

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

# iPolytech Journal

Tom 27, № 2. 2023 / Vol. 27, № 2. 2023

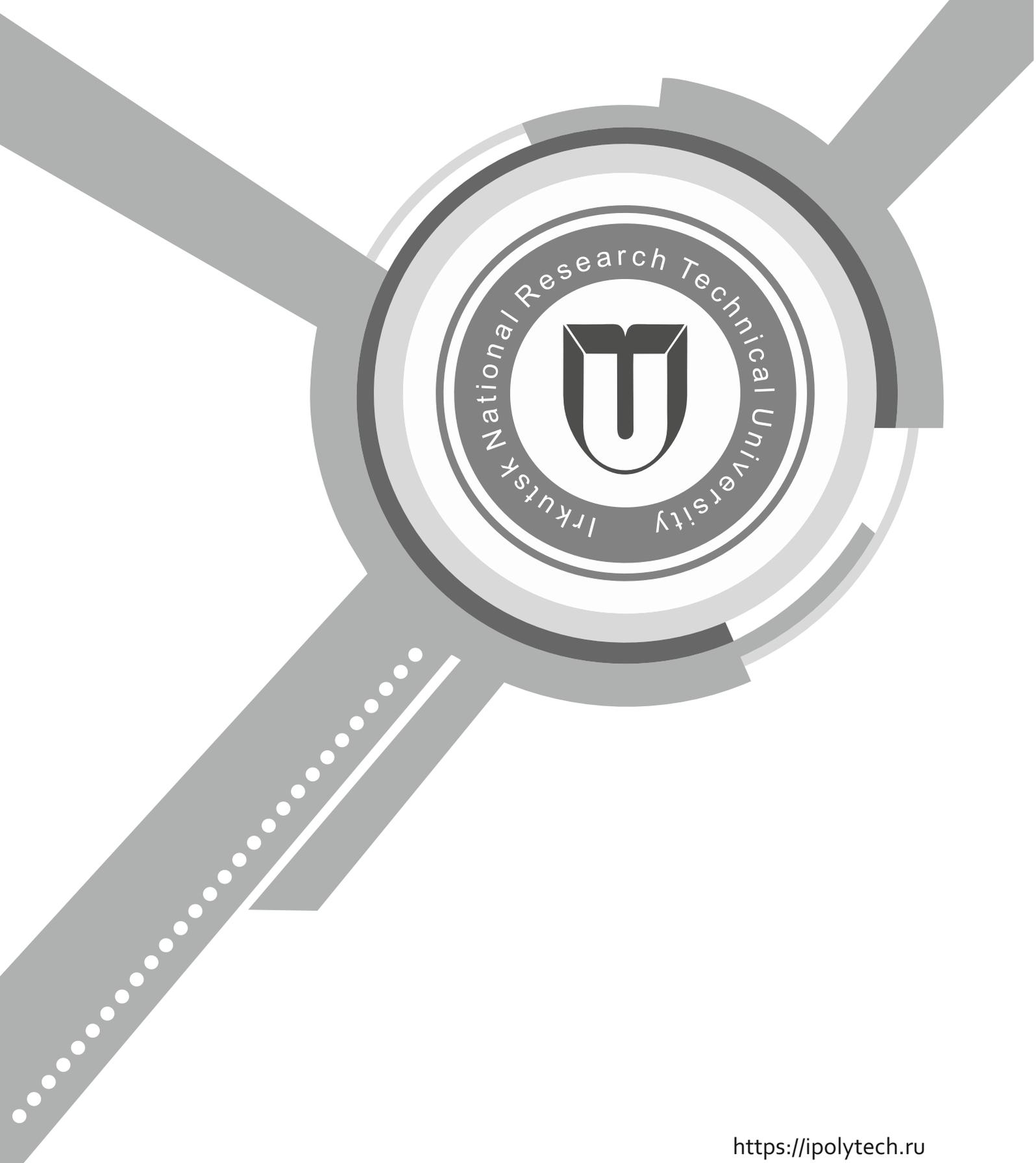


<https://ipolytech.ru>

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

# iPolytech Journal

Tom 27, № 2. 2023 / Vol. 27, № 2. 2023



<https://ipolytech.ru>

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

**iPolytech Journal**

Том 27, № 2. 2023 / Vol. 27, № 2. 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: [pgr@istu.edu](mailto:pgr@istu.edu)

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

# iPolytech Journal

Tom 27, № 2. 2023 / Vol. 27, № 2. 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, ФГБНУ Институт систем энергетики им. Л.А.Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)

**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)

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

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

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

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

**ИЛОШИН П.В.**, д.т.н., главный научный сотрудник ФГБНУ «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 (Куритиба, Бразилия)

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

**ОГАР П.М.**, д.т.н., профессор, 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 Мохаммад Мехди**, доктор, профессор Университета Тунцзи (Шанхай, Китай)

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

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

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

**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 Беларуси» (г. Минск, Республика Беларусь)

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

**ШОЛЬТЕС Берггольт**, директор Института материаловедения Кассельского университета (г. Кассель, Германия)

**Editorial board**

- Denis N. SIDOROV**, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Advanced Professor, Professor of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher, Melentiev Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)
- Mikhail V. KORNIKOV**, Dr. Sci. (Eng.), Rector, Irkutsk National Research Technical University, chairman of the editorial board (Irkutsk, Russia)
- Semen A. ZAIDES**, Dr. Sci. (Eng.), 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. BOROVNIKOV**, Dr. Sci. (Eng.), Rector, Novgorod State University n.a. Yaroslav-the-Wise (Veliky Novgorod, Russia)
- Josef GAVLIK**, Advanced Professor, Department of Production Technology and Automation, Krakow University of Technology (Krakow, Poland)
- PAVEL V. ILYUSHIN**, Doctor of Sciences (Engineering), Chief Researcher, Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Head of the Center for Intelligent Electric Power Systems and Distributed Energy
- Evgeniy I. KARPENKO**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Head of the Department of the Laboratory of Plasma Energy Processes and Technologies, Institute of Physical Materials Science, SB RAS (Ulan-Ude, Russia)
- Aleksander M. KLER**, Dr. Sci. (Eng.), Chief researcher, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)
- Irina N. KOLOSOK**, Dr. Sci. (Eng.), Leading researcher, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)
- Andrey V. KRYUKOV**, Dr. Sci. (Eng.), Academician of the Russian Academy of Transport, Corresponding member of the Academy of Sciences, Higher School of the Russian Federation and the Russian Academy of Engineering, Honored Power Engineer of the Republic of Buryatia, Advanced Professor, Department of Transport Electric Power Industry, Irkutsk State Railway University (Irkutsk, Russia)
- Viktor G. KURBATSKY**, Dr. Sci. (Eng.), Leading researcher, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)
- Paul LEAHY**, Professor at University College Cork (Department of Wind Power); Funded Investigator in the Science Foundation Ireland MAREI Centre for Marine, Climate and Energy research (Cork, Ireland)
- Sergey V. MAMYACHENKOV**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Head of the Department of Nonferrous Metallurgy, Ural Federal University n.a. the First President of Russia B.N. Yeltsin (Yekaterinburg, Russia)
- Igor V. MARCHUK**, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Director of the Mechanics and Mathematics Department, Novosibirsk State University (Russia)
- Mikhail M. MATLIN**, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Head of the Department of Machine Parts and Hoisting-and-Transport Devices, Volgograd State Technical University (Volgograd, Russia)
- Vsevolod A. MYMRIN**, Dr. Sci. (Geology), Professor, Federal University of Parana (Curitiba, Brazil)
- Nikolay N. NOVITSKY**, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)
- Pyotr M. OGAR**, Dr. Sci. (Eng.), 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. STYCZYNSKI**, 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)



<b>Содержание</b>	226
<hr/>	
<b>Машиностроение</b>	
<hr/>	
<b>Абрамов А.Д., Носов Н.В., Ладягин Р.В.</b> Разработка методики построения трёхмерного изображения структуры поверхности деталей по их профиллограммам.....	230
<b>Жавыркин В.В., Сладкова Л.А.</b> Трехкомпонентный тензометрический датчик для точного измерения колебания нагрузок.....	241
<b>Нижегородов А.И.</b> Новая разновидность аксиально-поршневых гидромашин с многорядными блоками и сдвоенным качающим узлом.....	250
<b>Свинин В.М., Ушаков В.А., Тихонов А.Г., Пятых А.С., Кононенко Р.В., Родыгина А.Е.</b> Динамометрический расточной резец.....	263
<b>Храмов А.В., Жирухин К.С., Киселев Е.С.</b> Эффективность использования новых видов технологической оснастки при изготовлении нежестких плоскостных алюминиевых деталей.....	284
<hr/>	
<b>Энергетика</b>	
<hr/>	
<b>Гвоздяков Д.В., Зенков А.В., Мальцев Л.И., Поджаров Ю.С.</b> Влияние кавитационной обработки на свойства водоугольных суспензий с добавками пирогенетической жидкости и характеристики их распыления пневматической форсункой.....	297
<b>Жуйков А.В., Матюшенко А.И., Степанов С.Г.</b> Актуальность применения твердотопливной смеси на основе бурого угля Большесырского разреза и отходов лесоперерабатывающей промышленности из березы в энергетических установках.....	310
<b>Литвинов С.Н., Лебедев В.Д., Гусенков А.В.</b> Анализ методов контроля технического состояния оборудования на применимость к высоковольтным электронным измерительным трансформаторам.....	322
<b>Савина Н.В., Варыгина А.О.</b> Выбор оптимальной марки провода высоковольтных воздушных линий электропередачи на основе критериального анализа.....	339
<b>Сергеев Н.Н., Матренин П.В.</b> Обзор международного опыта в прогнозировании генерации возобновляемых источников энергии с помощью методов машинного обучения.....	354
<b>Тихонов К.В.</b> Исследование коммутационных перенапряжений в электрических сетях до 1000 В...	370
<b>Шойко В.П., Бутакова А.М.</b> Оценка эффективности применения фазоповоротного трансформатора для повышения пропускной способности межсистемной электропередачи.....	380
<hr/>	
<b>Металлургия</b>	
<hr/>	
<b>Блудова Д.И., Мамяченков С.В., Анисимова О.С.</b> Методы удаления хлорид-ионов при производстве цинка из пыли электродуговой плавки.....	392
<b>Василькова А.О., Хмельницкая О.Д., Войлошников Г.И.</b> Изучение основных закономерностей растворения золота и меди в растворах с ультранизкой концентрацией цианида натрия.....	422
<b>Немчинова Н.В., Зайцева А.А.</b> Повышение качества металлургического кремния путём кислотной очистки от примесей.....	436
<hr/>	
<b>Персоналия</b>	
<hr/>	
К 85-летию Юбилею А.В. Баева.....	449

**Content** 227**Mechanical engineering**

<b>Abramov A.D., Nosov N.V., Ladyagin R.V.</b> Development of a method for constructing a 3D image of the surface structure of parts based on their profilograms.....	230
<b>Zhavyrkin V.V., Sladkova L.A.</b> Three-component strain gauge for precise measurement of load fluctuations.....	241
<b>Nizhegorodov A.I.</b> A new variety of axial piston hydraulic machines with multi-row units and a dual oscillating unit.....	250
<b>Svinin V.M., Ushakov V.A., Tikhonov A.G., Pyatykh A.S., Kononenko R.V., Rodygina A.E.</b> Dynamometric cutting tool.....	263
<b>Khramov A.V., Zhirukhin K.S., Kiselev E.S.</b> Feasibility of new types of technological equipment in the manufacture of nonrigid flat aluminum parts.....	284

**Power engineering**

<b>Gvozdyakov D.V., Zenkov A.V., Maltsev L.I., Podzharov Yu.S.</b> Influence of cavitation treatment on the properties of coal-water slurries with pyrogenetic liquid and characteristics of their atomization by a pneumatic nozzle.....	297
<b>Zhuikov A.V., Matyushenko A.I., Stepanov S.G.</b> Application a solid fuel mixture based on Bolshesyrsky lignite and birch wood waste in power plants.....	310
<b>Litvinov S.N., Lebedev V.D., Gusenkov A.V.</b> Analysis of methods for monitoring the technical condition of high-voltage electronic measuring transformers.....	322
<b>Savina N.V., Varygina A.O.</b> Selection of an optimal cable brand for high-voltage overhead power lines based on criterion analysis.....	339
<b>Sergeev N.N., Matrenin P.V.</b> A review of international experience in forecasting renewable energy generation using machine learning methods.....	354
<b>Tikhonov K.V.</b> Study of switching overvoltages in electrical networks up to 1000 V.....	370
<b>Shoiko V.P., Butakova A.M.</b> Feasibility of using phase-shifting transformers to increase the throughput of interconnected power transmission systems.....	380

**Metallurgy**

<b>Bludova D.I., Mamyachenkov S.V., Anisimova O.S.</b> Methods for removing chloride ions to manufacture zinc from arc melting dust.....	392
<b>Vasilkova A.O., Khmel'nitskaya O.D., Voiloshnikov G.I.</b> Study of the basic laws of dissolution of gold and copper in solutions with an ultra-low concentration of sodium cyanide.....	422
<b>Nemchinova N.V., Zaitseva A.A.</b> Improving the quality of metallurgical-grade silicon by acid leaching.....	436

**Personalia**

To the 85th anniversary of A.V. Baev.....	449
---	-----



## ***Уважаемые читатели!***

Предлагаем вашему вниманию выпуск научного журнала «iPolytech Journal».

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

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

«iPolytech Journal» реферируется и рецензируется.

Приглашаем вас к активному творческому сотрудничеству по научным направлениям:

- **МАШИНОСТРОЕНИЕ**
  - 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. Metallurgy 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**



Научная статья  
УДК 621.002:658.011:681.3  
<https://elibrary.ru/zidlhw>  
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-230-240>

## Разработка методики построения трёхмерного изображения структуры поверхности деталей по их профилограммам

А.Д. Абрамов<sup>1✉</sup>, Н.В. Носов<sup>2</sup>, Р.В. Ладыгин<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия

**Резюме.** Целью исследования является получение трехмерных изображений исследуемого микрорельефа рабочих поверхностей деталей машин с использованием более простых и доступных средств получения информации о структуре поверхности, а именно – с помощью профилографа. Для получения информации о трехмерном распределении высотных параметров микрорельефа необходимо перейти от профильных параметров микрогеометрии к параметрам ее структуры. Для построения 3D-модели изображений исследуемого микрорельефа прецизионных поверхностей деталей используется профилограмма поверхности, полученная стандартными государственными методами. Цифровые значения сигнала вводятся в компьютер в виде одномерного массива (при этом количество элементов данного массива будет определять размер формируемого изображения). В процессе моделирования сформулированы новые требования к характеристикам микрогеометрии рабочих поверхностей. Предложено одномерный массив рассматривать как одну случайную реализацию видеосигнала вдоль горизонтальной оси X, полученного с видеокамеры, а его повторение вдоль оси Y позволит сформировать 3D-модель исследуемой поверхности детали машин. Для устранения недостатка неадекватного изображения 3D-модели исследуемой поверхности авторами предложено ввести случайную компоненту с использованием генератора псевдослучайных чисел для зашумления каждой последующей строки строящегося изображения. Такой генератор реализован в языке программирования C++. Установлено, что графики видеосигналов для разных строк существенно отличаются друг от друга, что отражает структуру реального микрорельефа. Таким образом, рассмотренный программный метод построения изображений позволяет получить 3D-модель структуры исследуемой поверхности для дальнейшей обработки данных сигналов опико-электронным методом, не прибегая к использованию сложной и дорогостоящей аппаратуры.

**Ключевые слова:** структура, поверхность, изображение, цифровая обработка, зашумление, генератор псевдослучайных чисел

**Для цитирования:** Абрамов А.Д., Носов Н.В., Ладыгин Р.В. Разработка методики построения трёхмерного изображения структуры поверхности деталей по их профилограммам // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 2. С. 230–240. EDN: ZIDLHW, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-230-240>.

### MECHANICAL ENGINEERING

Original article

## Development of a method for constructing a 3D image of the surface structure of parts based on their profilograms

Aleksey D. Abramov<sup>1✉</sup>, Nikolay V. Nosov<sup>2</sup>, Roman V. Ladyagin<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Samara Polytech Flagship University, Samara, Russia

**Abstract.** This work is aimed at obtaining 3D images of the microrelief of working surfaces of machine parts using a profilograph, which represents a simple and convenient approach to analyzing the surface structure. To obtain information about the 3D distribution of height parameters of a microrelief, its structural parameters, rather than microgeometry profile, should be used. To build a 3D model of the microrelief of precision parts, a profilogram obtained by conventional GOST methods is used. The digital values of a signal are entered into a computer in the form of a one-dimensional

array (the number of elements of this array will determine the size of the generated image). In the process of modeling, new requirements for the microgeometry characteristics of working surfaces are formulated. It is proposed to consider the one-dimensional array as a single random realization of a video camera signal along the X axis. Then its replication along the Y axis will form a 3D model of the examined surface. In order to eliminate the drawback of inadequate imaging of the 3D model of the studied surface, it is proposed to introduce a random component using a pseudorandom number generator to add noise to each successive line of the image under construction. This generator is implemented in the C++ programming language. It was established that video signal graphs for different lines differ significantly, thereby reflecting the real microrelief structure. The proposed method for constructing digital images can be used to obtain a 3D model of the surface structure under examination for further processing of these signals by an optical electronic method, without using complex and expensive equipment.

**Keywords:** structure, surface, image, digital processing, noise contamination, pseudorandom number generator

**For citation:** Abramov A.D., Nosov N.V., Ladyagin R.V. Development of a method for constructing a 3D image of the surface structure of parts based on their profilograms. *iPolytech Journal*. 2023;27(2):230-240. (In Russ.). EDN: ZIDLHW, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-230-240>.

## ВВЕДЕНИЕ

Многочисленными исследованиями установлено, что шероховатость (или микрогеометрия рабочих поверхностей) деталей машин оказывает существенную, а порой и определяющую роль в надежности и долговечности промышленных изделий при их эксплуатации [1–3]. В связи с этим важную роль приобретают и вопросы контроля параметров микрогеометрии поверхности изделий, как на этапе их изготовления, так и в процессе эксплуатации. До недавнего времени основными документами, регламентирующими набор необходимых параметров микрогеометрии поверхности деталей, характеризующими ее качество, являлись ГОСТ 2789-73<sup>4</sup> и ГОСТ 25142-82<sup>5</sup>, а также ISO 468:1982<sup>6</sup>. При этом предполагалось, что сами показатели определялись на основе информации, полученной, как правило, профильными методами, в частности с помощью профилографов. Достоинства и недостатки этих методов рассмотрены в работах [4, 5].

Очевидно, что применение профилографов в классическом варианте для получения информации о микрогеометрии исследуемой поверхности [6–9] не позволяет использовать

эту информацию для вычисления параметров структуры поверхности<sup>7</sup> [10–13].

На практике для получения трехмерных изображений в технических системах, в частности в робототехнике, широкое распространение получили системы стереозрения [14]. Однако применение этих средств для получения 3D-изображений исследуемого микро рельефа прецизионных поверхностей, имеющих шероховатость меньше 0,15 мкм, не представляется возможным ввиду ограниченной разрешающей способности оптических систем, накладываемой на них дифракционным эффектом. Согласно ГОСТ 25502-82<sup>8</sup> и литературным данным [15], разрешающая способность объектива микроскопа зависит от значений нумерической (числовой) апертуры ( $A$ ) объектива и конденсора и длины волны источника света ( $\lambda$ ). Для пучка лучей, параллельных оптической оси микроскопа, разрешающую способность объектива микроскопа определяют по формуле:

$$d = \frac{\lambda}{A}$$

<sup>4</sup> ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. Введ. 01.01.1975 (с изм. 2018). М.: Стандартиформ, 2018.

<sup>5</sup> ГОСТ 25142-82. Шероховатость поверхности. Термины и определения. Введ. 18.02.1982. (с изм. 2018). М.: Стандартиформ, 2018.

<sup>6</sup> ISO 468:1982. Шероховатость поверхности. Параметры, их значения и общие правила установления технических требований. Введ. 01.08.1982. (отм. 01.04.1998). М.: Рос. ин-т стандартизации.

<sup>7</sup> Свидетельство о регистрации электронного ресурса № 24530. Алгоритм моделирования структуры трехмерной поверхности деталей машин из неоднородных конструкционных материалов с учетом доли объемных несплошностей / И.Н. Бобровский. Заявл. 25.05.2020; опубл. 01.06.2020.

<sup>8</sup> ГОСТ 25502-82. Объективы. Метод определения фотографической разрешающей способности. Введ. 10.11.1982. М.: Гос. комитет по стандартам СССР, 1982.

Для наклонных лучей разрешающая способность в 2 раза выше:

$$d = \frac{\lambda}{2A},$$

где  $\lambda$  – длина волны, нм;  $A$  – числовая апертура объектива.

Длина волны лучей источника света в видимой части спектра может меняться от 0,4 мкм (400 нм) для фиолетовых лучей до 0,7 мкм (700 нм) для красных. При освещении объекта наклонными лучами разрешающая способность объектива микроскопа в 2 раза выше, чем при освещении прямо падающими лучами. Освещая препарат синими лучами ( $\lambda = 0,47$  мкм), то есть, применяя в осветителе синий светофильтр, можно изучать более тонкие структуры, чем при освещении обычным белым светом. Например: для объектива с  $A = 1,4$  при освещении белым светом ( $\lambda = 0,55$  мкм) диаметр наименьшей видимой частицы при прямо падающем свете равен 0,39 мкм, при косом освещении – 0,20 мкм, а при освещении синим светом – 0,34 и 0,17 мкм, соответственно. Максимальное разрешение, которое можно получить при использовании светового микроскопа, 0,20–0,35 мкм. Увеличить разрешающую способность можно при использовании ультрафиолетового света (длина волны 0,26–0,28 мкм), однако и в этом случае разрешение меньше, чем 0,13–0,14 мкм получить не удастся.

Для получения трехмерных изображений

с высокой разрешающей способностью в настоящее время используются интерферометры и конфокальные микроскопы [16–18], которые позволяют получать разрешение порядка 5 нм. Однако эта аппаратура имеет значительные габариты, относительную сложность в эксплуатации, и ее использование возможно только в лабораторных условиях. Кроме того, разработка и использование программного обеспечения для получения трехмерных изображений с помощью этой аппаратуры требует привлечения специалистов высокой квалификации.

В связи с этим целью исследования является получение трехмерных изображений исследуемого микрорельефа с помощью более простых и доступных средств получения информации о структуре поверхности, а именно – с помощью профилографа.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для построения 3D-модели изображений исследуемого микрорельефа прецизионных поверхностей используется профилограмма поверхности, полученная стандартными ГОСТовскими методами. Вид такой профилограммы приведен на рис. 1.

На этой профилограмме значения полученных высотных параметров в микрометрах ставятся в соответствие значений яркостного сигнала, показанные слева на рис. 1. Эти значения яркостного сигнала в относительных безразмерных единицах будут соответствовать стандартным видеосигналам, используемым в мониторах персональных компьютеров.

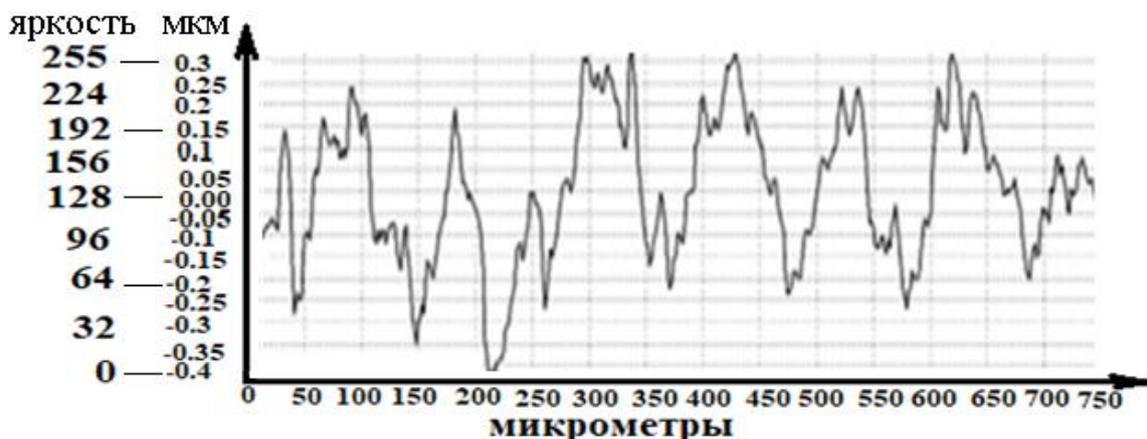


Рис. 1. Вид профилограммы  
Fig. 1. Profilogram image

Далее эти цифровые значения сигнала, расположенные вдоль оси профилограммы «микрометры» вводятся в компьютер в виде одномерного массива. При этом количество элементов этого массива будет определять размер формируемого изображения в пикселях по оси X. Этот одномерный массив рассматривается как одна случайная реализация видеосигнала вдоль горизонтальной оси X, как бы полученного с видеокамеры, а его повторение вдоль оси Y позволит сформировать 3D-модель исследуемой поверхности. Затем с использованием программных средств библиотеки OpenCV [19] строится трехмерное изображение исследуемого микрорельефа, то есть сигнал яркости и будет отображать высотный параметр микрорельефа. Для этого в компьютер вводится какое-либо полутоновое изображение в формате BMP. При этом размер одномерного массива должен соответствовать размеру изображения по оси X. В общем случае размер изображения по оси Y может задаваться пользователем произвольно. В данном конкретном случае было использовано изображение участка исследуемой поверхности с размерами 3×2,5мм, а формат изображения этого участка составлял 320×240 пикселей. Отметим также, что для этого микрорельефа, полученного шлифованием, и была сделана профилограмма, приведенная на рис. 1. Изображение этого микрорельефа приведено на рис. 2, а характерный график видеосигна-

ла для этого изображения приведен на рис. 3. Графики видеосигналов анализируются в специальном программном обеспечении, которое позволяет определять параметры микронеровностей поверхности по формулам, приведенным в работах [9–11].

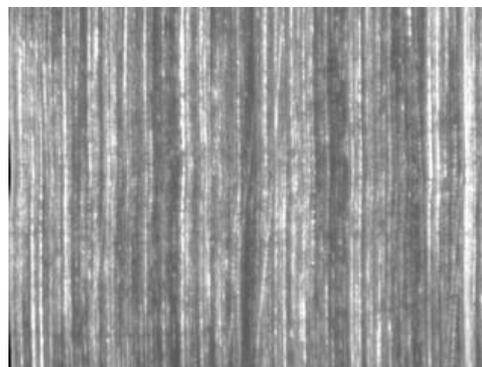


Рис. 2. Изображение микрорельефа исследуемого участка поверхности  
Fig. 2. Microrelief image of the investigated surface area

Для программного построения трехмерного изображения этого же микрорельефа высотные значения с профилограммы были использованы последовательно 4 раза для формирования одномерного массива. Результат такого построения – 3D-модель исследуемой поверхности микрорельефа, когда каждая строка изображения строится по исходной профилограмме (рис. 4), а вид полученного видеосигнала с этого изображения приведен на рис. 5.

