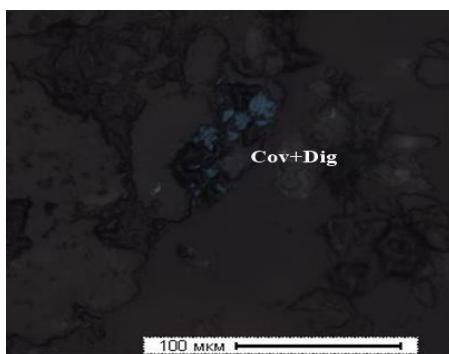


Рис. 8. Замещение дигенита ковеллином.  
Увеличение 200 (Cov – ковеллин, Dig – дигенит)  
Fig. 8. Digenite substitution with covellite.  
200×magnification (Cov – covellite, Dig – digenite)

Исследования по агитационному выщелачиванию пробы лежальных хвостов ЖОФ проводили в реакторе марки «Minni-100-1» с целью определения начальной концентрации раствора.

Тесты по изучению влияния концентрации серной кислоты ( $C_{H_2SO_4}$ ) и продолжительности выщелачивания ( $\tau$ ) на извлечение меди в раствор проводили в интервале 5,0–50,0 г/дм<sup>3</sup> и 2–72 ч, соответственно.

Проведены испытания по выщелачиванию лежальных хвостов в лабораторных перколяционных колоннах (производитель «Evonic GMBH») высотой 0,5 м и внутренним диаметром 56 мм. Исследуемая пробы перед укладкой в колонну подвергалась окомкованию с органическим связующим реагентом Alcotac® CB6 (фирма «BASF», Германия) в грануляторе барабанного типа при расходе 800 г/т с влажностью 8–10%. Гранулы крупностью 8–10 мм массой 1,247 кг загружали в колонны на перфорированное ложное днище. Перед началом выщелачивания производили влагонасыщение руды в течение суток. Подача раствора на выщелачивание хвостов осуществлялась с помощью перистальтического дозировочного насоса марки «Gudos 60 Watson Marlow», обеспечивающего необходимую скорость орошения 30 мл/ч. Раствор подавали сверху в распределительное устройство, установленное в верхней части колонны, которое равномерно распределяло раствор по сечению колонны.

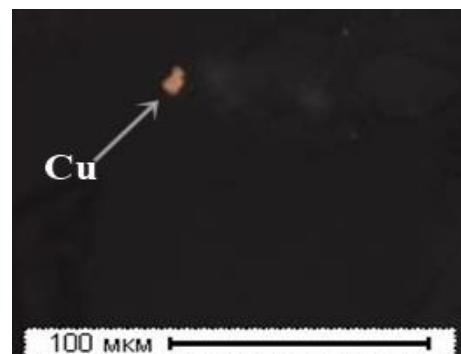


Рис. 9. Выделения самородной меди.  
Увеличение 200  
Fig. 9. Segregations of native copper. 200×magnification

При проведении испытаний также учитывается наличие в лежальных хвостах медных минералов, таких как азурит  $2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ , куприт  $\text{CuO}$ , халькозин  $\text{Cu}_2\text{S}$ , халькопирит  $\text{CuFeS}_2$  и др. Они, активно взаимодействуя с цианистыми растворами, полно и довольно быстро растворяются цианидом, являясь причиной больших потерь цианида вследствие образования комплексных цианистых соединений меди<sup>6</sup>. Присутствие в пробе даже относительно небольшого количества меди (десятые доли процента) может вызвать столь большой расход цианида, что применение процесса цианирования хвостов может стать нерентабельным. В связи с этим возникает необходимость предварительного удаления этих компонентов из пробы хвостов, что достигается обработкой раствором серной кислоты.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Тесты по изучению влияния концентрации серной кислоты на извлечение меди в раствор проводили при следующих условиях:

- $C_{H_2SO_4}$  – 5,0 – 50,0 г/дм<sup>3</sup>;
- температура раствора ( $t$ , °C) – 20°C (комнатная);
- продолжительность выщелачивания – 24 ч;
- отношение жидкого к твердому (Ж:Т) = 3:1.

Условия и полученные результаты экспериментов представлены в табл. 5.

<sup>6</sup>Масленицкий И.Н., Чугаев Л.В. Металлургия благородных металлов: учебник. М.: Металлургия, 1987. 432 с.

Таблица 5. Влияние концентрации серной кислоты на извлечение меди в раствор  
 Table 5. The effect of sulfuric acid concentration on copper recovery into solution

$C_{H_2SO_4}$ , г/дм <sup>3</sup>	Выход кека, %	Содержание элементов в кеке, %						Извлечение в раствор, %	
		Cu	Ag, г/т	Fe	Zn	Si	Al	Cu	Fe
5	98,2	0,140	2,780	2,355	0,075	22,4	6,473	—	—
10	97,2	0,140	2,700	2,67	0,067	23,2	5,61	—	—
15	96,6	0,142	2,420	2,36	0,069	22,8	6,31	—	—
20	96,0	0,142	2,807	2,452	0,075	23,7	6,241	—	—
30	95,2	0,045	2,760	2,127	0,056	23,7	5,60	68,50	3,53
35	95,6	0,044	2,303	2,12	0,062	22,3	6,44	69,07	3,444
40	94,4	0,044	2,970	2,148	0,056	24,8	4,80	69,46	3,396
50	93,8	0,046	2,981	2,143	0,066	24,0	6,553	68,27	4,234

Таблица 6. Влияние продолжительности процесса на результаты выщелачивания меди и железа из окисленных хвостов

Table 6. Leaching duration vs results of copper and iron leaching from oxidized tailings

t, ч	Выход кека, %	Содержание элементов в кеке, %						Извлечение в раствор, %	
		Cu	Ag, г/т	Fe	Zn	Si	Al	Cu	Fe
2	94,8	0,048	2,799	2,205	0,064	22,8	6,236	66,542	0,413
4	95,4	0,047	2,800	2,174	0,062	21,9	6,268	67,031	1,191
6	95,6	0,046	2,94	2,15	0,061	22,3	5,851	67,659	2,077
8	95,8	0,046	2,85	2,14	0,062	22,1	6,446	67,597	2,329
10	94,8	0,046	2,84	2,141	0,064	23,7	5,930	67,934	3,303
12	95,4	0,045	2,65	2,15	0,064	22,9	5,748	68,434	2,282
16	94,8	0,045	2,88	2,166	0,065	23,6	6,399	68,632	2,174
20	95,0	0,044	2,62	2,144	0,062	22,7	6,247	69,265	2,963
24	95,2	0,045	2,76	2,127	0,065	22,2	6,550	68,475	3,53
48	96,8	0,047	3,10	2,03	0,063	22,3	6,191	66,547	6,382
72	94,4	0,057	2,953	2,1	0,067	22,8	6,408	60,435	5,555

Из полученных данных следует, что при изменении начальной концентрации серной кислоты в интервале от 5,0 до 20,0 г/дм<sup>3</sup> медь в раствор не переходит. При концентрации серной кислоты 30,0 г/дм<sup>3</sup> извлечение меди в раствор составило 68,50%, железа – 3,53%.

С увеличением концентрации серной кислоты с 30 г/дм<sup>3</sup> до 50 г/дм<sup>3</sup> удельный расход повышается с 77,46 до 86,83 кг/т хвостов.

В результате проведенных исследований оптимальная концентрация серной кислоты при агитационном выщелачивании меди составила 30 г/дм<sup>3</sup>. При этом достигаются следующие показатели извлечения в раствор: Cu – 68,5%, Fe – 3,53%.

Исследования по влиянию продолжительности агитационного выщелачивания хвостов на извлечение меди в раствор проводили при условиях:

– продолжительность выщелачивания – 2–72 ч;  
 – Ж:Т = 3:1;  
 – температура – 20°C (комнатная);  
 – концентрация серной кислоты – 30 г/дм<sup>3</sup>.

Условия и результаты экспериментов представлены в табл. 6.

Полученные данные показывают, что при увеличении продолжительности выщелачивания с 2 до 6 ч извлечение меди в раствор увеличивается с 66,54 до 67,659%. Оптимальная продолжительность – 6 ч, т.к. дальнейшее увеличение продолжительности процесса не оказывает существенного влияния на процесс.

Исследования по агитационному выщелачиванию серебра из хвостов ЖОФ проводили при следующих условиях:

- концентрация цианида натрия ( $C_{NaCN}$ ) в интервале от 0,03–0,5%;
- выход класса -0,045+0 мм – 50,65%;
- температура раствора составляет 20°C (комнатная);
- масса навески – 50 г;
- продолжительность выщелачивания – 24 ч;
- Ж:Т = 3:1;
- pH-раствора 10,5–11 (расход CaO – 1,8 кг/т).

В процессе выщелачивания осуществляли контроль концентрации цианида натрия и pH-среды, при необходимости производили добавку реагента.

Условия и полученные результаты экспериментов представлены в табл. 7.

В результате экспериментов определена оптимальная концентрация NaCN – 0,13%, при этом извлечение серебра в раствор составило 75,58%.

При увеличении концентрации цианида до 0,5% извлечение серебра незначительно повышается – до 76,53%, однако при этом расход цианида увеличивается более чем в 3 раза.

В результате проведенных исследований определены оптимальные условия по цианированию серебра из исходных хвостов:

- концентрация цианида натрия – 0,13% (при расходе цианида натрия 1,17 кг/т);
- расход CaO – 1,8 кг/т;

При этом в раствор извлекается 75,58% серебра.

Достаточно высокий расход цианида обусловливается наличием в хвостах цветных металлов, которые повышают расход реагента, образуя цианистые комплексы.

Перколяционное выщелачивание меди из гранулированной пробы осуществляли с первоначальной концентрацией раствора серной кислоты 40 г/дм<sup>3</sup>, далее концентрацию серной кислоты снижали до 10 г/дм<sup>3</sup>. Поведение гранул в процессе выщелачивания (неизменная скорость перколяции раствора через

слой гранул, отсутствие затопления) указывает на эффективность применения процесса предварительного окомкования с лежащими хвостами и реагентом Alcotac® СВ6 на основе полиакриламида.

Зависимость извлечения меди в раствор является относительным извлечением, избыточным от продолжительности выщелачивания, рис. 10.

Ход зависимости извлечения меди от продолжительности перколяционного выщелачивания (кривая 2) показывает, что на первом этапе происходит нейтрализация содержащихся породообразующих минералов, а также оксидов железа. На вторые и третьи сутки процесс ускоряется, в этот период извлекается 48,46% меди за счет легкорастворимых оксидов и вторичных сульфидов меди. Далее извлечение проходит медленно, так как оставшиеся окисленные минералы находятся внутри куска, куда проникновение раствора затруднительно, а также при условии, если они изоморфно связаны с труднорастворимыми первичными сульфидами [13].

Переработку продуктивных растворов выщелачивания осуществляли по сорбционной схеме (сорбция/десорбция – электролиз). Суточный объем продуктивного раствора выщелачивания из колонны направлялся в сорбционные колонны, заполненные катионообменной смолой Lewatit MonoPlus производства компании «LANXESS Deutschland GmbH» (Германия)<sup>7</sup> [27]. Полученные в результате сорбционного выделения меди растворы после подкрепления до необходимой концентрации серной кислоты направлялись в питание процесса – на выщелачивание. Выбор сорбционной схемы обусловлен достаточно низкими содержаниями меди в продуктивных растворах выщелачивания (0,5–1 г/дм<sup>3</sup>). Корректировку кислотности осуществляли с помощью pH-метра и химического анализа на остаточную кислотность раствора. Выщелачивание проводили до следового содержания окисленной меди в хвостах.

<sup>7</sup>Захарьян С.В. Исследование и разработка гидрометаллургической технологии переработки бедного медно-сульфидного сырья Жезказганского региона с извлечением меди и сопутствующих ценных компонентов сорбционным методом: дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.02. Екатеринбург, 2020. 47 с.

Таблица 7. Условия и результаты прямого цианирования серебра  
 Table 7. Conditions and results of silver direct cyanidation

$C_{NaCN}$ , %	Выход кека, %	Содержание элементов в кеке, %						Извлечение в раствор, %	
		Cu	Ag, г/т	Fe	Zn	Al	Si	Cu	Ag
0,03	99,8	0,077	0,863	2,24	0,078	6,40	22,3	46,619	65,67
0,06	99,4	0,077	0,731	2,22	0,073	6,32	22,1	46,75	71,04
0,13	99,8	0,078	0,614	2,27	0,078	6,43	21,7	45,833	75,58
0,2	99,8	0,069	0,62	2,14	0,068	6,04	22,5	52,083	75,34
0,3	99,8	0,067	0,68	2,25	0,07	6,49	21,8	53,516	72,95
0,5	99,8	0,059	0,59	2,27	0,071	6,43	21,8	59,033	76,53

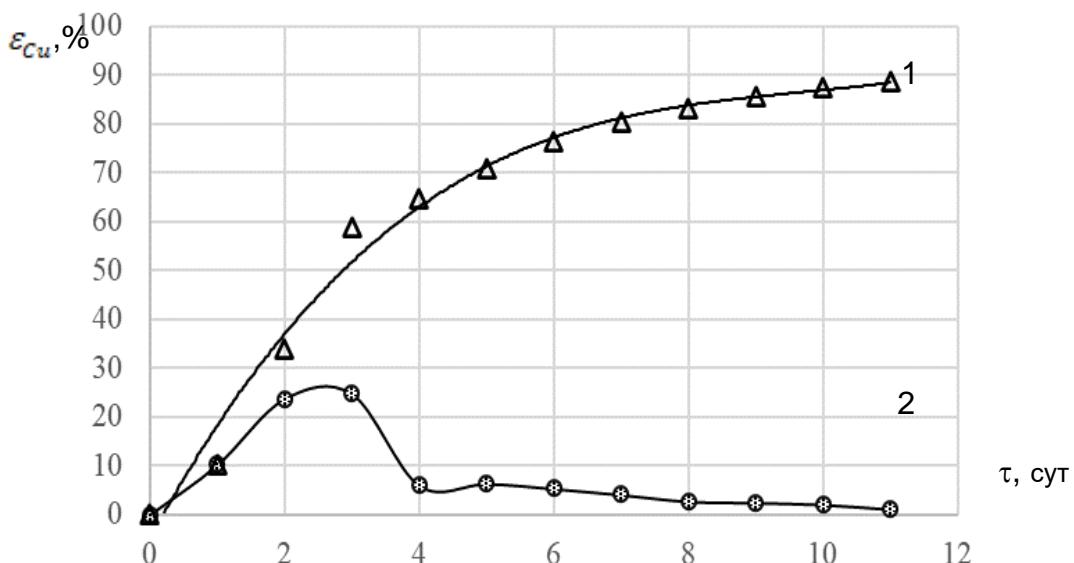


Рис. 10. Зависимость извлечения меди от продолжительности процесса

(1 – извлечение меди в раствор, 2 – суточное извлечение)

Fig. 10. Copper recovery vs leaching duration

(1 – copper recovery into solution, 2 – daily recovery)

По окончании перколяционного выщелачивания меди извлечение в раствор составило 88,55%. Общее время выщелачивания – 11 сут.

После обработки серной кислотой хвосты в колонне подвергали промывке до нейтральной среды, а затем обрабатывали (зашелачивали) раствором извести до pH вытекающего раствора 10,5–11,0. Далее проводили орошение гранул (пробы хвостов) цианидом натрия с начальной концентрацией 0,8 г/дм<sup>3</sup> с последующим снижением до 0,1 г/дм<sup>3</sup> при pH 10,5 и для насыщения кислородом вносили пероксид натрия в соотношении 1:100 (Na<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:хвосты). В качестве защитной щелочи использовали CaO. После каждого

орошения весь раствор выводился из цикла выщелачивания и анализировался на содержание серебра и остаточного цианида.

Итоговые результаты представлены на рис. 11.

Полученный раствор направляется на сорбционную переработку с применением ионообменной смолы Purogold MTA9920, функциональные группы которой селективны к ионам золота и серебра из цианидных растворов. По окончании перколяционного выщелачивания выход кека составил 92,05%. Общее время выщелачивания – 10 сут. Химический состав кека после выщелачивания представлен в табл. 8.

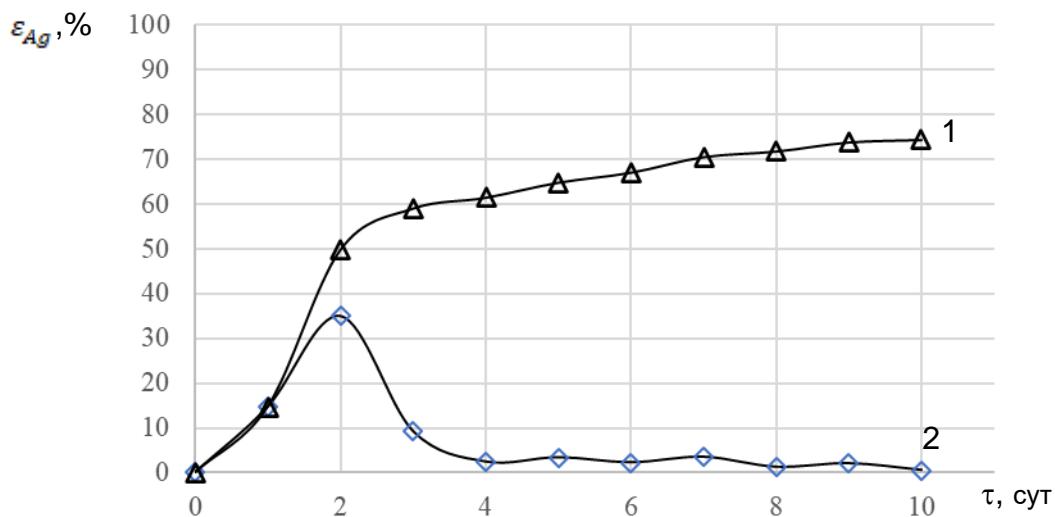


Рис. 11. Зависимость извлечения серебра от продолжительности выщелачивания  
(1 – извлечение серебра в раствор, 2 – суточное извлечение)

Fig. 11. Silver recovery rate vs leaching duration  
(1 – silver recovery into solution, 2 – daily recovery)

**Таблица 8.** Химический состав остатка хвостов (кека) после перколяционного выщелачивания в колонне  
**Table 8.** Chemical composition of the tailing residue (cake) after percolation leaching in the column

Cu	Fe	Zn	Pb	Al	Si
0,018	1,18	0,044	0,043	5,25	26,466
Mg	Mn	Ti	Ca	Sn	Ag, г/т
0,407	0,006	0,248	1,857	0,001	0,69

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведения исследований по перколяционному выщелачиванию в колонне высотой 0,5 м и внутренним диаметром 56 мм на окомкованной пробе лежальных хвостов с органическим связующим реагентом Alcotac® CB6 при расходе 800 г/т с влажностью 8–10% получено извлечение меди в раствор 88,55% с расходом серной кислоты – 80,0 кг/т хвостов. Извлечение серебра в раствор составило серебра 75,31% с расходом цианида натрия 0,55 кг/т.

Анализ проведенных исследований показывает, что в период с 1 по 3 день выщела-

чивания большая часть меди (48,46%) переходит в раствор за счет легкорастворимых оксидов и вторичных сульфидов меди. Бедные фракции раствора завершающих периодов выщелачивания необходимо возвращать в оборот.

Поведение гранул в методе перколяционного выщелачивания указывает на эффективность применения предварительного окомкования лежальных хвостов с реагентом Alcotac® CB6. В процессе выщелачивания окомкованный материал обладает достаточной пористостью и проницаемостью и обеспечивает доступ цианистых растворов к поверхности благородных металлов. Продуктивный раствор в дальнейшем перерабатывают по известным методам.

Практическая повторяемость зависимостей скорости выщелачивания меди и серебра указывает на то, что лимитирующий фактор относится не к реагенту, а к фильтрующему окомкованному материалу.

## Список источников

1. Чантурия В.А., Седельников Г.В. Развитие золотодобычи и технологии обогащения золотосодержащих руд и россыпей // Горный журнал. 1998. № 5. С. 4–9.
2. Сычева Е.А. Особенности переработки упорных золотосодержащих полиметаллических материалов. Благородные и редкие металлы // Благородные и редкие металлы: тр. IV Междунар. конф. «БРМ-2003» (г. Донецк, 22–26 сентября 2003 г.). Донецк, 2003. С. 204–206.
3. Лодейщиков В.В. Технология извлечения золота и серебра из упорных руд. Т. 1. Иркутск: Иргиредмет, 1999. 342 с.
4. Бескровная В.П., Коган Д.И., Панченко Г.М. Усовершенствованные технологические схемы для золотосодержащих руд // Горный журнал. 2001. № 5. С. 66–68.
5. Пат. 2624751, Российская Федерация, С22В 11/08

- С1. Способ цианистого выщелачивания золота и серебра / В.Г. Лобанов, Е.И. Тимофеев, Ф.М. Набиуллин, В.Б. Начаров, А.В. Третьяков, Н.А. Филонов, С.В. Миков, В.Н. Горбут, О.Ю. Маковская, А.М. Старков; заявитель и патентообладатель Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, ООО «Березовский рудник». Заявл. 11.04.2016; опубл. 06.07.2017. Бюл. № 19.
6. Пат. 2361076С1, Российская Федерация, Е21В 43/28 С1. Способ кучного выщелачивания золота из окисленных и смешанных руд / Л.В. Шумилова, Ю.Н. Резник, Н.В. Зыков, Ю.П. Добромуслов, Т.Г. Конарева; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Читинский государственный университет (ЧитГУ). Заявл. 06.12.2007; опубл. 10.07.2009. Бюл. № 19.
7. Пат. 9446, Республика Казахстан, С22В 11/00. Способ кучного выщелачивания золотосодержащих руд / Б.Б. Бейсембаев, Б.К. Кенжалиев, Х.К. Абсалямов, О.Ю. Говядовская, М.К. Копенов, А.К. Турсунбаева. Заявл. 17.08.1999; опубл. 15.09.2000. Бюл. № 9.
8. Пат. 2522921, Российская Федерация, С22В 11/08. Способ извлечения золота из руд и концентратов / Л.С. Стрижко, И.Р. Бобоев, К.К. Гурин, Е.Е. Трещетенков, Я.Р. Саруханова, И.Л. Трещентикова, О.А. Чурикова, А.В. Алексахин; заявитель и патентообладатель Национальный исследовательский технологический университет МИСиС. Заявл. 2021.01.13; опубл. 20.07.2014.
9. Фазлуллин М.И. Подземное и кучное выщелачивание урана, золота и других металлов. В 2 т., т. 2: Золото. М.: Руда и металлы, 2005. 328 с.
10. Дружинина Г.Я., Строганов Г.А., Зырянов М.Н. Кучное выщелачивание золота из предварительно окомкованных руд // Цветные металлы. 1997. № 9. С. 17–19.
11. Рашик 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.
12. Рашик 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.
13. Волошук С.Н. Кучное и подземное выщелачивание металлов. М.: Недра, 1982. 113 с.
14. 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.
15. Фазлуллин М.И. Кучное выщелачивание благородных металлов: монография. М.: Изд-во АГН, 2001. 647 с.
16. 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>.
17. Татаринов А.П., Гудков С.С., Дементьев В.Е. Основные аспекты технологии кучного выщелачивания из золотосодержащего сырья // Золотодобыча. 2001. [Электронный ресурс]. URL: <https://zolotodb.ru/article/373> (25.03.2022).
18. Есенгараев Е.К., Баимбетов Б.С., Болотова Л.С., Каналы Е.С., Акжаркенов М.Д. Влияние способа подготовки руды на показатели кучного выщелачивания золота // Интенсификация гидрометаллургических процессов переработки природного и техногенного сырья. Технологии и оборудование: матер. Междунар. науч.-практ. конф. (г. Санкт-Петербург, 28 мая – 1 июня 2018 г.). Санкт-Петербург: СПбГТИ, 2018. С. 297–299.
19. Addai-Mensah J., Quaicoe L., Nosrati A., Robinson D.J. Understanding lateritic ore agglomeration behaviour as a precursor to enhanced heap leaching // Ghana Mining Journal. 2013. Vol. 14. P. 41–50.
20. 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>.
21. Arun Kumar P., Vengatasalam R. Mineral beneficiation by heap leaching technique in mining // Procedia Earth and Planetary Science. 2015. Vol. 11. P. 140–148. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.06.018>.
22. 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>.
23. McNab B. Exploring HPGR technology for heap leaching of fresh rock gold ores // IIR Crushing & Grinding Conference (Townsville, 29–30 March, 2006). Townsville, 2006. P. 1–26.
24. Дружинина Г.Я., Строганов Г.А., Зырянов М.Н. Кучное выщелачивание золота предварительно окомкованных руд // Цветные металлы. 1997. № 9. С. 17–19.
25. Sánchez-Chacón A.E. Lapidus G.T. Model for heap leaching of gold ores by cyanidation // Hydrometallurgy. 1997. Vol. 44. Iss. 1-2. P. 1–20.  
[https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(96\)00052-7](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(96)00052-7).
26. Магад Е., Койжанова А.К., Игнатьев М.М., Камалов Э.М., Зенкова Г.А. Интенсификация извлечения золота методом кучного выщелачивания из руды месторождения Бестобе // Комплексное использование минерального сырья. 2015. № 1. С. 46–52.
27. Захарьян С.В., Юн А.Б., Серикбай А.У., Каримова Л.М. Исследование и разработка условий эксплуатации ионитов в гидрометаллургических схемах // Актуальные вопросы получения и применения РЗМ и РМ-2017: матер. Междунар. науч.-практ. конф. (г. Москва, 21–22 июня 2017 г.). М., 2017. С. 197–202.

## References

1. Chanturia V.A., Sedelnikov G.V. Development of gold mining and concentration technology of gold ores and placers. *Gornyi Zhurnal*. 1998;5:4-9. (In Russ.).
2. Sycheva E.A. Processing features of refractory gold-bearing polymetallic materials. *Blagorodnye i redkie metally: trudy IV Mezhdunarodnoj konferencii*. 22–26 September 2003, Donetsk. Donetsk; 2003, p. 204-206. (In Russ.).
3. Lodejshchikov V.V. *Gold and silver recovery technology from refractory ores*. Vol. 1. Irkutsk: Irkiredmet; 1999, 342 p. (In Russ.).
4. Beskrovnaia V.P., Kogan D.I., Panchenko G.M. Improved technological schemes for gold-bearing ores. *Gornyi zhurnal*. 2001;5:66-68. (In Russ.).
5. Lobanov V.G., Timofeev E.I., Nabiullin F.M., Nacharov V.B., Tretiakov A.V., Filonov N.A., Mikov S.V., Gorbut V.N., Makovskaya O.Yu., Starkov A.M. *Method of cyanide leaching of gold and silver*. Patent RF, no. 2624751; 2017. (In Russ.).
6. Shumilova L.V., Reznik Yu.N., Zykov N.V., Dobromyslov Yu.P., Konareva T.G. *Method of gold heap leaching from oxidized and complex ores*. Patent RF, no. 2361076C1; 2009. (In Russ.).
7. Beisembayev B.B., Kenzhaliev B.K., Absalyamov Kh.K., Govyadovskaya O.Yu., Kopenov M.K., Tursunbaeva A.K. *Method of gold ore heap leaching*. Patent RK, no. 9446; 2000. (In Russ.).
8. Strizhko L.S., Boboev I.R., Gurin K.K., Treshchetenkov E.E., Sarukhanova Ya.R., Treshchentikova I.L., Churikova O.A., Aleksakhin A.V. *Method for gold recovery from ores and concentrates*. Patent RF, no. 2522921; 2014. (In Russ.).
9. Fazlullin M.I. *Underground and heap leaching of uranium, gold and other metals*. In 2 vol., vol. 2: Zoloto. Moscow: Ruda i metally; 2005, 328 p. (In Russ.).
10. Druzhinina G.Ya., Stroganov G.A., Zyryanov M.N. Heap leaching of gold from pre-pelletized ores. *Tsvetnye metally*. 1997;9:17-19. (In Russ.).
11. Rashkin A.V., Avdeev I.A., Yashkin I.A. Classification of ore heap leaching control methods. *Vestnik Mezhdunarodnoj akademii nauk ekologii i bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti (MANEB) = Vestnik IAELPS*. 2006;11(5):166-169. (In Russ.).
12. Rashkin A.V., Avdeev P.B., Yashkin I.A. Rational formation of ore piles during heap leaching of ores. *Gornyi informacionno-analiticheskij byulleten' = Mining informational and analytical bulletin*. 2005;11:252-254. (In Russ.).
13. Voloschuk S.N. *Heap and underground leaching of metals*. Moscow: Nedra; 1982, 113 p. (In Russ.).
14. Vodolazov L.I., Drobodenko 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.).
15. Fazlullin M.I. *Heap leaching of precious metals: monograph*. Moscow: Academy of Mining Sciences; 2001, 647 p. (In Russ.).
16. 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.
17. Tatarinov A.P., Gudkov S.S., Dementiev V.E. Main aspects of gold-bearing raw material heap leaching technology. *Zolotodobycha*. 2001. Available from: <https://zolotodb.ru/article/373> [Accessed 25th March 2022]. (In Russ.).
18. Esengaraev E.K., Baimbetov B.S., Bolotova L.S., Kanaly E.S., Akzharkenov M.D. Influence of the ore preparation method on heap leaching indicators of gold. In: *Intensifikasiya gidrometallurgicheskikh processov pere-rabotki prirodnogo i tekhnogenного syr'ya. Tekhnologii i oborudovanie: materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Intensification of hydrometallurgical processing of natural and technogenic raw materials. Technologies and equipment: materials of the International scientific and practical conference*. St-Peterburg, 28 May – 1 June, St-Peterburg: Saint-Petersburg State Institute of Technology; 2018, p. 297-299. (In Russ.).
19. Addai-Mensah J., Quaicoe L., Nosrati A., Robinson D.J. Understanding lateritic ore agglomeration behaviour as a precursor to enhanced heap leaching. *Ghana Mining Journal*. 2013;14:41-50. (In Russ.).
20. 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>.
21. Arun Kumar P., Vengatasalam R. Mineral beneficiation by heap leaching technique in mining. *Procedia Earth and Planetary Science*. 2015;11:140-148. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.06.018>
22. 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>.
23. McNab B. Exploring HPGR technology for heap leaching of fresh rock gold ores. In: *IIR Crushing & Grinding Conference*. 29–30 March, 2006, Townsville. Townsville; 2006, p. 1-26.
24. Druzhinina G.Ya., Stroganov G.A., Zyryanov M.N. Heap leaching of gold from pre-pelletized ores. *Tsvetnye metally*. 1997;9:17-19. (In Russ.).
25. Sánchez-Chacón A.E. Lapidus G.T. Model for heap leaching of gold ores by cyanidation. *Hydrometallurgy*. 1997;44(1-2):1-20. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(96\)00052-7](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(96)00052-7).
26. Magad E., Kojzhanova A.K., Ignat'ev M.M., Kamalov E.M., Zenkova G.A. Gold recovery intensification by Bestobe ore heap leaching. *Kompleksnoe ispol'zovanie mineral'nogo syr'ya = Complex Use of Mineral Resources*. 2015;1:46-52. (In Russ.).
27. Zahar'yan S.V., Yun A.B., Serikbaj A.U., Karimova L.M. Research and development of operating conditions for ion exchangers in hydrometallurgical schemes. In: *Aktual'nye voprosy polucheniya i primeneniya RZM i RM-2017: materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Actual issues of production and use of rare earth metals and rare metals-2017: materials of the International scientific and practical conference* 21–22 June 2017, Moscow. Moscow: 2017, p. 197-202. (In Russ.).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Каримова Люция Монировна,

д.т.н., доцент,  
ведущий научный сотрудник  
Научно-исследовательской лаборатории,  
ТОО «КазГидроМедь», 100000, г. Караганда,  
ул. Бухар-Жырау, 48, Казахстан  
✉ lutsia.08@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-6205-6585>

### Кайралапов Ерлан Токпаевич,

к.т.н.,  
старший научный сотрудник  
Научно-исследовательской лаборатории,  
ТОО «КазГидроМедь»,  
100000, г. Караганда, ул. Бухар-Жырау, 48, Казахстан  
kairalapov.e@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-4616-5436>

### Мансуров Берик Елубаевич

ведущий научный сотрудник,  
ТОО «КазГидроМедь»,  
100000, г. Караганда, ул. Московская, 4, Казахстан  
b.mansurov@kazgidromed.kz  
<https://orcid.org/0000-0002-1741-0028>

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Lyutsiya M. Karimova,

Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Leading Researcher of the Research Laboratory,  
KazHydroMed LLP,  
48, Bukhar-Zhyrau St.,  
Karaganda 100000, Kazakhstan  
✉ lutsia.08@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-6205-6585>

### Yerlan T. Kairalapov,

Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher  
of the Research Laboratory,  
KazHydroMed LLP,  
48, Bukhar-Zhyrau St.,  
Karaganda 100000, Kazakhstan  
kairalapov.e@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-4616-5436>

### Berik E. Mansurov,

Leading Researcher of  
KazHydroMed LLP,  
4, Moskovskaya St.,  
Karaganda 100000, Kazakhstan  
b.mansurov@kazgidromed.kz  
<https://orcid.org/0000-0002-1741-0028>

## Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## Информация о статье

Статья поступила в редакцию 20.12.2022; одобрена после рецензирования 27.01.2023; принята к публикации 15.03.2023.

## Contribution of the authors

The authors contributed equally to the preparation of the article.

## Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

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

## Information about the article

The article was submitted 20.12.2022; approved after reviewing 27.01.2023; accepted for publication 15.03.2023.

## МЕТАЛЛУРГИЯ

Научная статья

УДК 669.331.1

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-188-218>

## Кинетика и механизм окислительного обжига сульфидной медно-cobальтовой руды

**А.М. Клюшников<sup>1</sup>✉, Р.И. Гуляева<sup>2</sup>, С.М. Пикалов<sup>3</sup>, Г.И. Мальцев<sup>4</sup>**<sup>1-4</sup>Институт metallurgии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

**Резюме.** Цель – изучение химизма, кинетики и механизма окислительного обжига типичного образца сульфидной медно-cobальтовой руды. Объектом исследования являлась сульфидная медно-cobальтовая руда (основные минералы: пирит, пирротин, халькопирит, сфалерит, тремолит, диоксид кремния, тальк, сидерит и кальцит). В работе использованы методы высокотемпературного рентгенофазового анализа (100–900°C), термогравиметрии, дифференциальной сканирующей калориметрии и масс-спектрометрии выделяемого газа (30–1100°C, скорость нагрева – 5–20°C·мин<sup>-1</sup>, расход воздуха – 30 см<sup>3</sup>·мин<sup>-1</sup>). Исследованы химизм, кинетика и механизм окислительного обжига сульфидной медно-cobальтовой руды (размер частиц <0,1 мм). С использованием указанных методов анализа установлено, что процесс можно представить совокупностью семи элементарных реакций: пяти экзотермических (при 398–445, 394–488, 440–498, 433–549 и 451–562°C), отвечающих интенсивному горению сульфидов железа, меди и цинка, и двух эндотермических (при 561–664 и 743–927°C), связанных с разложением остаточных сульфатов меди и железа. Кинетический анализ (методы Киссинджера, Огиса–Беннетта, идентификации реакционной модели по эталонной функции и итерационной оптимизации) данных дифференциальной сканирующей калориметрии применительно к указанным реакциям показал, что лимитирующей стадией последних являются нуклеация и рост кристаллов. Значения энергии активации, предэкспоненциального множителя и параметра Аврами находятся в интервалах 140–459 кДж·моль<sup>-1</sup>, 1,41·10<sup>4</sup>–3,49·10<sup>31</sup> с<sup>-1</sup> и 1,0–1,7, соответственно. Установлено, что кристаллизация продуктов элементарных реакций сопровождается увеличением числа зародышей; зародыши новой фазы могут формироваться как на поверхности, так и в объеме частиц руды. При этом рост кристаллов имеет одномерный характер и контролируется химической реакцией на границе раздела фаз или диффузией реагентов. Результаты работы могут быть использованы в практике окислительного обжига сульфидных руд и концентратов.

**Ключевые слова:** сульфидная медно-cobальтовая руда, обжиг, окисление, кинетика, механизм, дифференциальная сканирующая калориметрия

**Благодарности:** Работа выполнена по Государственному заданию ИМЕТ УрО РАН (№ госрегистрации темы: 122020100404-2).

**Для цитирования:** Клюшников А.М., Гуляева Р.И., Пикалов С.М., Мальцев Г.И. Кинетика и механизм окислительного обжига сульфидной медно-cobальтовой руды // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 1. С. 188–218. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-188-218>.

## METALLURGY

Original article

## Kinetics and mechanism of oxidizing roasting of sulfide copper-cobalt ore

**Alexander M. Klyushnikov<sup>1</sup>✉, Roza I. Gulyaeva<sup>2</sup>, Sergey M. Pikalov<sup>3</sup>, Gennady I. Maltsev<sup>4</sup>**<sup>1-4</sup>Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the RAS, Yekaterinburg, Russia

**Abstract.** The aim of the study was to examine the chemistry, kinetics and mechanism of oxidizing roasting of a typical sample of sulfide copper-cobalt ore. The research object was sulfide copper-cobalt ore with the following main minerals: pyrite, pyrrhotite, chalcopyrite, sphalerite, tremolite, silicon dioxide, talc, siderite and calcite. The methodology involved high-temperature X-ray phase analysis (100–900°C), thermogravimetry, differential scanning calorimetry and mass spectrometry of the released gas (30–1100°C, heating rate – 5–20°C·min<sup>-1</sup>, air flow rate – 30 cm<sup>3</sup>·min<sup>-1</sup>). The chemistry, kinetics and mechanism of oxidizing roasting of sulfide copper-cobalt ore with a particle size of <0.1 mm were studied. It was found that the process can be represented as a set of seven elementary reactions: five exothermic reactions (at 398–445, 394–488, 440–498, 433–549 and 451–562°C), corresponding to the intense combustion of iron, copper and zinc sulfides, and two endothermic reactions (at 651–664 and 743–927°C), associated with the decomposition of residual copper and iron sulfates. Kinetic analysis (Kissinger and Augis-Bennett methods, identification of the reaction model by reference function and iterative optimization) of differential scanning calorimetry data in connection with the above reactions showed that the limiting stage of the latter is nucleation and crystal growth. The values of activation energy, pre-exponential factor and Avrami parameter ranged between 140–459 kJ·mol<sup>-1</sup>, 1.41·10<sup>4</sup>–3.49·10<sup>31</sup> with<sup>-1</sup> and 1.0–1.7, respectively. It was established that crystallization of the products of elementary reactions is accompanied by an increase in the number of nuclei; new phase nuclei can be formed both on the surface and in the bulk of ore particles. The crystal growth is one-dimensional and is controlled by a chemical reaction at the interphase boundary or by diffusion of reagents. The results obtained can be applied in the practice of oxidizing roasting of sulfide ores and concentrates.

**Keywords:** copper-cobalt sulfide ore, roasting, oxidation, kinetics, mechanism, differential scanning calorimetry

**Acknowledgements:** The work was carried out under the State Assignment of the Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (no. of state registration of the theme: 122020100404-2).

**For citation:** Klyushnikov A.M., Gulyaeva R.I., Pikalov S.M., Maltsev G.I. Kinetics and mechanism of oxidizing roasting of sulfide copper-cobalt ore. *iPolytech Journal*. 2023;27(1):188-218. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-188-218>.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время сульфидные медные руды в основном перерабатывают по схеме, включающей флотационное обогащение, аутогенную плавку концентратов на штейн, конвертирование штейна, огневое и электролитическое рафинирование черновой меди. Шлаки рудной плавки и конвертирования подвергают обеднению методом флотации, полученные концентраты возвращают на плавку, а обедненные шлаки направляют в отвал. Отходящие газы рудной плавки и конвертирования утилизируют в производстве серной кислоты или элементной серы. Конечными продуктами технологии являются катодная медь, отвальный шлак, серная кислота и электролитный шлам, концентрирующий драгоценные и редкие металлы [1].

Сплошные и вкрапленные руды колчеданных месторождений Уральского региона (Россия) могут иметь повышенное (до 0,2% масс.) содержание кобальта [2, 3], в связи с этим возникает необходимость его попутного извлечения в товарные продукты. Каналом вывода кобальта в описанной схеме являются конвертерные шлаки; путем плавки с углеродистым восстановителем и сульфидизатором (рудным концентратом) из них можно выделить обогащенный кобальтом сульфидный

продукт, пригодный для переработки традиционными способами. Однако тонкое взаимное прорастание рудных минералов и высокая растворимость цветных металлов в пирите приводят к тому, что при флотационном обогащении руд до 95% кобальта переходит в отвальные продукты [4]. Переработка же всей массы руды по описанной схеме ограничена по технологическим и экономическим причинам.

Перспективным способом переработки сульфидных медно-кобальтовых руд Урала может стать их прямой частичный окислительный обжиг в печи кипящего слоя при 800–900°C с переводом до 80% серы в газовую фазу (при этом будет использована значительная часть теплотворной способности руды) и применение полученного огарка в качестве сульфидизатора при восстановительно-сульфидирующем плавке окисленных никель-кобальтовых руд (латеритов) месторождений того же региона, которые в настоящее время не перерабатываются [5]. Варьирование пропорций компонентов смеси руд позволит:

- 1) регулировать выходы и составы продуктов плавки;
- 2) контролировать потоки серы – основная ее часть в виде богатых SO<sub>2</sub> газов обжига

будет направлена в производство серной кислоты, а остаток израсходован на сульфидирование никеля и кобальта окисленной никелевой руды;

3) за счет ведения плавки в инертной или слабовосстановительной атмосфере количественно концентрировать в медно-никелевом штейне, содержащем до 10% масс. Ni+Cu+Co, не только никель, медь и драгоценные металлы, но и кобальт (при этом присутствие в штейне меди снизит потери никеля и кобальта со шлаком [6]);

4) исключить или минимизировать потребность во флюсах за счет использования флюсующего потенциала руд;

5) получать в голове схемы отвальный шлак, по качеству близкий к шлакам промышленной руднотермической плавки сульфидных медно-никелевых руд [7, 8]. Авторами настоящей работы ведутся исследования в направлении развития научных основ и технико-экономического обоснования указанного способа [9–13]. Важным аспектом технологии является интенсивность окислительного обжига медной руды, определяющая удельную производительность печи кипящего слоя и режим (температуру и продолжительность) ведения процесса. Для ее оценки необходимы сведения о химизме, кинетике и механизме обжига. Широкий ряд публикаций посвящен этим вопросам применительно к медно-никелевым рудам [14], медным [15–27], цинковым [17, 28, 29], никелевым [30, 31] и медно-кобальтовым [32] концентратам, а также входящим в их состав индивидуальным сульфидным минералам: пириту [33–46], марказиту [47], макинавиту [48], пирротину [34, 36, 39, 49–54], халькопириту [36, 47, 55–59], ковеллину [60], халькозину [47, 60–62], сульфиду цинка [63–69], сульфиду кобальта [70] и их смесям [71, 72]. В то же время сульфидные руды разных геолого-промышленных типов (и тем более разных месторождений) отличаются индивидуальными технологическими особенностями, связанными с различиями вещественного состава и структуры, и прямое распространение на них известных данных связано со значительными сложностями. В связи с этим целью настоящей работы

является изучение химизма, кинетики и механизма окислительного обжига типичного образца сульфидной медно-кобальтовой руды.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования был взят образец, отобранный от представительной пробы сульфидной медно-кобальтовой руды Дергамышского месторождения (Россия), измельченной в лабораторной мельнице до крупности менее 0,1 мм.

Химический состав исходного образца исследовали методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП АЭС) на оптическом эмиссионном спектрометре iCAP 6300 Duo (Thermo Scientific). Препараты для анализа готовили путем растворения навески массой 0,1 г в смеси минеральных кислот.

Термические свойства медно-кобальтовой руды изучали методом совмещенных термогравиметрии (ТГ) и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) на приборе для синхронного термического анализа STA 449 C Jupiter<sup>®</sup> (NETZSCH). Для проведения измерений навеску образца (~8,4 мг) тонким слоем распределяли по дну корундового тигля, который затем устанавливали в измерительную ячейку прибора, нагревали от 30 до 1100°C со скоростью  $\beta_i = 5, 10$  и  $20^{\circ}\text{C}\cdot\text{мин}^{-1}$  (здесь и далее подстрочный индекс «*i*» обозначает *i*-ю температурную программу (*i* = 1, 2, 3)). Динамическую окислительную атмосферу в реакционном пространстве поддерживали путем продувки измерительной ячейки осущенным синтетическим воздухом (21% об. O<sub>2</sub>, 79% об. N<sub>2</sub>), подаваемым с расходом 30 см<sup>3</sup>·мин<sup>-1</sup>. Материалом сравнения служил тигель, идентичный указанному выше. Корректирующие параметры ДСК оценивали по энталпии плавления химически чистого (99,99% масс.) индия с использованием программного обеспечения NETZSCH Thermokinetics 3.0. Состав газов, выделяющихся при нагреве материала, оценивали методом масс-спектрометрии (МС), для этого использовали сопряженный с термоанализатором квадрупольный масс-спектрометр QMS 403 C Aeolos<sup>®</sup> (NETZSCH); ионный ток (*I*, A)

выделяющихся при нагреве и окислении руды газов ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  и  $\text{SO}_3$ ) измеряли в режиме заданных массовых чисел. Обработку результатов измерений с определением температур начала ( $T_0$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ), максимума ( $T_p$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ) и окончания ( $T_e$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ) пиков ДСК, их площадей ( $\Delta H$ , Дж· $\text{g}^{-1}$ ), значений относительного изменения массы ( $\Delta m$ , %), а также температур максимумов ( $T_p^{\text{H}_2\text{O}}$ ,  $T_p^{\text{CO}_2}$ ,  $T_p^{\text{SO}_2}$  и  $T_p^{\text{SO}_3}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ) пиков кривых ионного тока  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  и  $\text{SO}_3$  проводили с помощью программного обеспечения NETZSCH *Proteus*® 5.1. Разделение сложных пиков ДСК на составляющие их перекрывающиеся элементарные пики и определение температур начала ( $T_{0ij}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ), максимума ( $T_{p_{ij}}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ) и окончания ( $T_{e_{ij}}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ), а также значений полной ширины на половине высоты ( $\Delta T_{p_{ij}}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ) последних проводили с помощью программы MathWorks по методике, изложенной в работе [73]; базовую линию характеризовали линейной функцией, профиль элементарных пиков аппроксимировали функцией Фрэйзера–Сузуки (асимметричной функцией Гаусса), для каждой температуры суммарное значение функции, описывающей сложный пик, представляли как сумму таких значений для элементарных пиков, достоверность аппроксимации (для уровня значимости 5%) контролировали по величине коэффициента корреляции Пирсона ( $r$ ). Погрешность измерения массы, температуры и теплоты составляла  $\pm 0,01$  мг,  $\pm 3^{\circ}\text{C}$  и  $\pm 5\%$ , соответственно.

Фазовый состав образца исходной руды определяли методом рентгенофазового анализа (РФА) на рентгеновском дифрактометре ДРОН–2.0. Эксперименты по окислительному обжигу руды, совмещенные с оценкой фазового состава получаемых продуктов методом высокотемпературного рентгенофазового анализа (ВРФА), выполняли в установленной на указанном приборе высокотемпературной приставке УВД–2000, оборудованной печью сопротивления с платиновым нагревательным элементом; конструкция приставки обеспечивала естественный доступ в рабочую камеру атмосферного воздуха. Эксперимент заключался в нагреве исходной руды со средней скоростью  $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{мин}^{-1}$  от  $25^{\circ}\text{C}$  до заданной температуры (100, 200, 300, 400, 500, 600,

700, 800 и  $900^{\circ}\text{C}$ ) и ее изотермической выдержке при указанной температуре в течение 80 мин. При этом, как сказано выше, на изотермических участках циклов вели регистрацию дифрактограмм в режиме *in situ*. Условия съемки: геометрия Брэгга–Брентано;  $\text{Cu}K_{\alpha}$ -излучение ( $\lambda_{\alpha} = 1,54056$  Å); графитовый монохроматор на выходящем пучке; напряжение и сила тока на трубке – 30 кВ и 30 мА, соответственно; угловой диапазон ( $2\theta$ ) и шаг ( $2\theta$ ) –  $10\text{--}90^{\circ}$  и  $0,02^{\circ}$ , время экспозиции в точке – 2 с при  $25^{\circ}\text{C}$  и 1,2 с для высокотемпературных измерений. Препараторы для эксперимента готовили путем нанесения на подложку, изготовленную из плексигласа или  $(\text{Zr}, \text{Y})\text{O}_{2-x}$ , порошкообразного (размер частиц  $<0,1$  мм) материала массой 1–3 мг. Температуру измеряли платинородий-платиновой термопарой ТПП, горячий спай которой помещали рядом с образцом (погрешность измерения составляла  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ). Идентификацию фаз и полукаличественную оценку их массовых содержаний в кристаллической составляющей образцов выполняли методом корундовых чисел [74, 75] с применением программы QualX 2.0 [76] и базы данных Pow\_Cod [76]. На основе данных ВРФА устанавливали возможную последовательность химических реакций, имеющих место при исследованных температурах; значения констант равновесия реакций ( $K_T$ ) для температуры  $T$  (К) рассчитывали с помощью пакета прикладных программ HSC Chemistry 6.12 (Outotec Research Oy).

Строение и элементный состав образцов изучали методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и энергодисперсионной рентгеновской спектрометрии (ЭДС) с использованием автоэмиссионного электронного микроскопа TESCAN MIRA 3 LMU (TESCAN), оборудованного энергодисперсионным рентгеновским спектрометром INCA Energy 350 X-max 80 (Oxford Instruments), при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе пучка электронов 20 нА и эффективном разрешении луча 3 мкм. В ходе приготовления аншлифа для анализа образец помещали в стальную цилиндрическую форму, заливали эпоксидной смолой с отвердителем и выдерживали на воздухе, затем поверхность блока полировали и

покрывали слоем графита толщиной 20 нм.