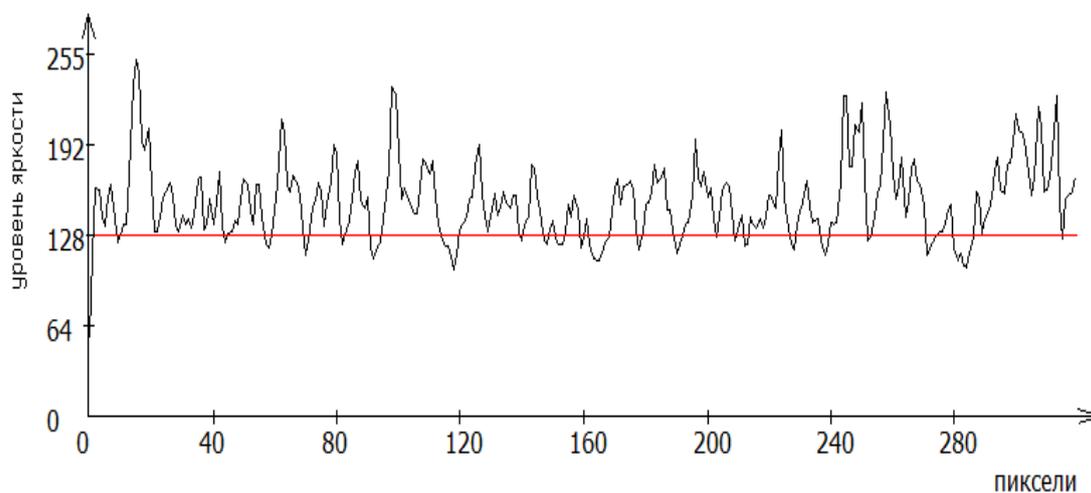
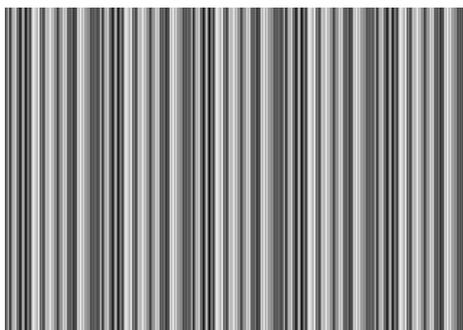
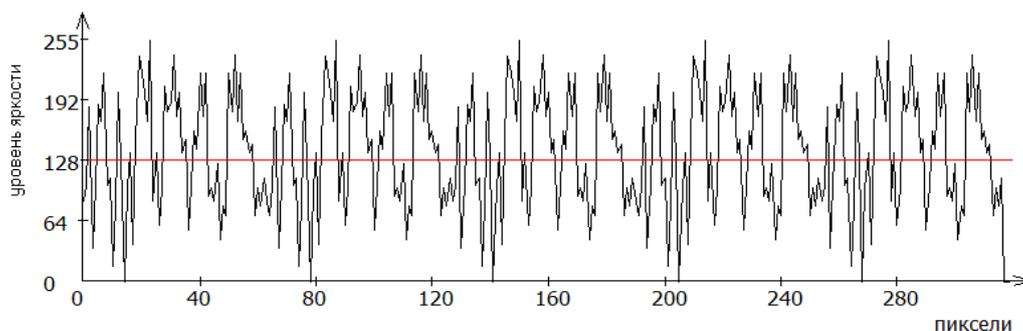


Рис. 3. Вид видеосигнала для изображения исследуемого микрорельефа  
Fig. 3. Type of the video signal for the studied microrelief image



**Рис. 4. Изображение построенного по профилограмме микро рельефа**  
**Fig. 4. The microrelief image constructed according to the profilogram**



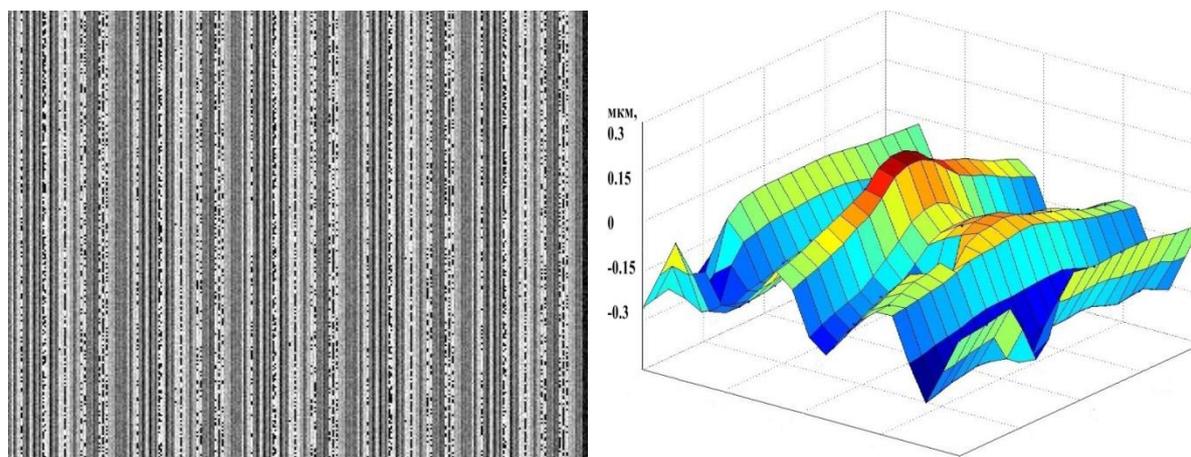
**Рис. 5. Вид видеосигнала для изображения 3D-модели микро рельефа**  
**Fig. 5. Type of the video signal for the 3D microrelief model image**

Как видно из рис. 5, характер видеосигнала в точности повторяет рисунок профилограммы, что дает полное основание утверждать, что 3D-модель исследуемой поверхности, полученная в результате программного метода, вполне адекватна реальному микро рельефу исследуемой поверхности, а полученная 3D-модель микро рельефа может быть использована для вычисления его характеристик в соответствии с новым ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014<sup>9</sup>. Следует также отметить, что использование обычного изображения исследуемого микро рельефа, приведенного на рис. 1, не может служить источником достоверной информации для непосредственного вычисления структурных характеристик исследуемого микро рельефа. Отмеченное обстоятельство вытекает из сильных отличий видеосигнала, приведенного на рис. 2, и профилограммы, что также подтверждает ранее сделанные выводы о применимости обычной микроскопии для вычисления струк-

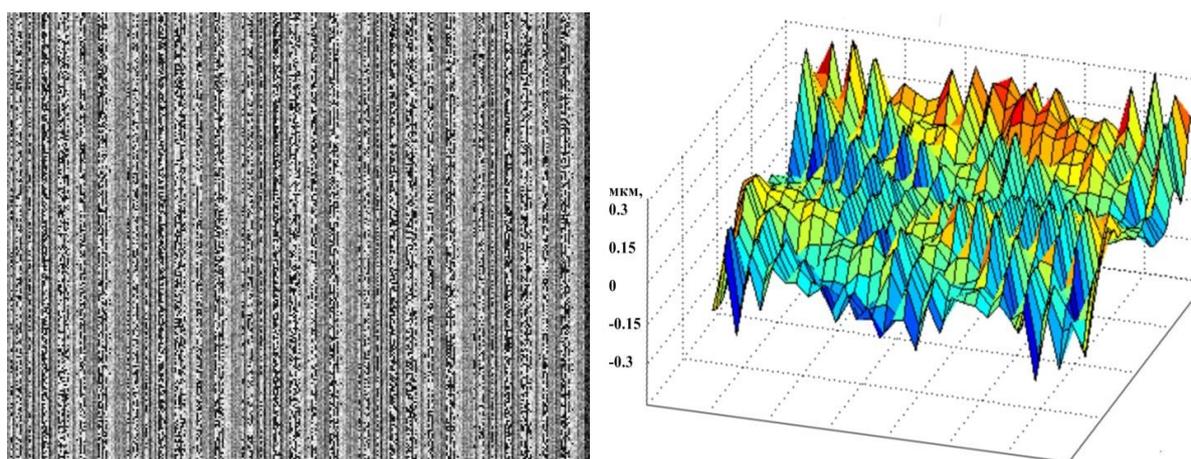
турных параметров микро рельефа.

Однако полученное изображение 3D-модели исследуемой поверхности не вполне адекватно отражает настоящий микро рельеф этой поверхности, так как каждая последующая строка данного изображения полностью повторяет предыдущую, построенную по исходной профилограмме. Для того, чтобы устранить отмеченный недостаток, при построении изображения нам необходимо бы было иметь набор профилограмм, последовательно полученных с исследуемого микро рельефа по координате Y. Например, для построения изображения формата 100×100 пикселей потребовалось бы получить 100 профилограмм, последовательно снятых по координате Y с анализируемого участка поверхности с шагом в один мм/пиксель. Естественно, что выполнить такие измерения на существующих в настоящее время профилографах/профилометрах не представляется возможным.

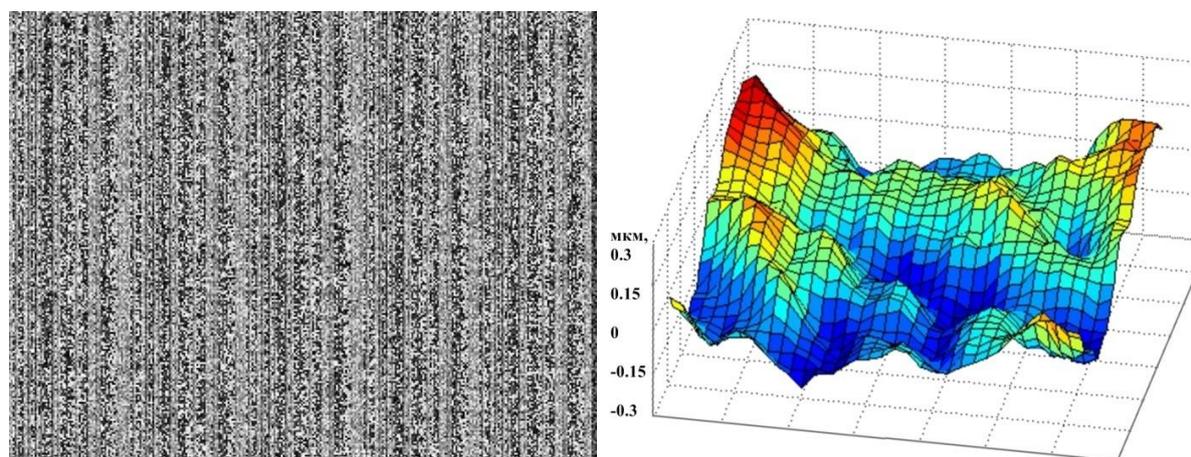
<sup>9</sup> ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014. Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Арел. Введ. 01.01.2016. М.: Стандартинформ, 2015.



a



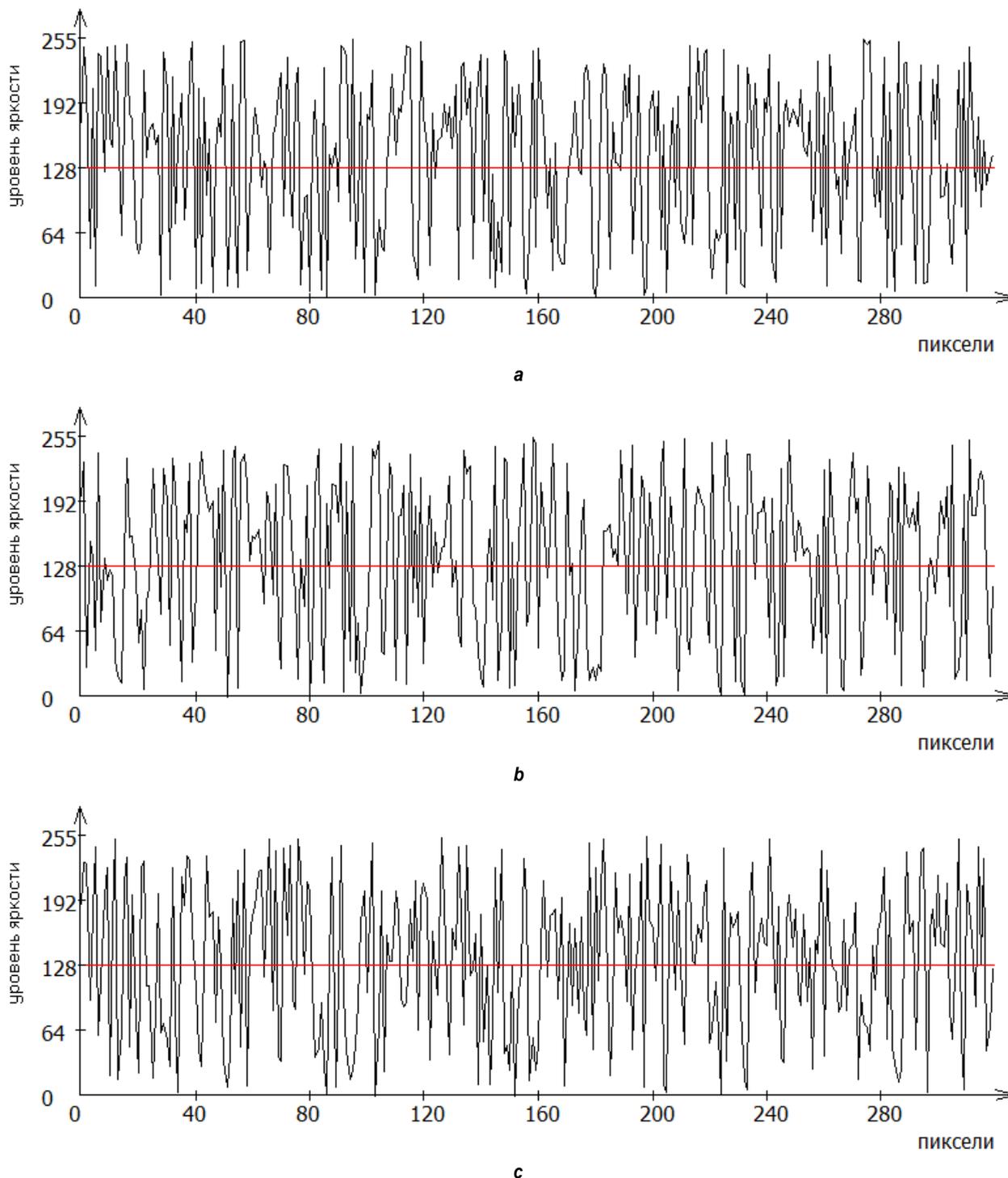
b



c

Рис. 6. Изображения программно сформированных 3D-изображений исследуемой поверхности с разной степенью зашумления генератора псевдослучайных чисел: a – rand() % 50; b – rand() % 100; c – rand() % 150

Fig. 6. Images of software generated 3D images of the studied surface with varying noise degrees of the pseudorandom number generator: a – rand() % 50; b – rand() % 100; c – rand() % 150



**Рис. 7. Графики видеосигналов с соответствующими 3D-моделями структуры для разных строк зашумленного изображения: а – для строки № 50; б – для строки № 100; с – для строки № 150**

**Fig. 7. Graphs of video signals with corresponding 3D models of the structure for different lines of the noisy image: a – for the line no. 50; b – for the line no. 100; c – for the line no. 150**

В связи с этим в данной работе был предложен подход к построению 3D-модели исследуемой поверхности, заключающийся в

использовании генератора псевдослучайных чисел (ГПСЧ)<sup>10</sup> [20] для зашумления каждой последующей строки строящегося изображе-

<sup>10</sup>Шилдт Г. Полный справочник по C++. 4-е изд. / пер. с англ. М.: Вильямс, 2006. 800 с.

ния. Такой генератор реализован в языке программирования C++. Следует также отметить, что этот язык используется и для составления программ средствами OpenCV. Фрагмент программы при использовании ГПСЧ для зашумления строк изображения приведен ниже.

```
//ВЫПОЛНЯЕМ РАНДОМИЗАЦИЮ ГПСЧ
srand(rand_value);
//ФОРМИРУЕМ ЗАШУМЛЕННЫЙ МИКРО-
РЕЛЬЕФ
for( int i = 0; i <img.rows; i++ )
//for( int i = 0; i <img.rows; i=i+4 )
for( int j = 0; j <img.cols; j++ )
//for( int j = 0; j <img.cols; j=j+2 )
//for( int j = 0; j <img.cols; j=j+3 )
//for( int j = 0; j <img.cols; j=j+4 )
//for( int j = 0; j <img.cols; j=j+6 )
{
//img.at<Vec3b>(i,j)[0] = mas[j]+1 + rand() %
20;
img.at<Vec3b>(i,j)[0] = mas[j]+1 + rand() %
50;
//img.at<Vec3b>(i,j)[0] = mas[j]+1 + rand() %
75;
//img.at<Vec3b>(i,j)[0] = mas[j]+1 + rand() %
100;
//img.at<Vec3b>(i,j)[0] = mas[j]+1 + rand() %
150;
//img.at<Vec3b>(i,j)[0] = mas[j]+1 + rand() %
200;
//img.at<Vec3b>(i,j)[0] = mas[j]+1 + rand() %
250;
img.at<Vec3b>(i,j)[1] = img.at<Vec3b>(i,j)[0];
img.at<Vec3b>(i,j)[2] = img.at<Vec3b>(i,j)[0];
}
//ПОКАЗЫВАЕМ СОЗДАННЫЙ МИКРО-
```

РЕЛЬЕФ

```
imshow("СФОРМ.РЕЛЬЕФ_2", img );
//ЗАПОМИНАЕМ СОЗДАННЫЙ МИКРО-
РЕЛЬЕФ
imwrite("СФОРМИРОВАННОЕ ЗАШУМ-
ЛЕННОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ.bmp", img );
```

В данной программе предусмотрены разные проценты зашумления строк изображения.

Результаты программного формирования 3D-изображений исследуемой поверхности с разной степенью зашумления строк изображения генератором ГПСЧ приведены на рис. 6, а графики видеосигналов для разных строк зашумленного изображения при состоянии ГПСЧ + rand() % приведены на рис. 7.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как видно из приведенных рисунков, видеосигналы для разных строк существенно отличаются друг от друга, что более реально отражает структуру реального микрорельефа. Таким образом, рассмотренный программный метод построения изображений позволяет получить 3D-модель структуры исследуемой поверхности для дальнейшей обработки данных сигналов опико-электронным методом, не прибегая к использованию сложной и дорогостоящей аппаратуры [4, 5]. Кроме того, предложенный метод позволяет прогнозировать качество выполнения технологической операции через определение процента зашумления изображения, то есть оценивать влияние случайной компоненты, полученной в процессе обработки.

## Список источников

1. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000. 320 с.
2. Клевцов Г.В., Фролова О.А., Клевцова Н.А. Влияние поверхностной обработки на микрорельеф и структурные изменения материала в поверхностных слоях // Фундаментальные исследования. 2005. № 4. С. 71.
3. Приходько В.М., Меделяев И.А., Фатюхин Д.С. Формирование эксплуатационных свойств деталей машин ультразвуковыми методами: монография. М.: МАДИ, 2015. 264 с.
4. Абрамов А.Д., Носов Н.В. Оценка параметров микрорельефа поверхностей деталей машин на основе квази-оптимальных корреляционных алгоритмов // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2016. № 9. С. 19–25.
5. Abramov A.D., Grishin R.G., Nosov N.V. Electrooptic estimation of texture parameters of precision surfaces // Journal of Physics: Conference Series. The IV International Conference on Information Technology and Nanotechnology. 2018. Vol. 1096. С. 168–175. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1096/1/012021>.
6. Носов Н.В., Михайлова Л.Н. Исследование шероховатости поверхностей конических роликовых подшипников //

- Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2018. Т. 20. № 4-2 . С. 232–237.
7. Зибров П.Ф., Бобровский И.Н., Бобровский Н.М. Исследование профиля шероховатого слоя, микронеровности которого ограничены сложной кривой, состоящей из вогнутых и выпуклых полуокружностей в двумерном пространстве // СТИН. 2020. № 6. С. 27–30.
8. Bobrovskij I., Khaimovich A., Bobrovskij N., D'yakonov A. Determination of wide burnishing energy-force parameters based on constructing the kinematically admissible velocity field // *Metals*. 2020. Vol. 10. Iss. 1. P. 46. <https://doi.org/10.3390/met10010046>.
9. Носов Н.В., Костин Н.А., Ладыгин Р.В. Оценка параметров текстуры прецизионных поверхностей с применением квазиоптимальных корреляционных алгоритмов // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2021. № 1. С. 24–31. <https://doi.org/10.18323/2073-5073-2021-1-24-31>.
10. Абрамов А.Д., Никонов А.И. Анализ и корреляционный метод устранения погрешности оптико-электронного определения микрорельефных параметров // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2016. № 1. С. 3–9.
11. Абрамов А.Д., Носов Н.В., Костин Н.А. Анализ структурных параметров профилограммы поверхности в оптико-электронных системах // Высокие технологии в машиностроении: материалы XIX Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием (г. Самара, 10–11 ноября 2022 г.). Самара: СамГТУ, 2022. С. 3–5.
12. Иванкин В.Ю., Пепеляева Т.Ф. Методика конструирования поверхности по заданным параметрам шероховатости // Перспективы науки. 2014. № 3. С. 73–75.
13. Носов Н.В., Якубович Е.А. Исследование качества поверхности профиля пера лопаток компрессора после алмазного виброконтрастного полирования // *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2021. № 26. С. 27–31. <https://doi.org/10.26160/2474-5901-2021-26-27-31>.
14. Смирнов А.В., Беззубцев А.Ю. Обход препятствий техническими средствами с использованием стереозрения // Программные системы: теория и приложения. 2016. Т. 7. № 4. С. 331–346.
15. Миланич А.И., Баранов А.А. Предельное разрешение в оптике // Труды Московского физико-технического института. 2012. Т. 4. № 2. С. 177–181.
16. Азарова В.В., Чертович И.В., Цветкова Т.В. Интерферометрический метод контроля прецизионных поверхностей и лазерных зеркал // Тр. 1-й Всерос. школы-семинара (г. Москва, 1–3 декабря 2010 г.). М.: МИЭМ, 2010. С. 209–214.
17. Пат. № 2441291, Российская Федерация, G02B21/00. Монохромный микроскоп сверхвысокого разрешения / А.И. Миланич; заявитель и правообладатель А.И. Миланич. Заявл. 20.05.2010; опубл. 27.01.2012.
18. Либенсон. М.Н. Преодоление дифракционного предела в оптике // Соросовский образовательный журнал. 2000. Т. 6. № 3. С. 99–104.
19. Кэлер А., Брэдки Г. Изучаем OpenCV 3. Разработка программ компьютерного зрения на C++ с применением библиотеки OpenCV / пер. с англ. А.А. Слинкина. М.: ДМК Пресс, 2017. 826 с.
20. Абрамов А.Д., Никонов А.И. Оптико-электронные системы и методы измерительной оценки параметров микрорельефа: монография. Самара: Изд-во СамГТУ, 2012. 207 с.

## References

1. Suslov A.G. *The quality of machine part surface layer*. Moscow: Mashinostroenie; 2000, 320 p. (In Russ.).
2. Klevtsov G.V., Frolova O.A., Klevtsova N.A. The effect of surface treatment on the material microrelief and structural changes in the surface layer. *Fundamental'niye issledovaniya = Fundamental research*. 2005;4:71-73. (In Russ.).
3. Prihod'ko V.M., Medelyaev I.A., Fatyuhin D.S. *Formation of machine part operational properties by ultrasonic methods: monograph*. Moscow: Moscow Automobile and Road Construction State Technical University; 2015, 264 p. (In Russ.).
4. Abramov A.D. Estimation of machine part surface microrelief parameters based on quasi-optimal correlation algorithms. *Vestnik komp'uternykh i informatsionnykh tekhnologii = Herald of Computer and Information Technologies*. 2016;9:19-25. (In Russ.).
5. Abramov A.D., Grishin R.G., Nosov N.V. Electrooptic estimation of texture parameters of precision surfaces. *Journal of Physics: Conference Series. The IV International Conference on Information Technology and Nanotechnology*. 2018;1096:168-175. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1096/1/012021>.
6. Nosov N.V., Mikhailova L.N. Research surface roughness of the tapered roller bearing. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2018;20(4-2):232-237. (In Russ.).
7. Zibrov P.F., Bobrovskij I.N., Bobrovskij N.M. Profile study of a rough layer with microroughnesses limited by a complex curve consisting of concave and convex semicircles in a two-dimensional space. *STIN*. 2020;6:27-30. (In Russ.).
8. Bobrovskij I., Khaimovich A., Bobrovskij N., D'yakonov A. Determination of wide burnishing energy-force parameters based on constructing the kinematically admissible velocity field. *Metals*. 2020;10(1):46. <https://doi.org/10.3390/met10010046>.
9. Nosov N.V., Kostin N.A., Ladyagin R.V. Estimation of texture parameters for the precision surfaces using the quasi-optimal correlation algorithms. *Vektor nauki Tol'yattinskogo gosudarstvennogo universiteta = Science Vector of Togliatti State University*. 2021;1:24-31. (In Russ.). <https://doi.org/10.18323/2073-5073-2021-1-24-31>.

10. Abramov A.D., Nikonov A.I. Analysis and correlation method for eliminating the errors of opto-electronic determination of microrelief parameters. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii = Herald of Computer and Information Technologies*. 2016;1:3-9. (In Russ.).
11. Abramov A.D., Nosov N.V., Kostin N.A. Analysis of surface profilogram structural parameters in optical-electronic systems. In: *Vysokie tekhnologii v mashinostroenii: materialy XIX Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem = High technologies in mechanical engineering: materials of the 19<sup>th</sup> All-Russian scientific and technical conference with international participation*. 10–11 November 2022, Samara: Samara Polytech Flagship University; 2022, p. 3-5. (In Russ.).
12. Ivankin V.Yu., Pepelyaeva T.F. Surface design technique based on specified roughness parameters. *Perspektivy nauki = Science Prospects*. 2014;3:73-75. (In Russ.).
13. Nosov N.V., Yakubovich E.A. Research of the surface quality of the compressor blades feather after diamond vibro-contact polishing. *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2021;26:27-31. (In Russ.).
14. Smirnov A.V., Bezzubcev A.Yu. Bypass obstacles mobile technical unit using stereo vision. *Programmnye sistemy: teoriya i prilozheniya = Program systems: Theory and applications*. 2016;7(4):331-346. (In Russ.).
15. Milanich A.I., Baranov A.A. Limit resolution in optics. *Trudy Moskovskogo fiziko-tekhnicheskogo instituta*. 2012;4(2):177-181. (In Russ.).
16. Azarova V.V., Chertovich I.V., Cvetkova T.V. Interferometric monitoring method for precision surfaces and laser mirrors. In: *Trudy I Vserossijskoj shkoly-seminara*. 1–3 December 2010, Moscow. Moscow: HSE Tikhonov Moscow Institute of Electronics and Mathematics; 2010, p. 209-214. (In Russ.).
17. Milanich A.I. *Monochrome microscope of ultra-high resolution*. Patent RF, no. 2441291; 2012. (In Russ.).
18. Libenson M.N. Overcoming diffraction limit in optics. *Sorosovskij obrazovatel'nyj zhurnal = Soros Educational Journal*. 2000;6(3):99-104. (In Russ.).
19. Keler A., Bredski G. Izuchaem OpenCV 3. Learning OpenCV 3 Computer Vision in C++ with the OpenCV Library, 2017, 826 p. (Russ. ed.: *Razrabotka programm komp'yuternogo zreniya na C++ s primeneniem biblioteki OpenCV*. Moscow, DMK Press; 2017, 826 p.)
20. Abramov A.D., Nikonov A.I. *Optoelectronic systems and estimation methods of microrelief parameters*. Samara: Samara Polytech Flagship University; 2012, 207 p. (In Russ.).

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ****Абрамов Алексей Дмитриевич,**

к.т.н., доцент,  
доцент кафедры «Электронные системы и  
информационная безопасность»,  
Самарский государственный технический  
университет,  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244,  
Россия  
✉ esib@samgtu.ru

**Носов Николай Васильевич,**

д.т.н., профессор, профессор кафедры «Технология  
машиностроения, станки и инструменты»,  
Самарский государственный технический  
университет,  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244,  
Россия  
nosov.nv@samgtu.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-7714-8896>

**Ладягин Роман Владимирович,**

старший преподаватель кафедры «Технология  
машиностроения, станки и инструменты»,  
Самарский государственный технический  
университет,  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244,  
Россия  
konferencia-isap@yandex.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-0262-8032>

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS****Aleksey D. Abramov,**

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Electronic  
Systems and  
Information Security,  
Samara Polytech Flagship University,  
244, Molodogvardeiskaya St., Samara 443100, Russia  
✉ esib@samgtu.ru

**Nikolay V. Nosov,**

Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Professor of the Department of Engineering Technology,  
Machines and Tools,  
Samara Polytech Flagship University,  
244, Molodogvardeiskaya St., Samara 443100, Russia  
nosov.nv@samgtu.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-7714-8896>

**Roman V. Ladyagin,**

Senior Lecturer of the Department of Engineering  
Technology,  
Machines and Tools,  
Samara Polytech Flagship University,  
244, Molodogvardeiskaya St., Samara 443100, Russia  
konferencia-isap@yandex.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-0262-8032>

**Вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

**Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 14.03.2023; одобрена после рецензирования 13.04.2023; принята к публикации 26.05.2023.

**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 14.03.2023; approved after reviewing 13.04.2023; accepted for publication 26.05.2023.



Научная статья  
УДК 669.713.7:669.054.83  
<https://elibrary.ru/bigrip>  
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-241-249>

## Трехкомпонентный тензометрический датчик для точного измерения колебания нагрузок

В.В. Жавыркин<sup>1</sup>, Л.А. Сладкова<sup>2✉</sup>

<sup>1,2</sup>Российский университет транспорта, г. Москва, Россия

**Резюме.** Цель – определение и оценка нагруженности большемерных элементов конструкций машин с использованием универсальных тензометрических датчиков. При создании универсального тензодатчика использовались системный анализ отказов и недостатков при изготовлении и эксплуатации большемерных конструкций, тензометрирование, методы сопротивления материалов и теории упругости кольцевых упругих элементов. Для расчета рациональных параметров датчика был использован программный продукт ANSYS. На основе исследования упругого деформирования колец (определение жесткости и напряженно-деформированного состояния) предложена замена кольцевой формы на восьмигранный многоугольник. Показано, что выбранная форма дает возможность проводить на восьмиграннике размещение тензодатчиков для одновременного измерения усилий растяжения-сжатия, изгиба и кручения, возникающих в элементе конструкции машины, либо при изготовлении большемерных поверхностей. На основании полученных результатов предложены зависимости, позволяющие определять погрешность измерений датчиком. Сравнительный анализ работы кольцевых и восьмигранных датчиков позволил отметить уникальные особенности восьмигранного (октаэдного) датчика, возможность оценки с высокой степенью точности измеряемых величин по трем координатным осям. Проведенные исследования показали, что предполагаемые датчики напряжений позволяют фиксировать величину и колебания нагрузок с высокой точностью измерения. Предлагаемая схема размещения датчиков дает возможность находить вертикальную и горизонтальные составляющие усилий, возникающих в элементе конструкции, и показывает отклонения в процессе измерений. Также предлагаемая схема измерений позволяет минимизировать погрешность взаимного влияния датчиков. Разработанный силоизмеритель является универсальной конструкцией и может использоваться для фиксирования статических и динамических воздействий и применяться для цифрового контроля силовых параметров в диапазоне действия до 5 мм.