Кинетический анализ окисления медно-кобальтовой руды проводили путем математической обработки данных ДСК нагрева ее образца по трем температурным программам ( $\beta_i = 5, 10$  и  $20^{\circ}\text{C}\cdot\text{мин}^{-1}$ ) в границах экзотермических и эндотермических пиков, соответствующих развитию указанного процесса. Сначала решали обратную кинетическую задачу, а именно – на основании экспериментальных данных определяли кинетические параметры окисления руды. Для этого каждый  $j$ -й ( $j = 1, 2, \dots, N$ ) элементарный пик ДСК рассматривали как след  $j$ -й формальной одностадийной необратимой реакции  $A_j \rightarrow B_j$ , где  $A_j$  и  $B_j$  – исходный формальный реагент и конечный формальный продукт (к числу элементарных относили как полученные при разделении сложных пиков, так и простые пики  $i$ -й кривой). Завершенность и интенсивность  $j$ -й реакции при  $i$ -й температурной программе количественно выражали через степень ( $\alpha_{ij}$ ) и скорость ( $d\alpha_{ij}/dt$ ,  $\text{с}^{-1}$ ) превращения  $A_j$  в  $B_j$  [77, 78] в соответствии с уравнениями:

$$\alpha_{ij} = \frac{\int_{t_{0ij}}^t \left( \frac{dH_{ij}(t)}{dt} \right) dt}{\int_{t_{0ij}}^{t_{eij}} \left( \frac{dH_{ij}(t)}{dt} \right) dt} = \frac{\int_{T_{0ij}}^T \left( \frac{dH_{ij}(T)}{dT} \right) dT}{\int_{T_{0ij}}^{T_{eij}} \left( \frac{dH_{ij}(T)}{dT} \right) dT}; \quad (1)$$

$$\frac{d\alpha_{ij}}{dt} = k_j(T) f_j(\alpha_{ij}) = A_j \exp\left(-\frac{E_j}{RT}\right) f_j(\alpha_{ij}), \quad (2)$$

где  $t_{0ij}$  и  $t_{eij}$  – моменты времени начала и окончания реакции (начала и окончания отклонения кривой ДСК от базовой линии), соответственно, с ( $t_{0ij} = 0$  с);  $t$  – произвольный момент времени реакции, с ( $t_{0ij} < t < t_{eij}$ );  $T_{0ij}$  и  $T_{eij}$  – температуры начала и окончания реакции (начала и окончания отклонения кривой ДСК от базовой линии), К;  $T$  – температура в произвольный момент времени реакции, К ( $T_{0ij} < T < T_{eij}$ );  $H_{ij}(T)$  и  $H_{ij}(t)$  – функции, описывающие зависимость энталпии реакции от температуры и времени, таким образом, Дж·г<sup>1</sup>;  $k_j(T)$  – инвариантная в отношении температурной программы константа скорости реакции, с<sup>-1</sup>;  $f_j(\alpha_{ij})$  – инвариантная в отношении температурной программы реакционная модель (функция, отражающая механизм реакции);  $E_j$

– инвариантная в отношении температурной программы эффективная энергия активации, Дж·моль<sup>-1</sup>;  $A_j$  – инвариантный в отношении температурной программы предэкспоненциальный множитель, с<sup>-1</sup>;  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж·моль<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>. В расчетах принимали, что температура меняется со временем по линейному закону:

$$T = T_{0ij} + \beta_i t, \quad (3)$$

( $\beta_i = dT/dt = \text{Const}$ ). В качестве функции  $f_j(\alpha_{ij})$  использовали модель Джонсона–Мела–Аврами–Ерофеева–Колмогорова [78, 79] (ее выбор обусловлен результатами идентификации реакционной модели, описанными ниже):

$$f_j(\alpha_{ij}) = n_j (1 - \alpha_{ij}) [-\ln(1 - \alpha_{ij})]^{(n_j - 1)/n_j}, \quad (4)$$

в основе которой лежит описывающее кинетику нуклеации и роста кристаллов новой фазы в материнской фазе уравнение:

$$\alpha_{ij} = 1 - \exp\left(-k_j t^{n_j}\right) = \frac{1 - \exp\left[-A_j \exp\left(-\frac{E_j}{RT}\right) \left(\frac{T - T_{0ij}}{\beta_i}\right)^{n_j}\right]}{1 - \exp\left[-A_j \exp\left(-\frac{E_j}{RT}\right) \left(\frac{T_{eij} - T_{0ij}}{\beta_i}\right)^{n_j}\right]}, \quad (5)$$

здесь  $n_j$  – инвариантный в отношении температурной программы параметр Аврами, зависящий от физико-геометрических особенностей процесса. Первоначальную оценку эффективных энергии активации ( $E_j$ , Дж·моль<sup>-1</sup>) и предэкспоненциального множителя ( $A_j$ , с<sup>-1</sup>) проводили методом Киссинджера [78, 80]; в основе метода лежит оценка параметров –  $E_j/R$  и  $\ln(A_j R/E_j)$  парной линейной регрессии для модели:

$$\ln\left(\frac{\beta_i}{T_{0ij}^2}\right) = \ln\frac{A_j R}{E_j} - \frac{E_j}{RT_{0ij}}, \quad (6)$$

построенной по парам наблюдаемых значений  $\ln(\beta_i/T_{0ij}^2) - 1/T_{0ij}$  для каждого  $\beta_i$ . Достоверность аппроксимации контролировали по величине коэффициента детерминации ( $R^2$ ). Для идентификации реакционной модели для  $j$ -й реакции при  $i$ -й температурной программе для заданного ряда значений  $\alpha_{ij}$ , меняющихся

от 0,1 до 1 с шагом 0,1, рассчитывали численные значения эталонной функции  $y_{ij}(\alpha_{ij})$ :

$$y(\alpha_{ij}) = \left( \frac{d\alpha_{ij}}{dt} \right)_{\alpha_{ij}} \exp \left( \frac{E_j}{RT_{\alpha_{ij}}} \right), \quad (7)$$

наносили пары значений  $y_{ij}(\alpha_{ij}) - \alpha_{ij}$  для каждого  $\beta_i$  на координатную плоскость и сравнивали полученные кривые с теоретическими графиками функции  $y(\alpha)$  для табулированных форм  $f(\alpha)$  [78]; выбор модели осуществляли на основе качественного соответствия экспериментальной и теоретической кривых. Инвариантный параметр Аврами ( $n_j$ )  $j$ -й реакции определяли методом Огиса–Беннетта [81]; расчет вели по формулам:

$$n_j = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 n_{ij}; \quad (8)$$

$$n_{ij} = \frac{2,5RT_{\alpha_{ij}}^2}{E_j \Delta T_{ij}}, \quad (9)$$

где  $n_{ij}$  – параметр Аврами  $j$ -й реакции для  $i$ -й скорости нагрева; при этом величину  $E_j$  (Дж·моль<sup>-1</sup>) брали по результатам анализа Киссинджера. Затем подстановкой значений инвариантных кинетических параметров элементарных реакций ( $E_j$ ,  $A_j$  и  $n_j$ ) в уравнение (5) находили аналитические выражения для оценки степени превращения ( $\alpha_{ij}$ ) для каждой  $j$ -й реакции и  $i$ -й температурной программы, строили расчетные кинетические кривые  $\alpha_{ij}-T$  и путем варьирования параметра  $A_j$  от его начального значения при фиксированных  $E_j$  и  $n_j$  проводили оптимизацию полученной модели методом аппроксимации экспериментальных кривых расчетными (качество приближения на этой и последующих итерациях контролировали по величине коэффициента корреляции Пирсона ( $r_{ij}$ )). Уточненное значение инвариантного предэкспоненциального множителя ( $A^r_j$ , с<sup>-1</sup>) получали как среднее арифметическое оптимальных значений  $A_j$  при  $i$ -й температурной программе. После этого полученное значение  $A^r_j$  подставляли в уравнение (5), фиксировали параметры  $A^r_j$  и  $n_j$  и путем варьирования  $E_j$  от его начального значения проводили оптимизацию модели с

получением уточненного инвариантного значения энергии активации ( $E_j$ , Дж·моль<sup>-1</sup>). И на завершающем этапе оптимизации подставляли в уравнение (5) фиксированные значения  $E_j$  и  $A^r_j$  и путем варьирования  $n_j$  от его начального значения проводили оптимизацию модели с целью определения уточненного инвариантного значения параметра Аврами ( $n^r_j$ ). Найденные оптимальные инвариантные кинетические параметры использовали для решения прямой кинетической задачи применительно к процессу окисления руды в изучаемом диапазоне температурных программ; подстановкой значений  $E_j$ ,  $A^r_j$  и  $n^r_j$  в уравнения (5) и (2) получали аналитические выражения для расчета степени ( $\alpha_j$ ) и скорости превращения ( $da/dt$ , с<sup>-1</sup>) на уровне элементарных реакций. Верификацию моделей для каждой реакции проводили путем оценки тесноты корреляционной связи между теоретическими и экспериментальными данными, для этого строили уточненные расчетные кинетические кривые  $\alpha_{ij}-T$  и сравнивали их с экспериментальными; критерием оптимальности служил усредненный по всем температурным программам коэффициент корреляции Пирсона ( $r_{avj}$ ):

$$r_{avj} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 r_{ij}. \quad (10)$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По данным ИСП АЭС исходная руда имеет следующий состав, % масс.: 0,98 Cu; 0,01 Ni; 0,10 Co; 0,78 Zn; 38,5 Fe; 30,2 S; 0,03 As; 17,0 SiO<sub>2</sub>; 0,9 CaO; 6,7 MgO и 4,8 прочих. При рядовом содержании меди (0,98% масс.) и цинка (0,78% масс.) она отличается повышенным (0,10% масс.) содержанием кобальта. Ориентировочные массовые доли сульфидов и пирообразующих компонентов составляют, таким образом, 63,3 и 36,7%. По результатам РФА (рис. 1 и табл. 1) суммарное содержание сульфидных фаз в образце исходной руды, определенное методом корундовых чисел, составляет 42,4% масс.; в числе выявленных минералов можно отметить пирит (FeS<sub>2</sub>), халькопирит (CuFeS<sub>2</sub>) и вюрцит (ZnS), содержания которых равны 30,7, 3,1 и 8,6% масс.,

соответственно. Оставшаяся часть (57,6% масс.) включает породообразующие минералы: tremolite ( $\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{H}_2(\text{SiO}_3)_8$ ), siderite ( $\text{FeCO}_3$ ) и кварц ( $\text{SiO}_2$ ); их содержания, таким образом, достигают 17,1, 2,6 и 38,0% масс. Разница в количественных оценках содержаний элементов может быть связана с ошибкой определения, присущей примененным методам анализа.

Исследование методами РЭМ и ЭДС показало (рис. 2), что руда обладает полнокристаллической порфировидной мелкозернистой структурой, для которой характерно тесное прорастание сульфидных и оксидных фаз, и имеет массивную (неупорядоченную) текстуру. В матрице, представленной силикатом магния, гидратированным оксидом железа (III) и карбонатами железа и кальция составов  $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  (тальк),  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  (лимонит),  $\text{FeCO}_3$  (сiderит) и  $\text{CaCO}_3$  (кальцит). Таким образом, распределены вкрапления (5–150 мкм) сульфида железа, по составу отвечающего пириту ( $\text{FeS}_2$ ), и приуроченных к нему мелких (до 5 мкм) выделений с формулами сфалерита ( $\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{S}$ ) и халькопирита ( $\text{CuFeS}_2$ ).

Сведения о составе и строении медно-кобальтовой руды, полученные методами РФА, СЭМ и ЭДС, дополняют друг друга и удовлетворительно согласуются со сведениями, полученными ранее для руды этого же месторождения [3, 4]. Обобщая полученные в настоящей работе данные, можно сделать вывод, что основными рудными минералами исследованного образца могут являться пирит, пирротин, халькопирит, сфалерит (вюрцит) и лимонит,нерудными – tremolite, диоксид кремния, тальк, siderite, кальцит и некоторые другие алюмосиликаты железа. Относительно распределения цветных металлов следует отметить, что в отличие от меди и цинка, кобальт собственных минеральных форм не образует и в количестве до 0,35% масс. изоморфно входит в состав пирита.

Результаты эксперимента по окислению руды, полученные методом ВРФА, представлены на рис. 1 и в табл. 1 (необходимо отметить ограничения, вытекающие из условий эксперимента:

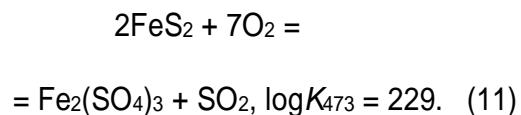
1) полукачественный характер оценки содержаний фаз, не позволяющий составить поэлементный материальный баланс;

2) действие на образцы влаги воздуха;

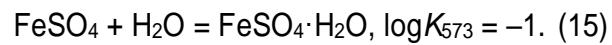
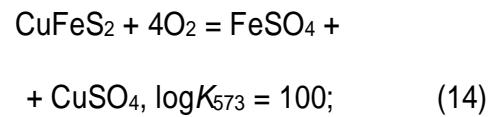
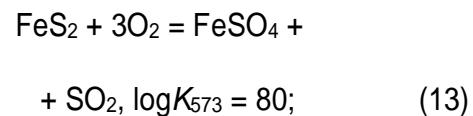
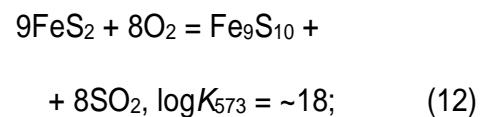
3) затруднения при идентификации фаз, вызванные изменением межплоскостных расстояний вследствие термического расширения;

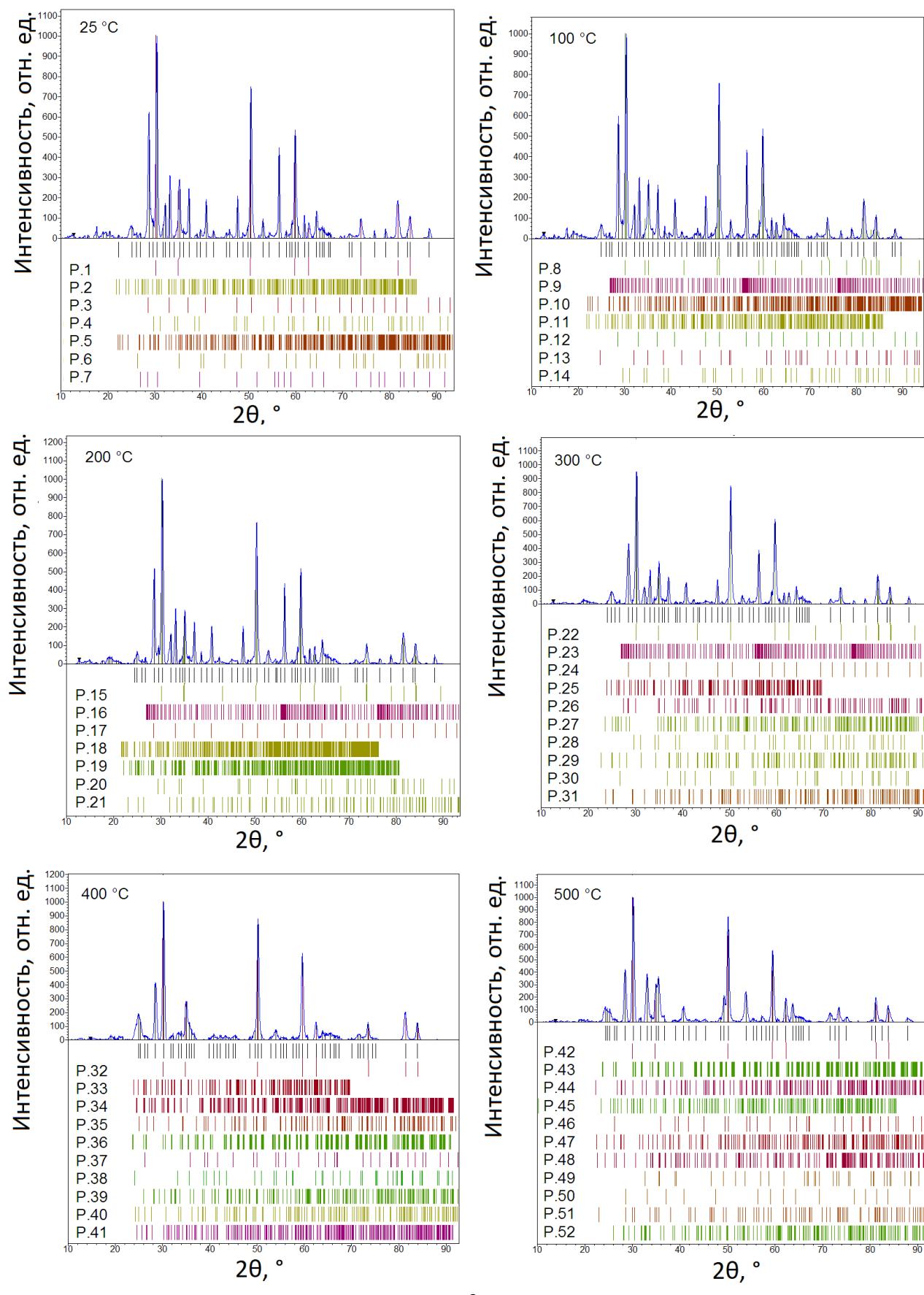
4) конечное время нагрева образца до температуры изотермической выдержки, составляющее ~7,5 мин для 100°C и ~87,5 мин для 900°C;

5) возможность образования и исчезновения фаз за меньший период времени по сравнению с продолжительностью регистрации дифрактограмм. Из полученных данных следует, что до 200°C значительных изменений в фазовом составе исходного образца не произошло; лишь при 200°C отмечено появление сульфата железа (III) ( $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ), свидетельствующего о начале окисления пирита по реакции:



Факт низкотемпературного окисления согласуется с данными [15, 52]. Формирование при 300°C гексагонального пирротина с формулой  $\text{Fe}_9\text{S}_{10}$ , пуатвинита ( $\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) и сульфата меди (II) ( $\text{CuSO}_4$ ) можно связать с развитием процессов, описываемых следующими уравнениями:





а

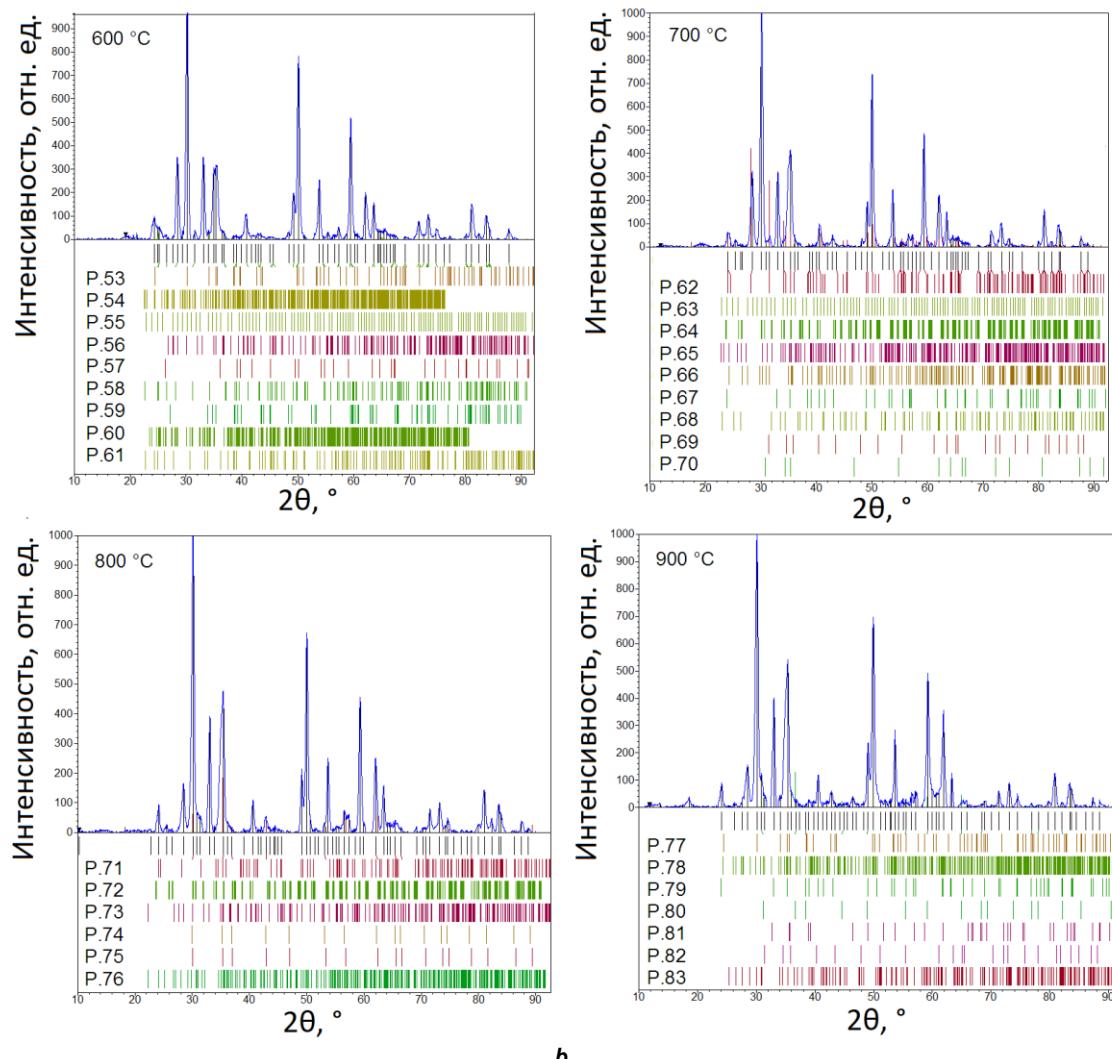


Рис. 1. Дифрактограммы медно-cobальтовой руды на воздухе при 25–900°C (а) и (б)  
Fig. 1. X-ray diffraction patterns of the copper-cobalt ore in air at 25–900°C (a) and (b)

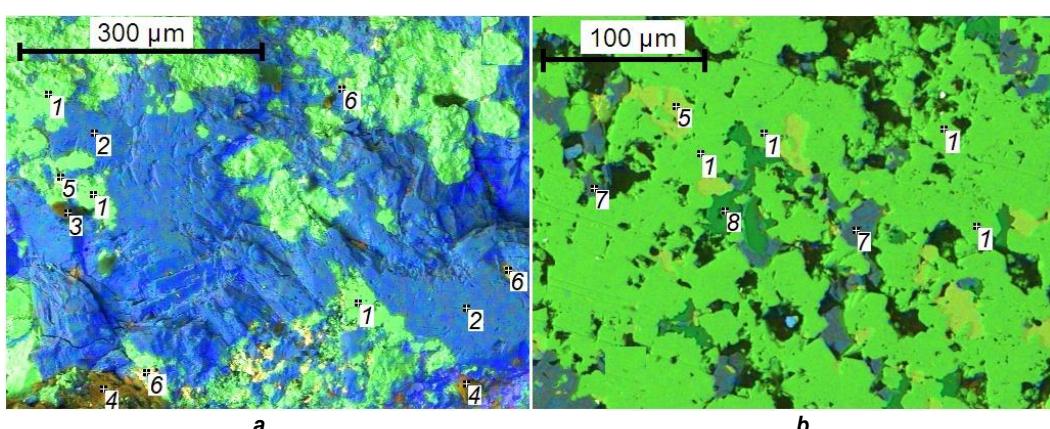


Рис. 2. Микрофотографии участков медно-cobальтовой руды с преобладанием оксидных (а) и сульфидных (б) соединений (изображение в отраженных электронах с указанием точек определения локального элементного состава методом ЭДС): 1 –  $\text{FeS}_2$  (<0,35% масс. Co), 2 –  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , 3 – алюмосиликаты железа, 4 –  $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})^2$ , 5 –  $\text{CuFeS}_2$ , 6 –  $\text{Zn}^{1-x}\text{Fe}_x\text{S}$ , 7 –  $\text{FeCO}_3$ , 8 –  $\text{CaCO}_3$

Fig. 2. Micrographs of the copper-cobalt ore fields with predominant oxide (a) and sulfide (b) compounds (back scattered electron image with specified determination points of local elemental composition by the EMF (electromotive force method)): 1 –  $\text{FeS}_2$  (<0.35 mass% Co), 2 –  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , 3 – iron aluminosilicates, 4 –  $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})^2$ , 5 –  $\text{CuFeS}_2$ , 6 –  $\text{Zn}^{1-x}\text{Fe}_x\text{S}$ , 7 –  $\text{FeCO}_3$ , 8 –  $\text{CaCO}_3$

Таблица 1. Характеристика кристаллических фаз медно-cobальтовой руды по данным рентгенофазового анализа  
 Table 1. Characteristics of the crystalline phases of the copper-cobalt ore according to x-ray phase analysis data