**Ключевые слова:** тензодатчик, силоизмеритель, нагруженность конструкций, испытания, измерение, компенсация погрешности измерений

**Для цитирования:** Жавыркин В.В., Сладкова Л.А. Трехкомпонентный тензометрический датчик для точного измерения колебания нагрузок // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 2. С. 241–249. EDN: BIGRIP, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-241-249>.

### MECHANICAL ENGINEERING

Original article

## Three-component strain gauge for precise measurement of load fluctuations

Vadim V. Zhavyrkin<sup>1</sup>, Liubov A. Sladkova<sup>2✉</sup>

<sup>1,2</sup>Russian University of Transport, Moscow, Russia

**Abstract.** The aim was to assess the loading of large-size elements of machine structures using versatile strain gauges. A strain gauge was developed using a system analysis of failures and deficiencies in the manufacture and operation of large-scale structures, strain gauging, strength of materials methods, as well as the theory of elasticity of ring elastic elements. The ANSYS software package was used to calculate rational sensor parameters. The conducted study

of ring elastic deformation (determination of stiffness and stress-strain state) allowed the authors to propose that the ring shape should be replaced by an octahedral polygon. This form is suitable for mounting strain gauges for simultaneous measurement of tension and compression, as well as bending and torsion, i.e., forces arising in a machine structural element or in the manufacture of large-size surfaces. The obtained results were used to derive dependences to determine the measurement error of the gauge under study. A comparative analysis of ring and octahedral gauges identified unique features of the latter, consisting in the possibility of assessing the measured values along the three coordinate axes with a high degree of accuracy. The conducted research shows that the proposed strain gauges are capable of registering the magnitude and fluctuations of loads with a high measurement accuracy. The proposed scheme of gauge placement makes it possible to determine the vertical and horizontal components of the forces arising in a structural element and to assess deviations in the process of measurement. In addition, the proposed measuring scheme minimizes the error of mutual influence of sensors. The developed force meter is a versatile device that can be used for registering static and dynamic impacts, as well as for digital control of force parameters in the range of up to 5 mm.

**Keywords:** strain gauge meter, force gauge, structure load, tests, measurement, measurement error compensation

**For citation:** Zhavyrkin V.V., Sladkova L.A. Three-component strain gauge for precise measurement of load fluctuations. *iPolytech Journal*. 2023;27(2):241-249. (In Russ.). EDN: BIGRIP, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-241-249>.

## ВВЕДЕНИЕ

Выход из строя элементов металлоконструкций транспортных средств во многом определяется не только на этапе проектирования, но и при их изготовлении и последующих испытаниях на нагрузочную способность, что особенно значимо для большемерных деталей (поворотный круг, реборды колес и т.п.). Изготовление таких конструкций сопряжено со сложностями изготовления, связанными с определением их плоскостности, которая обеспечивается, например, фрезерованием поверхности [1, 2]. Опыт показывает, что даже современное оборудование не может обеспечить плоскостность поверхности, заданную при проектировании, что ведет к расхождению результатов испытаний с расчетными данными [3]. Существующие измерительные устройства и их расположение на поверхности изделий не позволяют обеспечить точность оценки изменения усилий и деформаций (изгиб, кручение, растяжение-сжатие), возникающих, например, при фрезеровании или при испытаниях [4–6], так как при оценке напряженно-деформированного состояния конструкций тензометрированием используются тензодатчики, устанавливаемые в наиболее нагруженных точках конструкций. Несмотря на незначительные размеры существующих тензодатчиков, возникают определенные трудности при их размещении на элементе конструкции [7]: наблюдается получаемый разброс данных из-за невозможности разместить датчики для определения различных видов напряженно-деформированного состо-

яния в одной точке, особенно, если диапазон пространства для работы определен большими размерами исследуемого объекта [8, 9]. Для устранения этого недостатка требуется разработка конструкции универсального тензодатчика, позволяющего оценивать изменение усилий в элементе конструкции при наличии площади контакта с датчиком не более 5 мм<sup>2</sup>.

## ЦЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. На базе кольцевого упругого элемента и тензометрических датчиков разработать конструкцию универсального октаэдного тензодатчика, позволяющего повысить точность определения напряженного деформированного состояния большемерных элементов конструкций.

2. Определение параметров универсальных тензодатчиков, способ их размещения на поверхности и методика оценки нагруженности большемерных элементов конструкций машин.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Одним из приборов, способным определить направление и величину изменения нагруженного состояния элементов конструкций, служит трехкомпонентный динамометр, основанный на получении сигналов от изменения нагрузок, которые воспринимаются датчиками напряжения. Для этого в конструкции динамометра предусмотрены уже имеющиеся в наличии тензодатчики [10]. Методы исследований базируются на основных критериях предлагаемого силоизмерителя:

жесткости и упругости, которые являются основными показателями обеспечения чувствительности разработанного устройства. Основным недостатком используемого устройства является то, что оценка, например жесткости, искажается собственной частотой колебаний силоизмерителя. Учитывая, что все конструкции подвержены собственным и вынужденным колебаниям, необходимо, чтобы собственная частота силоизмерителя была значительно выше частот колебания объекта измерения, например станка [11]. В этом случае в силоизмерителе возникает область напряжений, которые фиксируются датчиками напряжений. При этом составляющие силового воздействия фиксируются упругим элементом. Однако показания силоизмерителя, как правило, занижены за счет совместного действия усилий, возникающих на обрабатываемой поверхности, а также возникающих со стороны режущего инструмента усилий. Для повышения точности измерений и исключения взаимовлияния при измерениях отклонений необходимо применять упругие элементы в виде кольца, так как в нем величина деформации в упругой зоне пропорциональна прилагаемому усилию.

Механические свойства разрабатываемого кольца определены из диаграммы растяжения-сжатия. Зона упругости материала определяет диапазон измерения усилий. Учитывая действие на кольцо динамических

и знакопеременных нагрузок, изготовленное кольцо и используемый датчик должны проверяться на отсутствие дефектов при изготовлении [12, 13].

Перед выбором кольцевого датчика измерения усилий определим величину деформации от действия прикладываемых усилий. При этом из запаса прочности, считаем, что кольцо должно воспринимать деформации и усилия, превышающие ожидаемые в 1,5...2 раза.

Схема измерения усилий на кольце приведена на рис. 1. Для определения геометрических параметров колец рассмотрим трехмерное приложение сил, возникающих в процессе фрезерования. Основными измеряемыми кольцом параметрами являются усилия резания и точность измерения.

При выборе формы силоизмерителя рассматривались различные варианты исполнения упругих элементов, влияющих на точность измерения. Для сравнения первоначально был рассмотрен вариант формы в виде кольца.

Для измерения деформации кольца (см. рис. 1 а) оценим его геометрические параметры (радиус  $r$ , толщину стенки кольца  $t$ ) от действия усилий  $F_r$  и  $F_t$ . Очевидно, что под действием указанного радиального усилия  $F_r$  кольцо будет деформироваться вдоль оси А – А (рис. 1 б), а от действия касательного (тангенциального) усилия возникает момент  $M$ , поворачивающий кольцо (рис. 1 с).

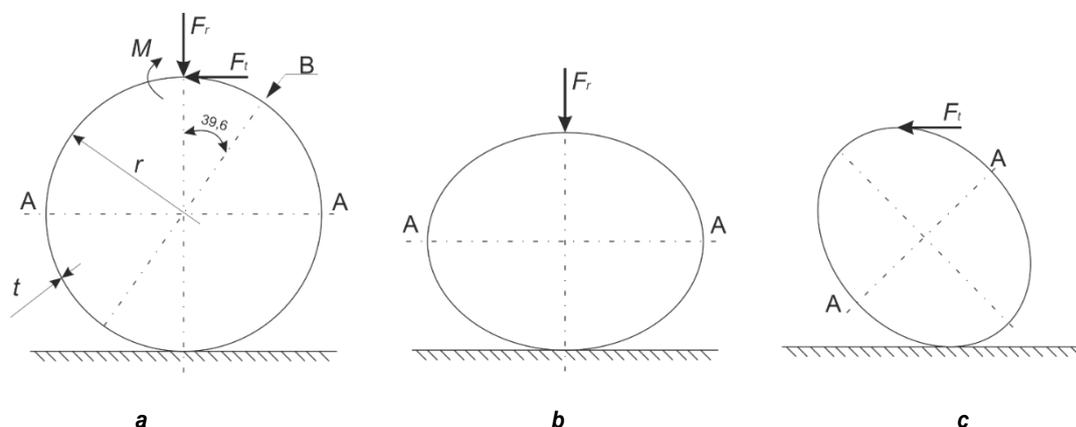


Рис. 1. Деформация кольца в зависимости от приложенных сил ( $r$  – радиус кольца;  $t$  – толщина кольца;  $b$  – ширина кольца): а – измерение деформации кольца; б – действие радиального усилия; с – действие касательного усилия

Fig. 1. Ring deformation depending on the applied forces ( $r$  – ring radius;  $t$  – ring thickness;  $b$  – ring width): а – ring deformation measurement; б – radial force action; с – tangential force action

Согласно теории пластичности, напряжения на внутренней и внешней поверхностях кольца смещаются от точки *A* к точке *B* под углом 39,6° от вертикальной оси [14], принятой за ноль. Величины относительных деформаций будут равны и станут изменяться от точки *A* к точке *B* от нуля до соответствующих величин, не изменяя линейности:

$$\varepsilon_A = \pm \frac{1,09F_r r}{Ebt^2}; \quad (1)$$

$$\varepsilon_A = \pm \frac{2,18F_t r}{Ebt^2}. \quad (2)$$

Преимущества использования круглых колец при действии радиальных и тангенциальных усилий очевидны из вышеприведенных формул. Их погрешность оценивается по зависимостям:

$$k_r = \frac{F_r}{\delta_r} = \frac{Ebt^3}{1,8r^3}; \quad (3)$$

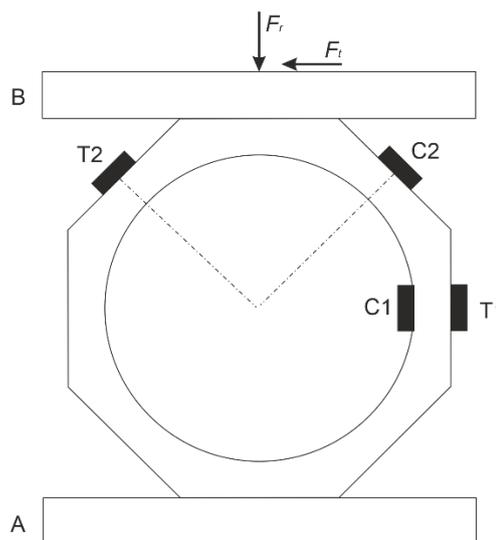
$$k_t = \frac{F_t}{\delta_t} = \frac{Ebt^3}{3,6r^3}. \quad (4)$$

Восьмиугольные кольца из условий прочности отличаются большей жесткостью по минимальному измерению момента инерции сечения. Наружная и внутренняя стороны кольца выполнены несколько вогнутыми для удобства наклейки датчиков. При этом толщину колец принимаем равной от 3 до 20 мм. Датчики наклеены таким образом, что позволяют одновременно фиксировать напряжения  $F_r$  и  $F_t$ , как показано на рис. 2. Для компенсации внешних влияний датчики *T2* и *C2* устанавливаются строго симметрично относительно центральных осей восьмиугольника. Величина относительного отклонения в радиальном направлении от действия силы  $F_r$  выражается зависимостью:

$$\frac{e_A}{\delta_r} = \frac{1,09t}{1,8r} = 0,61 \frac{t}{r}. \quad (5)$$

Аналогичным образом оценивается отклонение и при действии тангенциальной силы. Очевидно, что для обеспечения максимальной чувствительности и жесткости вели-

чина отношения  $e_A / dr$  должна быть максимально большой.



**Рис. 2. Схема установки датчиков на кольцо**  
**Fig. 2. Diagram of sensor installation on the ring**

Проведенные авторами в Японии исследования с использованием метода конечных элементов [14] показали, что восьмигранное кольцо обладает максимальной жесткостью по отношению к круглому при отношении толщины кольца к его радиусу  $t/r$  равному 0,05 и при 10%-м отклонении при отношении  $t/r$  равному 0,25. Кроме того, восьмиугольные кольца имеют значительные преимущества по сравнению с круглыми для различных соотношений  $t/r$ . Выше было сказано, что угол смещения от точки *A* к точке *B* для круглого кольца, при котором радиальная нагрузка равна нулю, а тангенциальная достигает максимума при 39,60°, что весьма близко к 45°, характерно для восьмиугольного кольца (см. рис. 2). Поэтому фактические погрешности при измерениях будут компенсироваться калибровкой динамометра.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

Рассмотрим работу силоизмерительного стола (пластины) с установленными восьмигранными кольцами, как показано на рис. 3. При действии вертикальной нагрузки  $F_z$  используются четыре динамометрических кольца, воспринимающие эту нагрузку, которая фиксируется датчиками *C1* и *T1*. Для из-

мерения вертикальной нагрузки  $C1$  и  $T1$  каждого кольца соединены таким образом, что каждый восьмигранник образует замкнутый мост Уитстона [15]. Сила в направлении оси  $x$  определяется одним из четырех замкнутых мостов Уитстона при помощи датчиков  $C2$  и  $T2$ , располагающихся на наклонных гранях колес  $A$  и  $C$ . Аналогично силы в направлении оси  $y$  измеряются датчиками на кольцах  $B$  и  $D$ , расположенных также на их наклонных поверхностях. При этом направление осей кольца должно совпадать с направлением действия сил. Замером подлежит площадь, ограниченная продольными осями колец. Любая сила, действующая в зоне ограниченной площади, будет показывать одинаковые усилия.

В предлагаемом силоизмерителе датчики, расположенные на наклонной поверхности кольца  $A$ , полностью компенсируют погреш-

ности измерений, производимые кольцом  $C$  в направлении оси  $z$ .

Восьмигранное кольцо жестко крепится между двумя параллельными пластинами. Сопротивление каждого тензодатчика определяется по формуле:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_S} + \frac{1}{R_S(N - 1)}, \quad (6)$$

где  $R_T$  – сопротивление для оценки силы  $F_x, N$ ;  $R_S$  – сопротивление для оценки силы  $F_y, N$ ;  $N$  – номер датчика напряжений в каждом мосту.

Силовое воздействие, передаваемое динамометром (таблица) производится по следующему алгоритму:

- тарировка динамометра;
- регулировка датчиков внутренних блоков;
- вывод сигналов силовых воздействий.

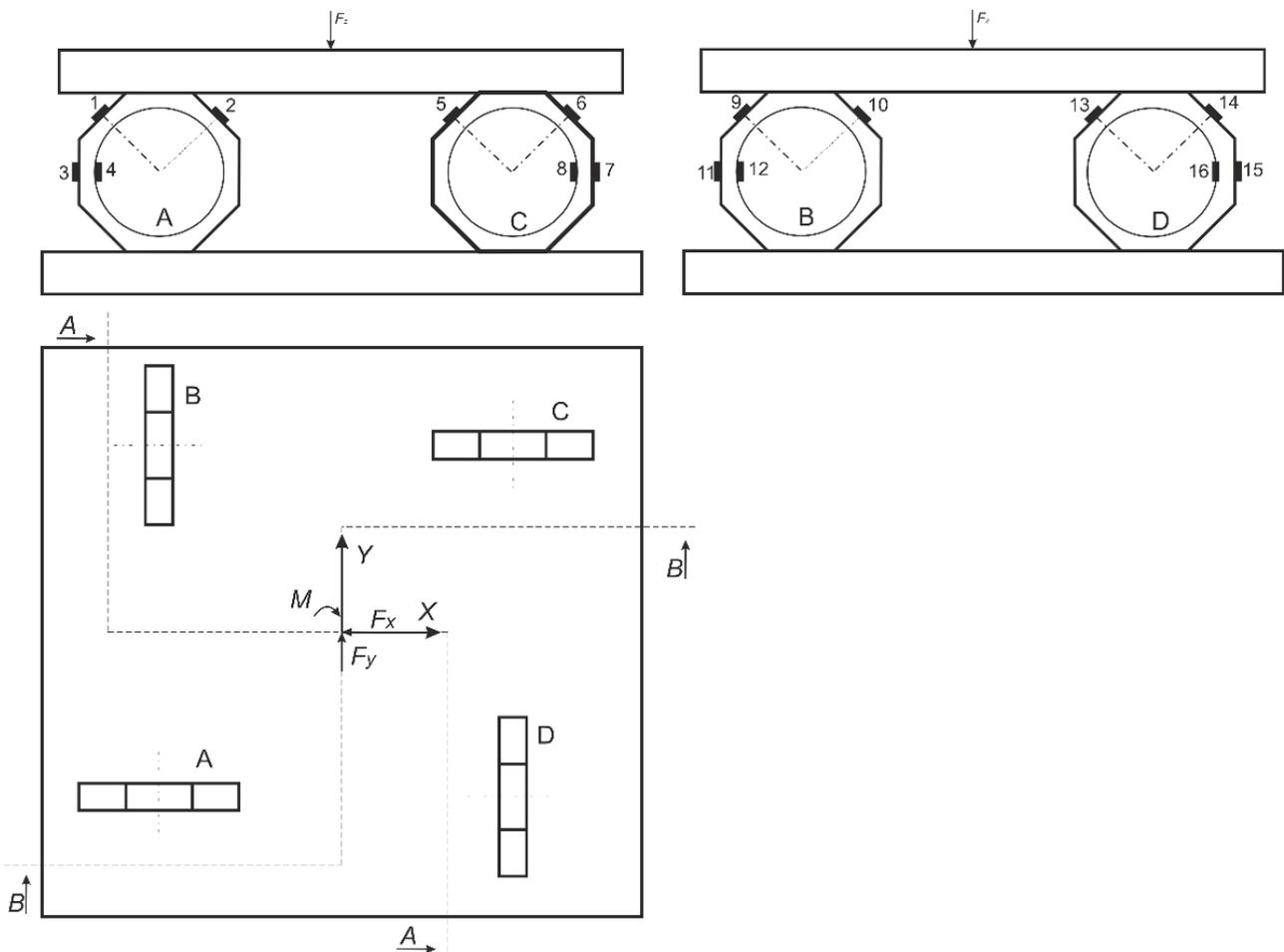


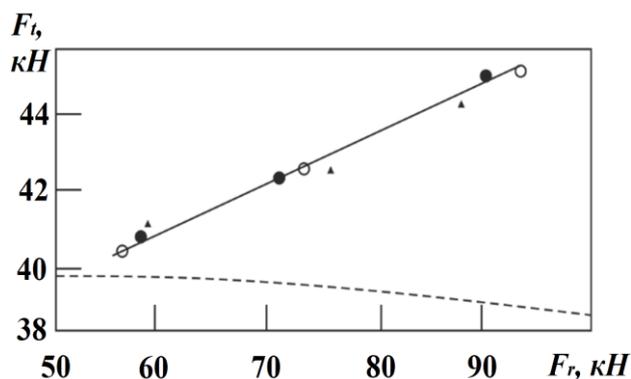
Рис. 3. Размещение колец на силоизмерительном столе  
Fig. 3. Ring locations on the force-measuring table

Технические характеристики силоизмерителя  
 Force meter specifications

Наименование	Обозначение	Величина
Тип кольца	–	Восьмигранник
Радиус кольца по средней линии, мм	$r$	30
Отношение толщины кольца к радиусу	$t/r$	0,40
Ширина кольца, мм	$b$	30
Модуль упругости, Па	$E$	$2,06 \cdot 10^{11}$
Радиальная сила, Н	$F_r$	8000
Тангенциальная сила, Н	$F_t$	3000
Деформации	–	–
–	$e_A$	$2,94 \cdot 10^{-4}$
–	$e_B$	$3,67 \cdot 10^{-4}$
–	$K_t$	21973 Н/мм
–	$K_r$	109866 Н/мм
Толщина кольца, мм	$t$	12

Перед использованием силоизмерителя рекомендуется провести его линейную тарировку [16–20]. После чего он может использоваться в течение длительного времени при разных температурах и влажности. При этом производится нагружение тарировочных колец от 0 до 2 кН.

Первоначально для калибрования нагрузки  $F_x$  по оси  $x$  калибровочное кольцо располагается между вертикальной направляющей станины и прикрепленной к ней зажимами прибора. Затем станина движется в поперечном оси кольца направлении, и показания считываются последовательно шаг за шагом, а именно – сигналы от силовых воздействий считываются по оси  $x$  от действия силы  $F_x$ , затем по оси  $y$  от действия силы  $F_y$  и по оси  $z$  от действия силы  $F_z$ . Эта информация постоянно отражается и фиксируется в базе данных. Затем ось направления действия силы  $F_y$  разворачивают параллельно оси от направления действия силы  $F_x$ , поворачивая динамометр. Аналогичным образом проводят тарировку по оси  $x$  от действия силы  $F_x$ . Далее для тарировки по оси  $z$  от действия силы  $F_z$  калибровочное кольцо располагают между корпусом станка и зажимами, и кольцо начинает деформироваться до того момента, пока не начнется считывание сигнала. Общая оценка алгебраически суммируется по трем осям и записывается. Величины приложенных нагрузок и полученные оценочные результаты показаны графически на рис. 4.



**Рис. 4. Отклонение между касательным и радиальным направлениями сил: o – октаэдральное кольцо; • – эксперимент; ▲ – круглое кольцо**  
**Fig. 4. Deviation between the tangent and radial directions of forces: o – octahedral ring; • – experiment; ▲ – circle ring**

После построения и анализа тарировочных графиков можно убедиться, что погрешность измерений настолько незначительна, что ею можно пренебречь и утверждать, что динамометр имеет весьма высокую точность измерений. Так как направления действия  $F_x$  и  $F_y$  симметричны, то полученные результаты можно считать достоверными. Для повышения точности измерений необходимо, чтобы в течение всего процесса тарировки нагрузка прикладывалась к определенной точке силоизмерителя в процессе измерения. Иначе говоря, для тарировки по осям  $x$  и  $y$  точка приложения нагрузки к деформированному кольцу должна быть удалена на такое же расстояние, что и высота между станиной и срезаемой поверхностью детали. Однако при повторном измерении полученные результаты могут быть не абсолютно эквивалентны, и может произойти незначительное отклонение при тарировке.

Предлагаемая схема размещения датчиков позволяет измерять вертикальную и горизонтальные составляющие усилий, возникающих в элементе конструкции, а также показывает отклонения в процессе измерений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемые октаэдральные датчики напряжения, используемые в процессе замеров, позволяют повысить точность определения напряженного деформированного состояния большемерных элементов конструкций.

Способ размещения датчиков на исследуемых поверхностях позволяет с высокой степенью точности оценить изменение большемерных элементов конструкций машин.

Динамометр предлагаемой конструкции можно считать универсальным прибором, он

может использоваться для измерения статических и динамических нагрузок при работе машин и механизмов. Предназначен он для точного измерения колебания нагрузок, а также может применяться в адаптивном контроле и управлении с применением соответствующих цифровых средств.

#### Список источников

1. Беззубов А.А., Шорин В.А. Остаточные напряжения в элементах конструкций и их влияние на прочность // Инновации технических решений в машиностроении и транспорте: сб. статей VII Всероссийской науч.-техн. конф. для молодых ученых и студентов с международным участием (г. Пенза, 16–17 марта 2021 г.). Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2021. С. 33–37.
2. Климов С.О., Аносов А.П., Восковщук Н.И., Бессонова В.О. Экспериментальное определение крутящего момента, действующего на корпус судна // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2021. № 62-63. С. 100–105.
3. Баутин А.А. Мониторинг элементов авиационных конструкций по данным тензометрии // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 1-1. С. 57–63. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-1-1-57-63>.
4. Локтионов А.П. Об измерении навесными датчиками поперечных сил и изгибающих моментов на звеньях машин и приборов // Методы и приборы для измерения и воспроизведения силы момента в приборостроении: тез. докл. к областному семинару (г. Пенза, 22–23 октября 1981 г.). Пенза: Пензенский Дом научно-технической пропаганды, 1981. С. 18–19.
5. Неумоин М.И., Столяров А.С. Разработка установки для измерения силовых параметров в затягиваемом резьбовом соединении // Неделя науки Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2019. Т. 1. № 1. С. 136.
6. Batra A., Shankar K., Swarnamani S. Propulsion shaft alignment measurements on warships afloat and alignment solution using multiobjective optimization // Journal of Marine Engineering & Technology. 2007. Vol. 6. Iss. 1. P. 39–49. <https://doi.org/10.1080/20464177.2007.11020200>.
7. Шубарев В., Мельников В., Иванов Н., Калинин В., Силаков Д., Лукьянов В. [и др.]. Математическое моделирование процесса сборки силоизмерительной шайбы // Электроника: наука, технология, бизнес. 2013. № 5. С. 32–39.
8. Лаврушин М.Ю. Датчик для измерения ударных контактных сил // Инженерно-физические проблемы новой техники: сб. матер. XIV Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, посвящ. 85-летию со дня рождения заслуженного работника ВШ РФ, доктора физико-математических наук, профессора М.И. Киселёва (г. Москва, 17–19 марта 2020 г.). М.: ООО «Диона», 2020. С. 51–55.
9. Голованов В.К., Елхов В.В. Конструкция бескорпусного датчика силы // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2014. № 8. С. 18–20.
10. Micheletti G.F., Koenig W., Victor H.R. In-process tool wear sensors for cutting operations // CIRP Annals. 1976. Vol. 25. P. 483–496.
11. Shaw M.C. Metal Cutting Principles. Oxford: Clarendon Press, 1996. 594 p.
12. Болсуновский С., Вермель В., Губанов Г. Применение специальных гасителей вибраций при чистовом фрезеровании тонкостенных деталей // САПР и графика. 2014. № 8. С. 110–112.
13. Проценко И.Г., Брусенцов Ю.А. Определение механических деформаций и напряжений полупроводниковыми тензочувствительными элементами // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2014. № 1. С. 272–280.
14. Tanimura M., Uryû N. Influence of the field strength and direction on the magnetic phases of an antiferromagnet with uniaxial anisotropy // Journal of the Physical Society of Japan. 1980. Vol. 49. Iss. 6. P. 2152–2158.
15. Михеев Р.Е., Зуева Е.С., Котряхова Е.А. Мост Уитстона и его применение на железной дороге // Актуальные проблемы математики, механики, естествознания и образования: сб. ст. Всерос. науч.-практ. конф., посвящ. 100-летию профессора А.А. Шестакова (г. Москва, 23–24 апреля 2020 г.). М.: Российский университет транспорта, 2021. С. 102–105.
16. Максимов Н.М., Корнякова О.Ю., Головань И.Н. О методах повышения динамической точности многомассовых электромеханических систем с учетом упругих податливостей // Актуальные научные исследования в современном мире. 2021. № 10-10. С. 57–60.
17. Калмыкова А.В., Дхар П., Узинцев О.Е. Тарировка электротензомера // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2012. № 2. С. 5–15.
18. Savage P.G. Strapdown system performance analysis // RTO Lecture Series 232, Advances in Navigation Sensors and Integration Technology. St. Petersburg, 2004. P. 4-1–4-33.

19. Zhang Hongliang, Wu Yuanxin, Wu Wenqi, Wu Meiping, Hu Xiaoping. Improved multi-position calibration for inertial measurement units // *Measurement Science and Technology*. 2009. Vol. 21. Iss. 1. P. 015107. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/21/1/015107>.
20. Wu Qiuping, Wu Ruonan, Han Feng Tian, Zhang Rong. A three-stage accelerometer self-calibration technique for space-stable inertial navigation systems // *Sensors*. 2018. Vol. 18. Iss. 9. P. 2888. <https://doi.org/10.3390/s18092888>.

### References

1. Bezzubov A.A., Shorin V.A. Structural element residual stresses and their influence on strength. In: *Innovacii tekhnicheskikh reshenij v mashinostroenii i transporte: sbornik statej VII Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii dlya molodyh uchenyh i studentov s mezhdunarodnym uchastiem = Innovative engineering solutions in mechanical engineering and transport: Collected articles of the 7<sup>th</sup> All-Russian scientific and technical conference for young scientists and students with international participation*. 16–17 March 2021, Penza. Penza: Penza State Agrarian University; 2021, p. 33-37. (In Russ.).
2. Klimov S.O., Anosov A.P., Voskovshchuk N.I., Bessonova V.O. Experimental determination of torque acting on a ship hull. *Nauchno-tekhnicheskij sbornik Rossijskogo morskogo registra sudohodstva = Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2021;62-63:100-105. (In Russ.).
3. Bautin A.A. Monitoring of the elements of aviation structures using strain-gauge measurement. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2019;85(1-1):57-63. (In Russ.). <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-1-1-57-63>.
4. Loktionov A.P. On measurement of transverse forces and bending moments on machine and device links by attached sensors. In: *Metody i pribory dlya izmereniya i vosпроизvedeniya sily momenta v priborostroenii: tezisy докладов k oblastnomu seminaru = Methods and devices for measuring and reproducing the moment force in tool engineering: report abstracts to the regional seminar*. 22–23 October 1981, Penza. Penza: Penzenskij Dom nauchno-tekhnicheskoy propagandy; 1981, p. 18-19. (In Russ.).
5. Neumoin M.I., Stolyarov A.S. Development of test stand for measurements of forces and torques in threaded joints. *Nedelya nauki Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnicheskogo universiteta*. 2019;1(1):136. (In Russ.).
6. Batra A., Shankar K., Swarnamani S. Propulsion shaft alignment measurements on warships afloat and alignment solution using multiobjective optimization. *Journal of Marine Engineering & Technology*. 2007;6(1):39-49. <https://doi.org/10.1080/20464177.2007.11020200>.
7. Shubarev V., Mel'nikov V., Ivanov N., Kalinin V., Silakov D., Luk'yanov V., et al. Mathematical modeling of force-measuring washer assembling process. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes = Electronics: Science, Technology, Business*. 2013;S:32-39. (In Russ.).
8. Lavrushin M.Yu. Sensor for shock contact force measurement. *Inzhenerno-fizicheskie problemy novoj tekhniki: sbornik materialov XIV Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchyonnoj 85-letiyu so dnya rozhdeniya zaslužennogo rabotnika VSh RF, doktora fiziko-matematicheskikh nauk, professora M.I. Kiselyova = Engineering and physical problems of new equipment: Collected materials of the 14<sup>th</sup> All-Russian scientific and technical conference with international participation, dedicated to the 85th birth anniversary of the Honored Worker of the Higher School of the Russian Federation, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor M.I. Kiselev*. 17–19 March 2020, Moscow. Moscow: OOO "Diona"; 2020, p. 51-55. (In Russ.).
9. Golovanov V.K., Elhov V.V. The design of the unpackaged force sensor. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2014;8:18-20. (In Russ.).
10. Micheletti G.F., Koenig W., Victor H.R. In-process tool wear sensors for cutting operations. *CIRP Annals*. 1976;25:483-496.
11. Shaw M.C. *Metal Cutting Principles*. Oxford: Clarendon Press; 1996, 594 p.
12. Bolsunovskij S., Vermel' V., Gubanov G. Using special vibration dampers in thin-walled part finishing milling. *SAPR i grafika*. 2014;8:110-112. (In Russ.).
13. Protsenko I.G., Brusentsov Yu.A. Measuring mechanical strains and stresses by semiconductor gage elements. *Vo-prosy sovremennoj nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo*. 2014;1:272-280. (In Russ.).
14. Tanimura M., Uryû N. Influence of the field strength and direction on the magnetic phases of an antiferromagnet with uniaxial anisotropy. *Journal of the Physical Society of Japan*. 1980;49(6):2152-2158.
15. Mikheev R.E., Zueva E.S., Kotryahova E.A. Wheatstone bridge and its application on the railway. *Aktual'nye problemy matematiki, mekhaniki, estestvoznaniya i obrazovaniya: sbornik statej Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj 100-letiyu professora A.A. Shestakova = Topical problems of mathematics, mechanics, natural sciences and education: collected articles of All-Russian scientific and practical conference dedicated to the 100th birth anniversary of the Professor A.A. Shestakov*. 23–24 April 2020, Moscow. Moscow: Russian University of Transport; 2021, p. 102-105. (In Russ.).
16. Maksimov N.M., Kornyakova O.Yu., Golovan I.N. Methods of increasing the dynamic accuracy of multi-mass electromechanical systems taking into account elastic compliance. *Aktual'nye nauchnye issledovaniya v sovremennom mire*. 2021;10-10:57-60. (In Russ.).

17. Kalmakova A., Dkhar P., Uzintsev O. Calibration of stress meter. *Vestnik Rossiiskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Inzhenernye issledovaniya = Rudn Journal of Engineering Research*. 2012;2:5-15.
18. Savage P.G. Strapdown system performance analysis. In: *RTO Lecture Series 232, Advances in Navigation Sensors and Integration Technology*. St. Petersburg; 2004, p. 4-1–4-33.
19. Zhang Hongliang, Wu Yuanxin, Wu Wenqi, Wu Meiping, Hu Xiaoping. Improved multi-position calibration for inertial measurement units. *Measurement Science and Technology*. 2009;21(1):015107. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/21/1/015107>.
20. Wu Qiuping, Wu Ruonan, Han Feng Tian, Zhang Rong. A three-stage accelerometer self-calibration technique for space-stable inertial navigation systems. *Sensors*. 2018;18(9):2888. <https://doi.org/10.3390/s18092888>.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

##### Жавыркин Вадим Витальевич,

аспирант,  
Российский университет транспорта,  
127994, г. Москва, ул. Образцова, 9/9, Россия  
[zhavyrkinv@mail.ru](mailto:zhavyrkinv@mail.ru)

##### Сладкова Любовь Александровна,

д.т.н., профессор,  
профессор кафедры «Наземные  
транспортно-технологические средства»,  
Российский университет транспорта,  
127994, г. Москва, ул. Образцова, 9/9, Россия  
✉ [rich.cat2012@yandex.ru](mailto:rich.cat2012@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 06.02.2023; одобрена после рецензирования 10.03.2023; принята к публикации 19.04.2023.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

##### Vadim V. Zhavyrkin,

Postgraduate Student,  
Russian University of Transport,  
9/9, Obraztsov St., Moscow 127994, Russia  
[zhavyrkinv@mail.ru](mailto:zhavyrkinv@mail.ru)

##### Liubov A. Sladkova,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Professor of the Department of Ground  
Transportation and Technological Vehicles,  
Russian University of Transport,  
9/9, Obraztsov St., Moscow 127994, Russia  
✉ [rich.cat2012@yandex.ru](mailto:rich.cat2012@yandex.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 06.02.2023; approved after reviewing 10.03.2023; accepted for publication 19.04.2023.

## МАШИНОСТРОЕНИЕ



Научная статья  
УДК 621.225.2:621.225.7:62-822  
<https://elibrary.ru/atzpvq>  
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-250-262>

## Новая разновидность аксиально-поршневых гидромашин с многорядными блоками и сдвоенным качающим узлом

А.И. Нижегородов<sup>1✉</sup>

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

**Резюме.** Цель – изучение возможности увеличения рабочего объема, мощности, удельной энергоемкости (энергоэффективности), приемистости и снижения пульсации подачи и крутящего момента вала гидромашин путем реализации принципа размещения последующих рядов цилиндров ее блоков в межцилиндровых зонах предыдущих. В исследованиях применялись методы исследований: геометрический, кинематический, силовой и энергетический анализ работы четырехрядной аксиально-поршневой гидромашин с бесторцевой распределительной системой и сдвоенным качающим узлом. По результатам проведенных исследований была создана новая разновидность компактных роторных гидромашин объемного действия. В предлагаемой модели каждый последующий ряд цилиндров расположен в межцилиндровых зонах предыдущих, выполненных по меньшим радиусам. Показано, что в такой конструкции достигается значительное увеличение рабочего объема и мощности гидромашин – в 24,5 раза по сравнению с однорядной, а также повышение приемистости машины в режиме гидромотора. Показано, что устранение торцевых распределительных систем исключает нарушение герметичности стыков между блоками и распределительными дисками из-за «опрокидывания» блока центробежными силами поршней при больших скоростях вращения и кратное снижение пульсации подачи и крутящего момента. Установлено, что увеличение удельной энергоемкости гидромашин зависит от конкретного конструктивного исполнения и может составлять 18–25 кВт/кг. Особенностью конструкции предложенной аксиально-поршневой гидромашин со сдвоенными качающими узлами является отсутствие торцевых распределительных систем и размещение последующих рядов цилиндров блоков в межцилиндровых зонах предыдущих рядов. Эти особенности обеспечивают компактность качающих узлов, минимальные размеры блоков цилиндров и гидромашин в целом, а, следовательно, минимальную массу и максимальную удельную энергоемкость.

**Ключевые слова:** многорядная аксиально-поршневая гидромашин, сдвоенный качающий узел, рабочий объем, крутящий момент, мощность, высокомоментный гидромотор

**Для цитирования:** Нижегородов А.И. Новая разновидность аксиально-поршневых гидромашин с многорядными блоками и сдвоенным качающим узлом // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 2. С. 250–262. EDN: ATZPVQ, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-250-262>.

## MECHANICAL ENGINEERING

Original article

## A new variety of axial piston hydraulic machines with multi-row units and a dual oscillating unit

Anatoly I. Nizhegorodov<sup>1✉</sup>

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

**Abstract.** The possibility of increasing the working volume, power, specific energy capacity (energy efficiency), and acceleration response of hydraulic machines under reduced supply and torque pulsation is investigated. The research methodology included the geometric, kinematic, power, and energy analysis of a four-row axial piston hydraulic machine with a dual oscillating unit and without an end distribution system. As a result, a new type of compact rotary hydraulic

machines with volumetric action was created. In the proposed model, each subsequent row of cylinders is located in the inter-cylinder space of the previous cylinders with smaller radii. Such a design provides for a 24.5-fold increase in the working capacity and power of a hydraulic machine compared to a single-row design, as well as an increase in the acceleration response in the hydraulic motor mode. The elimination of end distribution systems excludes the possibility of violation of joint tightness between blocks and distribution disks due to block overturning by piston centrifugal forces at high rotation speeds and a multiple reduction of supply and torque pulsation. It was established that the increase in the specific power capacity of a hydraulic machine depends on its particular implementation, potentially reaching 18–25 kW/kg. The abovementioned features of the proposed axial piston hydraulic machine with a dual oscillating unit ensure the compactness of oscillating units, minimum dimensions of the cylinder blocks, and the hydraulic machine as a whole, resulting in its minimum mass and maximum specific power capacity.

**Keywords:** multi-row axial piston hydraulic machine, double pumping unit, displacement, torque, power, high-torque hydraulic motor

**For citation:** Nizhegorodov A.I. A new variety of axial piston hydraulic machines with multi-row units and a dual oscillating unit. *iPolytech Journal*. 2023;27(2):250-262. (In Russ.). EDN: ATZPVQ, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-250-262>.

## ВВЕДЕНИЕ

Большое количество конструкторских решений в области роторных гидромашин [1] нашло свое применение на практике в разнообразных гидросистемах [2], начиная с середины прошлого столетия, и, тем не менее, исследования в этой области, хотя и не очень активно, продолжают за рубежом и в нашей стране [3, 4].

Многорядные радиально-поршневые роторные гидромашин, входящие в гидросистемы горных, строительных машин, металлообрабатывающих станков, различного технологического оборудования и т.п., имеющие 5...8 и более качающих узлов с различными системами управления, хорошо известны и применяются весьма широко. В таких машинах в общем роторе, но в разных его сечениях располагается несколько комплектов поршней [5], что значительно увеличивает их рабочий объем<sup>2</sup> [6] и мощность при относительно небольших габаритах<sup>3</sup> [7]. Чаще всего они используются в качестве высокомоментных гидромоторов [8, 9].

Двухрядные аксиально-поршневые роторные насосы и гидромоторы с двумя и более рядами рабочих камер в едином блоке цилиндров тоже известны [10], но они практически не нашли применения в гидравлических приводах, несмотря на то, что такие конструкции весьма перспективны.

В данной работе рассматривается аксиально-поршневая гидромашин с многоряд-

ным сдвоенным качающим узлом, способная работать как насосом, так и гидромотором, в частности – высокомоментным, и иметь как регулируемое, так и нерегулируемое исполнение.

## УСТРОЙСТВО ПРОТОТИПА – ГИДРОМАШИНЫ С ДВУХРЯДНЫМ КАЧАЮЩИМ УЗЛОМ

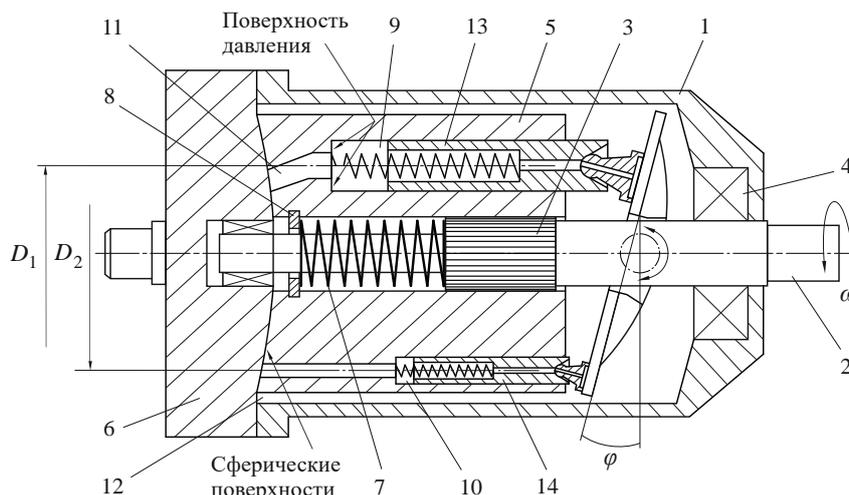
Аксиально-поршневая гидромашин с двухрядным качающим узлом [11], схематично показанная на рис. 1, является прототипом новой разработки. Она содержит корпус 1, приводной вал 2 со шлицами 3, установленный в подшипниках 4. Блок цилиндров 5 соединен с валом через шлицевое соединение с зазором и своим сферическим торцом прижат к поверхности распределительной шайбы 6 пружиной 7 через кольцевой упор 8.

В блоке цилиндров выполнены основные цилиндры первого ряда 9 с осями по диаметру  $D_1$  и дополнительные цилиндры второго ряда 10 с осями по диаметру  $D_2$ .

В блоке просверлены отводящие каналы 11 и 12 для подвода и отвода рабочей жидкости к распределительной шайбе, в которой, кроме основных (для первого ряда цилиндров), есть и дополнительные (для второго ряда цилиндров) серповидные окна. Через эти окна и соответствующие штуцеры гидромашин в процессе работы присоединяется к напорной и всасывающей (сливной) линиям гидросистемы.

<sup>2</sup>Андреев А.Ф., Барташевич Л.В., Богдан Н.В. Гидропневмоавтоматика и гидропривод мобильных машин. Объемные гидро- и пневмомашин и передачи: учеб. пособ. Минск: Высш. шк., 1987. 310 с.

<sup>3</sup>Свешников В.К. Станочные гидроприводы: справочник. М.: Машиностроение, 1995. 448 с.



**Рис. 1.** Схема аксиально-поршневой гидромашин с двухрядным качающим узлом  
**Fig. 1.** Diagram of an axial piston hydraulic machine with a double-row pumping unit

В корпусе гидромашин размещен наклонный диск, который в нерегулируемом варианте гидромашин является неподвижным, а в регулируемом – поворотным, способным изменять угол наклона  $\varphi$ .

Все поршни соединены со сферическими головками гидростатических подпятников, опирающихся на наклонный диск. Это типовое техническое решение позволяет снижать осевое усилие со стороны поршня и трение подпятника о наклонный диск<sup>3</sup> [7].

При вращении блока с угловой скоростью  $\omega$  поршни совершают возвратно-поступательное движение. На первом полуобороте они, выдвигаясь из цилиндров, всасывают рабочую жидкость через отверстия 11 и 12 и серповидные окна. На втором полуобороте – вытесняют ее в линию нагнетания через каналы и серповидные окна распределительной шайбы, рис. 3.

При увеличении наружного диаметра блока гидромашин всего на 10% в межцилиндровых зонах цилиндров первого ряда становится возможным просверлить соосно оси блока дополнительные цилиндры второго ряда, хотя и меньшего диаметра, и получить двухрядную аксиально-поршневую гидромашину.

Ход поршней второго ряда, определяемый по формуле:

$$h_2 = D_2 \operatorname{tg} \varphi$$

больше хода  $h_1$  основных поршней первого ряда, определяемого по той же формуле:

$$h_1 = D_1 \operatorname{tg} \varphi.$$

При увеличенном на 10% наружном диаметре блока диаметр  $D_2$  равен:

$$D_2 = 1,32 D_1,$$

поэтому и отношение ходов второго и первого рядов поршней  $h_2 / h_1$  будет равно отношению диаметров – 1,32.

Рабочий объем гидромашин, определяемый по формуле<sup>2</sup> [6], м<sup>3</sup>:

$$V_0 = f z h,$$

где  $f$  – площадь поршня, м<sup>2</sup>,  $z$  – число поршней, будет определяться суммой:

$$V_0 = V_1 + V_2,$$

которую можно представить в виде:

$$V_0 = f_1 h_1 z + 0,25 \cdot f_1 \cdot 1,32 \cdot h_1 z,$$

а после преобразований определить рабочий объем двухрядной гидромашин:

$$V_0 = f_1 z (1 + 0,25 \cdot 1,32) = 1,33 V_1,$$

который увеличивается на 33%.

Таким образом, принцип размещения в межцилиндровых зонах основных цилиндров первого ряда дополнительных цилиндров второго ряда приводит к существенному увеличению рабочего объема аксиально-поршневой гидромашины.

Увеличение рабочих камер за счет большего числа цилиндров снижает пульсацию подачи насоса или угловой скорости гидромотора.

Кроме того, возрастает приемистость гидромоторов такого типа.

Коэффициент, характеризующий приемистость, определяется по формуле [12]:

$$k = M / \sqrt{J} = M / \sqrt{\frac{1}{2}mR^2},$$

где  $M$  – крутящий момент на валу гидродвигателя, пропорциональный рабочему объему, Н·м;  $J$  – момент инерции блока цилиндров и всех вращающихся масс, кг·м<sup>2</sup>;  $m$  – масса блока с поршнями, кг;  $R$  – внешний радиус блока, м.

Чтобы оценить изменение приемистости двухрядного гидромотора, возьмем отношение коэффициентов для измененного  $k_2$  и исходного  $k_1$  блоков цилиндров:

$$k_2/k_1 = \frac{1,33M/(0,5m(1,1R)^2)^{\frac{1}{2}}}{M(0,5mR^2)^{\frac{1}{2}}},$$

$$F = m \omega^2 r,$$

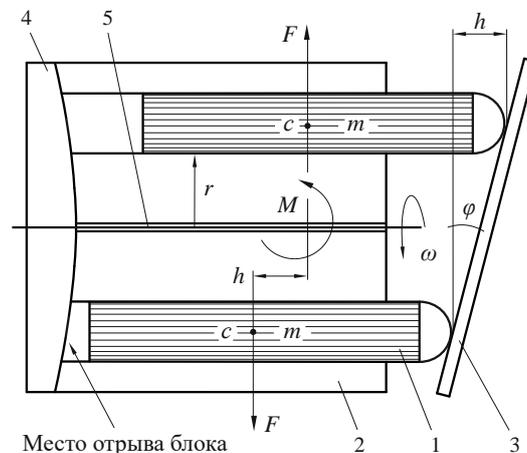


Рис. 2. Схема к определению потери устойчивости блока цилиндров: 1 – поршни, 2 – блок цилиндров, 3 – наклонный диск, 4 – распределительная шайба, 5 – приводной вал

Fig. 2. Diagram of cylinder block stability loss determination: 1 – pistons, 2 – cylinder block, 3 – swash plate, 4 – distribution washer, 5 – drive shaft

И после преобразований получим отношение:  $k_2 / k_1 = 1,21$  (1,33 – коэффициент увеличения рабочего объема, 1,1 – коэффициент увеличения наружного радиуса измененного блока цилиндров).

Как видим, увеличение приемистости гидромотора составляет 21%.

Однако увеличение рядности блока цилиндров в аксиально-поршневых гидромашинах с торцевой распределительной системой имеет свои недостатки.

При работе аксиально-поршневой гидромашины на определенной скорости вращения  $\omega$  (рис. 2) может происходить отрыв блока цилиндров 2 от зеркала торцевой распределительной шайбы 4 из-за момента  $M$  центробежных сил  $F$  поршней, который стремится «опрокинуть» блок против часовой стрелки.

Блок теряет динамическую устойчивость, поворачивается в зазоре шлицевого соединения с валом 5 на очень малый угол, но герметичность системы нарушается, давление в напорной линии гидромашины снижается до нуля, и гидропривод становится неуправляемым.

Точки  $c$  на рис. 2 обозначают центры тяжести поршней,  $m$  – их массы,  $h$  – ход поршней,  $r$  – радиус по осям поршней.

Силу инерции найдем из формулы:

тогда момент пары сил  $F$ , действующих в плоскости рис. 2, определится произведением:

$$M = m \omega^2 r h.$$

Момент  $M$  в плоскости рис. 2 максимален, так как верхний и нижний поршни находятся в противофазах, и определен для блока с четным числом цилиндров для упрощения расчета. Моменты от сил инерции других пар поршней будут меньше, так как плечи действия сил  $F$  для них становятся меньше, чем ход поршней  $h$ , и, кроме того, они уменьшаются при приведении их к плоскости рис. 2, в которой блок цилиндров «опрокидывается». Суммарный «опрокидывающий» момент от сил инерции поршней действует в вертикальной плоскости.

Схема и расчет, иллюстрирующие потерю устойчивости блока, являются приближенными, но наглядно показывают один из недостатков, ограничивающий возможность создания многорядных гидромашин.

Устранить потерю динамической устойчивости блока цилиндров возможно, замкнув моменты сил инерции всех поршней на корпус блока цилиндров. Для этого придется отказаться от торцевой системы распределения потоков рабочей жидкости.

Ограничение по скорости вращения блока в новой гидромашине теперь обусловлено только гидравлическими сопротивлениями в ее проточных каналах.

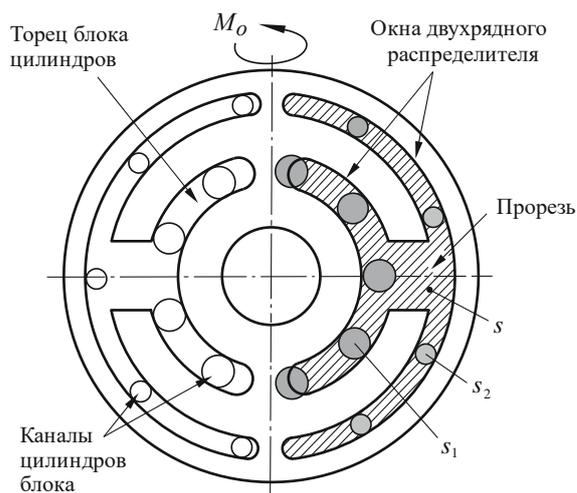
Со стороны поршней на пояски отводящих каналов 11 и 12 (см. на рис. 1 – площадь давления) действует давление, прижимающее блок цилиндров к распределительной шайбе. Однако давление со стороны шайбы через серповидные окна действует и на торец блока по значительно большей поверхности, площадь которой  $s$  показана заштрихованной на рис. 3 и равна разности:

$$s = S_{co} - s_{\Sigma 1} - s_{\Sigma 2},$$

где  $S_{co}$  – суммарная площадь серповидных окон и соединительной прорези на напорной стороне распределительной шайбы,  $m^2$ ;  $s_{\Sigma 1}$  –

сумма площадей отводящих каналов цилиндров первого ряда,  $m^2$ ;  $s_{\Sigma 2}$  – сумма площадей отводящих каналов дополнительных цилиндров второго ряда,  $m^2$ .

Очевидно, что по давлению блок цилиндров не уравновешен, и эта неуравновешенность тоже создает момент «опрокидывания» блока  $M_0$ , но уже в горизонтальной плоскости. Как и в первом случае, блок цилиндров может потерять устойчивость, незначительно повернувшись в пределах зазора шлицевого соединения с валом, что приведет к разгерметизации стыка блока с распределительной шайбой и отказу гидромашин.



**Рис. 3.** Схема, иллюстрирующая возникновение сил давления на торец блока со стороны распределительной шайбы в двухрядной гидромашине  
**Fig. 3.** Diagram illustrating the occurrence of pressure forces on the block end from the distribution washer in a two-row hydraulic machine

В новой конструкции гидромашин с многорядным сдвоенным качающим узлом и радиальной системой распределения эти недостатки устраняются, снимаются ограничения на угловую скорость вращения блока и рабочее давление.

### ГИДРОМАШИНА С МНОГОРЯДНЫМ СДВОЕННЫМ КАЧАЮЩИМ УЗЛОМ

Как и в рассмотренном выше прототипе, здесь выполняется принцип размещения последующих рядов цилиндров в межцилиндровых зонах предыдущих, выполненных по меньшим радиусам, рис. 4.

В каждом ряду расположено девять ци-

линдров с разными значениями диаметров. Первый ряд цилиндров с диаметрами  $d_1$  выполнен по радиусу  $r_1$ , второй ряд – с диаметрами  $d_2$  выполнен по радиусу  $r_2$  и т. д. При этом для радиусов выполняется неравенство:

$$r_4 > r_3 > r_2 > r_1.$$

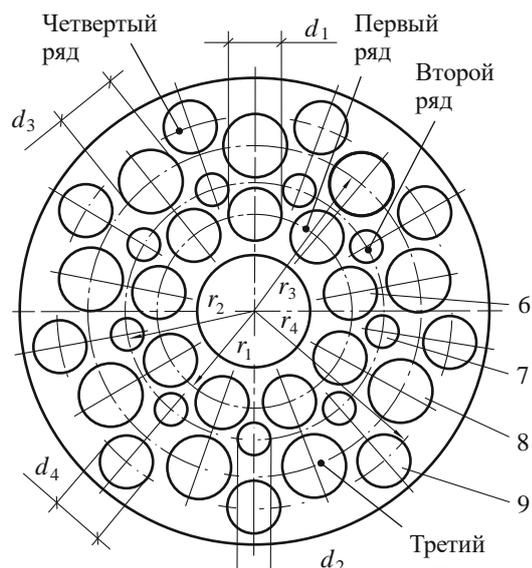
Для диаметров простой последовательности нет. Так, для первого и второго рядов:

$$d_2 < d_1,$$

для третьего, второго и первого рядов:

$$d_3 > d_1 > d_2.$$

Диаметры цилиндров четвертого ряда могут быть больше диаметров третьего ряда, однако в целях унификации деталей и упрощения конструкции гидромашины в целом целесообразно задать равные диаметры цилиндров первого и четвертого рядов:  $d_4 = d_1$ .



**Рис. 4. Вид на торец четырехрядного блока цилиндров аксиально-поршневой гидромашины**  
**Fig. 4. View of the end of a four-row cylinder block of an axial piston hydraulic machine**

Такое выполнение блока цилиндров позволяет осуществить наиболее компактное размещение поршней в общем блоке с двумя качающимися узлами, рис. 5.

Рассмотрим устройство и работу аксиально-поршневой гидромашины с четырехрядным сдвоенным качающимся узлом, схематично показанную на рис. 5.

Она содержит две наклонные шайбы 1 и 2, установленные под углом  $\varphi$  к вертикали зеркально относительно оси симметрии блока 3, посаженного на приводной вал 4 с натягом и зафиксированного шпонками 5. С обеих сторон блока выполнены цилиндры, образующие первый, второй, третий и четвертый ряды цилиндров 6, 7, 8 и 9, рис. 4, в которых размещены соответствующие поршни 10, 11, 12 и 13.

Башмаки 14, 15, 16 и 17 поршней блока завальцованы в их сферические шарниры. Через башмаки поршни обоих комплектов опираются на свои наклонные шайбы.

В центральной части блока цилиндров в плоскости его симметрии выполнены чередующиеся радиальные каналы 18 и 19 (рис. 6), соединяющие цилиндры первого и третьего ряда и цилиндры второго и четвертого ряда с каждой стороны блока с концентрическим пространством распределительной втулки 20. Втулка плотно охватывает поверхность блока, закреплена в корпусе 21 и имеет перемычки 22, отделяющие напорную 23 и сливную 24 полости концентрического пространства. Штуцеры 25 и 26 служат для подключения гидромашины к гидросистеме.

В перемычках 22 имеются дросселирующие каналы для устранения компрессии рабочей жидкости в моменты перехода через них каналов 18 и 19; при этом выполняется равенство  $n = 1,1 D$  (рис. 6).

Втулка совместно с блоком образуют систему распределения потоков рабочей жидкости взамен торцевой системы распределения, недостатки которой рассмотрены выше и устранены в новой гидромашине.

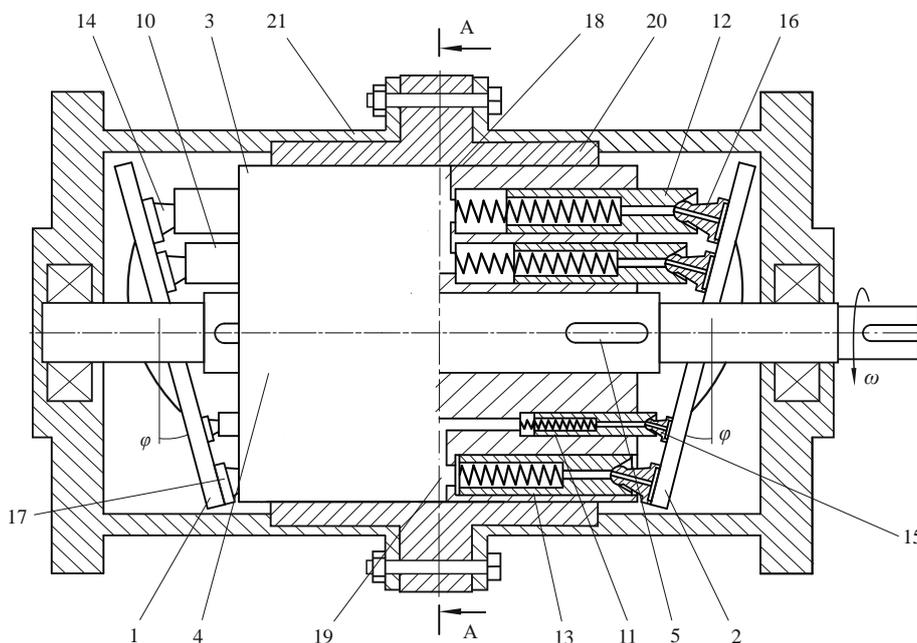
Радиусы осей цилиндров первого  $r_1$ , второго  $r_2$ , третьего  $r_3$  и четвертого  $r_4$  рядов с каждой из сторон блока минимальны, но таковы, что толщина стенки между соседними цилиндрами достаточна для обеспечения прочности и жесткости стенок.