№	Карточка [76]	Фаза	Формула	FoM	Содержание, % масс.
25°C					
P. 2	00-412-4058	Диоксид кремния	SiO <sub>2</sub>	0,7190	38,0
P. 3	00-900-0594	Пирит	FeS <sub>2</sub>	0,7036	30,7
P. 4	00-101-0940	Халькопирит	CuFeS <sub>2</sub>	0,6307	3,1
P. 5	00-101-1146	Тремолит	Ca <sub>2</sub> Mg <sub>5</sub> H <sub>2</sub> (SiO <sub>3</sub> ) <sub>8</sub>	0,5816	17,1
P. 6	00-901-5604	Сидерит	FeCO <sub>3</sub>	0,4794	2,6
P. 7	00-110-1051	Вюрцит	ZnS	0,5780	8,6
100°C					
P. 9	00-231-0814	Сфалерит	ZnS	0,8065	12,5
P. 10	00-101-1146	Тремолит	Ca <sub>2</sub> Mg <sub>5</sub> H <sub>2</sub> (SiO <sub>3</sub> ) <sub>8</sub>	0,7762	44,0
P. 11	00-412-4058	Диоксид кремния	SiO <sub>2</sub>	0,7459	21,9
P. 12	00-154-4891	Пирит	FeS <sub>2</sub>	0,7338	13,2
P. 13	00-210-4746	Сидерит	FeCO <sub>3</sub>	0,6346	7,3
P. 14	00-101-0940	Халькопирит	CuFeS <sub>2</sub>	0,5818	1,2
200°C					
P. 16	00-231-0813	Сульфид цинка	ZnS	0,7860	16,1
P. 17	00-770-0358	Пирит	FeS <sub>2</sub>	0,7788	26,0
P. 18	00-101-0935	Антофиллит	Mg <sub>7</sub> Si <sub>8</sub> O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub>	0,7312	41,8
P. 19	00-900-8249	Сульфат железа (III)	Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	0,7087	10,9
P. 20	00-901-5636	Халькопирит	CuFeS <sub>2</sub>	0,6358	1,6
P. 21	00-412-4073	Диоксид кремния	SiO <sub>2</sub>	0,6042	3,6
300°C					
P. 23	00-231-0814	Сульфид цинка	ZnS	0,7577	15,6
P. 24	00-500-0115	Пирит	FeS <sub>2</sub>	0,7487	33,7
P. 25	00-210-4749	Пирротин 5С	Fe <sub>9</sub> S <sub>10</sub>	0,6819	2,2
P. 26	00-900-6289	Диоксид кремния	SiO <sub>2</sub>	0,6671	3,7
P. 27	00-900-4339	Гуатвинит	FeSO <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O	0,6608	12,0
P. 28	00-101-0940	Халькопирит	CuFeS <sub>2</sub>	0,6411	1,7
P. 29	00-591-0168	Сульфат меди (II)	CuSO <sub>4</sub>	0,6285	1,9
P. 30	00-153-2512	Диоксид кремния	SiO <sub>2</sub>	0,5596	5,4
P. 31	00-900-6875	Оливин	FeMgSiO <sub>4</sub>	0,7330	23,7
400°C					
P. 33	00-210-4749	Пирротин 5С	Fe <sub>9</sub> S <sub>10</sub>	0,7216	2,8
P. 34	00-210-4740	Пирротин 4С	Fe <sub>7</sub> S <sub>8</sub>	0,7168	5,0
P. 35	00-231-0620	Сульфат меди (II)	CuSO <sub>4</sub>	0,6476	8,5
P. 36	00-153-2800	Магнетит	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	0,6189	3,9
P. 37	00-900-8093	Кварц	SiO <sub>2</sub>	0,6150	3,6
P. 38	00-210-8027	Гематит	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,5907	5,9
P. 39	00-900-1498	Кубанит	CuFe <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	0,5864	22,3
P. 40	00-221-6658	Сульфат железа (II)	FeSO <sub>4</sub>	0,5621	9,9
P. 41	00-153-4957	Гидросиликат магния	Mg <sub>7</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>14</sub> (OH) <sub>2</sub>	0,7275	38,2
500°C					
P. 43	00-153-2800	Магнетит	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	0,7077	12,9
P. 44	00-400-2383	Гематит	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,6903	30,3
P. 45	00-210-6703	Пирротин	Fe <sub>11</sub> S <sub>12</sub>	0,6762	5,2
P. 46	00-900-5025	Кварц	SiO <sub>2</sub>	0,6638	2,0
P. 47	00-900-9694	Долерофанит	Cu <sub>2</sub> SO <sub>5</sub>	0,6299	9,7
P. 48	00-900-3692	Гидросиликат магния	Mg <sub>3</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O	0,5874	11,6
P. 49	00-900-8961	Тенорит	CuO	0,5352	6,3
P. 50	00-901-5842	Пирит	FeS <sub>2</sub>	0,5168	9,1
P. 51	00-900-7650	Троилит	FeS	0,4921	1,4
P. 52	00-900-1498	Кубанит	CuFe <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	0,6047	11,6

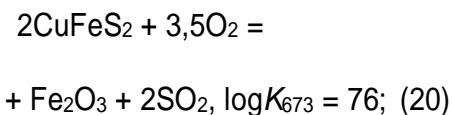
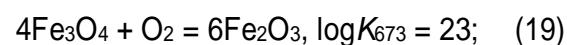
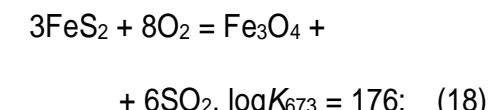
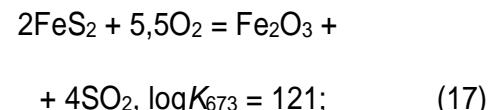
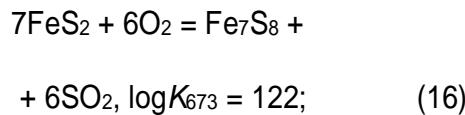
Продолжение таблицы 1

Table 1 (continuation)

№	Карточка [76]	Фаза	Формула	FoM	Содержание, % масс.
600°C					
P. 54	00-101-0935	Антофиллит	Mg <sub>7</sub> Si <sub>8</sub> O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub>	0,7504	48,2
P. 55	00-210-6936	Вюстит	Fe <sub>0,902</sub> O	0,7384	1,1
P. 56	00-400-2383	Гематит	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,6884	15,2
P. 57	00-900-5024	Кварц	SiO <sub>2</sub>	0,6732	2,3
P. 58	00-900-9830	Халькоцианит	CuSO <sub>4</sub>	0,6148	2,2
P. 59	00-153-3104	Магнетит	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	0,5654	6,3
P. 60	00-900-8249	Сульфат железа (III)	Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	0,7896	17,3
P. 61	00-221-6658	Сульфат железа (II)	FeSO <sub>4</sub>	0,7033	7,4
700°C					
P. 63	00-210-6936	Вюстит	Fe <sub>0,902</sub> O	0,8041	2,7
P. 64	00-153-2800	Магнетит	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	0,7749	15,0
P. 65	00-155-2115	Хризотил	Mg <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	0,7516	10,7
P. 66	00-900-5334	Диопсид	CaFe <sub>0,13</sub> Mg <sub>0,943</sub> Si <sub>1,927</sub> O <sub>6</sub>	0,7462	53,9
P. 67	00-210-8028	Гематит	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,7231	13,4
P. 68	00-412-4073	Диоксид кремния	SiO <sub>2</sub>	0,5205	0,6
P. 69	00-100-8929	Феррит меди (I)	CuFeO <sub>2</sub>	0,4846	1,3
P. 70	00-101-1259	Цинкит	ZnO	0,4725	2,3
800°C					
P. 72	00-153-2800	Магнетит	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	0,7552	17,0
P. 73	00-400-2383	Гематит	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,6581	26,5
P. 74	00-900-6893	Франклинит	ZnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	0,5996	10,7
P. 75	00-153-8387	Феррит меди	CuFe <sub>5</sub> O <sub>8</sub>	0,6441	4,6
P. 76	00-154-2068	Диопсид	Fe <sub>0,015</sub> Mg <sub>0,985</sub> SiO <sub>3</sub>	0,7869	41,3
900°C					
P. 78	00-152-8514	Диопсид	Fe <sub>0,15</sub> Mg <sub>1,82</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	0,8126	54,3
P. 79	00-210-8028	Гематит	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,7508	26,8
P. 80	00-900-2330	Магнетит	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	0,6115	4,7
P. 81	00-110-0028	Тенорит	CuO	0,5832	4,3
P. 82	00-900-0015	Делафоссит	CuFeO <sub>2</sub>	0,5553	3,6
P. 83	00-210-6565	Силикат цинка	ZnSiO <sub>3</sub>	0,7928	6,3

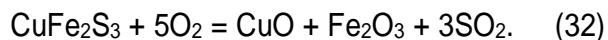
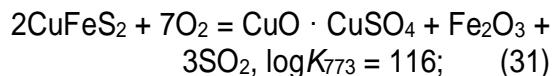
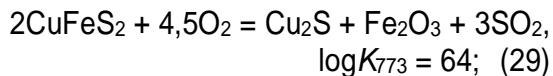
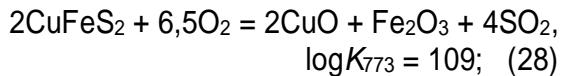
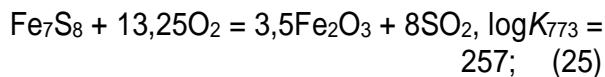
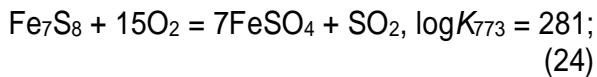
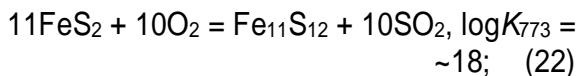
Примечание. N – обозначение фаз по рис. 1. FoM – критерий качества индицирования [76]. Фазы Р. 1, Р. 8, Р. 15, Р. 22, Р. 32, Р. 42, Р. 53, Р. 62, Р. 71 и Р. 77 – модификации диоксида циркония, стабилизированного иттрием (материала подложки) с общей формулой (Zr,Y)O<sub>2</sub> (карточки 00-500-0038, 00-152-6427, 00-152-1476, 00-152-1477, 00-231-0813, 00-152-8644, 00-210-7334, 00-154-5065, 00-152-2143, 00-152-2143).

причиной появления гидратных соединений может являться взаимодействие продуктов окисления с водой, содержащейся в воздухе и выделяющейся при дегидратации породообразующих минералов. При 400°C в дополнение к фазам, образованным при 300°C, выявлены моноклинный пирротин (Fe<sub>7</sub>S<sub>8</sub>), кубанит (CuFe<sub>2</sub>S<sub>3</sub>), магнетит (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) и гематит (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), формирующиеся по реакциям [15]:

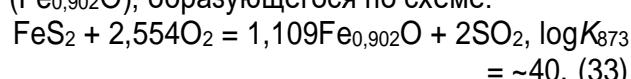




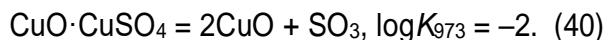
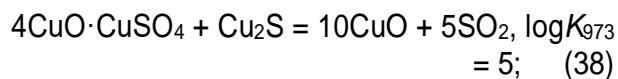
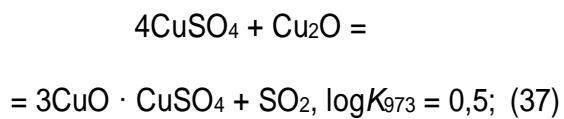
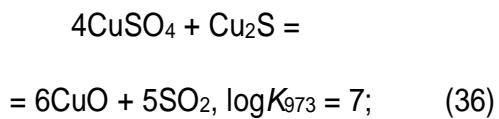
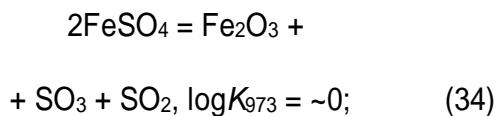
Несмотря на то, что присутствие пирита в продукте обжига при 400°C не подтверждено, его отражения вновь появляются на дифрактограмме, полученной при 500°C. Другими новообразованными фазами являются гексагональные модификации моносульфида железа с формулами  $\text{Fe}_{11}\text{S}_{12}$  и  $\text{FeS}$ , долерофанит ( $\text{CuO}\cdot\text{CuSO}_4$ ) и тенорит ( $\text{CuO}$ ). В связи с этим химизм окисления можно дополнить следующим рядом уравнений [15, 50]:



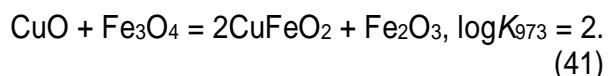
Для 600°C характерно полное расходование сульфидов железа и меди с формированием гематита и магнетита, сульфатов железа (II) и (III) и меди (II) по реакциям (13), (14), (24)–(30), а также появление вюстита ( $\text{Fe}_{0,902}\text{O}$ ), образующегося по схеме:



Начиная с 700°C в продуктах обжига отмечено отсутствие сульфатов, связанное с протеканием реакций их разложения [15, 20, 27, 31–33, 50, 52, 82]:



Продуктами окисления сульфидов в этом случае являются вюстит, магнетит и гематит, а также феррит меди (I) ( $\text{CuFeO}_2$ ), появляющийся в результате действия магнетита на оксид меди (II):



При этой же температуре можно ожидать начала интенсивного термического разложения гидратированных силикатов магния, например хризотила ( $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) и талька ( $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ), приводящего к образованию метасиликатов, в частности диопсида ( $\text{CaFe}_{0,13}\text{Mg}_{0,943}\text{Si}_{1,927}\text{O}_6$ ). Эти процессы можно представить общей схемой [83]:

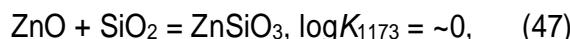


$$\log K_{973} = 0.5. \quad (43)$$

Отсутствие на соответствующих дифрактограммах следов форстерита ( $Mg_2SiO_4$ ) может быть связано с его аморфностью в начальные моменты выделения. Также при  $700^{\circ}\text{C}$  выявлены рефлексы цинкита ( $ZnO$ ), образующегося по уравнению [29]:

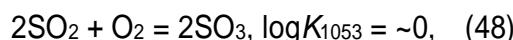


При  $800$  и  $900^{\circ}\text{C}$  формируются конечные продукты глубокого обжига, содержащие гематит ( $Fe_2O_3$ ), магнетит ( $Fe_3O_4$ ) и диопсид ( $Fe_{0.015}Mg_{0.985}SiO_3$  при  $800^{\circ}\text{C}$  и  $Fe_{0.15}Mg_{1.82}Si_2O_6$  при  $900^{\circ}\text{C}$ ); их происхождение связано с протеканием ряда указанных выше реакций. При  $800^{\circ}\text{C}$  могут дополнительно образовываться франклинит ( $ZnFe_2O_4$ ) и феррит меди состава  $CuFe_5O_8$ , а при  $900^{\circ}\text{C}$  – метасиликат цинка ( $ZnSiO_3$ ), тенорит ( $CuO$ ) и delaфоссит ( $CuFeO_2$ ); первые три из перечисленных фаз являются продуктами реакций [29, 63, 84]:



две последние – процессов, описанных уравнениями (28) и (41).

Состав газовой фазы в рассмотренном диапазоне температур определяется реакцией:



направление протекания которой сменяется с прямого на обратное при  $\sim 780^{\circ}\text{C}$ . Следует также отметить, что отсутствие на ряде дифрактограмм рефлексов сидерита и сульфида цинка в области температур их возможного существования можно пояснить низкой чувствительностью примененного аналитического метода в отношении указанных фаз. Значения констант равновесия большинства перечисленных реакций превышают единицу

(или близки к ней), что подтверждает возможность их протекания в прямом направлении (реакции, для которых из-за отсутствия в программе HSC Chemistry 6.12 термодинамических данных ряда соединений значение  $K_T$  не указано, носят предположительный характер или подтверждаются литературными данными). В целом представленные реакции могут служить лишь простейшим объяснением появления в продуктах обжига фаз, выявленных методом РФА. При этом очевидно, что химизм окисления руды носит еще более сложный характер.

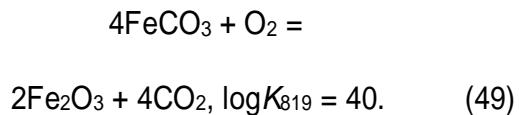
Результаты термического анализа медно-кобальтовой руды, проведенного в условиях нагрева ( $\beta_i = 5, 10$  и  $20^{\circ}\text{C} \cdot \text{мин}^{-1}$ ) от  $30$  до  $1100^{\circ}\text{C}$  в потоке ( $30 \text{ см}^3 \cdot \text{мин}^{-1}$ ) воздуха, представлены на рис. 3 и 4 и в табл. 2. На кривых ДСК (рис. 3) выявлены три первичных термических эффекта. Первый эффект представляет собой сложный экзотермический пик высокой интенсивности, образованный серией частично перекрывающихся (а при  $\beta_i = 5^{\circ}\text{C} \cdot \text{мин}^{-1}$  – частично разрешающихся) элементарных экзотермических пиков, и имеет следующие характеристики:  $T_o = 378^{\circ}\text{C}$ ,  $T_p = 415/468^{\circ}\text{C}$ ,  $T_e = 521^{\circ}\text{C}$  и  $\Delta H = -1468 \text{ Дж} \cdot \text{г}^{-1}$  при  $\beta_i = 5^{\circ}\text{C} \cdot \text{мин}^{-1}$ ;  $T_o = 386^{\circ}\text{C}$ ,  $T_p = 420/467^{\circ}\text{C}$ ,  $T_e = 549^{\circ}\text{C}$  и  $\Delta H = -1795 \text{ Дж} \cdot \text{г}^{-1}$  при  $\beta_i = 10^{\circ}\text{C} \cdot \text{мин}^{-1}$ ;  $T_o = 359^{\circ}\text{C}$ ,  $T_p = 457^{\circ}\text{C}$ ,  $T_e = 570^{\circ}\text{C}$  и  $\Delta H = -2052 \text{ Дж} \cdot \text{г}^{-1}$  при  $\beta_i = 20^{\circ}\text{C} \cdot \text{мин}^{-1}$ .

Разделение сложных экзотермических пиков показало (рис. 5 и табл. 2), что каждый из них является результатом наложения пяти элементарных экзотермических пиков (далее им присвоены условные обозначения ЭП1, ЭП2, ЭП3, ЭП4 и ЭП5), температуры максимумов ( $T_{p,ij}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ) которых, таким образом, равны  $415, 417, 447, 467$  и  $484^{\circ}\text{C}$  для  $\beta_i = 5^{\circ}\text{C} \cdot \text{мин}^{-1}$ ;  $420, 422, 466, 496$  и  $513^{\circ}\text{C}$  для  $\beta_i = 10^{\circ}\text{C} \cdot \text{мин}^{-1}$ ;  $427, 450, 462, 496^{\circ}\text{C}$  и  $536^{\circ}\text{C}$  – для  $\beta_i = 20^{\circ}\text{C} \cdot \text{мин}^{-1}$ . Вторым и третьим эффектами являются слабо выраженные простые (элементарные) эндотермические пики (далее обозначенные как ЭП6 и ЭП7) со следующими параметрами:  $T_o = 561^{\circ}\text{C}$ ,  $T_p = 598^{\circ}\text{C}$ ,  $T_e = 529^{\circ}\text{C}$  и  $\Delta H = 49 \text{ Дж} \cdot \text{г}^{-1}$  при  $\beta_i = 5^{\circ}\text{C} \cdot \text{мин}^{-1}$ ;  $T_o = 566^{\circ}\text{C}$ ,  $T_p = 615^{\circ}\text{C}$ ,  $T_e = 645^{\circ}\text{C}$  и  $\Delta H = 91 \text{ Дж} \cdot \text{г}^{-1}$  при  $\beta_i = 10^{\circ}\text{C} \cdot \text{мин}^{-1}$ ;  $T_o = 596^{\circ}\text{C}$ ,  $T_p = 630^{\circ}\text{C}$ ,  $T_e = 664^{\circ}\text{C}$  и  $\Delta H = 100 \text{ Дж} \cdot \text{г}^{-1}$  при  $\beta_i = 20^{\circ}\text{C} \cdot \text{мин}^{-1}$ .

и  $\Delta H = 97 \text{ Дж}\cdot\text{г}^{-1}$  при  $\beta_i = 20^\circ\text{C}\cdot\text{мин}^{-1}$  (второй пик);  $T_o = 743^\circ\text{C}$ ,  $T_p = 774^\circ\text{C}$ ,  $T_e = 834^\circ\text{C}$  и  $\Delta H = 113 \text{ Дж}\cdot\text{г}^{-1}$  при  $\beta_i = 5^\circ\text{C}\cdot\text{мин}^{-1}$ ;  $T_o = 760^\circ\text{C}$ ,  $T_p = 814^\circ\text{C}$ ,  $T_e = 867^\circ\text{C}$  и  $\Delta H = 64 \text{ Дж}\cdot\text{г}^{-1}$  при  $\beta_i = 10^\circ\text{C}\cdot\text{мин}^{-1}$ ;  $T_o = 798^\circ\text{C}$ ,  $T_p = 855^\circ\text{C}$ ,  $T_e = 927^\circ\text{C}$  и  $\Delta H = 51 \text{ Дж}\cdot\text{г}^{-1}$  при  $\beta_i = 20^\circ\text{C}\cdot\text{мин}^{-1}$  (третий пик). По данным ТГ (рис. 3) к  $1100^\circ\text{C}$  общая потеря массы в ходе окисления составляет 28–29%, из них на участок –  $30– $318^\circ\text{C}$ , свободный от эффектов ДСК, приходится 4–5%, а на серию экзотермических ( $359$ – $570^\circ\text{C}$ ) и две эндотермические ( $561$ – $664^\circ\text{C}$  и  $743$ – $927^\circ\text{C}$ ) аномалии – 7–10, 8–9 и 4–6%, соответственно; остаток потерь приходится на высокотемпературную область. Теоретические расчеты показали, что удаление в газовую фазу всех волатильных компонентов ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  и  $\text{S}$ ) должно уменьшить массу образца на ~20%; экспериментальная оценка превышает эту величину, что указывает на возможную погрешность определения вещественного состава руды или более сложный характер процесса. К зоне экзотермических процессов приурочены отмеченные на кривых МС (рис. 4) следы интенсивного выделения газов:  $\text{SO}_2$  ( $T_p^{\text{SO}_2} = 415$  и  $466^\circ\text{C}$  при  $\beta_i = 5^\circ\text{C}\cdot\text{мин}^{-1}$ ,  $T_p^{\text{SO}_2} = 420$  и  $465^\circ\text{C}$  при  $\beta_i = 10^\circ\text{C}\cdot\text{мин}^{-1}$ ,  $T_p^{\text{SO}_2} = 427$  и  $456^\circ\text{C}$  при  $\beta_i = 20^\circ\text{C}\cdot\text{мин}^{-1}$ ),  $\text{SO}_3$  ( $T_p^{\text{SO}_3} = 415$  и  $464^\circ\text{C}$  при  $\beta_i = 5^\circ\text{C}\cdot\text{мин}^{-1}$ ,  $T_p^{\text{SO}_3} = 419$  и  $472^\circ\text{C}$  при  $\beta_i = 10^\circ\text{C}\cdot\text{мин}^{-1}$ ,  $T_p^{\text{SO}_3} = 463^\circ\text{C}$  при  $\beta_i = 20^\circ\text{C}\cdot\text{мин}^{-1}$ ) и  $\text{CO}_2$  ( $T_p^{\text{CO}_2} = 519^\circ\text{C}$  при  $\beta_i = 5^\circ\text{C}\cdot\text{мин}^{-1}$ ,  $T_p^{\text{CO}_2} = 536^\circ\text{C}$  при  $\beta_i = 10^\circ\text{C}\cdot\text{мин}^{-1}$ ,  $T_p^{\text{CO}_2} = 546^\circ\text{C}$  при  $\beta_i = 20^\circ\text{C}\cdot\text{мин}^{-1}$ ). Последующие эндотермические события связаны со скачками ионного тока  $\text{SO}_2$  ( $T_p^{\text{SO}_2} = 604$  и  $819^\circ\text{C}$  при  $\beta_i = 5^\circ\text{C}\cdot\text{мин}^{-1}$ ,  $T_p^{\text{SO}_2} = 632$  и  $842^\circ\text{C}$  при  $\beta_i = 10^\circ\text{C}\cdot\text{мин}^{-1}$ ,  $T_p^{\text{SO}_2} = 647$  и  $855^\circ\text{C}$  при  $\beta_i = 20^\circ\text{C}\cdot\text{мин}^{-1}$ ). Методом МС выявлены также три слабых пика ионного тока воды, максимумы которых ( $T_p^{\text{H}_2\text{O}}$ ) варьируются в диапазонах  $120– $125$ ,  $290– $310$  и  $950$ – $960^\circ\text{C}$ .$$$

Анализ результатов ВРФА, ДСК, ТГ и МС показывает, что нагрев ( $\beta_i = 5$ – $20^\circ\text{C}\cdot\text{мин}^{-1}$ ) медно-кобальтовой руды до  $318^\circ\text{C}$  сопровождается удалением в газовую фазу адсорбционной (капиллярной) и гигроскопической влаги, с которыми связаны первоначальная монотонная потеря массы ( $\Delta m = 4$ – $5\%$ ) и выделение в газовую фазу  $\text{H}_2\text{O}$  при  $120$ – $125$  и

$290$ – $310^\circ\text{C}$ . Основной период окисления медно-кобальтовой руды, связанный с выделением наибольшего ( $-\Delta H = 1468$ – $2052 \text{ Дж}\cdot\text{г}^{-1}$ ) количества теплоты, начинается при  $359^\circ\text{C}$ , достигает кульминации при  $420$ – $468^\circ\text{C}$  и завершается к  $570^\circ\text{C}$ ; на него приходится до ~34% относительного суммарного снижения массы. В его границах могут протекать многочисленные взаимодействия минералов руды с газообразной атмосферой, описываемые уравнениями (12)–(32); часть реакций характеризуется высоким тепловым эффектом и предусматривает выделение большого количества  $\text{SO}_2$ , способного взаимодействовать с  $\text{O}_2$  по реакции (48). Появление  $\text{CO}_2$ , интенсифицирующееся к  $519$ – $546^\circ\text{C}$ , можно связать с окислительным разложением сидерита [85]:



Исходя из выявленного методом ТГ факта отсутствия увеличения массы, основное содержание этого периода можно связать с воспламенением и прямым окислением (горением) сульфидов с образованием оксидов [15]; формирование сульфатов при этом носит ограниченный характер, или они эффективно разрушаются сульфидными соединениями. Заключительный этап окисления руды включает два процесса, сопровождаемых слабыми эндотермическими эффектами ( $\Delta H = 49$ – $97$  и  $51$ – $113 \text{ Дж}\cdot\text{г}^{-1}$ , соответственно), снижением массы (до ~31 и ~21% отн.) и выделением  $\text{SO}_2$ ; по всей вероятности, в этом случае имеет место термическое разложение остаточных сульфатов: железа – при  $561$ – $664^\circ\text{C}$  (реакции (34) и (35)) и меди – при  $743$ – $927^\circ\text{C}$  (реакции (39) и (40)). Этот вывод подтверждается данными [19, 31, 57, 86, 87]. При  $950$ – $960^\circ\text{C}$  выделяется часть кристаллизационной воды породообразующих силикатных минералов.