В режиме высокомоментного гидромотора гидромашинка работает следующим образом. При подводе рабочей жидкости из гидроси-

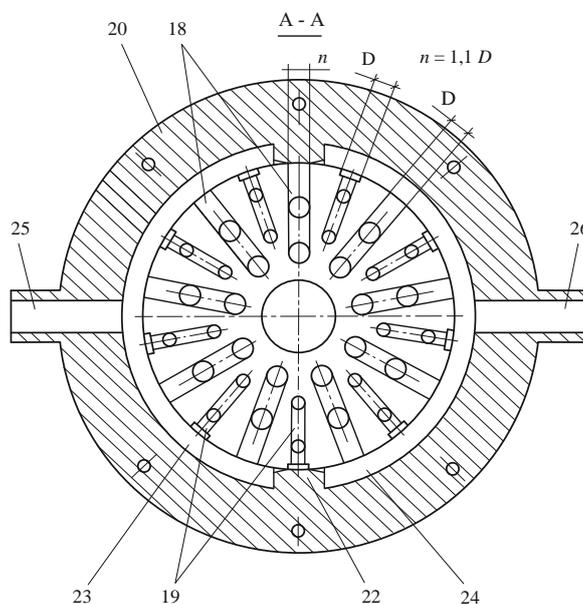
стемы через штуцер 25 и радиальные каналы 18 и 19 в напорную полость 23 распределительной втулки 20, поршни всех четырех рядов с обеих сторон блока 3, находящиеся в разных фазовых положениях, отталкиваясь от наклонных шайб 1 и 2, выдвигаются из своих цилиндров, заставляя вращаться блок и приводной вал 4 против часовой стрелки, если смотреть с торца выступающей части вала 4. При этом на приводном валу созда-

ется высокий крутящий момент  $M_{кр}$ , пропорциональный рабочему объему гидромашин.

После прохождения соответствующих каналов 18 и 19 через верхнюю перемычку 22 распределительной втулки, поршни всех рядов с каждой стороны блока отталкиваются от наклонных шайб 1 и 2, задвигаются в свои цилиндры и через соответствующие каналы 18 и 19 вытесняют рабочую жидкость через штуцер 26 в гидросистему на слив.



**Рис. 5.** Аксиально-поршневая гидромашина с четырехрядным сдвоенным качающим узлом  
**Fig. 5.** Axial piston hydraulic machine with a four-row double pumping unit



**Рис. 6.** Сечение блока по плоскости симметрии  
**Fig. 6.** Block section along the symmetry plane

Чередование циклов движения поршней обеспечивает непрерывное вращение блока и приводного вала 3 с угловой скоростью  $\omega$ , создавая на приводном валу высокую механическую мощность:

$$N = \omega M_{кр.}$$

В многорядных гидромашинах такого типа угловая скорость вращения  $\omega$  блока цилиндров может ограничиваться только большими значениями коэффициентов местных сопротивлений, что может сказаться на снижении гидравлического КПД. Но если количество проточных каналов уменьшить нельзя, то, чтобы снизить гидравлические потери, можно повлиять на их «живое сечение», увеличив диаметры радиальных каналов в блоке цилиндров и размеры концентрического пространства в распределительной муфте.

Определим рабочий объем новой аксиально-поршневой четырехрядной гидромашины со сдвоенным качающим узлом.

В соответствии с рис. 4 и 5, ходы поршней первого, второго, третьего и четвертого рядов будут равны:

$$h_1 = 2r_1 \operatorname{tg} \varphi = D_1 \operatorname{tg} \varphi;$$

$$h_2 = 2r_2 \operatorname{tg} \varphi = D_2 \operatorname{tg} \varphi;$$

$$h_3 = 2r_3 \operatorname{tg} \varphi = D_3 \operatorname{tg} \varphi;$$

$$h_4 = 2r_4 \operatorname{tg} \varphi = D_4 \operatorname{tg} \varphi,$$

где  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  и  $D_4$  – диаметры по осям цилиндров блока первого, второго, третьего и четвертого рядов.

Вытесняемые теоретические объемы рабочей жидкости (без учета утечек) поршнями первого, второго, третьего и четвертого рядов за один оборот блока цилиндров, соответственно, равны:

$$v_1 = 0,25\pi d_1^2 h_1 z = 0,25\pi d_1^2 D_1 \operatorname{tg} \varphi z;$$

$$v_2 = 0,25\pi d_2^2 h_2 z = 0,25\pi d_2^2 D_2 \operatorname{tg} \varphi z;$$

$$v_3 = 0,25\pi d_3^2 h_3 z = 0,25\pi d_3^2 D_3 \operatorname{tg} \varphi z;$$

$$v_4 = 0,25\pi d_4^2 h_4 z = 0,25\pi d_4^2 D_4 \operatorname{tg} \varphi z,$$

где  $z$  – количество цилиндров (поршней) в каждом ряду, равное для данной конструкции гидромашины, составило 9 шт.

Сумма объемов  $v_1$ ,  $v_2$ ,  $v_3$  и  $v_4$ , умноженная на два, делает рабочий объем аксиально-поршневой гидромашины с четырехрядным сдвоенным качающим узлом:

$$V_0 = 2 \cdot 0,25\pi \operatorname{tg} \varphi z (d_1^2 D_1 + d_2^2 D_2 + d_3^2 D_3 + d_4^2 D_4), \quad (1)$$

а при условии унификации части деталей и упрощения конструкции гидромашины в целом, когда  $D_1 = D_4$ , формула (1) рабочего объема примет вид:

$$V_0 = 2 \cdot 0,25\pi \operatorname{tg} \varphi z (2 d_1^2 D_1 + d_2^2 D_2 + d_3^2 D_3). \quad (2)$$

Исходя из соотношений диаметров осей цилиндров и диаметров самих цилиндров, взятых из рис. 4:

$$d_2/d_1 = 0,6; d_3/d_1 = 1,27; d_4/d_1 = 1,0;$$

$$D_2/D_1 = 1,32; D_3/D_1 = 1,7; D_4/D_1 = 2,02,$$

выразим в формуле (1) рабочий объем через  $d_1$  и  $D_1$ :

$$V_0 = 2 \cdot 0,25\pi \operatorname{tg} \varphi z (d_1^2 D_1 + 0,6 d_1^2 1,32 D_1 + 1,27 d_1^2 1,7 D_1 + 1,0 d_1^2 2,02 D_1).$$

При рабочем давлении  $\Delta P = 160$  кгс/см<sup>2</sup> (15696000 Па) и частоте вращения вала 1800 об/мин (188,4 рад/с), если задать значения  $d_1 = 0,025$  м и  $D_1 = 0,069$  м как в прототипе [13], то можно рассчитать теоретические численные значения рабочего объема (см<sup>3</sup>), расхо-

да ( $\text{м}^3/\text{с}$ ), крутящего момента ( $\text{Н}\cdot\text{м}$ ) и мощности на валу без учета потерь ( $\text{Вт}$ ):

$$V_0 = 1695,5 \text{ см}^3 = 1695,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3;$$

$$Q_T = 1695,5 \cdot 10^{-6} \cdot 1800 = 3,053 \text{ м}^3/\text{мин} \\ = 0,051 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$M_T = \Delta P V_0 / 2\pi = 160 \cdot 1695,5 / 6,28 = \\ 43197 \text{ кгс}\cdot\text{см} = 4237,7 \text{ Нм};$$

$$N_T = M_T \omega = 4237,7 \cdot 188,4 = 798382 \text{ Вт} \\ = 798,4 \text{ кВт}.$$

У однорядной гидромашин с двумя качающимися узлами с рабочим объемом  $v_1$ , равным объему вытесняемой рабочей жидкости поршнями первого ряда рассматриваемой гидромашин, равен:

$$v_1 = 2 \cdot 0,25\pi d_1^2 D_1 \text{ tg } \varphi z = \\ 2 \cdot 0,25 \cdot 3,14 \cdot 2,5^2 \cdot 6,9 = 67,7 \text{ см}^3.$$

Соотнесем рабочие объемы четырехрядной гидромашин с однорядной и получим, что он увеличился в 24,5 раза. При том же рабочем давлении и частоте вращения в 24,5 раза возрастают и крутящий момент на валу, и расход рабочей жидкости, и мощность. Возрастает и масса гидромашин, и в зависимости от конкретного конструктивного исполнения удельная энергоёмкость (энергоэффективность) может составить 18–25 кВт/кг.

Если у однорядной гидромашин наружный диаметр блока цилиндров составляет 110 мм [13], то у четырехрядной, с теми размерами диаметров цилиндров и диаметров по их осям, которые приведены выше, он будет равен примерно 220 мм, то есть в два раза больше.

Приведенные расчеты являются ориентировочными, т.к. не учитывают прочностной расчет элементов, который может внести коррективы в размеры конструкции. Так, если теоретический момент четырехрядной гидромашин равен 4237,7 Нм, то теоретический момент однорядной –  $4237,7 / 24,5 = 173$  Нм.

Исходя из условия прочности приводных валов, можно найти соотношение их диаметров:

$$\frac{d_{4p}}{d_{1p}} = \sqrt[3]{\frac{4238}{173}} = 2,9,$$

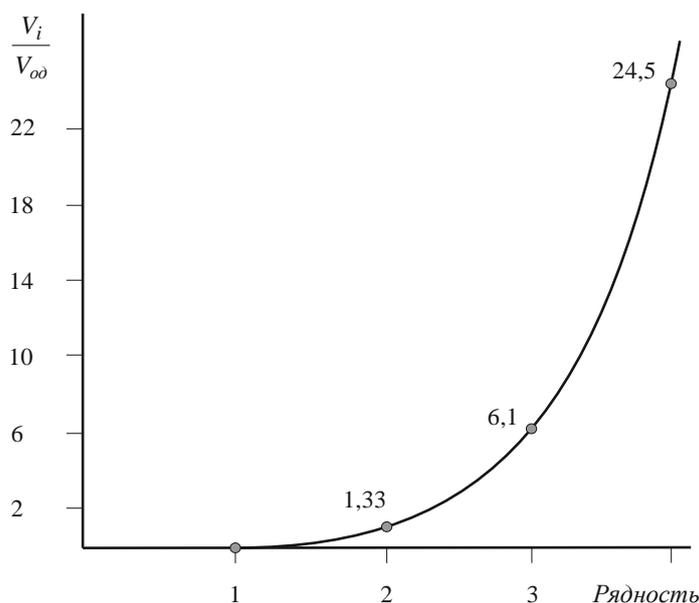
где  $d_{4p}$  и  $d_{1p}$  – диаметры ведущих валов четырехрядной и однорядной гидромашин, м, соответственно.

То есть увеличение крутящего момента в 24,5 раза приводит к увеличению диаметра вала четырехрядной гидромашин всего в 2,9 раза, а это скажется на размерах блока цилиндров и других элементов.

Тенденцию повышения рабочего объема многорядных гидромашин можно проследить по графику, показанному на рис. 7. Здесь приведена зависимость относительно рабочего объема, равного  $V_i/V_{од}$ , от рядности гидромашин, которая представляет собой степенную функцию. Так, в гидромашине с двухрядным блоком цилиндров рабочий объем повышается на 33%. Если увеличить рядность до трех, то рабочий объем относительно однорядной гидромашин возрастет примерно в шесть раз. А у машин с четырьмя рядами цилиндров он увеличится в 24,5 раза.

Если соотнести объемы блоков четырехрядной и однорядной гидромашин ( $220^2 / 110^2$ ), то их отношение будет примерно равно четырем, тогда как рабочий объем и мощность возрастают в 24,5 раза. Очевидно, что при таком значительном увеличении мощности, и не столь значительном увеличении габаритов, а, следовательно, массы, существенно повысится и другой важнейший показатель качества роторных гидромашин – удельная энергоёмкость, кВт/кг (энергоэффективность).

Безусловно, эти цифры можно рассматривать лишь как ориентировочные, так как они зависят от принятых диаметров цилиндров и диаметров по осям цилиндров. При отходе от схемы гидромашин, показанной на рис. 4, 5 и 6, к разработке сборочных чертежей неизбежно возникнет потребность в уточнении основных конструктивных размеров, но это уже вопросы проектирования.



**Рис. 7. Зависимость относительного рабочего объема многорядной гидромашины от рядности ее блока цилиндров:  $V_i$  – рабочий объем  $i$ -рядной гидромашины,  $V_{од}$  – рабочий объем однорядной гидромашины**  
**Fig. 7. Dependence of the relative displacement of a multi-row hydraulic machine on the number of rows of its cylinder block:  $V_i$  – displacement of the  $i$ -row hydraulic machine,  $V_{од}$  – displacement of a single-row hydraulic machine**

Полученные же результаты дают убедительный ответ на вопрос о целесообразности создания подобных видов аксиально-поршневых гидромашин.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Аксиально-поршневые насосы и гидромоторы – это самые современные и наиболее универсальные из всех роторных гидромашин. По этой причине они обладают широкими техническими возможностями и перспективами широкого применения в самых разнообразных типах гидросистем, в том числе режимами работы с автоматическим управлением, о чем свидетельствуют многочисленные публикации исследователей, работающих в этой области [14–18]. И потому последние разработки автора данной статьи, посвященные двухрядным аксиально-поршневым гидромашинам со сдвоенными качающими узлами [19, 20], являющимися предшественниками рассматриваемой здесь новой многорядной их модификации, считаются актуальными и обладают высоким внедренческим потенциалом.

В основу конструкции аксиально-поршневых гидромашин с двумя многорядными (сдвоенным) качающими узлами, вставленными с обеих сторон в общий блок

цилиндров, положен принцип размещения последующих рядов цилиндров в межцилиндровых зонах предыдущих, выполненных по меньшим радиусам. Этот принцип обеспечивает компактность качающих узлов, минимальные размеры блока цилиндров и гидромашин в целом и минимальную массу.

Особенность конструкции многорядных гидромашин со сдвоенным качающим узлом – отсутствие торцевых распределительных систем, в которых для герметичности стыка распределительных шайб с зеркалом торцов блоков необходимы шлицевое соединение блока с валом для возможности динамической самоустановки и прижатие блока пружинной. В таких системах при определенных скоростях вращения блока происходит нарушение герметичности из-за «опрокидывания» блока центробежными силами поршней со шлицевым зазором. К тому же приводит и повышенное давление в гидросистеме.

Эти ограничения в многорядной гидромашине со сдвоенным качающим узлом полностью устраняются и, например, угловая скорость блока ограничивается только уровнем гидравлических сопротивлений, который может быть снижен правильным подбором сечений проточных каналов в гидромашине.

В двухрядной гидромашине, рассмотрен-

ной в качестве прототипа, второй ряд поршней меньшего диаметра, чем в основном (первом) ряду в блоке цилиндров, увеличенном всего на 10% по диаметру, обеспечивает ей повышение рабочего объема, крутящего момента и мощности в 1,33 раза.

Увеличение рядности до трех, приводит к повышению рабочего объема в 6,1 раза, а если рядность увеличить до четырех, при том, что наружный диаметр блока возрастает всего в два раза, рабочий объем, крутящий момент и мощность увеличиваются в 24,5 раза.

Очевидно, что при таком значительном увеличении всех показателей гидромашин, и не столь выраженном увеличении габаритов и массы, существенно повысится и другой важнейший показатель качества роторных гидро-

машин – энергоэффективность. Для четырехрядной гидромашин она будет примерно в шесть раз меньше, чем у типовых однорядных аксиально-поршневых гидромашин.

Это примерные значения зависят от принятых диаметров цилиндров и диаметров по их осям. Однако они убедительно показывают целесообразность и перспективность создания аксиально-поршневых гидромашин такого типа.

Измененная конструкция многорядной гидромашин не только увеличивает рабочий объем, но также крутящий момент и мощность, повышает приемистость, снижая пульсацию расхода до исчезающе малой величины.

#### Список источников

1. Jasiński R. Research of hydrotronic variable-displacement radial piston pump with electro-pneumatic control // *Solid State Phenomena*. 2010. Vol. 164. Iss. 7. P. 37–40. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.164.37>.
2. Guo Tong, Zhao Shengdun, Han Xiaolan, Zhao Renfeng, Li Sheng. Research on the rotational inertia of radial piston pump and the optimization method of the pump parameters // 11th IEEE International Conference on Control & Automation. 2014. <https://doi.org/10.1109/ICCA.2014.6870955>.
3. Нижегородов А.И. Радиально-поршневой насос с фазовым регулированием и режимом знакопеременной подачи // *Вестник машиностроения*. 2014. № 11. С. 20–23.
4. Nizhegorodov A.I., Gavrilin A.N., Moyzes B.B., Cherkasov A.I., Zharkevich O.M., Zhetessova G.S., Savelyeva N.A. Radial-piston pump for drive of test machines // *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2018. Vol. 289. Iss. 1. P. 012014. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/289/1/012014>.
5. Zhao Shengdun, Guo Tong, Yu Yanghuiwen, Dong Peng, Liu Chen, Chen Wanqiang. Design and experimental studies of a novel double-row radial piston pump // *Journal of Mechanical Engineering Science*. 2015. Vol. 231. Iss. 10. P. 1884–1896. <https://doi.org/10.1177/0954406215623309>.
6. Зедгенизов В.Г., Мехнбол Д., Стрельников А.С. О возможности применения метода амплитудных характеристик для диагностирования аксиально-поршневых гидронасосов // *Эрденет-Прогресс (Монголия)*. 2009. № 1. С. 29–33.
7. Nizhegorodov A., Gavrilin A., Moyzes B., Ditenberg I., Zharkevich O., Zhetessova G., et al. Stand for dynamics tests of technical products in the mode of amplitude-frequency modulation with hydrostatic vibratory drive // *Vibroengineering*. 2016. Vol. 18. Iss. 6. P. 3734–3742. <https://doi.org/10.21595/jve.2016.16994>.
8. Dasgupta K. Analysis of a hydrostatic transmission system using low speed high torque motor // *Mechanism and Machine Theory*. 2000. Vol. 35. Iss. 10. P. 1481–1499. [https://doi.org/10.1016/S0094-114X\(00\)00005-7](https://doi.org/10.1016/S0094-114X(00)00005-7).
9. Hasan M.E., Dasgupta K., Ghoshal S. Comparison of the efficiency of the high speed low torque hydrostatic drives using bent axis motor: an experimental study // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2015. Vol. 231. Iss. 4. P. 1989–1996. <https://doi.org/10.1177/0954408915622413>.
10. Пат. № 804858, СССР, F 04 В 1/20. Аксиально-поршневая гидромашин / Б.Н. Бирюков, Ю.С. Алексеев; заявители: Уральский ордена трудового красного знамени политехнический институт им. С.М. Кирова, Свердловский завод «Пневмостроймашина». № 2562722. Заявл. 09.12.1977; опубл. 15.02.1981. Бюл. № 6.
11. Пат. № 190213, Российская Федерация, F04B 1/20. Аксиально-поршневая гидромашин / А.И. Нижегородов. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет». № 2019110768. Заявл. 11.04.2019; опубл. 24.06.2019. Бюл. № 18.
12. Кондаков Л.А., Никитин Г.А., Прокофьев В.Н. Машиностроительный гидропривод. М.: Машиностроение, 1978. 495 с.
13. Gavrilin A.N., Nizhegorodov A.I., Moyzes B.B., Kuvshinov K.A., Cherkasov A.S. Dual row rotary piston hydraulic machine with two pumping units // *Advances in Engineering Research*. 2019. Vol. 188. P. 248–252. <https://doi.org/10.2991/aviaent-19.2019.47>.

14. Кузьмин А.О., Попов В.В., Стажков С.М. Гидродинамические процессы в поршневой паре аксиально-поршневых гидромашин // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2017. № 4. С. 86–90. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2017-4-86-90>.
15. Кокошкин Н.Н., Новосёлов Б.В., Шорохов А.И. Оптимизация параметров автоколебательного режима механизмов управления гидравлическими регуляторами // Оборонная техника. 2005. № 2-3. С. 46–49.
16. Зайцев А.А. Об использовании аксиально-поршневого гидромотора с наклонным диском в гидроприводах высокоточной следящей системы // Вопросы оборонной техники. Специальные системы управления, следящие приводы и их элементы. 2010. Сер. 9. Вып. 3-4. С. 152–157.
17. Зуев Ю.Ю., Беляев О.А. Анализ энергетических возможностей объёмно-роторных машин // Вестник Московского энергетического института. 2013. № 3. С. 5–13.
18. Домогацкий В.В. Создание гидropередачи на базе ролико-лопастных машин // Строительные и дорожные машины. 2009. № 5. С. 1–5.
19. Нижегородов А.И. Регулируемый аксиально-поршневой насос с двумя разнотипными качающими узлами // Строительные и дорожные машины. 2022. № 11. С. 23–29.
20. Нижегородов А.И. Аксиально-поршневая гидромашинa с двумя качающими узлами и шестеренным приводом блоков цилиндров // Насосы. Турбины. Системы. 2022. № 3. С. 29–37.

### References

1. Jasiński R. Research of hydrotronic variable-displacement radial piston pump with electro-pneumatic control. *Solid State Phenomena*. 2010;164(7):37-40. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.164.37>.
2. Guo Tong, Zhao Shengdun, Han Xiaolan, Zhao Renfeng, Li Sheng. Research on the rotational inertia of radial piston pump and the optimization method of the pump parameters. In: *11th IEEE International Conference on Control & Automation*. 2014. <https://doi.org/10.1109/ICCA.2014.6870955>.
3. Nizhegorodov A.I. Radial piston pump with phase control and variable feed mode. *Vestnik mashinostroeniya = Russian Engineering Research*. 2014;11:20-23. (In Russ.).
4. Nizhegorodov A.I., Gavrilin A.N., Moyzes B.B., Cherkasov A.I., Zharkevich O.M., Zhetessova G.S., Savelyeva N.A. Radial-piston pump for drive of test machines. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2018;289(1):012014. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/289/1/012014>.
5. Zhao Shengdun, Guo Tong, Yu Yanghuiwen, Dong Peng, Liu Chen, Chen Wanqiang. Design and experimental studies of a novel double-row radial piston pump. *Journal of Mechanical Engineering Science*. 2015;231(10):1884-1896. <https://doi.org/10.1177/0954406215623309>.
6. Zedgenizov V.G., Mekhnbol D., Strel'nikov A.S. On application possibility of the method of amplitude characteristics for diagnosing axial piston hydraulic pumps. *Erdenet-Progress*. 2009;1:29-33. (In Russ.).
7. Nizhegorodov A., Gavrilin A., Moyzes B., Ditenberg I., Zharkevich O., Zhetessova G., et al. Stand for dynamics tests of technical products in the mode of amplitude-frequency modulation with hydrostatic vibratory drive. *Vibroengineering*. 2016;18(6):3734-3742. <https://doi.org/10.21595/jve.2016.16994>.
8. Dasgupta K. Analysis of a hydrostatic transmission system using low speed high torque motor. *Mechanism and Machine Theory*. 2000;35(10):1481-1499. [https://doi.org/10.1016/S0094-114X\(00\)00005-7](https://doi.org/10.1016/S0094-114X(00)00005-7).
9. Hasan M.E., Dasgupta K., Ghoshal S. Comparison of the efficiency of the high speed low torque hydrostatic drives using bent axis motor: an experimental study. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2015;231(4):1989-1996. <https://doi.org/10.1177/0954408915622413>.
10. Biryukov B.N., Alekseev Yu.S. *Axial-piston hydraulic machine*. Patent SSSR, no. 804858; 1981. (In Russ.).
11. Nizhegorodov A.I. *Axial piston hydraulic machine*. Patent RF, no. 190213; 2019. (In Russ.).
12. Kondakov L.A., Nikitin G.A., Prokofiev V.N. *Mechanical hydraulic drive*. Moscow: Mechanical engineering; 1978, 495 p. (In Russ.).
13. Gavrilin A.N., Nizhegorodov A.I., Moyzes B.B., Kuvshinov K.A., Cherkasov A.S. Dual row rotary piston hydraulic machine with two pumping units. *Advances in Engineering Research*. 2019;188:248-252. <https://doi.org/10.2991/aviaent-19.2019.47>.
14. Kuz'min A.O., Popov V.V., Stazhkov S.M. Hydrodynamic processes in the piston and cylinder unit of axial-piston hydraulic machines. *Vestnik Koncerna VKO «Almaz – Antey» = Journal of «Almaz – Antey» Air and Space Defense Corporation*. 2017;(4):86-90. (In Russ.). <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2017-4-86-90>.
15. Kokoshkin N.N., Novosyolov B.V., Shorohov A.I. Parameter optimization of the self-oscillating mode of hydraulic regulator control mechanisms. *Oboronnaya tekhnika*. 2005;2-3:46-49. (In Russ.).
16. Zaitsev A.A. On the use of an axial-piston hydraulic motor with an inclined disk in hydraulic drives of a high-precision servo system. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Special'nye sistemy upravleniya, sledyashchie privody i ih element*. 2010;9(3-4):152-157. (In Russ.).
17. Zuev Yu.Yu., Belyaev O.A. Analysis of the energy capabilities of volumetric rotary machines. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo institute = Bulletin of Moscow Power Engineering Institute*. 2013;3:5-13. (In Russ.).
18. Domogatskiy V.V. Creation of a hydraulic transmission based on roller blade machines. *Stroitel'nye i dorozhnye*

*mashiny = Construction and road building machinery*. 2009;5:1-5. (In Russ.).

19. Nizhegorodov A.I. Adjustable axial piston pump with two different types of pumping units. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny = Construction and road building machinery*. 2022;11:23-29. (In Russ.).

20. Nizhegorodov A.I. Axial-piston hydraulic machine with two pumping units and a gear drive of cylinder blocks. *Nasosy. Turbiny. Sistemy = Pumps. Turbines. Systems*. 2022;3:29-37. (In Russ.).

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ**

**Нижегородов Анатолий Иванович,**

д.т.н., профессор,

профессор кафедры строительных, дорожных машин и гидравлических систем,

Иркутский национальный исследовательский технический университет,

664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

✉ [nastromo\\_irkutsk@mail.ru](mailto:nastromo_irkutsk@mail.ru)

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHOR**

**Anatoly I. Nizhegorodov,**

Dr. Sci. (Eng.), Professor,

Professor of the Department of Construction, Road Machinery and Hydraulic Systems,

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

✉ [nastromo\\_irkutsk@mail.ru](mailto:nastromo_irkutsk@mail.ru)

#### **Вклад автора**

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

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

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

#### **Конфликт интересов**

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

#### **Conflict of interests**

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

*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.*

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

#### **Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 25.04.2022; одобрена после рецензирования 12.05.2023; принята к публикации 15.06.2023.

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

The article was submitted 25.04.2022; approved after reviewing 12.05.2023; accepted for publication 15.06.2023.



Научная статья  
УДК 621.9.08  
<https://elibrary.ru/qgfkdb>  
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-263-283>

## Динамометрический расточной резец

В.М. Свинин<sup>1✉</sup>, В.А. Ушаков<sup>2</sup>, А.Г. Тихонов<sup>3</sup>,  
А.С. Пятых<sup>4</sup>, Р.В. Кононенко<sup>5</sup>, А.Е. Родыгина<sup>6</sup>

<sup>1-6</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

**Резюме.** Цель – разработка, изготовление и испытание несложного по конструкции динамометра для исследования динамики процесса резания при растачивании и точении. Объектом исследований был выбран сборный правый расточной резец S20R-SSSCR09. Для регистрации силы резания и виброперемещений вершины резца в тангенциальном и радиальном направлениях на него были наклеены по полумостовой схеме четыре тензорезистора КФ5П1-10-400-А-12. Измерение изгибной жесткости резца в двух направлениях выполнили с помощью образцового динамометра сжатия ДОУ-3-01 и индикатора часового типа DDP-10А. Собственную частоту резца определили по виброграмме затухающих изгибных колебаний. Испытание динамометрического резца в работе проводили при точении на станке DMG NEF 400 заготовки из стали 20Х диаметром 79 мм с вылетом 200 мм при частоте вращения шпинделя 600 об/мин, глубине резания 0,8 мм и продольной подаче 0,103 мм/об. На основании проведенного аналитического обзора современных конструкций токарных динамометров установлено, что при растачивании наиболее простым и компактным техническим решением является тензометрирование инструмента. Изгибная жесткость резца в тангенциальном и радиальном направлениях составила, соответственно, 0,6 и 1,058 Н/мкм. Коэффициенты преобразования для перемещений в этих же направлениях имеют следующие значения: 3,5 и 4,2 мкм/В. Установлено, что взаимное влияние регистрации радиальных смещений вершины резца на тангенциальные составляет 7,7%, а тангенциальных на радиальные – 2,8%. Виброграммы показали, что процесс точения с принятыми условиями обработки сопровождается отчетливыми автоколебаниями резца с частотой 561 Гц. Таким образом, тензометрирование инструмента позволяет в одном сигнале получать информацию в виде виброграмм о двух важнейших параметрах динамики процесса резания: силе и виброперемещениях. Основными достоинствами динамометрического резца являются простота конструкции, возможность изготовления в лабораторных условиях, невысокая стоимость и нечувствительность к изменению температуры и осевой силы подачи.