Таким образом, формальную кинетику окислительного обжига руды можно связать с совокупностью семи элементарных реакций: пяти экзотермических (при  $398$ – $445$ ,  $394$ – $488$ ,  $440$ – $498$ ,  $433$ – $549$  и  $451$ – $562^\circ\text{C}$ ), отвечающих

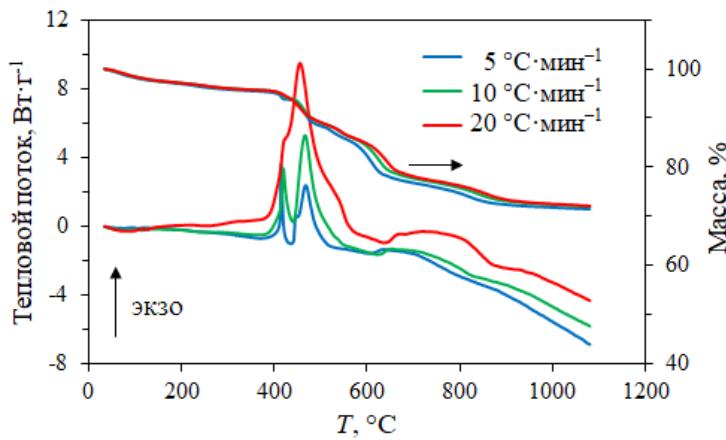


Рис. 3. Кривые термогравиметрии и дифференциальной сканирующей калориметрии нагрева (30–1100°C,  $\beta_i = 5, 10$  и  $20^{\circ}\text{C}\cdot\text{мин}^{-1}$ , динамическая воздушная атмосфера) медно-кобальтовой руды

Fig. 3. Thermogravimetry curves and differential scanning calorimetry curves of copper-cobalt ore heating ( $\beta_i = 5, 10$ , and  $20^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ , dynamic air atmosphere) in the air flow from 30 to 1100°C

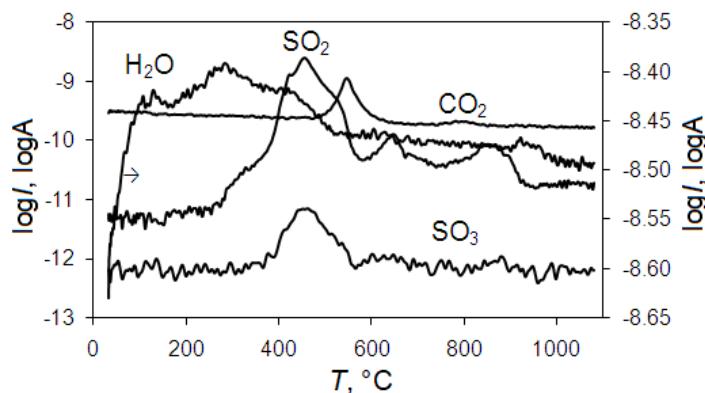


Рис. 4. Кривые масс-спектрометрии нагрева (30–1100°C,  $\beta_i = 20^{\circ}\text{C}\cdot\text{мин}^{-1}$ , динамическая воздушная атмосфера) медно-кобальтовой руды. Графики для  $\beta_i = 5$  и  $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{мин}^{-1}$  имеют аналогичный вид

Fig. 4. Mass spectrometry curves of copper-cobalt ore heating ( $\beta_i = 20^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ , dynamic air atmosphere) in the air flow from 30 to 1100°C. Plots for  $\beta_i = 5$  and  $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  are analogical

интенсивному горению сульфидов железа, меди и цинка, и двух эндотермических (при 561–664 и 743–927°C), связанных с разложением остаточных сульфатов меди и железа. Сгруппированные одноименные пики ДСК, являющиеся их следами, показаны на рис. 6 и 7. Результаты кинетического анализа данных ДСК применительно к интервалам температур протекания указанных реакций представлены на рис. 8–10 и в табл. 3; инвариантные значения энергии активации ( $E_j$ ) и предэкспоненциального множителя ( $\log A_j$ ), определенные методом Киссинджера, составляют:

- 1)  $E_1 = 455 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$ ,  $\log A_1 = 32,5 \log(\text{c}^{-1})$ ;
- 2)  $E_2 = 142 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$ ,  $\log A_2 = 8,3 \log(\text{c}^{-1})$ ;
- 3)  $E_3 = 220 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$ ,  $\log A_3 = 13,7 \log(\text{c}^{-1})$ ;
- 4)  $E_4 = 159 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$ ,  $\log A_4 = 8,7 \log(\text{c}^{-1})$ ;

- 5)  $E_5 = 124 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$ ,  $\log A_5 = 5,9 \log(\text{c}^{-1})$ ;
- 6)  $E_6 = 275 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$ ,  $\log A_6 = 15,6 \log(\text{c}^{-1})$ ;
- 7)  $E_7 = 154 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$ ,  $\log A_7 = 4,4 \log(\text{c}^{-1})$ .

Форма графиков функции  $y_{ij}(a_{ij})$  (рис. 9 и 10) для элементарных реакций окисления отвечает кинетической модели нуклеации и роста кристаллов Джонсона–Мела–Аврами–Ерофеева–Колмогорова (An) [78]. Инвариантные величины параметра Аврами ( $n_j$ ) перечисленных реакций, рассчитанные методом Огиса–Беннетта, таким образом, равны 1,4, 1,1, 1,0, 1,1, 1,7, 1,7 и 4,0.

Уточненные инвариантные кинетические параметры ( $E_j$ ,  $A_j^r$ ,  $n_j^r$ ) элементарных реакций несколько отличаются от первоначальных оценок:

- 1)  $E_1 = 459 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$ ,

$\log A_1 = 31,5 \log(c^{-1})$ ,  $n_1 = 1,4$ ;  
 2)  $E_2 = 140 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$ ,  
 $\log A_2 = 8,6 \log(c^{-1})$ ,  $n_2 = 1,1$ ;  
 3)  $E_3 = 220 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$ ,  
 $\log A_3 = 13,7 \log(c^{-1})$ ,  $n_3 = 1,0$ ;  
 4)  $E_4 = 160 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$ ,  
 $\log A_4 = 8,1 \log(c^{-1})$ ,  $n_4 = 1,1$ ;  
 5)  $E_5 = 155 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$ ,

$\log A_5 = 5,9 \log(c^{-1})$ ,  $n_5 = 1,7$ ;  
 6)  $E_6 = 320 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$ ,  
 $\log A_6 = 15,7 \log(c^{-1})$ ,  $n_6 = 1,2$ ;  
 7)  $E_7 = 149 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$ ,  
 $\log A_7 = 4,2 \log(c^{-1})$ ,  $n_7 = 1,2$ .

Кинетические модели, полученные на основе этих параметров, имеют следующий вид:

$$\alpha_1 = 1 - \exp \left[ -3,49 \cdot 10^{31} \exp \left( -\frac{459000}{RT} \right) \left( \frac{T-T_{0i1}}{\beta_i} \right)^{1,4} \right]; \quad (50)$$

$$\alpha_2 = 1 - \exp \left[ -4,12 \cdot 10^8 \exp \left( -\frac{140000}{RT} \right) \left( \frac{T-T_{0i2}}{\beta_i} \right)^{1,1} \right]; \quad (51)$$

$$\alpha_3 = 1 - \exp \left[ -4,74 \cdot 10^{13} \exp \left( -\frac{220000}{RT} \right) \left( \frac{T-T_{0i3}}{\beta_i} \right) \right]; \quad (52)$$

$$\alpha_4 = 1 - \exp \left[ -1,20 \cdot 10^8 \exp \left( -\frac{160000}{RT} \right) \left( \frac{T-T_{0i4}}{\beta_i} \right)^{1,1} \right]; \quad (53)$$

$$\alpha_5 = 1 - \exp \left[ -7,27 \cdot 10^5 \exp \left( -\frac{155000}{RT} \right) \left( \frac{T-T_{0i5}}{\beta_i} \right)^{1,7} \right]; \quad (54)$$

$$\alpha_6 = 1 - \exp \left[ -4,90 \cdot 10^{15} \exp \left( -\frac{320000}{RT} \right) \left( \frac{T-T_{0i6}}{\beta_i} \right)^{1,2} \right]; \quad (55)$$

$$\alpha_7 = 1 - \exp \left[ -1,41 \cdot 10^4 \exp \left( -\frac{149000}{RT} \right) \left( \frac{T-T_{0i7}}{\beta_i} \right)^{1,2} \right]; \quad (56)$$

$$\frac{d\alpha_1}{dt} = 4,89 \cdot 10^{31} \exp \left( -\frac{459000}{RT} \right) (1 - \alpha_1) [-\ln(1 - \alpha_1)]^{0,29}; \quad (57)$$

$$\frac{d\alpha_2}{dt} = 4,52 \cdot 10^8 \exp \left( -\frac{140000}{RT} \right) (1 - \alpha_2) [-\ln(1 - \alpha_2)]^{0,09}; \quad (58)$$

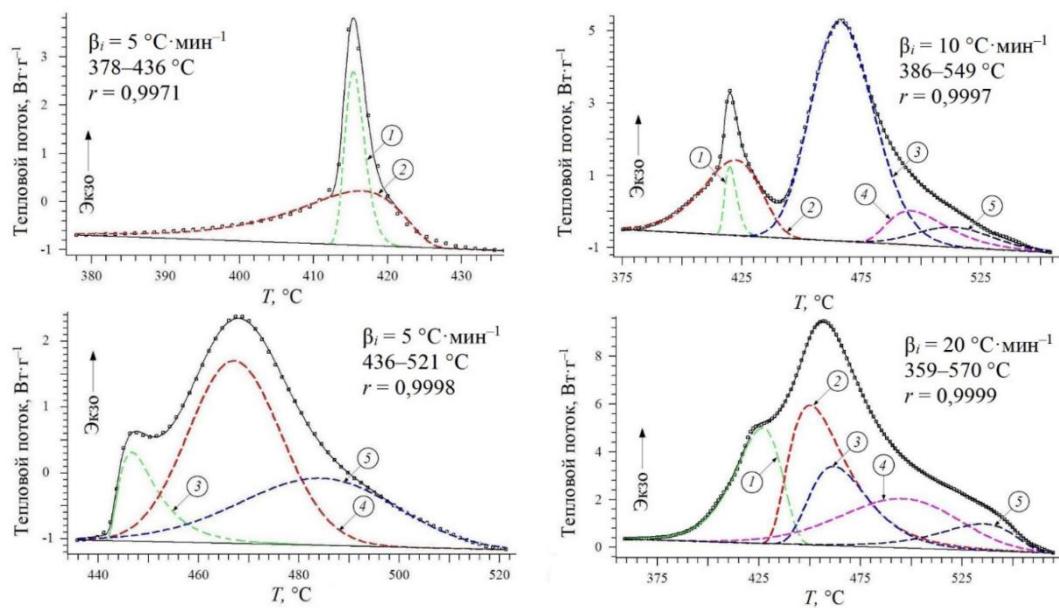
$$\frac{d\alpha_3}{dt} = 4,74 \cdot 10^{13} \exp \left( -\frac{220000}{RT} \right) (1 - \alpha_3); \quad (59)$$

$$\frac{d\alpha_4}{dt} = 1,32 \cdot 10^8 \exp \left( -\frac{160000}{RT} \right) (1 - \alpha_4) [-\ln(1 - \alpha_4)]^{0,09}; \quad (60)$$

$$\frac{d\alpha_5}{dt} = 1,24 \cdot 10^6 \exp \left( -\frac{155000}{RT} \right) (1 - \alpha_5) [-\ln(1 - \alpha_5)]^{0,41}; \quad (61)$$

$$\frac{d\alpha_6}{dt} = 5,88 \cdot 10^{15} \exp \left( -\frac{320000}{RT} \right) (1 - \alpha_6) [-\ln(1 - \alpha_6)]^{0,17}; \quad (62)$$

$$\frac{d\alpha_7}{dt} = 1,69 \cdot 10^4 \exp \left( -\frac{149000}{RT} \right) (1 - \alpha_7) [-\ln(1 - \alpha_7)]^{0,17}. \quad (63)$$



**Рис. 5. Результаты разделения сложных экзотермических пиков на криевых дифференциальной сканирующей калориметрии нагрева (30–1100°C,  $\beta_i = 5, 10$  и  $20^{\circ}\text{C}\cdot\text{мин}^{-1}$ , динамическая воздушная атмосфера) медно-кобальтовой руды. Сплошные прямые – базовые линии, точки – экспериментальные данные дифференциальной сканирующей калориметрии, штриховые кривые – расчетные кривые дифференциальной сканирующей калориметрии для элементарных пиков, сплошные кривые – суммарные расчетные кривые дифференциальной сканирующей калориметрии. В выносках показаны номера элементарных пиков**

**Fig. 5. Separation results for complex exothermic peaks on the differential scanning calorimetry curves of copper-cobalt ore heating ( $\beta_i = 5, 10$ , and  $20^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ) in the air flow from 30 to 1100°C. Solid straight lines are baselines, dots stand for experimental data of the differential scanning calorimetry, dashed curves are calculated curves of differential scanning calorimetry for elementary peaks; solid curves are summary calculated curves of differential scanning calorimetry. The numbers of elementary peaks are given in circles with arrows**

**Таблица 2.** Параметры элементарных пиков (359–927°C) на криевых дифференциальной сканирующей калориметрии нагрева (30–1100°C,  $\beta_i = 5, 10$  и  $20^{\circ}\text{C}\cdot\text{мин}^{-1}$ , динамическая воздушная атмосфера) медно-кобальтовой руды и значения  $n_{ij}$ , рассчитанные методом Огиса–Беннетта

**Table 2.** Parameters of the elementary peaks (359–927°C) on the differential scanning calorimetry curves of copper-cobalt ore heating ( $\beta_i = 5, 10$ , and  $20^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ) in the air flow from 30 to 1100°C, and  $n_{ij}$  values calculated by the Augis–Bennett method

Параметр	Значение						
	$\beta_i = 5^{\circ}\text{C}\cdot\text{мин}^{-1}$						
Пик	ЭП1	ЭП2	ЭП3	ЭП4	ЭП5	ЭП6	ЭП7
$T_{oij}$ , °C	413	397	442	449	451	561	743
$T_{p_{ij}}$ , °C	415	417	447	467	484	598	774
$T_{e_{ij}}$ , °C	418	426	457	486	514	629	834
$\Delta T_{p_{ij}}$ , K	3,1	16,3	12,6	23,8	14,0	32,2	43,5
$n_{ij}$	2,5	1,6	1,5	1,2	2,8	1,8	3,4
$\beta_i = 10^{\circ}\text{C}\cdot\text{мин}^{-1}$							
Пик	ЭП1	ЭП2	ЭП3	ЭП4	ЭП5	ЭП6	ЭП7
$T_{oij}$ , °C	416	394	442	478	483	566	760
$T_{p_{ij}}$ , °C	420	422	466	496	513	615	814
$T_{e_{ij}}$ , °C	426	443	494	527	546	645	867
$\Delta T_{p_{ij}}$ , K	5,7	28,7	30,8	27,9	37,1	38,3	33,6
$n_{ij}$	1,4	0,9	0,7	1,2	1,2	1,6	4,7
$\beta_i = 20^{\circ}\text{C}\cdot\text{мин}^{-1}$							
Пик	ЭП1	ЭП2	ЭП3	ЭП4	ЭП5	ЭП6	ЭП7
$T_{oij}$ , °C	398	431	440	433	489	596	798
$T_{p_{ij}}$ , °C	427	450	462	496	536	630	855
$T_{e_{ij}}$ , °C	445	488	498	549	562	664	927
$\Delta T_{p_{ij}}$ , K	26,8	31,9	33,9	38,1	42,4	31,4	42,5
$n_{ij}$	0,3	0,9	0,6	0,8	1,1	1,8	4,0

Верификация полученных моделей показала высокий ( $r_{avj} = 0,8580\text{--}0,9984$ ) уровень корреляционной связи уточненных расчетных и экспериментальных данных (рис. 11 и 12 и табл. 3); следовательно, они с убедительной достоверностью описывают кинетические закономерности окисления исследуемой сульфидной медно-cobальтовой руды в заданных условиях.

По литературным данным эффективная энергия активации процессов, сопровождающих окисление (при нагреве на воздухе) сульфидов железа, меди и цинка, а также их природных и искусственных смесей различной крупности (от  $-0,043$  до  $-12$  мм), может составлять  $7\text{--}463$  кДж·моль $^{-1}$  [11, 14, 19, 26, 27, 40, 41, 53, 60, 67, 69, 72, 82, 85]. При этом

оценки, полученные в настоящей работе ( $E_j = 124\text{--}455$  кДж·моль $^{-1}$ ), не выходят за рамки этого интервала.

Результаты определения реакционной модели показывают, что лимитирующей стадией всех элементарных реакций окисления исследуемой руды являются нуклеация и рост кристаллов. Следует упомянуть примеры применения модели Аврами–Ерофеева для описания механизма окисления сульфидов, в частности халькопиритных и пиритных концентратов [41, 67, 88]. Полученные в настоящей работе значения параметра Аврами ( $n_j^t$ ) находятся в диапазоне от 1 до 1,7, это позволяет сделать следующие выводы относительно деталей механизма и физико-геометрических особенностей процесса:

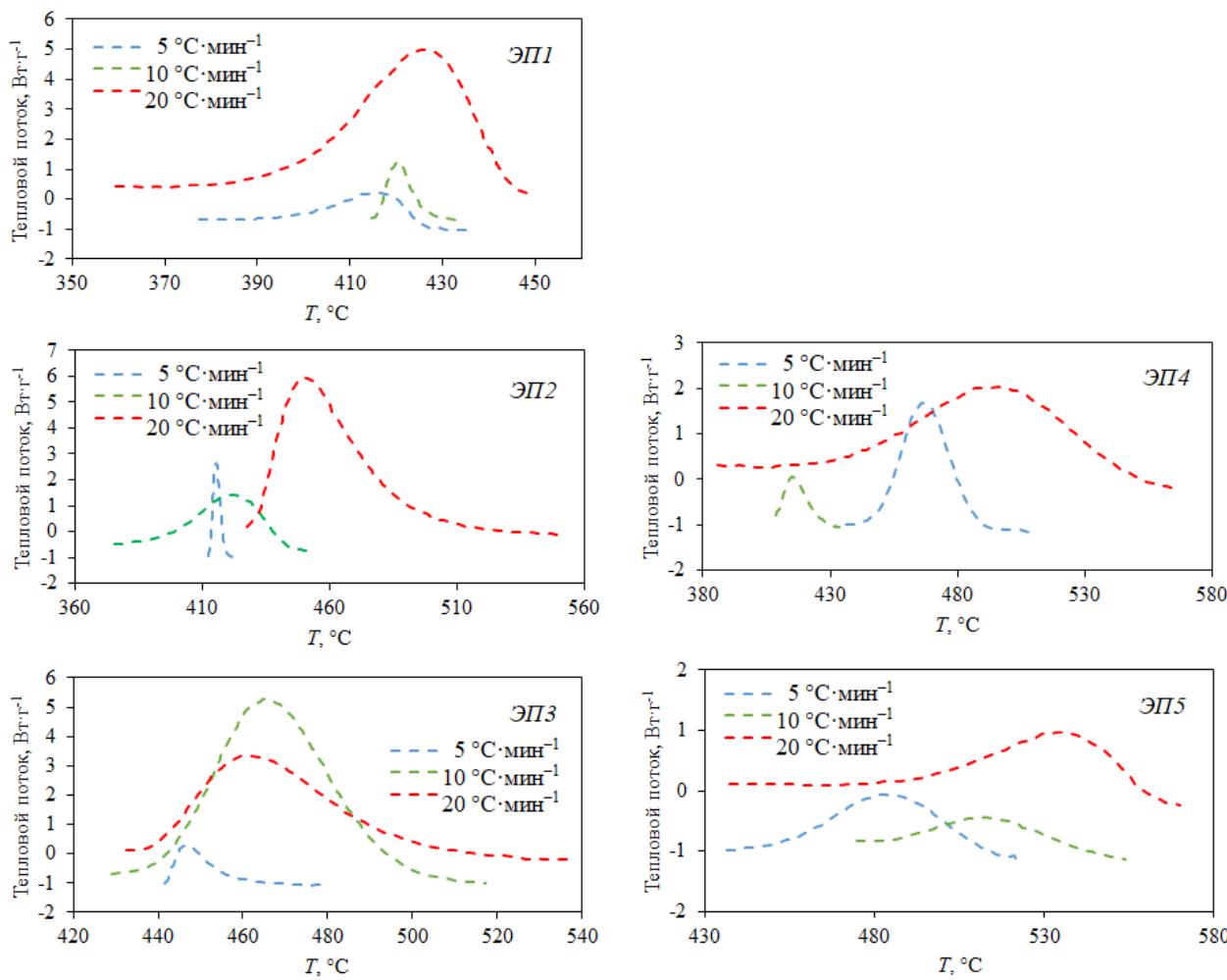


Рис. 6. Результаты группировки одноименных экзотермических элементарных пиков ( $359\text{--}570^\circ\text{C}$ ), полученных при разделении сложных пиков на кривой дифференциальной сканирующей калориметрии нагрева ( $30\text{--}1100^\circ\text{C}$ ,  $\beta_i = 5, 10$  и  $20^\circ\text{C}\cdot\text{мин}^{-1}$ ) медно-cobальтовой руды

Fig. 6. Results of grouping analogous elementary exothermic peaks ( $359\text{--}570^\circ\text{C}$ ) received under the complex peaks separation on the differential scanning calorimetry curve of copper-cobalt ore heating ( $\beta_i = 5, 10$ , and  $20^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ) in the air flow from 30 to  $1100^\circ\text{C}$

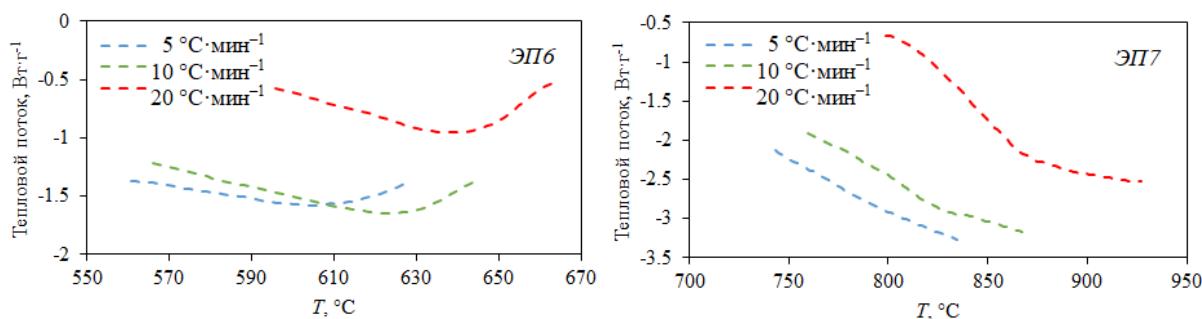


Рис. 7. Результаты группировки одноименных эндотермических элементарных пиков (561–927°C) на кривой дифференциальной сканирующей калориметрии нагрева (30–1100°C,  $\beta_i = 5, 10$  и  $20^{\circ}\text{C}\cdot\text{мин}^{-1}$ ) медно-cobальтовой руды

Fig. 7. Results of grouping analogous elementary endothermic peaks (561–927°C) on the differential scanning calorimetry curve of copper-cobalt ore heating ( $\beta_i = 5, 10$ , and  $20^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ) in the air flow from 30 to 1100°C

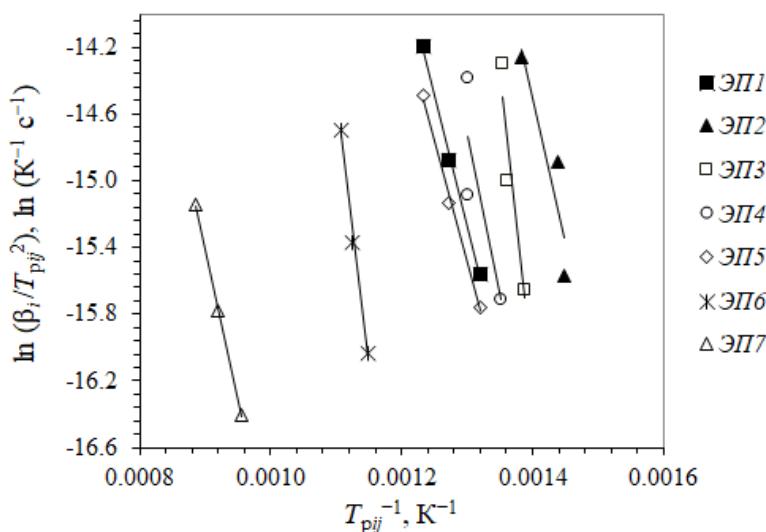


Рис. 8. Графики Киссингера для элементарных пиков (359–927°C) на кривой дифференциальной сканирующей калориметрии нагрева (30–1100°C,  $\beta_i = 5, 10$  и  $20^{\circ}\text{C}\cdot\text{мин}^{-1}$ ) медно-cobальтовой руды. Точки – экспериментальные данные, линии – результаты аппроксимации ( $R_1^2 = 0,9918$ ,  $R_2^2 = 0,8472$ ,  $R_3^2 = 0,5356$ ,  $R_4^2 = 0,7178$ ,  $R_5^2 = 0,9907$ ,  $R_6^2 = 0,9954$ ,  $R_7^2 = 0,9994$ )

Fig. 8. Kissinger plots for elementary peaks (359–927°C) on the differential scanning calorimetry curve of copper-cobalt ore heating ( $\beta_i = 5, 10$ , and  $20^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ) in the air flow from 30 to 1100°C. Dots stand for experimental data, lines – for approximation results ( $R_1^2 = 0.9918$ ,  $R_2^2 = 0.8472$ ,  $R_3^2 = 0.5356$ ,  $R_4^2 = 0.7178$ ,  $R_5^2 = 0.9907$ ,  $R_6^2 = 0.9954$ ,  $R_7^2 = 0.9994$ )

- 1) кристаллизация продуктов элементарных реакций сопровождается увеличением числа зародышей;
- 2) зародыши новой фазы могут формироваться как на поверхности, так и в объеме частиц руды;
- 3) рост кристаллов имеет одномерный характер и контролируется химической реакцией на границе раздела фаз или диффузией реагентов [89–92].