**Ключевые слова:** динамометр для измерения силы резания, расточной резец, тензометрия, электронный блок формирования сигнала, тарирование резца, виброграммы

**Финансирование:** Представленная в данной статье работа реализуется в рамках стратегического проекта ФГБОУ ВО «ИРНИТУ» i.DIT – Байкальский центр цифровых производственных технологий (Программа «Приоритет 2030»).

**Для цитирования:** Свинин В.М., Ушаков В.А., Тихонов А.Г., Пятых А.С., Кононенко Р.В., Родыгина А.Е. Динамометрический расточной резец // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 2. С. 263–283. EDN: QGFKDB, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-263-283>.

### MECHANICAL ENGINEERING

Original article

## Dynamometric cutting tool

Valeriy M. Svinin<sup>1✉</sup>, Vladislav A. Ushakov<sup>2</sup>, Aleksandr G. Tikhonov<sup>3</sup>,  
Aleksey S. Pyatykh<sup>4</sup>, Roman V. Kononenko<sup>5</sup>, Albina E. Rodygina<sup>6</sup>

<sup>1-6</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

© Свинин В.М., Ушаков В.А., Тихонов А.Г., Пятых А.С., Кононенко Р.В., Родыгина А.Е., 2023

<https://ipolytech.ru>

**Abstract.** The aim was to develop, manufacture and test a technically simple dynamometer for monitoring the cutting process during boring and turning. An S20R-SSSCR09 right-hand cutter was selected as a research object. To register the cutting force and vibration movements of the cutter tip in tangential and radial directions, the cutter was equipped with four KF5P1-10-400-A-12 strain gauges mounted according to a half-bridge scheme. The bending stiffness of the cutter in two directions was measured by a DOU-3-01 compression dynamometer and a DDP-10A dial indicator. The cutter natural frequency was determined by a vibrogram of damped bending vibrations. The dynamometric boring tool was tested on a DMG NEF 400 turning machine by turning a workpiece made of 20X steel, 79 mm in diameter with a 200 mm extension, at a spindle rotational frequency of 600 r/min, a cutting depth of 0.8 mm and a longitudinal feed of 0.103 mm/turn. According to the conducted review of modern turning dynamometers and their designs, strain gauging of cutting tools is the simplest technical solution when carrying out boring procedures. The bending stiffness of the cutter in tangential and radial directions comprised 0.6 and 1.058 N/ $\mu\text{m}$ , respectively. The conversion coefficients for displacements in these directions were 3.5 and 4.2  $\mu\text{m}/\text{V}$ , respectively. The mutual influence of registration of radial on tangential and tangential on radial displacements was 7.7% and 2.8%, respectively. The obtained vibrograms showed that the turning process under the given machining conditions is accompanied by distinct auto-oscillations of the cutter with a frequency of 561 Hz. Therefore, strain gauging of cutting tools provides information in the form of vibrograms about the two most important parameters of the cutting process dynamics – force and vibration displacements. The main advantages of the presented dynamometric cutting tool include its design simplicity, possibility of manufacturing in laboratory conditions, low cost and insensitivity to temperature and axial feed force variations.

**Keywords:** dynamometer for cutting force measurement, boring cutter, tensometry, electronic signal generation unit, tool calibration, vibrograms

**Funding:** The work presented in this article is implemented within the framework of the strategic project of the Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Irkutsk National Research Technical University» i.DIT – Baikal Center for Digital Production Technologies (Priority 2030 Program).

**For citation:** Svinin V.M., Ushakov V.A., Tikhonov A.G., Pyatykh A.S., Kononenko R.V., Rodygina A.E. Dynamometric cutting tool. *iPolytech Journal*. 2023;27(2):263-283. (In Russ.). EDN: QGFKDB, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-263-283>.

## ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальное исследование динамики процессов резания заключается в получении информации об изменении во времени составляющих силы резания и относительных перемещений лезвия инструмента и заготовки по координатным направлениям [1]. Для этого используют различные типы динамометров [2] и датчики вибраций<sup>7</sup> [3]. Измерение уровня колебаний неподвижных элементов технологической системы чаще всего проводят с помощью пьезоэлектрических акселерометров. При регистрации колебаний вращающихся заготовок и инструментов незаменимы бесконтактные вихретоковые датчики и лазерные виброметры. Если доступ к зоне резания затруднен, то вибрации оценивают вблизи этой зоны по уровню акустической эмиссии, регистрируемой измерительными микрофонами.

Детальный анализ конструкций динамометров, созданных в первой половине прошлого века для измерения составляющих силы и момента резания, приведен в работе

профессора М.Ф. Полетики [2]. Им же определены основные требования к динамометрам: точность измерения, малая инерционность, виброустойчивость, отсутствие взаимного влияния составляющих силы резания, компактность. По принципу действия их разделяют на гидравлические, упругомеханические и упруго-электрические. Последние получили преимущественное распространение в связи с наилучшим соответствием вышеуказанным требованиям.

В отечественных вузах и научно-исследовательских организациях широкое применение нашли универсальные динамометры моделей УДМ-100, УДМ-600 и УДМ-1200, которые изготавливали во Всероссийском научно-исследовательском инструментальном институте в последней четверти прошлого века<sup>8</sup>. Цифры в обозначении модели указывают предельно допустимую величину силы резания в килограммах. Динамометры предназначены для измерения трех составляющих силы резания и крутящего момента при точении, фрезеровании, свер-

<sup>7</sup>Васильев Р.В., Гречинский Д.А., Ключев В.В. Приборы и системы для измерения вибрации, шума и удара: справочник. В 2-х т., т. 1. М.: Машиностроение, 1978. 448 с.

<sup>8</sup>Руководство к универсальному динамометру УДМ конструкции ВНИИ. М.: ВНИИ, 1983, 22 с.

лении, зенкерования, развертывании и нарезании резьбы метчиком. Их действие основано на преобразовании деформации упругих звеньев в электрический сигнал с помощью проволочных тензорезисторов.

Частота собственных колебаний механической части динамометра УДМ-600 составляет 1350 Гц [4]. Поэтому основным его недостатком является неспособность регистрации без искажения сигналов с частотой более 400 Гц. Кроме того, к настоящему времени они физически и морально устарели: радиолампы и конденсаторы в усилителях выработали свой ресурс, а выходные аналоговые сигналы требуют преобразования в цифровую форму для использования в компьютерах.

С целью продления возможности практического использования этих динамометров проводили работы по их модернизации. В Московском государственном техническом университете (МГТУ) им. Н.Э. Баумана лампы тензоусилитель 4АНЧ22 заменили на современный электронный усилитель напряжения ЛА-УН16, для преобразования сигналов в цифровую форму применили устройство сбора данных NI USB-6009, а вместо светолучевого шлейфного осциллографа – персональный компьютер с программным обеспечением LabVIEW [5]. Подобная же работа выполнена в Тульском государственном университете с использованием усилителя МДУ-8 и аналого-цифрового преобразователя ЛА2-USB [6]. С целью повышения точности измерений и удобства обработки данных, а также удешевления оборудования в МГТУ им. Н.Э. Баумана провели дальнейшую модернизацию измерительного комплекса на базе модуля NI-9237 компании «National Instruments» [7].

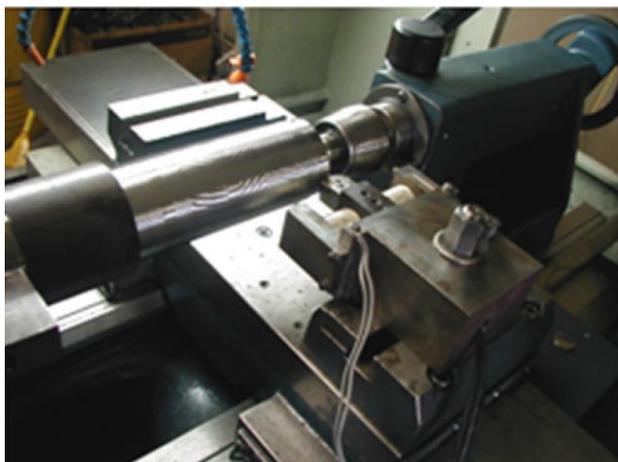
Несмотря на то, что проведенная работа качественно улучшила условия эксплуатации динамометра УДМ, не удалось устранить основного его недостатка – низкого порога частоты регистрации динамической составляющей силы резания. При этом частота автоколебаний, сопутствующих процессам механической обработки, может достигать 3000 Гц [8]. Преодоление этого недостатка возможно путем использования пьезокварцевых

пластинок в качестве упругих и силовых чувствительных элементов динамометров. В работе [9] отмечается, что «для измерения быстроизменяющихся сил рациональнее применять пьезоэлектрические датчики, так как они обладают высокой жесткостью, очень малой деформацией при нагружении, высокой резонансной частотой, широким диапазоном измерений, компактностью, большим количеством циклов нагружения, способностью выдерживать значительные перегрузки, высокой повторяемостью и возможностью измерения малых изменений сил при значительной статической составляющей». Примером такого технического решения является однокомпонентный токарный динамометр Dyna-Z, выпускаемый ООО «Технолог» [10]. На этом же принципе основана работа широко известных, но очень дорогих (порядка нескольких миллионов рублей) динамометров швейцарской компании «Kistler», используемых в лабораторных исследованиях.

В последние годы для обеспечения высокой точности и качества обработки деталей машин во всех промышленно развитых странах резко активизировалась работа по созданию интеллектуальных систем управления металлорежущими станками на основе мониторинга процесса резания. Динамометры являются обязательной частью таких систем. Поэтому в дополнение к вышеуказанным требованиям они должны обладать способностью встраиваться в конструкцию станка без ограничения зоны резания. Использование существующих динамометров, например, компании «Kistler», часто приводит к необходимости значительной модификации станков. В этой связи исследователями было разработано много новых компактных и недорогих конструкций динамометров. Ограниченный объем статьи не позволяет детально их рассмотреть. Поэтому далее представлены примеры основных типов технических решений динамометров для токарной обработки.

Доступный по цене и простой по конструкции трехкомпонентный динамометр для чистового и получистового точения предложили бразильские исследователи (рис. 1) [11]. Упругая часть динамометра выполнена

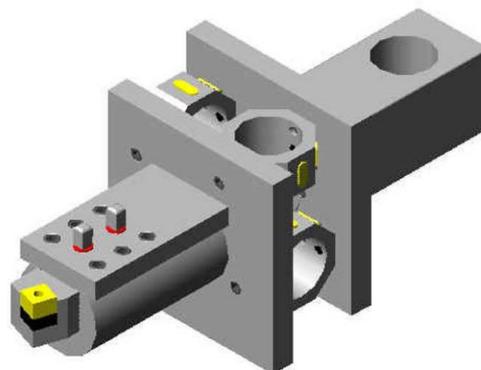
в виде круглой трубы, закрепленной своими концами в вилкообразном держателе, установленном на поперечных салазках токарного станка вместо обычного резцедержателя. На середине упругого элемента поперек к нему расположен держатель инструмента в виде отрезка квадратной трубы. Тензорезисторы, наклеенные на внешней поверхности упругого элемента, регистрируют деформацию его прогиба и закручивания от действия составляющих силы резания. По своим возможностям представленный динамометр уступает отечественному динамометру УДМ, т.к. предназначен только для точения. Кроме того, низкая частота дискретизации аналогоцифрового преобразователя (120 Гц) не позволяет регистрировать динамическую составляющую силы резания.



*Рис. 1. Трехкомпонентный токарный динамометр [11]*  
*Fig 1. Three-component turning dynamometer [11]*

Часто современные токарные динамометры являются композицией держателя инструмента, хвостовика динамометра и соединяющего их упругого элемента с чувствительными датчиками. Упругая часть динамометра, описанного в работе [12], представляет собой четыре восьмигранных кольца, воспринимающих усилие резания и последовательно развернутых относительно друг друга на  $90^\circ$  (рис. 2). На внешних и внутренних сторонах колец наклеены тензорезисторы. Динамометр рассчитан на восприятие трех компонентов силы резания до 3500 Н, т.е. для условий черновой обработки. Частота собственных колебаний динамометра составля-

ет 159 Гц, что не позволяет регистрировать динамическую составляющую силы резания. Для ее измерения динамометр дополнительно снабжен акселерометром.



*Рис. 2. Трехкомпонентный токарный динамометр [12]*  
*Fig. 2. Three-component turning dynamometer [12]*

Следующая конструкция трехкомпонентного динамометра [13] отличается формой упругого элемента и местом расположения датчиков. Упругий элемент из эластомера выполнен в виде квадратного бруска с эллиптическими выточками на продольных сторонах. Тензорезисторы расположены не на упругом элементе, а на некотором расстоянии вокруг него на внешней поверхности тонкой восьмигранной муфты, состоящей из отдельных листов и соединяющей держатель инструмента с хвостовиком динамометра (рис. 3). Сами датчики изготовлены методом напыления нихромовой ( $Ni_{80}Cr_{20}$ ) измерительной решетки на тонкой стальной пластинке. Электрическую изоляцию измерительной решетки обеспечивают два слоя напыленной пленки из нитрида кремния ( $Si_3N_4$ ). Принятое расположение тензорезисторов в совокупности с тонкопленочным вариантом их исполнения служит повышению чувствительности динамометра.

В работе [14] представлен динамометр (рис. 4), имеющий очень оригинальную конструкцию упругого элемента (рис. 5). Он представляет собой комбинацию 12 изгибных балок, монолитно соединенных в виде квадратной рамки и вписанного в нее креста. Балки, образующие крест, развернуты в поперечном направлении относительно балок, образующих рамку. На балки наклеены 24 полупроводниковых тензорезистора разме-

ром 6×3,5 мм. Удачная конструкция упругого элемента обеспечивает компактность динамометра и возможность восприятия силовой нагрузки до 2000 Н по всем направлениям при полустойковой и чистовой обработке. Частота собственных колебаний динамометра составляет 2253, 2317 и 2957 Гц, соответственно, по направлениям продольной подачи – радиальному и тангенциальному, позво-

ляя уверенно регистрировать автоколебания с частотой до 500...600 Гц. Можно признать, что на сегодняшний день эта конструкция динамометра является одной из лучших. Но ее практическое использование сдерживается необходимостью обеспечения очень точного изготовления сложного по форме упругого элемента.

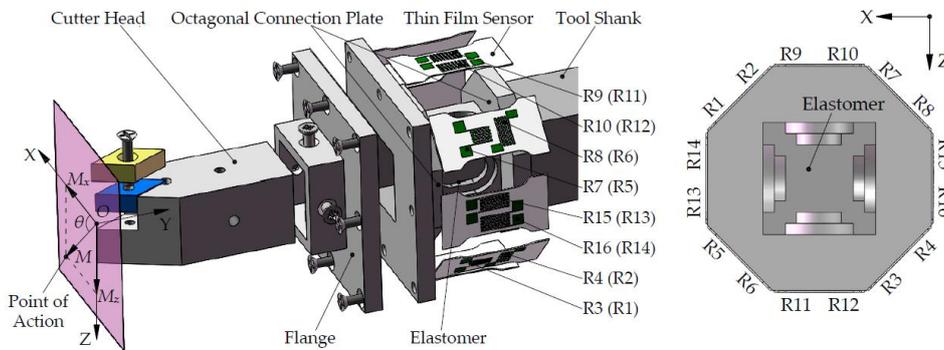


Рис. 3. Трехкомпонентный токарный динамометр [13]  
Fig. 3. Three-component turning dynamometer [13]

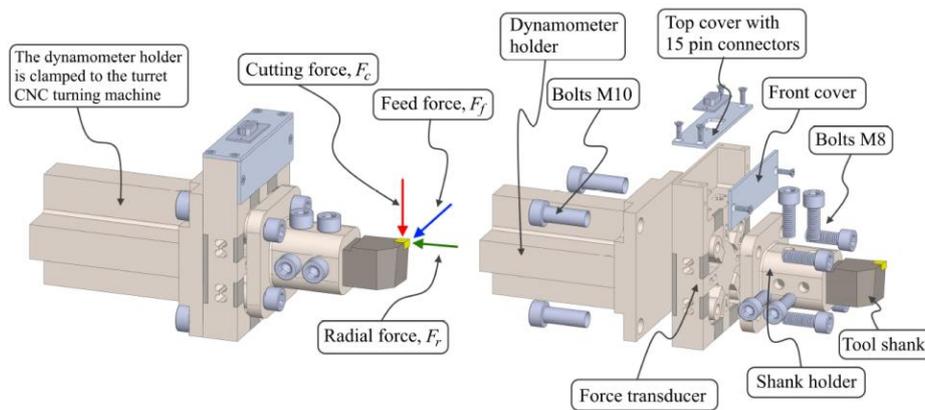


Рис. 4. Трехкомпонентный токарный динамометр [14]  
Fig. 4. Three-component turning dynamometer [14]

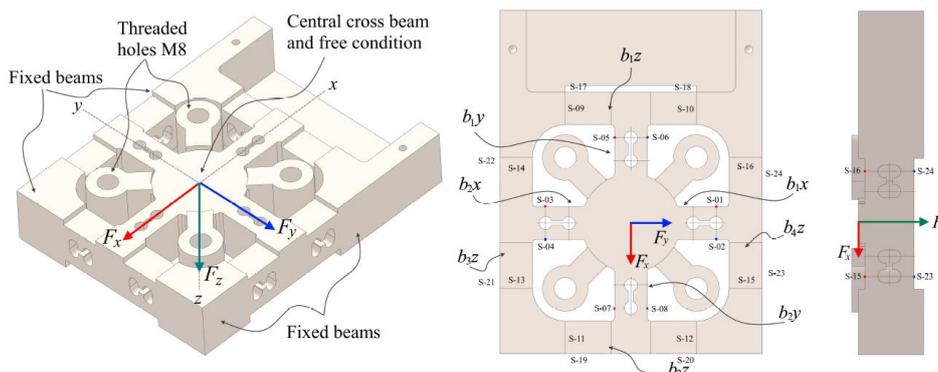


Рис. 5. Упругий элемент трехкомпонентного динамометра [14]  
Fig. 5. Elastic element of a three-component dynamometer [14]

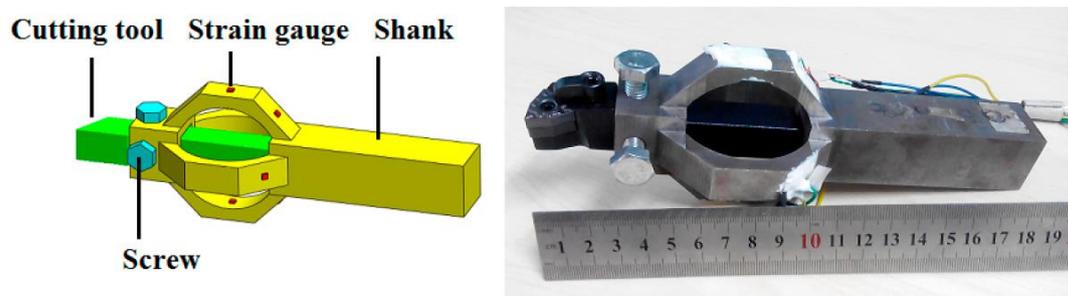


Рис. 6. Трехкомпонентный динамометрический футляр [15, 16]  
Fig. 6. Three-component dynamometric case [15, 16]

Весьма оригинальную и очень компактную конструкцию трехкоординатного токарного динамометра (рис. 6) представили китайские авторы [15, 16]. По своей сути он является упругим чехлом для резца и может закрепляться в резцедержателе любого токарного станка.

Динамометр состоит из хомута и полого хвостовика, монолитно связанных двумя взаимно перпендикулярными восьмиугольными упругими кольцами, на внешних и внутренних поверхностях которых наклеены тензорезисторы. Резец вставляется в динамометр и закрепляется там двумя болтами через резьбовые отверстия на хомуте. Хвостовик служит для закрепления динамометра на станке. Отличительная особенность динамометра состоит в близком расположении упругого контура к зоне резания, что повышает точность измерений. Достоинствами динамометра являются компактность и малое (менее 0,84%) взаимовлияние составляющих силы резания. Последнее обеспечивается удачной формой упругой части и правильным выбором мест расположения тензодатчиков. Частота собственных колебаний резца, закрепленного в динамометре, составила 1147, 1122 и 2035 Гц в направлениях, соответственно, скорости резания, продольной подачи и нормальном к поверхности заготовки. Поэтому измерительные возможности этого динамометра по частоте регистрируемого сигнала не превышают возможностей динамометра УДМ. Кроме того, большой вылет вершины резца из резцедержателя станка (не менее 110 мм) обуславливает низкую изгибную жесткость инструмента и может спровоцировать возбуждение автоколебаний при резании.

Следующим шагом на пути миниатюризации токарного динамометра явилось встраивание через промежуточный элемент малогабаритного (24×24×10 мм) трехкомпонентного силоизмерительного пьезоэлектрического датчика Kistler 9251A под сменную головку резца (рис. 7 и 8) [17, 18].

Сравнение разработанного динамометра [17] с серийно выпускаемым токарным динамометром Kistler 9129AA доказало его преимущество по двукратному повышению частоты собственных колебаний в направлениях главного движения и продольной подачи, что положительно отражается на способности регистрации автоколебаний. Достигнутое преимущество объясняется снижением массы режущего инструмента (120 г головки резца против 1068 г целого резца). Вторым преимуществом созданного динамометра перед динамометром Kistler 9129AA является его компактность и трехкратное уменьшение общей массы. Трехкомпонентный датчик Kistler 9251A позволяет измерять три составляющие силы резания до 100 Н с точностью 0,1 Н при тонком точении. Уменьшение жесткости резца практически незначительно. Достоинствами конструкции являются компактность и минимальность искажения динамики процесса резания, а недостатком – невозможность использования при полустойковой и черновой обработках. Наибольшей компактностью и простотой обладает конструкция динамометрического резца [19], под сменной режущей пластиной которого размещены два кусочка (3×3 мм) пьезоэлектрической пленки толщиной 0,26 мм (рис. 9), с помощью которой измеряют главную составляющую силы резания. Очевидным достоинством конструкции является возможность использования в

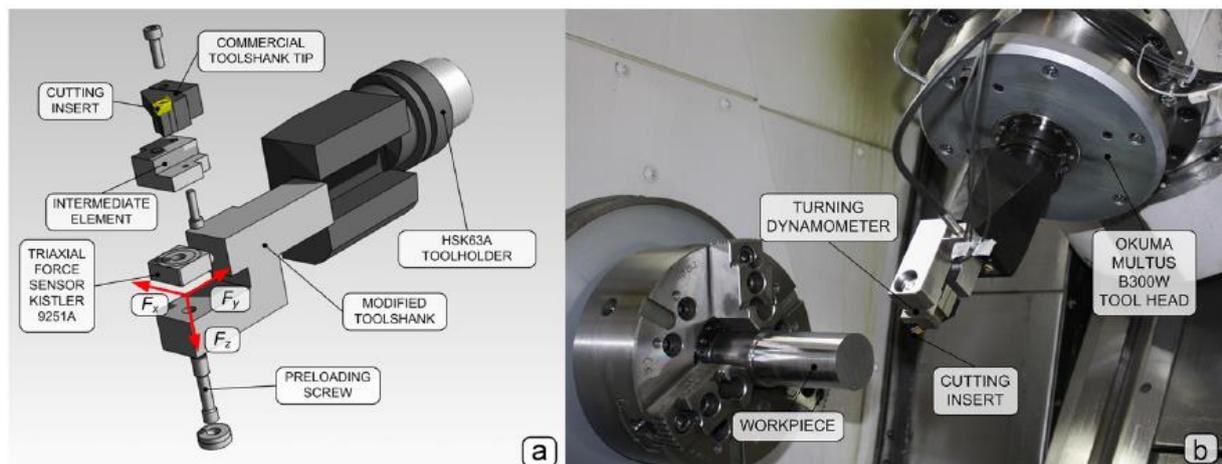


Рис. 7. Трехкомпонентный динамометрический резец [17]  
Fig. 7. Three-component dynamometric cutter [17]

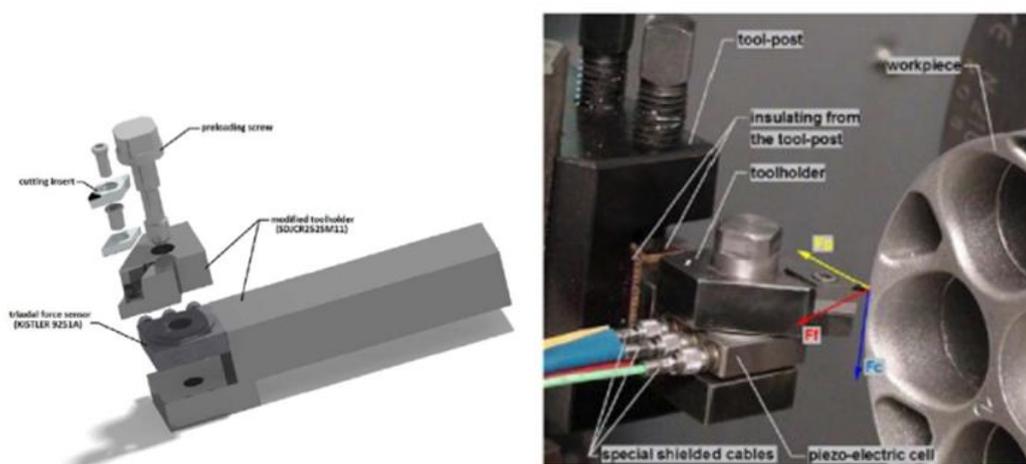


Рис. 8. Трехкомпонентный динамометрический резец [18]  
Fig. 8. Three-component dynamometric cutter [18]

штатных инструментах, а недостатком – отсутствие возможности измерения двух других компонент силы резания. Кроме того, проблемы использования резца могут возникнуть в связи с надежностью электрической изоляции пленки в условиях работы с СОЖ и превышением допустимых силовых и тепловых нагрузок пленки.

В конце прошлого века был разработан новый тип датчиков, способных регистрировать очень малые деформации с помощью поверхностных акустических волн (ПАВ) [20]. Они характеризуются компактностью, надежностью, максимальной точностью в сложных условиях эксплуатации и беспроводной передачей сигнала. Пример использования датчиков ПАВ для измерения силы резания токарного резца приведен в работе [21]. С

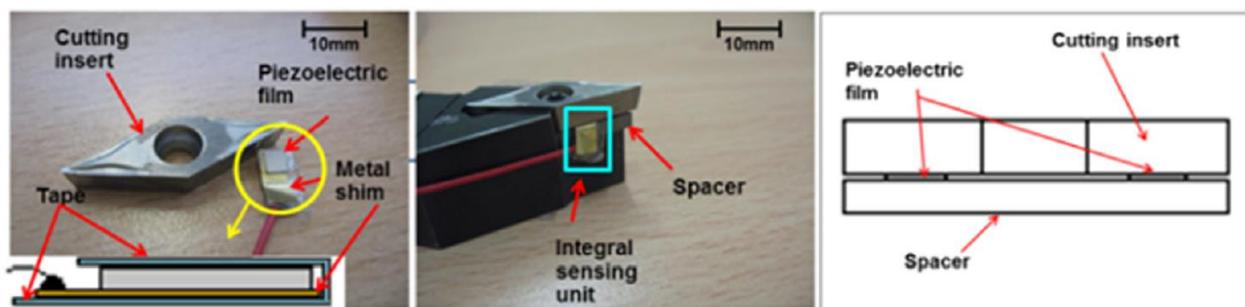
этой целью на теле инструмента выбирается зона, в которой деформация от силы резания регистрируется датчиком.

Принципиальная схема датчика ПАВ представлена на рис. 10. Датчик, изготавливаемый компанией «SENSeOR», представляет полированную пластинку (7×5×0,35 мм) из пьезоэлектрического материала (кварц или ниобат лития), на поверхности которой методом фотолитографии нанесен встречно-штыревой преобразователь из алюминия толщиной 0,1 мкм в виде вставленных друг в друга гребенок, и две отражательные решетки. Электроды преобразователя шириной 1 мкм расположены с шагом 3,645 мкм и связаны с антенной. При поступлении на антенну электромагнитной волны преобразователь генерирует в пьезоэлектрической пластине

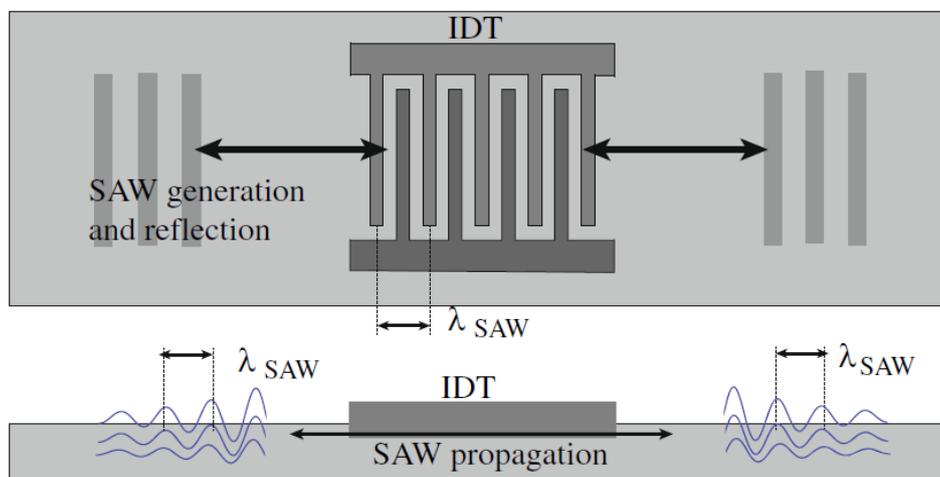
стоящую поверхностную акустическую волну частотой 433 МГц, затухающую на глубине две-три длины волны от поверхности. Механическая деформация пластинки, вызванная силой резания, приводит к изменению резонансной частоты датчика. Он работает совместно с радиоопросчиком, имеющим излучающую и приемную части и расположенным в 20 см от антенны датчика. Опросчик генерирует импульсы с частотой 3 кГц, между которыми получает ответ от датчика. По изменению резонансной частоты датчика определяют степень механической деформации пластинки и величину вызывающей ее силы.

Динамометрический токарный проходной резец представлен на рис. 11. На каждой продольной грани хвостовика сразу за головкой инструмента наклеен датчик ПАВ и закреплен держатель антенны. Датчики на противоположных гранях хвостовика образуют дифференциальные пары для измерения

главной составляющей силы резания и силы подачи. Вылет экспериментального резца из резцедержателя составляет примерно 70...80 мм. Для проверки достоверности измерений силы резания созданным инструментом были проведены опыты по точению, в которых резец находился в динамометре Kistler 9263, а тот – в револьверной головке токарного станка. Одновременная запись сигналов силы резания от обоих устройств показала высокую степень их совпадения. Однако принятая частота дискретизации 3 кГц может обеспечить уверенную регистрацию динамической составляющей силы резания с частотой не более 200 Гц, тем самым уступая динамометру УДМ-600. Вторым недостатком созданного устройства состоит в возможности возбуждения автоколебаний резца вследствие его большого вылета из резцедержателя.



**Рис. 9. Однокомпонентный динамометрический резец [19]**  
**Fig. 9. One-component dynamometric cutter [19]**



**Рис. 10. Принципиальная схема датчика поверхностных акустических волн [21]**  
**Fig. 10. Schematic diagram of the surface acoustic wave sensor [21]**

SAW sensors setup on all four faces of tool holder

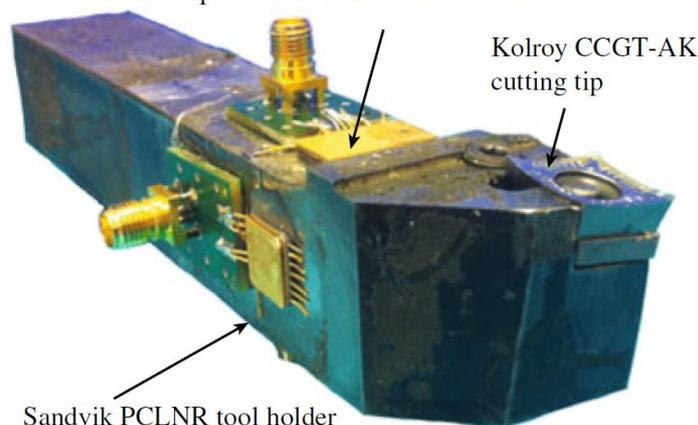


Рис. 11. Двухкомпонентный токарный динамометрический резец с датчиками поверхностных акустических волн [21]

Fig. 11. Two-component turning dynamometric cutter with surface acoustic wave sensors [21]

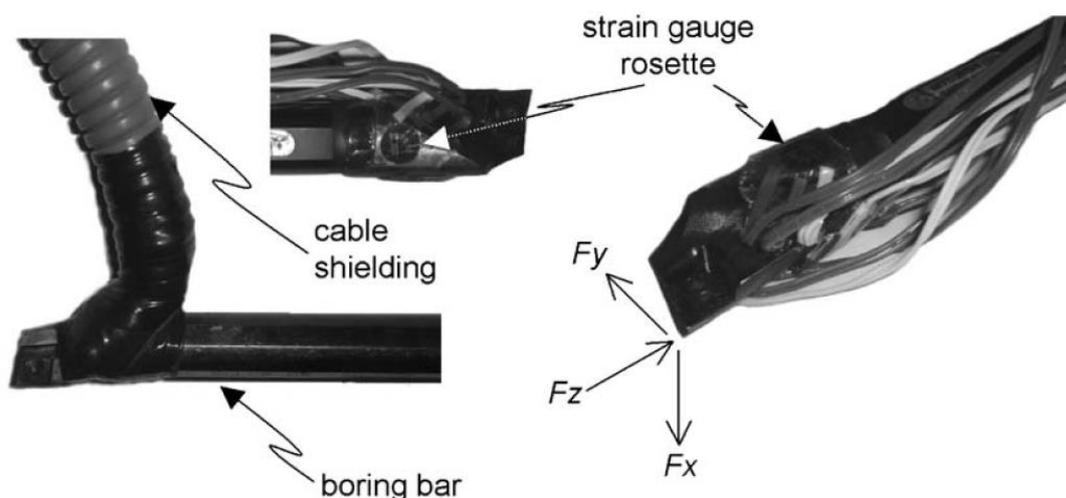


Рис. 12. Трехкомпонентный расточной динамометрический резец [22]

Fig. 12. Three-component dynamometric boring cutter [22]

Рассмотренные выше конструкции динамометров предназначены для измерения силы резания при наружной токарной обработке. Применительно к расточным резцам создано гораздо меньше технических решений. Для мониторинга износа инструмента посредством измерения трех составляющих силы резания при растачивании авторами работы [22] был изготовлен тензометрический инструмент (рис. 12). На переднем конце стандартного расточного резца S16Q-SCLCR09, оснащенного режущей пластиной CCGT 09T304 FN, вблизи его головки была наклеена фольговая розетка тензорезисторов с базой 5 мм. Недостатком предложенной конструкции является низкая чувствительность измерительной системы вслед-

ствие расположения тензодатчиков на небольшом расстоянии от места приложения силы резания. Кроме того, громоздкость кабеля в защитном рукаве ограничивает минимальный диаметр растачиваемого отверстия.

В процессе работы вершина расточного резца вследствие его гибкости отжимается под действием силы резания. Адаптивные системы управления станками позволяют компенсировать этот отжим радиальным смещением резца. Непосредственное измерение отжима в зоне резания при растачивании глубоких отверстий весьма проблематично. Поэтому измерение выполняют с помощью тензорезисторов, наклеенных на стержень резца вблизи места его закрепления. Однако такой способ измерения сопро-

водится ошибкой. В работе [23] проведен анализ ошибки измерения изгибных деформаций консольно закрепленной балки при учете первых двух форм ее колебаний. По результатам анализа для уменьшения ошибки авторы предложили использовать две группы тензорезисторов вместо одной. Такой прием позволил сократить ошибку более чем в три раза и добиться микронной точности измерения отжатий резца. Однако практическая реализация этих рекомендаций возможна при использовании миниатюрных тензодатчиков с малой базой, обладающих низкой чувствительностью. Такие датчики требуют большего усиления сигнала, что ведет к повышению уровня помех.

С целью повышения чувствительности измерения смещения вершины расточной оправки силой резания в работе [24] предлагается использовать специальную муфту (рис. 13), по принципу действия подобную муфте в работе [13]. Она состоит из двух фланцев, соединенных четырьмя мостиками, на которых наклеены тензорезисторы. Муфта закрепляется на расточной оправке в непосредственной близости от держателя инструмента. В процессе работы при изгибе оправки мостики испытывают деформацию растяжения и сжатия, что позволяет независимо регистрировать радиальную и тангенциальную составляющие силы резания. Недостатком конструкции является ограничение муфтой глубины растачивания. Кроме того, ослабление под действием вибраций жестко-

сти крепления фланцев на стержне расточной оправки может привести к значительным погрешностям измерения.

Приобретение динамометрической аппаратуры для проведения исследований в настоящее время затруднительно. В России аппаратуру для измерения силы резания производит единственное предприятие ООО «Технолог» (г. Рыбинск). Однако серийно выпускаемый токарный динамометр Dyna Z способен регистрировать только одну компоненту силы резания. Динамометры швейцарской компании «Kistler» имеют высокую стоимость. Поэтому исследователи вынуждены самостоятельно конструировать и изготавливать динамометры.

Краткий обзор современных токарных динамометров показал широкое многообразие их конструкций. В качестве чувствительных элементов используют тензорезисторы, пьезодатчики и датчики ПАВ. В некоторых конструкциях упругий элемент имеет сложную геометрическую форму, создающую технологические трудности при изготовлении. Другая часть конструкций в качестве упругого элемента использует тело инструмента. Для получения и обработки сигнала применяют дорогостоящую аппаратуру.

Целью данной работы является разработка, изготовление и испытание простого по конструкции и недорогого динамометра для исследования динамики процесса резания при растачивании и точении.

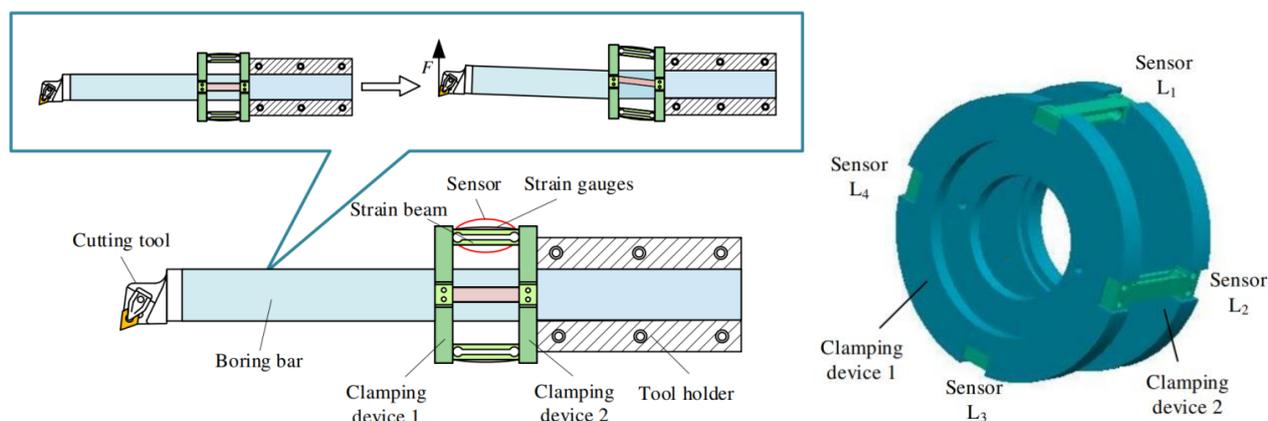


Рис. 13. Двухкомпонентный динамометрический расточной резец с измерительной муфтой [24]  
Fig. 13. Two-component dynamometric boring cutter with a measuring sleeve [24]

## КОНСТРУКЦИИ ДИНАМОМЕТРИЧЕСКОГО РАСТОЧНОГО РЕЗЦА И ЭЛЕКТРОННОГО БЛОКА ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

Обзор литературных источников показал, что для получения опытных данных о виброперемещениях и силе резания расточного резца наилучшим из существующих технических решений является тензометрирование инструмента. Тензорезисторы очень компактны и не загромождают зону резания. Получаемый при этом сигнал несет информацию одновременно об этих обоих важнейших параметрах динамики процесса резания, связанных между собой жесткостью инструмента. Поэтому в данной работе было принято решение об изготовлении тензометрического резца.

В качестве базового элемента изделия использовали токарный сборный правый расточной резец S20R-SSSCR09 (рис. 14) для обработки сквозных отверстий (главный угол в плане  $\varphi = 75^\circ$ ) с винтовым механическим креплением сменной квадратной твердосплавной режущей пластины SCMT09T304-MM IM7325 с задним углом  $\alpha = 7^\circ$ . Форма сечения державки резца круглая, с продольными лысками сверху и спереди. Длина резца составляет 180 мм, диаметр державки – 20 мм, поперечный размер державки с лыской – 18 мм, минимальный диаметр растачиваемого отверстия – 25 мм. Резец размечали и зачищали шлифовальной шкуркой до шероховатости  $Ra\ 2,5\ \mu\text{м}$  его поверхности под наклейку тензорезисторов (см. рис. 14). Участок резца длиной 50 мм от заднего торца предназначен для закрепления в держателе револьверной головки станка. На следующих 20 мм располагается короткая сторона тензорезисторов с выводами.

Расточной резец, установленный в револьверной головке токарного станка, представляет консольно закрепленную балку. Практика эксплуатации резцов показывает, что при обычных режимах резания они не имеют остаточной деформации изгиба. Достаточная упругость резцов объясняется их изготовлением (согласно ГОСТ 26613-85<sup>9</sup>) из

стали 40X с термообработкой до HRC<sub>э</sub> 37...47. Поэтому стержень резца можно использовать в качестве упругого элемента, максимальная деформация которого располагается в зоне возле места закрепления. Именно в этой зоне целесообразно располагать датчики деформации. Наиболее доступными, компактными и недорогими из них являются тензорезисторы.

Исходя из возможности размещения на резце, были использованы фольговые одиночные тензорезисторы марки КФ5П1-10-400-А-12 с номинальным сопротивлением 400 Ом и базой (длиной тензорешетки) 10 мм (рис. 15). Тензорезистор состоит из чувствительного элемента (тензорешетки), полимерной подложки и выводов. В тензорезисторах типа КФ5 в качестве подложки используется термостойкая бумага, пропитанная клеем УВС-10Т.

С целью группировки тензорезисторов было измерено их фактическое сопротивление с точностью до 0,1 Ом при помощи моста постоянного тока типа УМВ и отобраны две пары с одинаковым сопротивлением: 399,8 и 400,2 Ом. Первая пара тензорезисторов предназначена для измерения главной составляющей силы резания и виброперемещений вершины резца в направлении вектора скорости резания (тангенциальные перемещения). Они размещены на верхней и нижней сторонах стержня резца напротив друг друга. Вторая пара служит для измерения радиальной составляющей силы резания и радиальных виброперемещений. Они расположены на боковых сторонах резца. В осевом направлении все тензорезисторы одинаково удалены от торца резца.

Наклейку тензорезисторов осуществляли клеем БФ-2 высшего сорта (ГОСТ 12172-2016<sup>10</sup>) согласно инструкции. Для обезжиривания использовали спирто-бензиновую смесь, ацетон и этиловый спирт. Сушку проводили в электрошкафу ШС-80-01 СПУ. На рис. 16 показан фрагмент державки резца с наклеенными тензорезисторами.

<sup>9</sup>ГОСТ 26613-85. Резцы токарные с механическим креплением сменных многогранных пластин. Введ. 01.07.1986. М.



Рис. 14. Расточной резец S20R-SSSCR09 с разметкой под наклейку тензодатчиков  
Fig. 14. S20R-SSSCR09 boring cutter with markings for load cell stickers

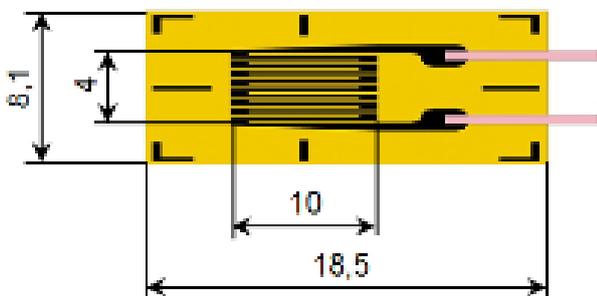


Рис. 15. Одиночный тензорезистор КФ5П1-10-400-А-12  
Fig. 15. Single KF5P1-10-400-A-12 strain gauge



Рис. 16. Наклеенные тензорезисторы  
Fig. 16. Strain gauges glued to the cutter

После наклейки тензорезисторов к их выводам припаяли экранированный 8-жильный медный кабель типа LCS-8BL OFC 8C+1. Для фиксации кабеля и предотвращения непредвиденного механического воздействия использовали термоусадочную трубку Rexant 25/12,5 art. 22-5008, термоклей и пластиковую скобу (рис. 17). С целью защиты от внешнего воздействия и экранирования помех на участок резца с приклеенными тензорезисторами одели термоусадочную трубку, поверх которой намотали слой алюминиевой ленты фирмы «Tesa» шириной 50 мм и толщиной 0,08 мм, соединив ее с экраном кабеля. Затем для окончательной защиты и фиксации одели еще одну термоусадочную труб-

ку. К другому концу кабеля припаяли разъем типа DB37M для соединения с аппаратурой.



Рис. 17. Распайка и фиксация кабеля на резце со стороны тензорезисторов  
Fig. 17. Cable unsoldering and clamping on the cutter from the strain gauge side

Таким методом были сформированы два измерительных канала: для регистрации тангенциальных виброперемещений по оси Z и радиальных по оси Y. Каждый канал представляет собой пару тензорезисторов  $R_1$  и  $R_2$  с электрическим сопротивлением  $R$ , наклеенных напротив друг друга на державку в виде балки с консольным закреплением (рис. 18).

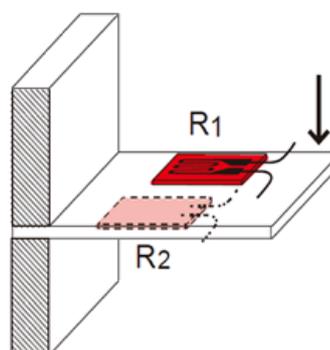


Рис. 18. Балка с консольным закреплением  
Fig. 18. Beam with a single-sided support

В рассматриваемом случае под действием составляющих силы резания (тангенциальной и радиальной) происходит изгиб консольно-закрепленной державки резца, соот-

ветственно, вершина резца перемещается на некую величину. Для измерения изгибных деформаций и вызванных ими перемещений два одинаковых активных тензорезистора  $R_1$  и  $R_2$  должны быть включены в смежные плечи по схеме полумоста (дифференциальная схема) (рис. 19), в то время как другая половина моста дополняется непосредственно в измерительном приборе парой стабильных одинаковых сопротивлений  $R_3=R_4=R_0$ .

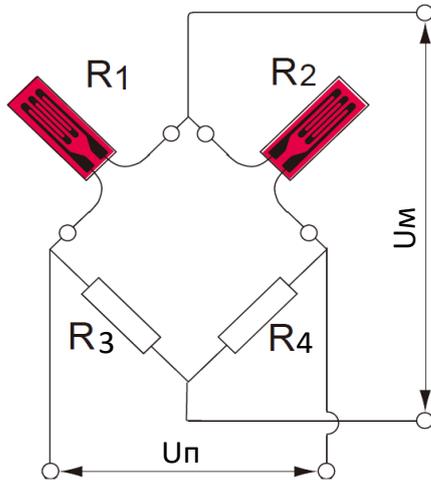


Рис. 19. Подключение двух активных тензорезисторов по дифференциальной схеме  
Fig. 19. Connecting two active strain gauges in a differential circuit

Под влиянием нагружения сопротивление  $R$  тензорезисторов изменяется на величину  $\Delta R$ , причем для тензорезистора  $R_1$  в сторону увеличения, а для тензорезистора  $R_2$  – в сторону уменьшения. Кроме того, в результате температурных изменений исследуемого объекта, на котором наклеены тензорезисторы, его сопротивление увеличивается на величину  $\Delta R_T$ . Помимо этого, под действием осевой силы подачи  $P_X$  сопротивление тензорезисторов уменьшается на величину  $\Delta R_X$ . С учетом вышесказанного имеем:

$$R_1 = R + \Delta R + \Delta R_T - \Delta R_X; \quad (1)$$

$$R_2 = R - \Delta R + \Delta R_T - \Delta R_X. \quad (2)$$

Основное уравнение мостовых схем [25]:

$$U_M = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} U_{\Pi}, \quad (3)$$

где  $U_M$  – выходное напряжение моста, В;  
 $U_{\Pi}$  – напряжение питания моста, В.

Подставляя (1) и (2) в (3), получаем:

$$U_M = \frac{(R + \Delta R + \Delta R_T - \Delta R_X)R_0 - (R - \Delta R + \Delta R_T - \Delta R_X)R_0}{2R_0(R + \Delta R + \Delta R_T - \Delta R_X + R - \Delta R + \Delta R_T - \Delta R_X)} U_{\Pi} = \frac{\Delta R}{2(R + \Delta R_T - \Delta R_X)} U_{\Pi}. \quad (4)$$

Как видим, сопротивления второй половины моста  $R_3=R_4=R_0$ , встроенной в прибор, в уравнение вообще не входят, т.е. их величина не оказывает влияния на результаты измерений. Влияние температуры и осевой силы при принятой схеме моста (см. рис. 19) хорошо компенсируется, т.к.  $\Delta R_T \ll R$ ,  $\Delta R_X \ll R$  и слагаемыми  $\Delta R_T$  и  $\Delta R_X$  знаменателя в формуле (4) можно пренебречь. Следовательно, можно записать:

$$U_M \approx \frac{U_{\Pi} \Delta R}{2R}. \quad (5)$$

Таким образом, данная схема не фиксирует температурную и осевую деформации, вызываемые силой подачи. К преимуществам данной схемы подключения можно отнести то, что она исключает температурное влияние проводов, а чувствительность при измерении деформаций изгиба увеличивается вдвое.

Сигнал с выходов измерительных каналов поступает в тензостанцию с аналогово-цифровым преобразователем (АЦП) и далее на персональный компьютер. Изначально в качестве тензостанции использовали крейтовую систему LTR-EU-2 (Л-Кард) с прилагаемым программным обеспечением.

Тензостанция LTR-EU-2 рассчитана на проведение долгосрочных экспериментов с медленно изменяющейся во времени измеряемой величиной, что обуславливает крайне низкую дискретность измерительных каналов (около 600 Гц). Для преодоления этого препятствия был принят ряд мер, в том числе изменен режим работы тензометриче-

<sup>10</sup>ГОСТ 12172-2016. Клеи фенолополивинилацетальные. Введ. 01.11.2017. М.: Стандартинформ, 2019.

ских модулей, позволивший добиться максимально возможной частоты дискретизации на уровне 7560 Гц для каждого из двух измерительных каналов. Однако предварительные опыты по резанию показали неудовлетворительное качество сигналов.

Для устранения возникшей проблемы вместо приобретения другой дорогостоящей тензостанции с большей частотой дискретизации выходного сигнала был сконструирован и изготовлен недорогой двухканальный электронный блок. Каждый канал блока включает в себя измерительный мост Уитстона из двух тензорезисторов и подстроечного резистора, усилитель и АЦП. В качестве комплектующих деталей были выбраны:

INA333 – прецизионный инструментальный дифференциальный усилитель с нулевым дрейфом, со схемотехническим решением типа rail to rail;

AD8629 – сдвоенный операционный усилитель, со схемотехническим решением типа rail to rail.

Встроенный в контроллер АЦП осуществляет дискретизацию сигнала с частотой 42 кГц на канал. По интерфейсу COM-порт осуществляется передача данных со скоростью 8 Мбит/с. Электронная схема разработанного устройства приведена на рис. 20, где

указаны:

R3, R4, R12, R13 – тензорезисторы измерительного полумоста Уитстона;

RV1, RV4 – подстроечные резисторы для уравнивания полумоста;

U1, U4, U5, U6, U9, U10 – операционные усилители, объединенные в дифференциальный усилитель попарно в одном корпусе;

U2, U3, U7, U8 – операционные усилители, объединенные попарно в одном корпусе;

RV2, RV3, RV5, RV6 – подстроечные резисторы для задания коэффициента усиления;

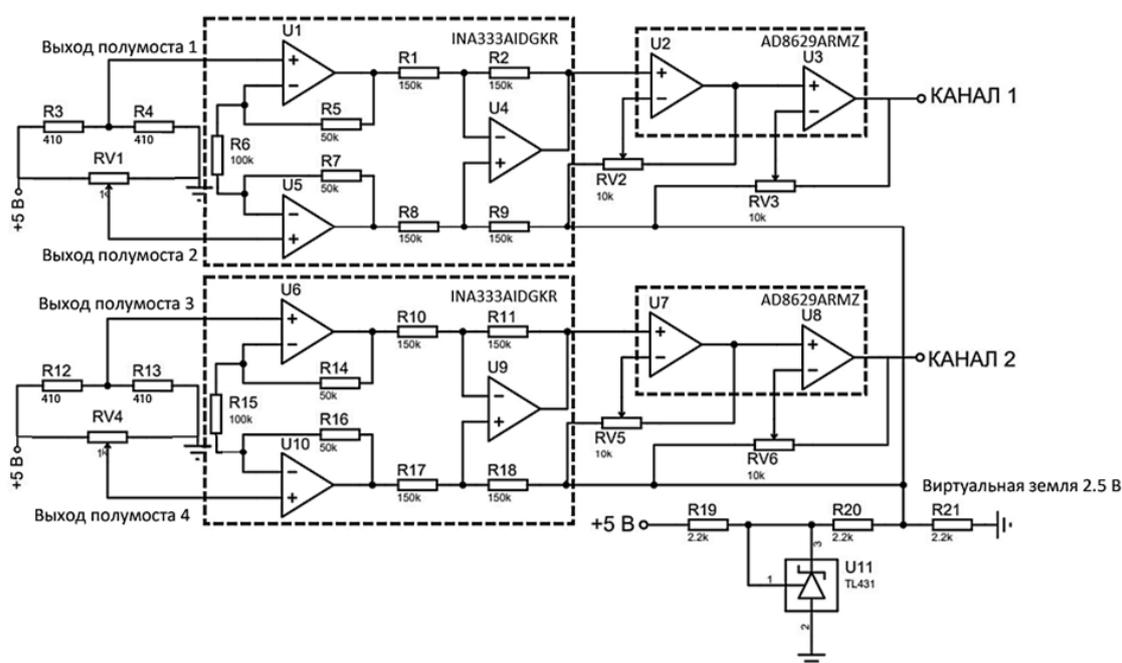
U11 – стабилитрон для создания виртуальной земли;

R19 – токоограничивающий резистор;

R20, R21 – резисторы делителя напряжения.

Плата электронного блока помещена в пластмассовый корпус и закрыта прозрачной крышкой (рис. 21). На корпусе размещены три разъема: DB37M – для подключения тензорезисторов, электропитания +5 В и микро USB – для связи с компьютером.

Дополнительно для устройства была разработана собственная управляющая программа на языке программирования Python, позволяющая записывать неограниченный объем данных.



**Рис. 20. Принципиальная электрическая схема электронного блока**  
**Fig. 20. Schematic diagram of the electronic unit**



Рис. 21. Внешний вид электронного блока  
Fig. 21. External view of the electronic unit

## ИСПЫТАНИЯ ДИНАМОМЕТРИЧЕСКОГО РАСТОЧНОГО РЕЗЦА

Тарирование резца в двух радиальных направлениях выполняли на экспериментальной установке, собранной на столе фрезерного станка (рис. 22).

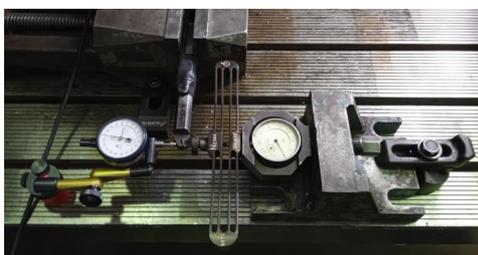


Рис. 22. Измерение изгибной жесткости динамометрического расточного резца  
Fig. 22. Measuring bending stiffness of a dynamometric boring cutter

Изгибающую резец силу создавали на вершине режущей пластинки с помощью нагрузочного винта и образцового динамометра сжатия механического типа ДОУ-3-01 с максимальной нагрузкой 100 кгс. Регистрацию смещений резца выполняли механическим датчиком часового типа DDP-10A с ценой деления 1 мкм. Нагружение и разгружение резца выполняли ступенчато с интервалом смещения 20 мкм до величины 200 мкм и обратно. Силу определяли по индикатору динамометра. Сигнал от резца поступал на персональный компьютер, где обрабатывался с помощью модуля тарировки специализированного программного обеспечения АСТест (рис. 23).

Полученные коэффициенты преобразования для перемещений имеют следующие значения: 3,5 мкм/В в направлении силы  $P_z$  и 4,2 мкм/В в направлении силы  $P_y$ . Изгибная жесткость резца в указанных направлениях составила, соответственно, 0,6 Н/мкм и 1,058 Н/мкм (рис. 24).