В заключение следует отметить, что по сравнению с медными концентратами медно-cobальтовая руда представляет собой

материал, более сложный в технологическом отношении, а целью ее обжига является не только удаление в газовую фазу определенного количества серы, но и соответствующая трансформация (разложение, дегидратация) минералов пустой породы. Полученные кинетические модели позволяют предсказывать уровень завершенности процесса в зависимости от времени и температуры. Результаты работы в целом могут способствовать развитию теоретических представлений о физико-химических превращениях сульфидных руд и концентратов в ходе пирометаллургических

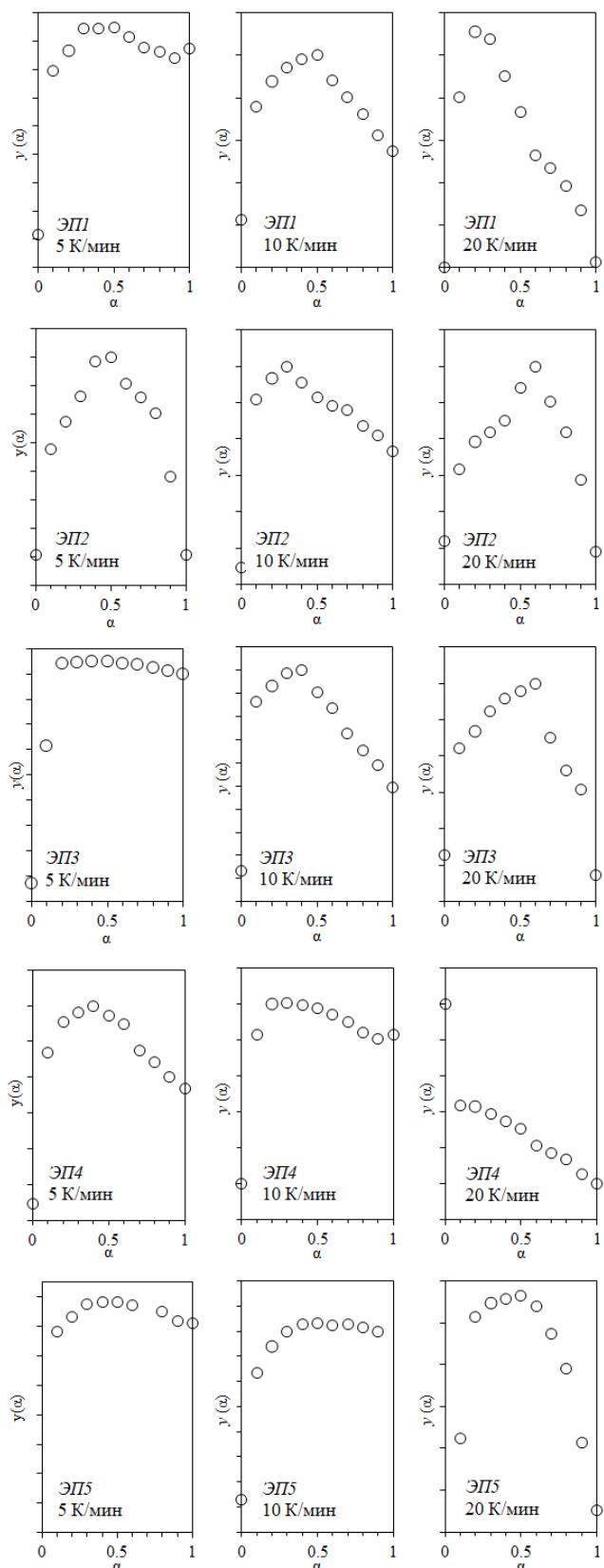
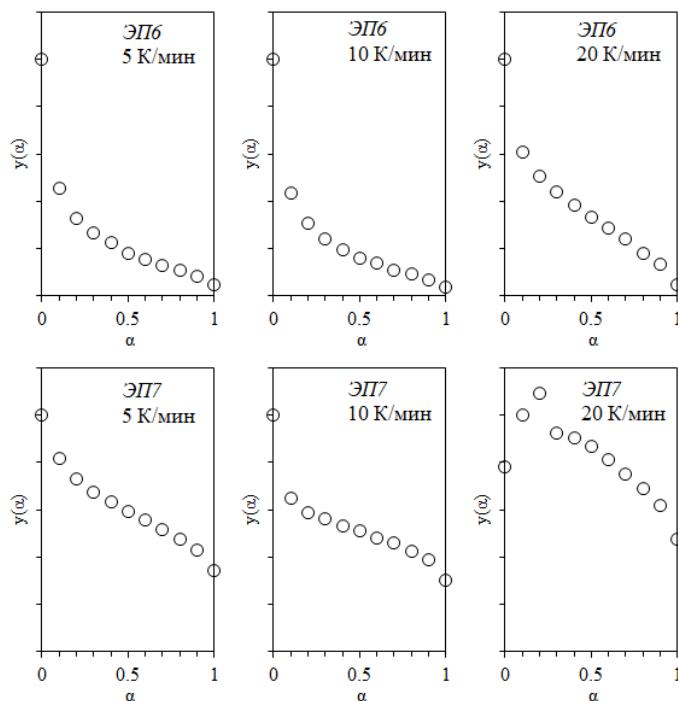


Рис. 9. Графики функции  $y(\alpha)$  для экзотермических элементарных реакций окисления (359–570°C) медно-cobальтовой руды, построенные по данным дифференциальной сканирующей калориметрии  
Fig. 9. Plots of the  $y(\alpha)$  function for exothermic elementary oxidation reactions (359–570°C) of the copper-cobalt ore based on differential scanning calorimetry data



**Рис. 10. Графики функции  $y(\alpha)$  для эндотермических элементарных реакций окисления (561–927°C) медно-кобальтовой руды, построенные по данным дифференциальной сканирующей калориметрии**  
**Fig. 10. Plots of the  $y(\alpha)$  function for endothermic elementary oxidation reactions (561–927°C) of the copper-cobalt ore based on differential scanning calorimetry data**

**Таблица 3.** Кинетические параметры элементарных реакций окисления (359–927°C) медно-кобальтовой руды, определенные по данным дифференциальной сканирующей калориметрии

**Table 3.** Kinetic parameters of elementary oxidation reactions (359–927°C) of the copper-cobalt ore, determined by the differential scanning calorimetry data

Элементарная реакция	Кинетический параметр						
	$E_j$ , кДж·моль $^{-1}$	$E'_j$ , кДж·моль $^{-1}$	$\log A_j$ , $\log(\text{с}^{-1})$	$\log A'_j$ , $\log(\text{с}^{-1})$	$n_j$	$n'_j$	$r_{\text{avj}}$
1	$455 \pm 22$	459	32,5	31,5	1,4	1,4	0,8615
2	$142 \pm 21$	140	8,3	8,6	1,1	1,1	0,8580
3	$220 \pm 22$	220	13,7	13,7	1,0	1,0	0,9464
4	$159 \pm 21$	160	8,7	8,1	1,1	1,1	0,9527
5	$124 \pm 20$	155	5,9	5,9	1,7	1,7	0,9928
6	$275 \pm 15$	320	15,6	15,7	1,7	1,2	0,9984
7	$154 \pm 14$	149	4,4	4,2	4,0	1,2	0,9689

Примечание. Номера элементарных реакций соответствуют номерам элементарных пиков в табл. 2.

операций, а также могут быть использованы в практике окислительного обжига этих материалов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Исследованы вещественный состав и структура образца (размер частиц менее 0,1 мм) медно-кобальтовой руды. Основными рудными минералами являются пирит ( $\text{FeS}_2$ ), халькопирит ( $\text{CuFeS}_2$ ), сфалерит–вюрцит

( $\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{S}$ ) и лимонит ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ); нерудными – тремолит ( $\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{H}_2(\text{SiO}_3)_8$ ), диоксид кремния ( $\text{SiO}_2$ ), тальк ( $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ), сидерит ( $\text{FeCO}_3$ ) и кальцит ( $\text{CaCO}_3$ ). Кобальт изоморфно входит в состав пирита. Руда обладает полнокристаллической порфировидной мелкозернистой структурой, для которой характерно тесное прорастание сульфидных и оксидных фаз, и имеет массивную (неупорядоченную) текстуру.

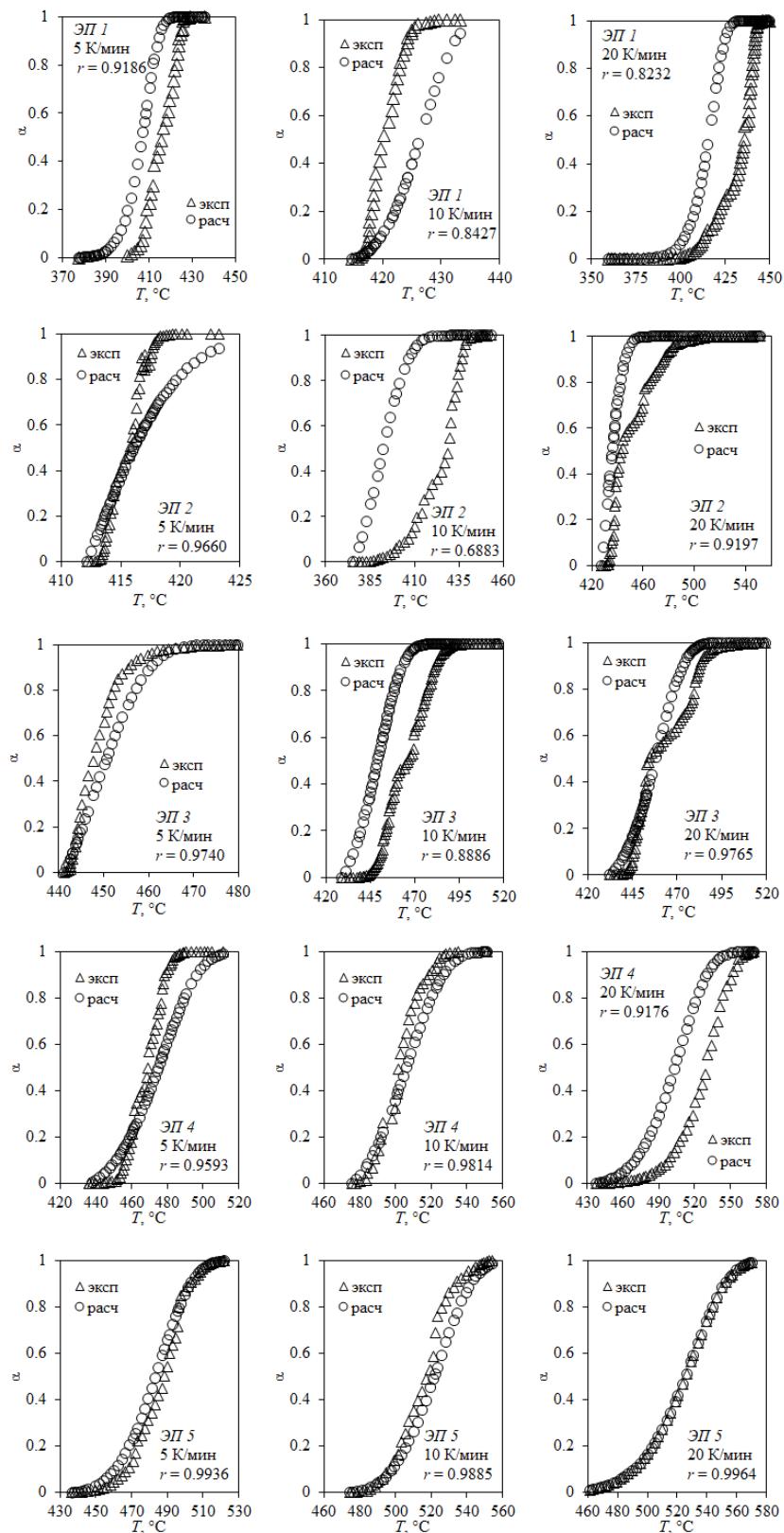


Рис. 11. Экспериментальные (кружки) и уточненные расчетные (треугольники) кинетические кривые  $\alpha$ -Т для экзотермических элементарных реакций окисления (359–570°C) медно-cobальтовой руды, построенные по данным дифференциальной сканирующей калориметрии

Fig. 11. Experimental (circles) and refined calculated (triangles) kinetic curves  $\alpha$ -T for exothermic elementary oxidation reactions (359–570°C) of the copper-cobalt ore plotted on differential scanning calorimetry data

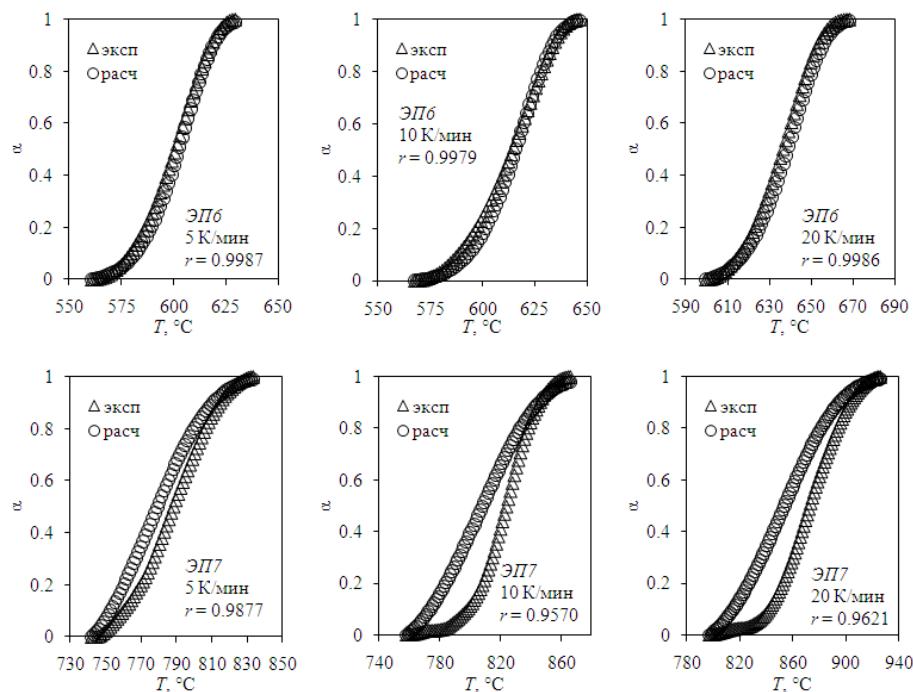


Рис. 12. Экспериментальные (кружки) и уточненные расчетные (треугольники) кинетические кривые  $a$ – $T$  для эндотермических элементарных реакций окисления (561–927°C) медно-кобальтовой руды, построенные по данным дифференциальной сканирующей калориметрии

Fig. 12. Experimental (circles) and refined calculated (triangles) kinetic curves  $a$ – $T$  for endothermic elementary oxidation reactions (561–927°C) of the copper-cobalt ore plotted on differential scanning calorimetry data

2. Установлен химизм окисления руды при нагреве на воздухе. Процесс сопровождается многочисленными взаимодействиями между кислородом, составляющими руду минералами и продуктами их разложения. Начало окисления (200°C) связано с образованием сульфата железа (II) ( $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ). При 300°C формируются гексагональный пирротин ( $\text{Fe}_9\text{S}_{10}$ ), пуатвинит ( $\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) и сульфат меди (II) ( $\text{CuSO}_4$ ), при 400°C – моноклинный пирротин ( $\text{Fe}_7\text{S}_8$ ), кубанит ( $\text{CuFe}_2\text{S}_3$ ), магнетит ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) и гематит ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), при 500°C – гексагональные модификации моносульфида железа ( $\text{Fe}_{11}\text{S}_{12}$  и  $\text{FeS}$ ), долерофанит ( $\text{CuO} \cdot \text{CuSO}_4$ ) и тенорит ( $\text{CuO}$ ). Для 600°C характерно полное расходование сульфидов железа и меди с формированием гематита ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) и магнетита ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), сульфатов железа (II) и (III) и меди (II), а также появление вюстита ( $\text{Fe}_{0.902}\text{O}$ ). При 700°C начинается интенсивное разложение сульфатов и гидратированных силикатов магния; продуктами окисления являются вюстит ( $\text{Fe}_{0.902}\text{O}$ ), магнетит ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) и гематит ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), феррит меди (I) ( $\text{CuFeO}_2$ ) и цинкит ( $\text{ZnO}$ ).

Конечными продуктами глубокого обжига (800–900°C) являются гематит ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), магнетит ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), диопсид ( $\text{Fe}_{0.015}\text{Mg}_{0.985}\text{SiO}_3$  и  $\text{Fe}_{0.15}\text{Mg}_{1.82}\text{Si}_2\text{O}_6$ ), франклинит ( $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ ), феррит меди ( $\text{CuFe}_5\text{O}_8$ ), метасиликат цинка ( $\text{ZnSiO}_3$ ), тенорит ( $\text{CuO}$ ) и делафоссит ( $\text{CuFeO}_2$ ).

3. Изучены кинетика и механизм окислительного обжига руды. Формально процесс можно представить совокупностью семи элементарных реакций: пяти экзотермических (при 398–445, 394–488, 440–498, 433–549 и 451–562°C), отвечающих интенсивному горению сульфидов железа, меди и цинка, и двух эндотермических (при 561–664 и 743–927°C), связанных с разложением остаточных сульфатов меди и железа. Лимитирующей стадией всех элементарных реакций являются нуклеация и рост кристаллов, а их кинетические параметры имеют следующие значения:

- 1)  $E_1 = 459 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$ ,  
 $\log A_1 = 31.5 \log(c^{-1})$ ,  $n_1 = 1.4$ ;
- 2)  $E_2 = 140 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$ ,  
 $\log A_2 = 8.6 \log(c^{-1})$ ,  $n_2 = 1.1$ ;

- 3)  $E_3 = 220$  кДж·моль<sup>-1</sup>,  
 $\log A_3 = 13,7 \log(c^{-1})$ ,  $n_3 = 1,0$ ;  
4)  $E_4 = 160$  кДж·моль<sup>-1</sup>,  
 $\log A_4 = 8,1 \log(c^{-1})$ ,  $n_4 = 1,1$ ;  
5)  $E_5 = 155$  кДж·моль<sup>-1</sup>,  
 $\log A_5 = 5,9 \log(c^{-1})$ ,  $n_5 = 1,7$ ;  
6)  $E_6 = 320$  кДж·моль<sup>-1</sup>,  
 $\log A_6 = 15,7 \log(c^{-1})$ ,  $n_6 = 1,2$ ;  
7)  $E_7 = 149$  кДж·моль<sup>-1</sup>,  
 $\log A_7 = 4,2 \log(c^{-1})$ ,  $n_7 = 1,2$ .

4. Установлены тип зародышеобразования, физико-геометрические особенности элементарных реакций окисления руды и детали механизма роста кристаллов. Кристаллизация продуктов элементарных реакций сопровождается увеличением числа заро-

дышей; зародыши новой фазы могут формироваться как на поверхности, так и в объеме частиц руды; при этом рост кристаллов имеет одномерный характер и контролируется химической реакцией на границе раздела фаз или диффузией реагентов.

5. Полученные кинетические модели позволяют предсказывать уровень завершенности процесса окисления руды в зависимости от времени и температуры. Результаты работы могут способствовать развитию теоретических представлений о физико-химических превращениях сульфидных руд и концентратов в ходе пирометаллургических операций, а также могут быть использованы в практике окислительного обжига этих материалов.

#### Список источников

1. Schlesinger M.E., King M.J., Sole K.C., Davenport W.G. Extractive metallurgy of copper. 5th Edition. Oxford: Elsevier, 2011.
2. Мелекесцева И.Ю., Масленников В.В., Масленникова С.П. Элементы-примеси в сульфидах Дергамышского кобальт-медноколчеданного месторождения, Южный Урал: форма нахождения и источники вещества // Литосфера. 2020. Т. 20. № 4. С. 499–516. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2020-20-4-499-516>.
3. Селиванов Е.Н., Гуляева Р.И., Ключников А.М. Исследование структуры и фазового состава медно-кобальтовых сульфидных руд Дергамышского месторождения // Цветные металлы. 2016. № 3. С. 13–17. <https://doi.org/10.17580/tsm.2016.03.02>.
4. Нагаева С.П., Мезенцева О.П., Козорез М.В. Минералогические исследования медных кобальтсодержащих руд Дергамышского месторождения // Горный журнал. 2014. № 11. С. 31–34.
5. Cusano G., Gonzalo M.R., Farrell F., Remus R., Roudier S., Sancho L.D. Best available techniques (BAT) reference document for the main non-ferrous metals Industries. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (integrated pollution prevention and control). Joint Research Centre, 2017. P. 902–910. <https://doi.org/10.2760/8224>.
6. Резник И.Д., Соболь С.И., Худяков В.М. Кобальт: в 2 т. Т. 1. М.: Машиностроение, 1995. 440 с.
7. Crundwell F.K., Moats M.S., Ramachandran V., Robinson T.G., Davenport W.G. Extractive metallurgy of nickel, cobalt and platinum-group metals. Oxford: Elsevier, 2011. 622 р.
8. Warner A.E.M., Diaz C.M., Dalvi A.D., Mackey P.J., Tarasov A.V., Jones R.T. World nonferrous smelter survey. Part IV: Nickel: Sulfide // JOM. 2007. Vol. 59. P. 58–72. <https://doi.org/10.1007/s11837-007-0056-x>.
9. Selivanov E.N., Klyushnikov A.M., Gulyaeva R.I. Use of quartz-containing materials as fluxes in copper smelting production // Metallurgist. 2017. Vol. 61. Iss. 1-2. P. 155–161. <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0469-x>.
10. Selivanov E.N., Klyushnikov A.M., Gulyaeva R.I. Application of sulfide copper ores oxidizing roasting products as sulfidizing agent during melting nickel raw materials to matte // Metallurgist. 2019. Vol. 63. Iss. 7-8. P. 867–887. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00901-z>.
11. Klyushnikov A.M., Gulyaeva R.I., Selivanov E.N., Pikalov S.M. Kinetics and mechanism of oxidation for nickel-containing pyrrhotite tailings // International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. 2021. Vol. 28. Iss. 9. P. 1469–1477. <https://doi.org/10.1007/s12613-020-2109-x>.
12. Klyushnikov A., Gulyaeva R., Pikalov S. Cold crystallization kinetics of slag from the joint smelting of oxidized nickel and sulfide copper ores // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2022. Vol. 147. P. 12165–12176. <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11429-x>.
13. Klyushnikov A.M. Modeling of exchange interactions in melts formed during joint smelting of oxidized nickel ores and pyrrhotite concentrates // Metallurgist. 2022. Vol. 66. Iss. 1-2. P. 190–199. <https://doi.org/10.1007/s11015-022-01314-1>.
14. Božinović K., Štrbac N., Mitovski A., Sokić M., Minić D., Marković B., Stojanović J. Thermal decomposition and kinetics of pentlandite-bearing ore oxidation in the air atmosphere // Metals. 2021. Vol. 11. Iss. 9. P. 1364. <https://doi.org/10.3390/met11091364>.
15. Смирнов В.И., Тихонов А.И. Обжиг медных руд и концентратов (теория и практика). М.: Металлургия, 1956. 255 с.
16. Devia M., Wilkomirsky I., Parra R. Roasting kinetics of high-arsenic copper concentrates: a review // Mining, Metallurgy & Exploration. 2012. Vol. 29. Iss. 2. P. 121–128. <https://doi.org/10.1007/BF03402403>.
17. Dimitrov R., Boyanov B. Investigation of the oxidation of metal sulphides and sulphide concentrates // Thermo-chimica Acta. 1983. Vol. 64. Iss. 1-2. P. 27–37. [https://doi.org/10.1016/0040-6031\(83\)80125-7](https://doi.org/10.1016/0040-6031(83)80125-7).
18. Hua Yixin, Cai Chaojun, Cui Yan. Microwave-enhanced roasting of copper sulfide concentrate in the presence of  $\text{CaCO}_3$  // Separation and Purification Technology. 2006. Vol. 50. Iss. 1. P. 22–29. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2005.11.003>.

19. Mitovski A., Strbac N., Mihajlovic I., Sokić M., Stojanović J. Thermodynamic and kinetic analysis of the polymetallic copper concentrate oxidation process // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2014. Vol. 118. P. 1277–1285. <https://doi.org/10.1007/s10973-014-3838-8>.
20. Prasad S., Pandey B.D. Thermoanalytical studies on copper-iron sulphides // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 1999. Vol. 58. P. 625–637. <https://doi.org/10.1023/A:1010108729034>.
21. Prasad P.N., Lennartsson A., Samuelsson C. A mineralogical investigation of sintering in Cu-rich polymetallic concentrates during roasting in inert atmosphere // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2020. Vol. 51. P. 1446–1459. <https://doi.org/10.1007/s11663-020-01850-8>.
22. Shamsuddin M., Sohn H.Y. Constitutive topics in physical chemistry of high-temperature nonferrous metallurgy – a review: Part 1. Sulfide roasting and smelting // *JOM*. 2019. Vol. 71. No. 9. P. 3253–3265. <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03620-7>.
23. Souza R., Queiroz C., Brant J., Brocchi E. Pyrometallurgical processing of a low copper content concentrate based on a thermodynamic assessment // *Minerals Engineering*. 2019. Vol. 130. P. 156–164. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.10.015>.
24. Wan Xingbang, Shi Junjie, Taskinen P., Jokilaakso A. Extraction of copper from copper-bearing materials by sulfation roasting with  $\text{SO}_2$ – $\text{O}_2$  gas // *JOM*. 2020. Vol. 72. No. 10. P. 3436–3446. <https://doi.org/10.1007/s11837-020-04300-7>.
25. Wilkomirsky I., Parra R., Parada F., Balladares E., Seguel E., Etcheverry J., Díaz R. Thermodynamic and kinetic mechanisms of bornite/chalcopyrite/magnetite formation during partial roasting of high-arsenic copper concentrates // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2020. Vol. 51. P. 1540–1551. <https://doi.org/10.1007/s11663-020-01870-4>.
26. Yang Fu-qiang, Wu Chao, Cui Yan, Lu Guang. Apparent activation energy for spontaneous combustion of sulfide concentrates in storage yard // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2011. Vol. 21. Iss. 2. P. 395–401. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)60727-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)60727-9).
27. Živcović Ž.D., Mitevska N., Savović V. Kinetics and mechanism of the chalcopyrite-pyrite concentrate oxidation process // *Thermochimica Acta*. 1996. Vol. 282–283. P. 121–130. [https://doi.org/10.1016/0040-6031\(96\)02883-3](https://doi.org/10.1016/0040-6031(96)02883-3).
28. Chen T.T., Dutrizac J.E. Mineralogical changes occurring during the fluid-bed roasting of zinc sulfide concentrates // *JOM*. 2004. Vol. 56. P. 46–51. <https://doi.org/10.1007/s11837-004-0235-y>.
29. Снурников А.П. Гидрометаллургия цинка. М.: Металлургия, 1981. 384 с.
30. Dunn J.G., Jayaweera S.A.A. Effect of heating rate on the TG curve during the oxidation of nickel sulphide concentrates // *Thermochimica Acta*. 1983. Vol. 61. Iss. 3. P. 313–317.
31. Yu Dawei, Utigard T.A. TG/DTA study on the oxidation of nickel concentrate // *Thermochimica Acta*. 2012. Vol. 533. P. 56–65. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2012.01.017>.
32. Thoumsin F.J., Coussement R. Fluid-bed roasting reactions of copper and cobalt sulfide concentrates // *JOM*. 1964. Vol. 16. P. 831–834. <https://doi.org/10.1007/BF03378299>.
33. Hu Guilin, Dam-Johansen Kim, Wedel S., Hansen J.P. Decomposition and oxidation of pyrite // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2006. Vol. 32. Iss. 3. P. 295–314. <https://doi.org/10.1016/J.PECS.2005.11.004>.
34. Dunn J.G., Mackey L.C. The measurement of ignition temperatures and extents of reaction on iron and iron-nickel sulfides // *Journal of Thermal Analysis*. 1991. Vol. 37. P. 2143–2164. <https://doi.org/10.1007/BF01905584>.
35. Lukanov V.A., Shabalina V.I. Thermal dissociation of pyrite during processing of pyrite-containing raw materials // *Canadian Metallurgical Quarterly*. 1994. Vol. 33. Iss. 3. P. 169–174. <http://dx.doi.org/10.1179/cmq.1994.33.3.169>.
36. Dunn J.G. The oxidation of sulphide minerals // *Thermochimica Acta*. 1997. Vol. 300. Iss. 1–2. P. 127–139. [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(96\)03132-2](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(96)03132-2).
37. Eneroth E., Koch C.B. Crystallite size of haematite from thermal oxidation of pyrite and marcasite – effects of grain size and iron disulphide polymorph // *Minerals Engineering*. 2003. Vol. 16. Iss. 11. P. 1257–1267. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2003.07.004>.
38. Ferrow E.A., Mannerstrand M., Sjöberg B. Reaction kinetics and oxidation mechanisms of the conversion of pyrite to ferrous sulphate: a Mössbauer spectroscopy study // *Hyperfine Interactions*. 2005. Vol. 163. P. 109–119. <https://doi.org/10.1007/s10751-005-9200-6>.
39. Aylmore M.G., Lincoln F.J. Mechanochemical milling-induced reactions between gases and sulfide minerals. I. Reactions of  $\text{SO}_2$  with arsenopyrite, pyrrhotite and pyrite // *Journal of Alloys and Compounds*. 2000. Vol. 309. Iss. 1–2. P. 61–74. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(00\)00916-6](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(00)00916-6).
40. Vázquez M., Moreno-Ventas I., Raposo I., Palma A., Díaz M.J. Kinetic of pyrite thermal degradation under oxidative environment // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020. Vol. 141. P. 1157–1163. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-09098-4>.
41. Ruan Shufeng, Wang Chengyan, Jie Xiaowu, Yin Fei, Zhang Yonglu, Yao Zhichao, et al. Kinetics of pyrite multi-step thermal decomposition in refractory gold sulphide concentrates // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2022. Vol. 147. P. 3689–3702. <https://doi.org/10.1007/s10973-021-10761-y>.
42. Wang Luyi, Fan B.W., He Y.T., Li P., Yin D.Q., Hu Y.H. Characteristics of minerals and their associations of transformation processes in pyrite at elevated temperatures: an X-ray diffraction study // *Ironmaking Steelmaking*. 2014. Vol. 41. Iss. 2. P. 147–152. <https://doi.org/10.1179/1743281213Y.0000000113>.
43. Xu Hongwu, Guo Xiaofeng, Seaman L.A., Harrison A.J., Obrey S.J., Page K. Thermal desulfurization of pyrite: an in situ high-T neutron diffraction and DTA–TGA study // *Journal of Materials Research*. 2019. Vol. 34. P. 3243–3253. <https://doi.org/10.1557/jmr.2019.185>.
44. Zhang Yan, Li Qian, Liu Xiaoliang, Xu Bin, Yang Yongbin, Jiang Tao. A thermodynamic analysis on the roasting of pyrite // *Minerals*. 2019. Vol. 9. Iss. 4. P. 220. <https://doi.org/10.3390/min9040220>.
45. Jorgensen F.R.A., Moyle F.J. Phases formed during the thermal analysis of pyrite in air // *Journal of Thermal Analysis*. 1982. Vol. 25. P. 473–485. <https://doi.org/10.1007/BF01912973>.
46. Aracena A., Jerez Ó., Ortíz R., Morales J. Pyrite oxidation kinetics in an oxygen-nitrogen atmosphere at temperatures from 400 to 500°C // *Canadian Metallurgical*

- Quarterly. 2016. Vol. 55. Iss. 2. P. 195–201. <http://doi.org/10.1080/00084433.2015.1126904>.
47. Reimers G.W., Hjelmstad K.E. Analysis of the oxidation of chalcopyrite, chalcocite, galena, pyrrhotite, marcasite, and arsenopyrite // Department of the Interior, Bureau of Mines. Report of investigations 9118 (United States. Bureau of Mines). Pittsburgh, 1987.
48. Malek T.J., Chaki S.H., Deshpande M.P. Structural, morphological, optical, thermal and magnetic study of mackinawite FeS nanoparticles synthesized by wet chemical reduction technique // *Physica B: Condensed Matter*. 2018. Vol. 546. P. 59–66. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2018.07.024>.
49. Asaki Z., Matsutomo T., Tanabe T., Condo Y. Oxidation of dense iron sulfide // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 1983. Vol. 14. P. 109–116. <https://doi.org/10.1007/BF02670877>.
50. Kennedy T., Sturman B.T. The oxidation of iron (II) sulfide // *Journal of Thermal Analysis*. 1975. Vol. 8. P. 329–337. <https://doi.org/10.1007/BF01904010>.
51. Asaki Z., Condo Y. Oxidation kinetics of iron sulfide in the form of dense plate, pellet and single particle // *Journal of Thermal Analysis*. 1989. Vol. 35. P. 1751–1759. <https://doi.org/10.1007/BF01911664>.
52. Coombs P.G., Munir Z.A. The mechanism of oxidation of ferrous sulfide (FeS) powders in the range of 648 to 923 K // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 1989. Vol. 20. P. 661–670. <https://doi.org/10.1007/BF02655922>.
53. Gulyaeva R.I., Selivanov E.N., Vershinin A.D. Nonisothermal oxidation of pyrrhotines // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2003. Vol. 4. P. 299–304.
54. Alksnis A., Li B., Elliott R., Barati M. Kinetics of oxidation of pyrrhotite // *The Minerals, Metals & Materials Series* / eds. B. Davis. Cham: Springer, 2018. P. 403–413. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-95022-8\\_32](https://doi.org/10.1007/978-3-319-95022-8_32).
55. Habashi F., Dugdale R. The action of sulfur trioxide on chalcopyrite // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 1973. Vol. 4. P. 1553–1556. <https://doi.org/10.1007/BF02668007>.
56. Leung L.S. The overall kinetics of roasting of chalcopyrite // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 1975. Vol. 6. P. 341–343. <https://doi.org/10.1007/BF02913578>.
57. Aneesuddin M., Char P.N., Hussain M.R., Saxena E.R. Studies on thermal oxidation of chalcopyrite from Chitradurga, Karnataka State, India // *Journal of Thermal Analysis*. 1983. Vol. 26. P. 205–215. <https://doi.org/10.1007/BF01913204>.
58. Chaubal P.C., Sohn H.Y. Intrinsic kinetics of the oxidation of chalcopyrite particles under isothermal and nonisothermal conditions // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 1986. Vol. 17. P. 51–60. <https://doi.org/10.1007/BF02670818>.
59. Cocić M.B., Logar M.M., Cocić S.Lj., Dević S.S., Majsijević D.M. Transformation of chalcopyrite in the roasting process of copper concentrate in fluidized bed reactor // *JOM*. 2011. Vol. 63. P. 55–59. <https://doi.org/10.1007/s11837-011-0078-2>.
60. Živcović Z., Štrbać N., Živcović D., Velinovski V., Mihajlović I. Kinetic study and mechanism of chalcocite and covellite oxidation process // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2005. Vol. 79. P. 715–720. <https://doi.org/10.1007/s10973-005-0601-1>.
61. Ramakrishna Rao V.V.V.N.S., Abraham K.P. Kinetics of oxidation of copper sulfide // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 1971. Vol. 2. P. 2463–2470. <https://doi.org/10.1007/BF02814883>.
62. Dunn J.G., Ginting A.R., O'Connor B. A thermoanalytical study of the oxidation of chalcocite // *Journal of Thermal Analysis*. 1994. Vol. 41. P. 671–686. <https://doi.org/10.1007/BF02549341>.
63. Benlyamani M., Ajersch F. Agglomeration of particles during roasting of zinc sulfide concentrates // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 1986. Vol. 17. P. 647–656. <https://doi.org/10.1007/BF02657127>.
64. Dimitrov R., Bonev I. Mechanism of zinc sulphide oxidation // *Thermochimica Acta*. 1986. Vol. 106. P. 9–25. [https://doi.org/10.1016/0040-6031\(86\)85111-5](https://doi.org/10.1016/0040-6031(86)85111-5).
65. Dimitrov R.I., Boyanov B.S. Oxidation of metal sulphides and determination of characteristic temperatures by DTA and TG // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2000. Vol. 61. P. 181–189. <https://doi.org/10.1023/A:1010181112713>.
66. Graydon J.W., Kirk D.W. A Microscopic study of the transformation of sphalerite particles during the roasting of zinc concentrate // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 1988. Vol. 19. P. 141–146. <https://doi.org/10.1007/BF02666500>.
67. Gulyaeva R.I., Selivanov E.N., Pikalov S.M. Mechanism and kinetics of the thermal oxidation of natural sphalerite // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2018. Vol. 3. P. 221–227. <https://doi.org/10.1134/S0036029518030047>.
68. Natesan K., Philbrook W.O. Oxidation kinetic studies of zinc sulfide in a fluidized bed reactor // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 1970. Vol. 1. P. 1353–1360. <https://doi.org/10.1007/BF02900254>.
69. Marzoughi O., Halali M., Moradkhani D., Pickle C.A. Kinetics of roasting of a sphalerite concentrate // *The Minerals, Metals & Materials Series* / eds. B. Davis. Extraction 2018. The Minerals, Metals & Materials Series. Cham: Springer, 2018. P. 559–571. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-95022-8\\_44](https://doi.org/10.1007/978-3-319-95022-8_44).
70. Asaki Z., Nitta M., Tanabe T., Condo Y. Oxidation of cobalt sulfide // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 1986. Vol. 17. P. 367–373. <https://doi.org/10.1007/BF02655084>.
71. Boyanov B.S. Differential thermal study of the interactions between sulphates, oxides and ferrites // *Thermochimica Acta*. 1997. Vol. 302. Iss. 1-2. P. 109–115. [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(97\)00199-8](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(97)00199-8).
72. Tsukada H., Asaki Z., Tanabe T., Kondo Y. Oxidation of mixed copper-iron sulfide // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 1981. Vol. 12. P. 603–609. <https://doi.org/10.1007/BF02654333>.
73. Arkhangelsky I.V., Dunaev A.V., Makarenko I.V., Tikhonov N.A., Belyaev S.S., Tarasov A.V. Non-isothermal kinetic methods. Workbook and laboratory manual. 2013. [Электронный ресурс]. URL: <http://edition-open-access.de/media/textbooks/1/Textbooks1.pdf> (23.08.2022).
74. Chung Frank H. A new X-ray diffraction method for quantitative multicomponent analysis // *Advances in X-Ray Analysis*. 1973. Vol. 17. P. 106–115. <https://doi.org/10.1154/S0376030800005231>.
75. Hubbard C.R., Evans E.H., Smith D.K. The reference intensity ratio,  $I/I_c$ , for computer simulated powder patterns

- // Journal of Applied Crystallography. 1976. Vol. 9. P. 169–174. <https://doi.org/10.1107/S0021889876010807>.
76. Altomare A., Corriero N., Cuocci C., Falcicchio A., Moliterni A., Rizzi R. QUALX2.0: a qualitative phase analysis software using the freely available database POW\_COD // Journal of Applied Crystallography. 2015. Vol. 48. P. 598–603. <https://doi.org/10.1107/S1600576715002319>.
77. Arshad M.A., Maaroufi A.K. Recent advances in kinetics and mechanisms of condensed phase processes: a mini-review // Reviews on Advanced Materials Science. 2017. Vol. 51. P. 177–187.
78. Vyzavokin S., Burnham A.K., Criado J.M., Perez-Maqueda L.A., Popescu C., Sbirrazzuoli N. ICTAC kinetics committee recommendations for performing kinetic computations on thermal analysis data // *Thermochimica Acta*. 2011. Vol. 520. Iss. 1-2. P. 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2011.03.034>.
79. Henderson D.W. Thermal analysis of non-isothermal crystallization kinetics in glass forming liquids // Journal of Non-Crystalline Solids. 1979. Vol. 30. Iss. 3. P. 301–315. [https://doi.org/10.1016/0022-3093\(79\)90169-8](https://doi.org/10.1016/0022-3093(79)90169-8).
80. Kissinger H.E. Variation of peak temperature with heating rate in differential thermal analysis // Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology. 1956. Vol. 57. Iss. 4. P. 217–221.
81. Augis J.A., Bennett J.E. Calculation of the Avrami parameters for heterogeneous solid state reactions using a modification of the Kissinger method // Journal of Thermal Analysis. 1978. Vol. 13. P. 283–292. <https://doi.org/10.1007/BF01912301>.
82. Pelovski Y.G., Petkova V. Mechanism and kinetics of inorganic sulphates decomposition // Journal of Thermal Analysis. 1997. Vol. 49. P. 1227–1441. <https://doi.org/10.1007/BF01983679>.
83. Хорошавин А.Г. Форстерит  $2\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$ . М.: Теплотехника, 2004. 368 с.
84. Yamaguchi T., Shiraishi T. Kinetic studies of eutectoid decomposition of  $\text{CuFe}_5\text{O}_8$  // Journal of the American Ceramic Society. 1971. Vol. 54. P. 556–558. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1971.tb12206.x>.
85. Luo Yan-hong, Zhu De-qing, Pan Jian, Zhou Xianlin. Thermal decomposition behaviour and kinetics of Xinjiang siderite ore // Mineral Processing and Extractive Metallurgy. 2016. Vol. 125. Iss. 1. P. 17–25. <https://doi.org/10.1080/03719553.2015.1118213>.
86. Petkova V., Pelovski Y.G. Comparative DSC study on thermal decomposition of iron sulphates // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2008. Vol. 93. P. 847–852. <https://doi.org/10.1007/S10973-008-9302-X>.
87. Petkova V., Pelovski Y.G., Paneva D., Mitov I. Influence of gas media on the thermal decomposition of second valence iron sulphates // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2011. Vol. 105. P. 793–803. <https://doi.org/10.1007/S10973-010-1242-6>.
88. Choi Kyungsob, Kim Sookyoung, Kim Minseuk, Park Hyunsik. Oxidation behavior of copper concentrate, gold concentrate, and their mixtures between 1173 K (900°C) and 1373 K (1100°C) // Metallurgical and Materials Transactions B. 2019. Vol. 50. P. 1300–1308. <https://doi.org/10.1007/s11663-019-01575-3>.
89. Matusita K., Sakka S. Kinetic study of crystallization of glass by differential thermal analysis – criterion on application of Kissinger plot // Journal of Non-Crystalline Solids. 1980. Vol. 38–39. Part 2. P. 741–746. [https://doi.org/10.1016/0022-3093\(80\)90525-6](https://doi.org/10.1016/0022-3093(80)90525-6).
90. Donald I.W. Crystallization kinetics of a lithium zinc silicate glass studied by DTA and DSC // Journal of Non-Crystalline Solids. 2004. Vol. 345–346. P. 120–126. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2004.08.007>.
91. Šesták J. Thermophysical properties of solids: their measurements and theoretical thermal analysis. Prague: Academia, 1984. 440 p.
92. Bamford C.H., Tipper C.F.H. Reactions in the solid state. Amsterdam: Elsevier, 1980. 340 p.

## References

1. Schlesinger M.E., King M.J., Sole K.C., Davenport W.G. Extractive metallurgy of copper. 5th Edition. Oxford: Elsevier; 2011.
2. Melekestseva I.Yu., Maslennikov V.V., Maslennikova S.P. Trace-elements in sulfides of the Dergamish cobalt-bearing massive sulfide deposit, the Southern Urals: mode of occurrence and matter sources. *Litosfera = Lithosphere*. (Russ.). 2020;20(4):499–516. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2020-20-4-499-516>
3. Selivanov E.N., Gulyaeva R.I., Klyushnikov A.M. Study of structure and phase composition of copper-cobalt sulfide ores of Dergamyshskoe deposit *Tsvetnye Metally*. 2016;3:13–17. <https://doi.org/10.17580/tsm.2016.03.02>.
4. Nagaeva S.P., Mezentseva O.P., Kozorez M.V. Mineralogical researches of copper cobalt-containing ores of Dergamysh deposit. *Gornyi Zhurnal = Mining Journal*. 2014;11:31–34. (Russ.).
5. Cusano G., Gonzalo M.R., Farrell F., Remus R., Roudier S., Sancho L.D. Best available techniques (BAT) reference document for the main non-ferrous metals Industries. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (integrated pollution prevention and control). Joint Research Centre; 2017, p. 902–910. <https://doi.org/10.2760/8224>.
6. Reznik I.D., Sobol S.I., Khudyakov V.M. Cobalt. Vol. 1. Moscow: Mashinostroyenie; 1995, 440 p. (In Russ.).
7. Crundwell F.K., Moats M.S., Ramachandran V., Robinson T.G., Dawenport W.G. *Extractive metallurgy of nickel, cobalt and platinum-group metals*. Oxford: Elsevier; 2011, 622 p.
8. Warner A.E.M., Diaz C.M., Dalvi A.D., Mackey P.J., Tarasov A.V., Jones R.T. World nonferrous smelter survey. Part IV: Nickel: Sulfide. *JOM*. 2007;59:58–72. <https://doi.org/10.1007/s11837-007-0056-x>.
9. Selivanov E.N., Klyushnikov A.M., Gulyaeva R.I. Use of quartz-containing materials as fluxes in copper smelting production. *Metallurgist*. 2017;61(1–2):155–161. <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0469-x>.
10. Selivanov E.N., Klyushnikov A.M., Gulyaeva R.I. Application of sulfide copper ores oxidizing roasting products as sulfidizing agent during melting nickel raw materials to matte. *Metallurgist*. 2019;63(7–8):867–887. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00901-z>.

11. Klyushnikov A.M., Gulyaeva R.I., Selivanov E.N., Pikalov S.M. Kinetics and mechanism of oxidation for nickel-containing pyrrhotite tailings. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2021;28(9):1469-1477. <https://doi.org/10.1007/s12613-020-2109-x>.
12. Klyushnikov A., Gulyaeva R., Pikalov S. Cold crystallization kinetics of slag from the joint smelting of oxidized nickel and sulfide copper ores. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2022;147:12165-12176. <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11429-x>.
13. Klyushnikov A.M. Modeling of exchange interactions in melts formed during joint smelting of oxidized nickel ores and pyrrhotite concentrates. *Metallurgist*. 2022;66(1-2):190-199. <https://doi.org/10.1007/s11015-022-01314-1>.
14. Božinović K., Štrbac N., Mitovski A., Sokić M., Minić D., Marković B., Stojanović J. Thermal decomposition and kinetics of pentlandite-bearing ore oxidation in the air atmosphere. *Metals*. 2021;11(9):1364. <https://doi.org/10.3390/met11091364>.
15. Smirnov V.I., Tikhonov A.I. *Theory and practice of copper ores and concentrates roasting*. Moscow: Metallurgiya; 1956, 255 p. (In Russ.).
16. Devia M., Wilkomirsky I., Parra R. Roasting kinetics of high-arsenic copper concentrates: a review. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2012;29(2):121-128. <https://doi.org/10.1007/BF03402403>.
17. Dimitrov R., Boyanov B. Investigation of the oxidation of metal sulphides and sulphide concentrates. *Thermochimica Acta*. 1983;64(1-2):27-37. [https://doi.org/10.1016/0040-6031\(83\)80125-7](https://doi.org/10.1016/0040-6031(83)80125-7).
18. Hua Yixin, Cai Chaojun, Cui Yan. Microwave-enhanced roasting of copper sulfide concentrate in the presence of  $\text{CaCO}_3$ . *Separation and Purification Technology*. 2006;50(1):22-29. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2005.11.003>.
19. Mitovski A., Štrbac N., Mihajlović I., Sokić M., Stojanović J. Thermodynamic and kinetic analysis of the polymetallic copper concentrate oxidation process. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2014;118:1277-1285. <https://doi.org/10.1007/s10973-014-3838-8>.
20. Prasad S., Pandey B.D. Thermoanalytical studies on copper-iron sulphides. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 1999;58:625-637. <https://doi.org/10.1023/A:1010108729034>.
21. Prasad P.N., Lennartsson A., Samuelsson C. A mineralogical investigation of sintering in Cu-rich polymetallic concentrates during roasting in inert atmosphere. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2020;51:1446-1459. <https://doi.org/10.1007/s11663-020-01850-8>.
22. Shamsuddin M., Sohn H.Y. Shamsuddin M., Sohn H.Y. Constitutive topics in physical chemistry of high-temperature nonferrous metallurgy – a review: Part 1. Sulfide roasting and smelting. *JOM*. 2019;71(9):3253-3265. <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03620-7>.
23. Souza R., Queiroz C., Brant J., Brocchi E. Pyrometallurgical processing of a low copper content concentrate based on a thermodynamic assessment. *Minerals Engineering*. 2019;130:156-164. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.10.015>.
24. Wan Xingbang, Shi Junjie, Taskinen P., Jokilaakso A. Extraction of copper from copper-bearing materials by sulfation roasting with  $\text{SO}_2-\text{O}_2$  gas. *JOM*. 2020;72(10):3436-3446. <https://doi.org/10.1007/s11837-020-04300-7>.
25. Wilkomirsky I., Parra R., Parada F., Balladares E., Seguel E., Etcheverry J., Díaz R. Thermodynamic and kinetic mechanisms of bornite/chalcopyrite/magnetite formation during partial roasting of high-arsenic copper concentrates. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2020;51:1540-1551. <https://doi.org/10.1007/s11663-020-01870-4>.
26. Yang Fu-qiang, Wu Chao, Cui Yan, Lu Guang. Apparent activation energy for spontaneous combustion of sulfide concentrates in storage yard. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2011;21(2):395-401. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)60727-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)60727-9).
27. Živcović Ž., Mitevska N., Savović V. Kinetics and mechanism of the chalcopyrite-pyrite concentrate oxidation process. *Thermochimica Acta*. 1996;282-283:121-130. [https://doi.org/10.1016/0040-6031\(96\)02883-3](https://doi.org/10.1016/0040-6031(96)02883-3).
28. Chen T.T., Dutrizac J.E. Mineralogical changes occurring during the fluid-bed roasting of zinc sulfide concentrates. *JOM*. 2004;56:46-51. <https://doi.org/10.1007/s11837-004-0235-y>.
29. Snurnikov A.P. *Hydrometallurgy of zinc*. Moscow: Metallurgiya; 1981, 384 p. (In Russ.).
30. Dunn J.G., Jayaweera S.A.A. Effect of heating rate on the TG curve during the oxidation of nickel sulphide concentrates. *Thermochimica Acta*. 1983;61(3):313-317.
31. Yu Dawei., Utigard T.A. TG/DTA Study on the oxidation of nickel concentrate. *Thermochimica Acta*. 2012;533:56-65. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2012.01.017>.
32. Thoumsin F.J., Coussement R. Fluid-bed roasting reactions of copper and cobalt sulfide concentrates. *JOM*. 1964;16:831-834. <https://doi.org/10.1007/BF03378299>.
33. Hu Guilin, Dam-Johansen Kim, Wedel S., Hansen J.P. Decomposition and oxidation of pyrite. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2006;32(3):295-314. <https://doi.org/10.1016/j.jpecs.2005.11.004>.
34. Dunn J.G., Mackey L.C. The measurement of ignition temperatures and extents of reaction on iron and iron-nickel sulfides. *Journal of Thermal Analysis*. 1991;37:2143-2164. <https://doi.org/10.1007/BF01905584>.
35. Lukanov V.A., Shabalina V.I. Thermal dissociation of pyrite during processing of pyrite-containing raw materials. *Canadian Metallurgical Quarterly*. 1994;33(3):169-174. <http://dx.doi.org/10.1179/cmq.1994.33.3.169>.
36. Dunn J.G. The oxidation of sulphide minerals. *Thermochimica Acta*. 1997;300(1-2):127-139. [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(96\)03132-2](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(96)03132-2).
37. Enero E., Koch C.B. Crystallite size of haematite from thermal oxidation of pyrite and marcasite – effects of grain size and iron disulphide polymorph. *Minerals Engineering*. 2003;16(11):1257-1267. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2003.07.004>.
38. Ferrow E.A., Mannerstrand M., Sjöberg B. Reaction kinetics and oxidation mechanisms of the conversion of pyrite to ferrous sulphate: a Mössbauer spectroscopy study. *Hyperfine Interactions*. 2005;163:109-119. <https://doi.org/10.1007/s10751-005-9200-6>.
39. Aylmore M.G., Lincoln F.J. Mechanochemical milling-induced reactions between gases and sulfide minerals. I. Reactions of  $\text{SO}_2$  with arsenopyrite, pyrrhotite and pyrite. *Journal of Alloys and Compounds*. 2000;309(1-2):61-74. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(00\)00916-6](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(00)00916-6).
40. Vázquez M., Moreno-Ventas I., Raposo I., Palma A.,

- Díaz M.J. Kinetic of pyrite thermal degradation under oxidative environment. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020;141:1157-1163. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-09098-4>.
41. Ruan Shufeng, Wang Chengyan, Jie Xiaowu, Yin Fei, Zhang Yonglu, Yao Zhichao, et al. Kinetics of pyrite multi-step thermal decomposition in refractory gold sulphide concentrates. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2022;147:3689-3702. <https://doi.org/10.1007/s10973-021-10761-y>.
42. Wang Luyi, Fan B.W., He Y.T., Li P., Yin D.Q., Hu Y.H. Characteristics of minerals and their associations of transformation processes in pyrite at elevated temperatures: an X-ray diffraction study. *Ironmaking Steelmaking*. 2014;41(2):147-152. <https://doi.org/10.1179/1743281213Y.0000000113>.
43. Xu Hongwu, Guo Xiaofeng, Seaman L.A., Harrison A.J., Obrey S.J., Page K. Thermal desulfurization of pyrite: An in situ high-T neutron diffraction and DTA-TGA study. *Journal of Materials Research*. 2019;34:3243-3253. <https://doi.org/10.1557/jmr.2019.185>.
44. Zhang Yan, Li Qian, Liu Xiaoliang, Xu Bin, Yang Yongbin, Jiang Tao. A thermodynamic analysis on the roasting of pyrite. *Minerals*. 2019;9(4):220. <https://doi.org/10.3390/min9040220>.
45. Jorgensen F.R.A., Moyle F.J. Phases formed during the thermal analysis of pyrite in air. *Journal of Thermal Analysis*. 1982;25:473-485. <https://doi.org/10.1007/BF01912973>.
46. Aracena Á., Jerez Ó., Ortiz R., Morales J. Pyrite oxidation kinetics in an oxygen-nitrogen atmosphere at temperatures from 400 to 500°C. *Canadian Metallurgical Quarterly*. 2016;55(2):195-201. <http://doi.org/10.1080/00084433.2015.1126904>.
47. Reimers G.W., Hjelmstad K.E. Analysis of the oxidation of chalcopyrite, chalcocite, galena, pyrrhotite, marcasite and arsenopyrite. In: *Department of the Interior, Bureau of Mines. Report of investigations 9118 (United States. Bureau of Mines)*. Pittsburgh; 1987.
48. Malek T.J., Chaki S.H., Deshpande M.P. Structural, morphological, optical, thermal and magnetic study of mackinawite FeS nanoparticles synthesized by wet chemical reduction technique. *Physica B: Condensed Matter*. 2018;546:59-66. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2018.07.024>.
49. Asaki Z., Matsutomo T., Tanabe T., Condo Y. Oxidation of dense iron sulfide. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 1983;14:109-116. <https://doi.org/10.1007/BF02670877>.
50. Kennedy T, Sturman BT. The Oxidation of iron (II) sulfide. *Journal of Thermal Analysis*. 1975;8:329-337. <https://doi.org/10.1007/BF01904010>.
51. Asaki Z., Condo Y. Oxidation kinetics of iron sulfide in the form of dense plate, pellet and single particle. *Journal of Thermal Analysis*. 1989;35:1751-1759. <https://doi.org/10.1007/BF01911664>.
52. Coombs P.G., Munir Z.A. The mechanism of oxidation of ferrous sulfide (FeS) powders in the range of 648 to 923K. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 1989;20:661-670. <https://doi.org/10.1007/BF02655922>.
53. Gulyaeva R.I., Selivanov E.N., Vershinin A.D. Nonisothermal oxidation of pyrrhotines. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2003;4:299-304.
54. Alksnis A., Li B., Elliott R., Barati M. Kinetics of oxidation of pyrrhotite. In: Davis B. (eds.). *The Minerals, Metals & Materials Series*. Cham: Springer; 2018, p. 403-413. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-95022-8\\_32](https://doi.org/10.1007/978-3-319-95022-8_32).
55. Habashi F., Dugdale R. The action of sulfur trioxide on chalcopyrite. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 1973;4:1553-1556. <https://doi.org/10.1007/BF02668007>.
56. Leung L.S. The overall kinetics of roasting of chalcopyrite. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 1975;6:341-343. <https://doi.org/10.1007/BF02913578>.
57. Aneesuddin M., Char P.N., Hussain M.R., Saxena E.R. Studies on thermal oxidation of chalcopyrite from Chitradurga, Karnataka State, India. *Journal of Thermal Analysis*. 1983;26:205-215. <https://doi.org/10.1007/BF01913204>.
58. Chaubal P.C., Sohn H.Y. Intrinsic kinetics of the oxidation of chalcopyrite particles under isothermal and nonisothermal conditions. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 1986;17:51-60. <https://doi.org/10.1007/BF02670818>.
59. Cocić M.B., Logar M.M., Cocić S.Lj., Dević S.S., Majsjević D.M. Transformation of chalcopyrite in the roasting process of copper concentrate in fluidized bed reactor. *JOM*. 2011;63:55-59. <https://doi.org/10.1007/s11837-011-0078-2>.
60. Živcović Ž., Štrbać N., Živcović D., Velinovski V., Mihajlović I. Kinetic study and mechanism of chalcocite and covellite oxidation process. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2005; 79:715-720. <https://doi.org/10.1007/s10973-005-0601-1>.
61. Ramakrishna Rao V.V.V.N.S., Abraham K.P. Kinetics of oxidation of copper sulfide. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 1971; 2:2463-2470. <https://doi.org/10.1007/BF02814883>.
62. Dunn J.G., Ginting A.R., O'Connor B. A thermoanalytical study of the oxidation of chalcocite. *Journal of Thermal Analysis*. 1994;41:671-686. <https://doi.org/10.1007/BF02549341>.
63. Benlyamani M., Ajersch F. Agglomeration of particles during roasting of zinc sulfide concentrates. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 1986;17:647-656. <https://doi.org/10.1007/BF02657127>.
64. Dimitrov R., Bonev I. Mechanism of zinc sulphide oxidation. *Thermochimica Acta*. 1986;106:9-25. [https://doi.org/10.1016/0040-6031\(86\)85111-5](https://doi.org/10.1016/0040-6031(86)85111-5).
65. Dimitrov R.I., Boyanov B.S. Oxidation of metal sulfides and determination of characteristic temperatures by DTA and TG. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2000;61:181-189. <https://doi.org/10.1023/A:1010181112713>.
66. Graydon J.W., Kirk D.W. A microscopic study of the transformation of sphalerite particles during the roasting of zinc concentrate. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 1988;19:141-146. <https://doi.org/10.1007/BF02666500>.
67. Gulyaeva R.I., Selivanov E.N., Pikalov S.M. Mechanism and kinetics of the thermal oxidation of natural sphalerite. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2018;3:221-227. <https://doi.org/10.1134/S0036029518030047>.
68. Natesan K., Philbrook W.O. Oxidation kinetic studies of zinc sulfide in a fluidized bed reactor. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 1970;1:1353-1360. <https://doi.org/10.1007/BF02900254>.

69. Marzoughi O., Halali M., Moradkhani D., Pickle C.A. Kinetics of roasting of a sphalerite concentrate. In: Davis B. (eds.). *The Minerals, Metals & Materials Series*. Cham: Springer; 2018, p. 559-571. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-95022-8\\_44](https://doi.org/10.1007/978-3-319-95022-8_44).
70. Asaki Z., Nitta M., Tanabe T., Condo Y. Oxidation of cobalt sulfide. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 1986;17:367-373. <https://doi.org/10.1007/BF02655084>.
71. Boyanov B.S. Differential thermal study of the interactions between sulphates, oxides and ferrites. *Thermochimica Acta*. 1997;302(1-2):109-115. [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(97\)00199-8](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(97)00199-8).
72. Tsukada H., Asaki Z., Tanabe T., Kondo Y. Oxidation of mixed copper-iron sulfide. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 1981;12:603-609. <https://doi.org/10.1007/BF02654333>.
73. Arkhangelsky I.V., Dunaev A.V., Makarenko I.V., Tikhonov N.A., Belyaev S.S., Tarasov A.V. Non-isothermal kinetic methods. Workbook and laboratory manual. 2013. <http://edition-open-access.de/media/textbooks/1/Textbooks1.pdf>. (Accessed 23 August 2022).
74. Chung Frank H. A new X-ray diffraction method for quantitative multicomponent analysis. *Advances in X-Ray Analysis*. 1973;17:106-115. <https://doi.org/10.1154/S0376030800005231>.
75. Hubbard C.R., Evans E.H., Smith D.K. The reference intensity ratio,  $I/I_c$ , for computer simulated powder patterns. *Journal of Applied Crystallography*. 1976;9:169-174. <https://doi.org/10.1107/S0021889876010807>.
76. Altomare A., Corriero N., Cuocci C., Falcicchio A., Moliterni A., Rizzi R. QUALX2.0: a qualitative phase analysis software using the freely available database POW\_COD. *Journal of Applied Crystallography*. 2015;48:598-603. <https://doi.org/10.1107/S1600576715002319>.
77. Arshad M.A., Maaroufi A.K. Recent advances in kinetics and mechanisms of condensed phase processes: a mini-review. *Reviews on Advanced Materials Science*. 2017;51:177-187.
78. Vyazovkin S., Burnham A.K., Criado J.M., Perez-Maqueda L.A., Popescu C., Sbirrazzuoli N. ICTAC kinetics committee recommendations for performing kinetic computations on thermal analysis data. *Thermochimica Acta*. 2011;520(1-2):1-19. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2011.03.034>.
79. Henderson D.W. Thermal analysis of non-isothermal crystallization kinetics in glass forming liquids. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 1979;30(3):301-315. [https://doi.org/10.1016/0022-3093\(79\)90169-8](https://doi.org/10.1016/0022-3093(79)90169-8).
80. Kissinger H.E. Variation of peak temperature with heating rate in differential thermal analysis. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*. 1956;57:217-221.
81. Augis J.A., Bennett J.E. Calculation of the Avrami parameters for heterogeneous solid state reactions using a modification of the Kissinger method. *Journal of Thermal Analysis*. 1978;13:283-292. <https://doi.org/10.1007/BF01912301>.
82. Pelovski Y.G., Petkova V. Mechanism and kinetics of inorganic sulphates decomposition. *Journal of Thermal Analysis*. 1997;49:1227-1241. <https://doi.org/10.1007/BF01983679>.
83. Horoshavin A.G.  $2\text{MgO}\text{-}\text{SiO}_2$  forsterite. Moscow: Teplotekhnika; 2004, 368 p. (In Russ.).
84. Yamaguchi T., Shiraishi T. Kinetic studies of eutectoid decomposition of  $\text{CuFe}_5\text{O}_8$ . *Journal of the American Ceramic Society*. 1971;54:556-558. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1971.tb12206.x>.
85. Luo Yan-hong, Zhu De-qing, Pan Jian, Zhou Xianlin. Thermal decomposition behaviour and kinetics of Xinjiang siderite ore. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 2016;125(1):17-25. <https://doi.org/10.1080/03719553.2015.1118213>.
86. Petkova V., Pelovski Y.G. Comparative DSC study on thermal decomposition of iron sulphates. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2008;93:847-852. <https://doi.org/10.1007/S10973-008-9302-X>.
87. Petkova V., Pelovski Y.G., Paneva D., Mitov I. Influence of gas media on the thermal decomposition of second valence iron sulphates. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2011;105:793-803. <https://doi.org/10.1007/S10973-010-1242-6>.
88. Choi Kyungsoob, Kim Sookkyung, Kim Minseuk, Park Hyunsik. Oxidation behavior of copper concentrate, gold concentrate, and their mixtures between 1173 K (900°C) and 1373 K (1100°C). *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2019;50:1300-1308. <https://doi.org/10.1007/s11663-019-01575-3>.
89. Matusita K., Sakka S. Kinetic study of crystallization of glass by differential thermal analysis – criterion on application of Kissinger plot. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 1980;38-39(2):741-746. [https://doi.org/10.1016/0022-3093\(80\)90525-6](https://doi.org/10.1016/0022-3093(80)90525-6).
90. Donald I.W. Crystallization kinetics of a lithium zinc silicate glass studied by DTA and DSC. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2004;345-346:120-126. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2004.08.007>.
91. Šesták J. *Thermophysical properties of solids: their measurements and theoretical thermal analysis*. Prague: Academia; 1984, 440 p.
92. Bamford C.H., Tipper C.F.H. *Reactions in the solid state*. Amsterdam: Elsevier; 1980, 340 p.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Ключников Александр Михайлович**,  
к.т.н.,  
старший научный сотрудник лаборатории  
пирометаллургии цветных металлов,  
Институт металлургии УрО РАН,  
620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 101, Россия  
✉ amk8@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-8239-3757>

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Alexander M. Klyushnikov**,  
Cand. Sci. (Eng.),  
Senior Researcher of the Laboratory of Non-ferrous  
Metals Pyrometallurgy,  
Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the RAS,  
101, Amundsen St., Yekaterinburg 620016, Russia  
✉ amk8@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-8239-3757>

**Гуляева Роза Иосифовна,**  
к.х.н.,  
старший научный сотрудник лаборатории  
пирометаллургии цветных металлов,  
Институт metallurgии УрО РАН,  
620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 101, Россия  
gulroza@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-2860-0377>

**Пикалов Сергей Михайлович,**  
научный сотрудник лаборатории пирометаллургии  
цветных металлов,  
Институт metallurgии УрО РАН,  
620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 101, Россия  
s.pikalov@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-6292-0468>

**Мальцев Геннадий Иванович,**  
д.т.н., старший научный сотрудник,  
старший научный сотрудник лаборатории  
пирометаллургии цветных металлов,  
Институт metallurgии УрО РАН,  
620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 101, Россия  
maltsewg@yandex.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-0750-0070>

**Вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

**Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 10.01.2023; одобрена  
после рецензирования 15.02.2023; принята к публика-  
ции 23.03.2023.

**Roza I. Gulyaeva,**  
Cand. Sci. (Chem.),  
Senior Researcher of the Laboratory of Non-ferrous  
Metals Pyrometallurgy,  
Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the RAS,  
101, Amundsen St., Yekaterinburg 620016, Russia  
gulroza@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-2860-0377>

**Sergey M. Pikalov,**  
Researcher of the Laboratory of Non-ferrous Metals  
Pyrometallurgy,  
Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the RAS,  
101, Amundsen St., Yekaterinburg 620016, Russia  
s.pikalov@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-6292-0468>

**Gennady I. Maltsev,**  
Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher,  
Senior Researcher of the Laboratory of Non-ferrous  
Metals Pyrometallurgy,  
Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the RAS,  
101, Amundsen St., Yekaterinburg 620016, Russia  
maltsewg@yandex.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-0750-0070>

**Contribution of the authors**

The authors contributed equally to this article.

**Conflict of interests**

The authors declare no conflict of interests.

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

**Information about the article**

The article was submitted 10.01.2023; approved after re-  
viewing 15.02.2023; accepted for publication 23.03.2023.

## ПЕРСОНАЛИЯ

## Профессору Валерию Салову 80 лет

31 января 2023 года Валерий Михайлович Салов отметил 80-летие.



В 1970 году Валерий Салов окончил Иркутский политех по специальности «Автоматизация металлургических процессов». Спустя пять лет защитил в альма-матер кандидатскую диссертацию. Обучаясь в аспирантуре, специализировался на разработке автоматических анализаторов качества и методов очистки сточных вод металлургических предприятий.

Почти вся профессиональная деятельность профессора связана с политехом. Карьеру он начал в 1970 году, пройдя путь от ассистента до профессора кафедры автоматизации производственных процессов. За

время работы в университете Валерий Михайлович занимал ответственные административные должности – был деканом Металлургического факультета, проректором по научной работе, около 10 лет возглавлял кафедру автоматизации производственных процессов.

Валерий Михайлович также проявил себя как ученый секретарь диссертационного совета, член научного координационного совета при губернаторе Приангарья, председатель совета проректоров по научной работе вузов Иркутска.

Профессор Салов является автором свыше 130 научных публикаций, подготовил трех кандидатов технических наук. В сферу его научных интересов входит тема интенсификации, контроля и автоматизации технологических процессов. В настоящее время Валерий Михайлович сосредоточился на преподавательской деятельности. Он читает студентам лекции по теории автоматического управления и управлению персоналом.

Поддерживать здоровье и бодрость юбиляру помогает активный образ жизни. Валерий Михайлович с детства увлекается спортом. В 1960-х годах он стал Мастером спорта СССР по лыжным гонкам и биатлону. К такому успеху пришел в составе спортивного сообщества «Буревестник», которое объединяло студентов и преподавателей советских вузов.

Валерий Салов посетил около 10 стран. За его плечами участие в любительских чемпионатах мира в Финляндии, Швеции, Италии, Австрии и др. Больше всего спортсмен гордится серебряными медалями, полученными на чемпионатах мира среди ветеранов в США (штат Индиана, 2008 год) и Канада (2011 год).

Валерий Михайлович подчеркивает, что, даже находясь в почтенном возрасте, он каждый день начинает с утренней зарядки и старается пробегать по 10 км. Спортивные увлечения Валерия Салова поддерживают друзья и близкие. Внучка спортсмена Алива занимается троеборьем. Сын Артём увлекается триатлоном, выступал на выездных турнирах в Италии, переплыл пролив Ла-Манш.

## 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 аспирантов и аспирантов должна стоять также подпись научного руководителя.

II. Текст статьи, сведения об авторах, реферат, ключевые слова, адрес учреждения, контактный телефон и E-mail должны быть также представлены по электронной почте: pgp@istu.edu в виде файла с расширением \*.DOC – документа, построенного средствами Microsoft Word 97 или последующих версий.

- При наборе статьи в Microsoft Word рекомендуются следующие установки:
- 1) параметры страницы и абзаца: отступы сверху и снизу – 2 см; слева и справа – 2 см; табуляция – 2 см; ориентация – книжная;
  - 2) шрифт – **Times New Roman**, размер – **12**, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;
  - 3) при вставке формул использовать **Microsoft Equation 3** при установках: элементы формулы выполняются **курсивом**; для греческих букв и символов назначать шрифт **Symbol**, для остальных элементов – **Times New Roman**. Размер символов: обычный – 12 пт, крупный индекс – 7 пт, мелкий индекс – 5 пт, крупный символ – 18 пт, мелкий символ – 12 пт. Все экспликации элементов формул необходимо также выполнять в виде формул;
  - 4) рисунки, вставленные в текст, должны быть выполнены с разрешением 300 dpi, B&W – для черно-белых иллюстраций, Grayscale – для полутона, 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 «КиберЛенинка» (CYBERLENINKA), рассыпается в Российскую книжную палату, ВИНИТИ 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



Редактор Я.В. Макшанцева  
Дизайнер В.Г. Лисицин  
Ответственный секретарь  
Г.П. Привалова  
Перевод на английский язык  
Tomas A. Beavitt,  
Н.Г. Поповой, В.В. Батицкой  
Верстка Н.П. Дзюндзя

Выход в свет 31.03.2023 г.  
Формат 60x90/8.  
Бумага офсетная. Печать трафаретная.  
Усл. печ. л. 28,5.  
Тираж 500 экз. Номер по реестру 18 / 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