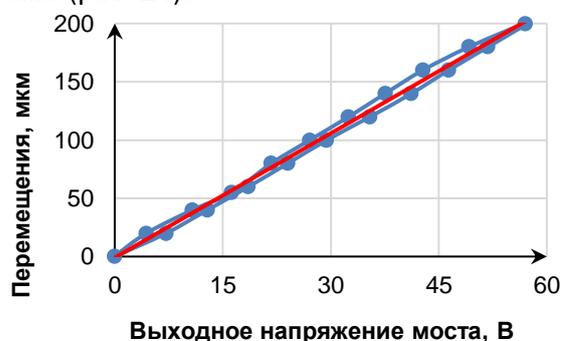


Рис. 23. Результаты тарировки устройства в тангенциальном направлении  
Fig. 23. Results of device calibration in tangential direction

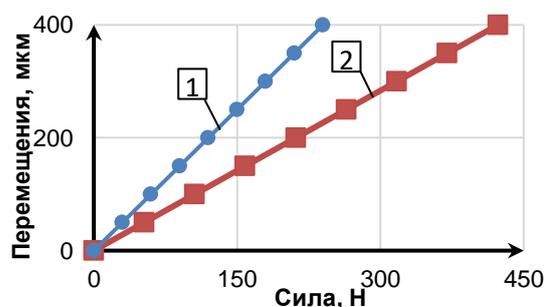


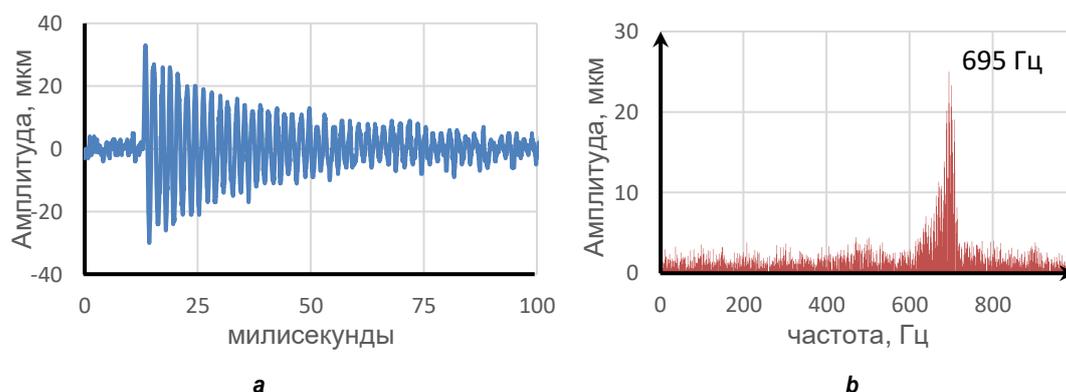
Рис. 24. График зависимости перемещений от силы: 1 – в тангенциальном направлении, 2 – в радиальном направлении  
Fig. 24. Displacement vs force graph: 1 – in the tangential direction, 2 – in the radial direction

Взаимное влияние радиальных смещений на тангенциальные составляет 7,7% и 2,8% – наоборот. Кроме того, путем удара по резцу, закрепленном в револьверной головке станка, была записана виброграмма его собственных затухающих изгибных колебаний (рис. 25). Спектрограмма колебаний показала, что их частота составляет 695 Гц.

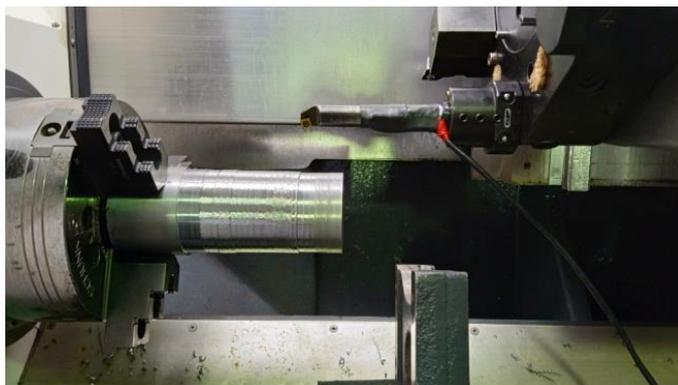
Для испытания резца в работе провели опыты на токарном станке DMG NEF 400 (рис. 26).

Заготовка из стали 20Х диаметром 79 мм была установлена в трехлапчатом патроне с вылетом 200 мм. Динамометрический резец закрепили в револьверной головке станка. Наружное продольное точение заготовки выполнили при частоте вращения шпинделя  $n = 600$  об/мин, глубине резания  $t = 0,8$  мм и продольной подаче  $S = 0,103$  мм/об.

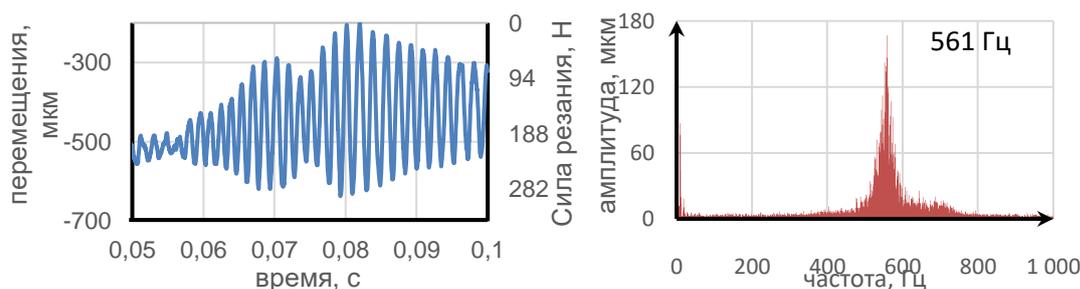
Виброграммы колебаний вершины резца записывали в память персонального компьютера. Они представлены на рис. 27 и 28.



**Рис. 25. Виброграмма и спектрограмма собственных колебаний резца**  
**Fig. 25. Vibrogram and spectrogram of cutter natural oscillations**



**Рис. 26. Испытание динамометрического резца в работе**  
**Fig. 26. Tests of the dynamometric boring cutter**



**Рис. 27. Виброграмма и спектр частот тангенциальных перемещений**  
**Fig. 27. Vibrogram and frequency spectrum of tangential displacements**

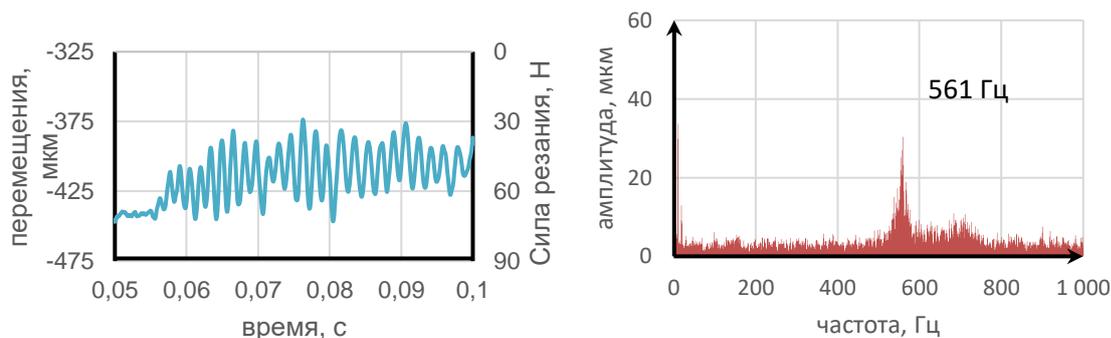


Рис. 28. Виброграмма и спектр частот радиальных перемещений  
Fig. 28. Vibrogram and frequency spectrum of radial displacements

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для измерения силы резания при точении промышленность России в настоящее время выпускает одну марку динамометра – Dyna-Z. Он позволяет регистрировать только главную составляющую силы резания. Однако проведение анализа динамики процесса резания требует информации и о двух других компонентах силы, в первую очередь радиальной составляющей. Кроме того, в динамометре Dyna-Z невозможно закрепить расточной резец. Использование устаревшей отечественной марки динамометра УДМ на современных токарных станках с револьверной головкой также не представляется возможным. Это обусловило необходимость изготовления динамометра для растачивания собственными силами. С целью поиска наилучшей конструкции был проведен обзор литературных источников, показавший, что для расточных резцов наиболее компактным техническим решением является их тензометрирование. Оно позволяет в одном сигнале получать информацию о двух важнейших параметрах динамики процесса резания: силе и виброперемещениях.

Для реализации такого подхода на стан-

дартный расточной резец наклеили четыре тензорезистора для регистрации силы и виброперемещений его вершины в радиальном направлении и скорости резания. С целью формирования сигнала спроектировали и изготовили электронный блок. Испытание устройства в двух указанных направлениях позволило определить изгибную жесткость резца и коэффициенты преобразования. Опыты по точению доказали способность устройства получать качественные виброграммы динамики процесса резания.

Основными достоинствами спроектированного изделия являются простота конструкции, возможность изготовления в лабораторных условиях и невысокая стоимость. Кроме того, принятая полумостовая дифференциальная схема включения тензорезисторов обеспечивает практическую нечувствительность к деформациям резца от изменения температуры и осевой силы подачи. Динамометрический расточной резец может найти применение при исследованиях динамики процесса резания, разработке адаптивных систем управления станками, в учебном процессе и в других областях технологии машиностроения.

## Список источников

1. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975. 344 с.
2. Полетика М.Ф. Приборы для измерения сил резания. М.: Машгиз, 1962. 108 с.
3. Altintas Y., Weck M. Chatter stability of metal cutting and grinding // CIRP Annals – Manufacturing Technology. 2004. Vol. 53. Iss. 2. P. 619–642. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60032-8](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60032-8).
4. Гусейнов Р.В. Динамометрическая аппаратура для измерения составляющих сил резания при обработке осевым инструментом // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018. Т. 45. № 1. С. 22–29. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2018-45-1-22-29>.
5. Шуляк Я.И. Модернизация установки измерения сил резания на базе динамометра УДМ-600 // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. 2016. № 1. С. 1-12.

6. Павлов И.О., Ушаков М.В., Воробьев И.А. Система для измерения сил резания. Компоновка, тарирование и оценка погрешности // Известия ТулГУ. Серия: Технические науки. 2013. № 10. С. 159–168.
7. Самойлов В.Б. Модернизация системы для измерения сил резания на базе динамометров серии УДМ // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2019. № 5. С. 91–103. <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2019-5-91-103>
8. Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом. Л.: Машиностроение, 1986. 184 с.
9. Марков А.М., Леонов С.Л., Черданцев П.О., Черданцев А.О., Гайст С.В., Лапенков Е.Ю. Особенности обработки сигналов, получаемых от пьезоэлектрических датчиков динамометра для измерения сил резания // Актуальные проблемы в машиностроении. 2017. Т. 4. № 4. С. 89–93.
10. Безъязычный В.Ф., Кордюков А.В., Тимофеев М.В., Фоменко Р.Н. Разработка динамометрической системы для измерения силы резания при точении // Известия МГТУ «МАМИ». 2014. Т. 2. № 1-2. С.171–176. <https://doi.org/10.17816/2074-0530-67842>.
11. Panzera T.H., Souza P.R., Rubio J.C.C., Abrão A.M., Mansur T.R. Development of a three-component dynamometer to measure turning force // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2012. Vol. 62. P. 913–922. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3866-5>.
12. Yaldiz S., Ünsaçar F. Design, development and testing of a turning dynamometer for cutting force measurement // Materials and Design. 2006. Vol. 27. Iss. 10. P. 839–846. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.04.001>.
13. Zhang Yuntao, Wu Wenge, Han Yanwen, Wen Haijun, Cheng Yunping, Liu Lijuan. Design and analysis of a turning dynamometer embedded in thin-film sensor // Micromachines. 2019. Vol. 10. Iss. 3. P. 210. <https://doi.org/10.3390/mi10030210>.
14. Rizal M., Ghani J.A., Mubarak A.Z. Design and development of a tri-axial turning dynamometer utilizing cross-beam type force transducer for fine-turning cutting force measurement // Sensors. 2022. Vol. 22. Iss. 22. P. 8751. <https://doi.org/10.3390/s22228751>.
15. You Zhao, Yulong Zhao, Songbo Liang, Guanwu Zhou. A high performance sensor for triaxial cutting force measurement in turning // Sensors. 2015. Vol.15. Iss. 4. P. 7969–7984. <https://doi.org/10.3390/s150407969>.
16. Zhao You, Zhao Yulong, Gong Taobo. Application of a strain gauge cutting force sensor in machining process monitoring // 14th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (Changsha, 1–3 November 2019). Changsha: IEEE, 2019. P. 891–897.
17. Totis G., Sortino M. Development of a modular dynamometer for triaxial cutting force measurement in turning // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2011. Vol. 51. Iss. 1. P. 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2010.10.001>.
18. Horváth R., Pálkás T., Mátyási G., Drégelyi-Kiss A.G. The design, calibration and adaption of a dynamometer for fine turning // International Journal of Machining and Machinability of Materials. 2017. Vol. 19. Iss. 1. P. 1–16. <https://doi.org/10.1504/IJMMM.2017.081183>.
19. Wang Chao, Rakowski Ricard, Cheng Kai. Design and analysis of a piezoelectric film embedded smart cutting tool // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2013. Vol. 227. Iss. 2. P. 254–260. <https://doi.org/10.1177/0954405412462785>.
20. Елисеев Н. Перспективные ПАВ-датчики Transense/HoneyWell // Электроника: наука, технология, бизнес. 2008. № 1. С. 40–45.
21. Stoney R., Donnell G.E., Geraghty D. Dynamic wireless passive strain measurement in CNC turning using surface acoustic wave sensors // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2013. Vol. 69. P. 1421–1430. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5116-5>.
22. Scheffer C., Heyns P.S. An industrial tool wear monitoring system for interrupted turning // Mechanical Systems and Signal Processing. 2004. Vol. 18. Iss. 5. P. 1219–1242. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2003.09.001>.
23. Li Chen-Jung, Ulsoy A.G. High-precision measurement of tool-tip displacement using strain gauges in precision flexible line boring // Mechanical Systems and Signal Processing. 1999. Vol. 13. Iss. 4. P. 531–546. <https://doi.org/10.1006/mssp.1999.1223>.
24. Liu Qiang, Gao Dayong, Jia Ruhong, Zhou Qiang, Bai Zhengyan. Investigating the cutting force monitoring system in the boring process // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022. Vol. 119. P. 3703–3715. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08451-y>.
25. Немец И. Практическое применение тензорезисторов / пер. с чешск. М.: «Энергия», 1970. Вып. 392. 144 с.

### References

1. Bobrov V.F. *Fundamentals of the theory of metal cutting*. Moscow: Mashinostroenie; 1975, 344 p. (In Russ.).
2. Poletika M.F. *Instruments for measuring cutting forces*. Moscow: Mashgiz; 1962, 108 p. (In Russ.).
3. Altintas Y., Weck M. Chatter stability of metal cutting and grinding. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2004;53(2):619-642. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60032-8](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60032-8).
4. Gusejnov R.V. Dynamometric equipment for measuring the components of cutting strengths when processing materials with axial tools. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences*. 2018;45(1):22-29. (In Russ.).

<https://doi.org/10.21822/2073-6185-2018-45-1-22-29>.

5. Shuliak Y.I., Vasilev V.G. A modernized UDM-600 dynamometer-based setup for the cutting force measurement. *Mashiny i ustanovki: proektirovanie, razrabotka i ekspluatatsiya = Machines and Plants: Design and Exploiting*. 2016;(1):1-12. (In Russ.).
6. Pavlov I.O., Ushakov M.V., Vorobyov I.A. Cutting force measurement system. Layout, taring and error estimation. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. = Proceedings of the Tula State University*. 2013;10:159-168. (In Russ.).
7. Samoylov V.B. Modernization of the system for measuring cutting forces on the basis of UDM dynamometer series. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni N.E. Baumana. Seriya: Seriya Mashinostroyeniye = Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*. 2019;5:91-103. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2019-5-91-103>.
8. Zharkov I.G. *Vibrations when processing with a blade tool*. Leningrad, Mashinostroyeniye; 1986, 184 p. (In Russ.).
9. Markov A.M., Leonov S.L., Cherdancev P.O., Cherdancev A.O., Gayst S.V., Lapenkov E.Y. The features of a processing of signals received from piezoelectric sensors of a dynamometer for measuring cutting forces. *Aktual'nye problemy v mashinostroyenii = Actual Problems in Machine Building*. 2017;4:89-93. (In Russ.).
10. Bezyazichniy V.F., Kordyukov A.V., Timofeev M.V., Fomenko R.N. Development of a dynamometer system for cutting force measurement when turning. *Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta «MAMI» = Scientific Journal "Izvestiya MGTU "MAMI"*. 2014;2(1-2):171-176. <https://doi.org/10.17816/2074-0530-67842>. (In Russ.).
11. Panzera T.H., Souza P.R., Rubio J.C.C., Abrão A.M., Mansur T.R. Development of a three-component dynamometer to measure turning force. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2012;62:913-922. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3866-5>.
12. Yaldız S., Ünsaçar F. Design, development and testing of a turning dynamometer for cutting force measurement. *Materials and Design*. 2006;27(10):839-846. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.04.001>.
13. Zhang Yuntao, Wu Wenge, Han Yanwen, Wen Haijun, Cheng Yunping, Liu Lijuan. Design and analysis of a turning dynamometer embedded in thin-film sensor. *Micromachines*. 2019;10(3):210. <https://doi.org/10.3390/mi10030210>.
14. Rizal M., Ghani J.A., Mubarak A.Z. Design and development of a tri-axial turning dynamometer utilizing cross-beam type force transducer for fine-turning cutting force measurement. *Sensors*. 2022;22(22):8751. <https://doi.org/10.3390/s22228751>.
15. You Zhao, Yulong Zhao, Songbo Liang, Guanwu Zhou. A high performance sensor for triaxial cutting force measurement in turning. *Sensors*. 2015;15(4):7969-7984. <https://doi.org/10.3390/s150407969>.
16. Zhao You, Zhao Yulong, Gong Taobo. Application of a strain gauge cutting force sensor in machining process monitoring. In: *14th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments*. 1–3 November 2019, Changsha. Changsha: IEEE; 2019, p. 891-897.
17. Totis G., Sortino M. Development of a modular dynamometer for triaxial cutting force measurement in turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2011;51(1):34-42. <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2010.10.001>.
18. Horváth R., Pálkás T., Mátyási G., Drégelyi-Kiss A.G. The design, calibration and adaption of a dynamometer for fine turning. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*. 2017;19(1):1-16. <https://doi.org/10.1504/IJMMM.2017.081183>.
19. Wang Chao, Rakowski Ricard, Cheng Kai. Design and analysis of a piezoelectric film embedded smart cutting tool. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2013;227(2):254-260. <https://doi.org/10.1177/0954405412462785>.
20. Eliseev N. Promising surface acoustic wave sensors. Transense/HoneyWell. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes*. 2008;1:40-45. (In Russ.).
21. Stoney R., Donnell G.E., Geraghty D. Dynamic wireless passive strain measurement in CNC turning using surface acoustic wave sensors. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013;69:1421-1430. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5116-5>.
22. Scheffer C., Heyns P.S. An industrial tool wear monitoring system for interrupted turning. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2004;18(5):1219-1242. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2003.09.001>.
23. Li Chen-Jung, Ulsoy A.G. High-precision measurement of tool-tip displacement using strain gauges in precision flexible line boring. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 1999;13(4):531-546. <https://doi.org/10.1006/mssp.1999.1223>.
24. Liu Qiang, Gao Dayong, Jia Ruhong, Zhou Qiang, Bai Zhengyan. Investigating the cutting force monitoring system in the boring process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022;119:3703-3715. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08451-y>.
25. Nemeč I. Practical application of strain gauges, 1970, 144 p. (Russ. ed.: *Prakticheskoe primenenie tenzorezistorov*. Moscow, Energiya; 1970, iss. 392, 144 p.)

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Свинин Валерий Михайлович,**  
д.т.н., профессор,  
профессор кафедры технологий и оборудования  
машиностроительных производств,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия  
✉ svinin\_vm@mail.ru

**Ушаков Владислав Александрович,**  
магистрант,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия  
pren.prr@mail.ru

**Тихонов Александр Геннадиевич,**  
м.н.с. кафедры технологий и оборудования  
машиностроительных производств,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия  
tihonovalex90@mail.ru

**Пятых Алексей Сергеевич,**  
к.т.н.,  
доцент кафедры технологий и оборудования  
машиностроительных производств,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия  
pyatykhas@ex.istu.edu  
<https://orcid.org/0000-0002-4116-9190>

**Конonenko Роман Владимирович,**  
к.т.н.,  
доцент института информационных технологий и  
анализа данных,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия  
istu\_politeh@mail.ru

**Родыгина Альбина Евгеньевна,**  
к.т.н., доцент кафедры технологий и оборудования  
машиностроительных производств,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия  
rodygina.ae@gmail.com

### Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Valeriy M. Svinin,**  
D. Sci. (Eng.), Professor,  
Professor of the Department of Technology and  
Equipment for Machine-Building Production,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia  
✉ svinin\_vm@mail.ru

**Vladislav A. Ushakov,**  
Master's Degree Student,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia  
pren.prr@mail.ru

**Aleksandr G. Tikhonov,**  
Junior Researcher of the Department of Technology and  
Equipment for Machine-Building Production,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia  
tihonovalex90@mail.ru

**Aleksey S. Pyatykh,**  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor  
of the Department of  
Technology and Equipment for Machine-Building  
Production,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia  
pyatykhas@ex.istu.edu  
<https://orcid.org/0000-0002-4116-9190>

**Roman V. Kononenko,**  
Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor at the  
School of Information Technology  
and Data Science,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia  
istu\_politeh@mail.ru

**Albina E. Rodygina,**  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor  
of the Department of Technology and Equipment for  
Machine-Building Production,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia  
rodygina.ae@gmail.com

### 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 21.01.2023; одобрена после рецензирования 01.03.2023; принята к публикации 11.04.2023.

**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 21.01.2023; approved after reviewing 01.03.2023; accepted for publication 11.04.2023.



Научная статья

УДК 536:621.9

<https://elibrary.ru/zeaqr1><https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-284-296>

## Эффективность использования новых видов технологической оснастки при изготовлении нежестких плоскостных алюминиевых деталей

А.В. Храмов<sup>1</sup>, К.С. Жирухин<sup>2✉</sup>, Е.С. Киселев<sup>3</sup><sup>1,2</sup>ООО «ХАЛТЕК-ДоАЛЛ», г. Москва, Россия<sup>3</sup>Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, Россия

**Резюме.** Цель – установить эффективность применения современной системы нулевого базирования SCHUNK VERO-S Aviation при изготовлении нежестких деталей из алюминия в сравнении с существующей технологией их мелкосерийного производства на отечественных самолетостроительных предприятиях. Исследования проводились в условиях механических цехов, осуществляющих изготовление нежестких деталей летательных аппаратов. При этом оценивались временные и экономические затраты на их изготовление при изменении элементов режима резания и величин снимаемых припусков. Предлагаемый директивный технологический процесс был реализован российской инжиниринговой компанией «ХАЛТЕК» на одном из авиационных предприятий Российской Федерации. Длительность технологического процесса составила в общей сложности 14 ч (по существующей в действующем производстве технологии – 300 ч). Установлено, что сокращение длительности процесса удалось достичь за счет исключения двух операций термостабилизации, сокращения машинного и подготовительно-заключительного времени в 2 раза. Показано, что сокращение машинного времени произошло благодаря увеличению элементов режима резания при изготовлении нежесткой алюминиевой детали с использованием данной оснастки, а также за счет изменения стратегии обработки. Показано, что применение технологической оснастки SCHUNK VERO-S Aviation в совокупности с определенной стратегией механической обработки тонкостенной нежесткой заготовки позволяет практически полностью компенсировать деформации, вызванные остаточными напряжениями первого рода. Новая современная технология с использованием оснастки SCHUNK VERO-S Aviation доказывает свою эффективность при мелкосерийном и серийном изготовлении качественных нежестких тонкостенных деталей, соответствующих требованиям конструкторской документации, без короблений, многочисленных операций правки, термо- и временной (пролеживания) стабилизации.

**Ключевые слова:** коробление, остаточные напряжения, базирование, технологическая оснастка, нежесткие детали

**Для цитирования:** Храмов А.В., Жирухин К.С., Киселев Е.С. Эффективность использования новых видов технологической оснастки при изготовлении нежестких плоскостных алюминиевых деталей // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 2. С. 284–296. EDN: ZEAQRL, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-284-296>.

## MECHANICAL ENGINEERING

Original article

## Feasibility of new types of technological equipment in the manufacture of nonrigid flat aluminum parts

Alexander V. Khramov<sup>1</sup>, Kirill S. Zhirukhin<sup>2✉</sup>, Evgeny S. Kiselev<sup>3</sup><sup>1,2</sup>HALTEK-DoALL LLC, Moscow, Russia<sup>3</sup>Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia<sup>1</sup> © Храмов А.В., Жирухин К.С., Киселев Е.С., 2023

**Abstract.** In this work, we assess the efficiency of the SCHUNK VERO-S Aviation clamping system in manufacturing nonrigid aluminum parts in comparison with the existing technology of their small-scale production at domestic aircraft plants. The research was conducted using the facilities of mechanical shops that manufacture nonrigid aircraft parts to estimate the time and economic expenditures involved in their production when changing the cutting mode and machining allowances. The proposed technological process was implemented by the HALTEC Russian engineering company at an aircraft manufacturing plant of the Russian Federation. The duration of the technological process amounted to a total of 14 hours, with the existing production technology lasting for 300 hours. The process duration was reduced by eliminating two thermal stabilization operations and shortening the machine-setting time by 50%. The machine-setting time was reduced by increasing the number of cutting mode elements during manufacturing of a non-rigid aluminum part using this tooling, as well as by using a modified machining strategy. The use of the SCHUNK VERO-S Aviation system together with a modified machining strategy for a thin-walled non-rigid workpiece allows for an almost complete compensation of deformations caused by residual stresses of the first kind. The new modern technology of SCHUNK VERO-S Aviation proves to be effective for the small-volume and series production of thin-walled nonrigid components of the required quality without warping, multiple straightening operations, thermal and temporal stabilization.

**Keywords:** warping, residual stresses, basing, technological jigs and tooling, nonrigid parts

**For citation:** Khramov A.V., Zhirukhin K.S., Kiselev E.S. Feasibility of new types of technological equipment in the manufacture of nonrigid flat aluminum parts. *iPolytech Journal*. 2023;27(2):284-296. (In Russ.). EDN: ZEAQRL, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-284-296>.

## ВВЕДЕНИЕ

Применение поликристаллических композитных материалов из углепластиков находит все более широкое распространение в различных изделиях машиностроения и становится основным при изготовлении современных видов скоростного транспорта. Так, в конструкции пассажирских летательных аппаратов их доля уже достигла 35–45%. Однако более половины объема конструкции самолета по-прежнему изготавливают из металлов. Из них 20–35% приходится на алюминиевые сплавы. По всей вероятности, в ближайшее время эти соотношения мало изменятся.

Принято считать, что алюминиевые сплавы относятся к легко обрабатываемым, и изготовление деталей из них не представляет существенных затруднений. Следует отметить, это не относится к изготовлению тонкостенных нежестких плоскостных деталей.

Недостаточная жесткость алюминиевых деталей в сочетании со сравнительно низкой температурой плавления может привести к исчезновению требуемой по чертежу формы как в процессе их изготовления, так и после его завершения в процессах хранения и эксплуатации.

Коробление готовых изделий в процессе

механообработки – основная проблема, с которой приходится бороться. Везде, где изготавливают сложные детали из алюминия, сталкиваются с проблемой коробления в процессе механической обработки<sup>4,5</sup> [1, 2].

Причиной этого является возникновение в поверхностных слоях нежестких деталей неуравновешенных технологических остаточных напряжений (ТОН). Данный вид ТОН чаще всего вызывается структурно-фазовыми превращениями материала заготовки, а также высокой теплосиловой напряженностью процесса резания [3–5].

Все это приводит как к усложнению и удорожанию технологии изготовления нежестких деталей, как и в ряде случаев к пересмотру конструкции некоторых изделий. В технологический процесс приходится вводить те или иные операции релаксации остаточных напряжений (термические, ультразвуковые и др.) или увеличивать время пролеживания полуфабрикатов деталей между операциями (временная релаксация или естественное старение). Достаточно часто в процессе исправления формы готовых деталей приходится прибегать к выполнению дополнительной операции правки. Это, естественно, увеличивает производственный цикл и себестоимость готовой продукции.

<sup>4</sup> Альтман М.Б. Применение алюминиевых сплавов: справочник. М.: Металлургия, 1985. 344 с.

<sup>5</sup> Беляев А.И. Металловедение алюминия и его сплавов: справочник. М.: Металлургия, 1983. 280 с.

<sup>6</sup> VERO-S Aviation [Электронный ресурс]. URL: [https://halte.ru/catalog/SCHUNK\\_VERO\\_S\\_Aviation\\_2018\\_EN.PDF](https://halte.ru/catalog/SCHUNK_VERO_S_Aviation_2018_EN.PDF) (28.08.2022).

Применение различных стратегий снятия припуска позволяет уменьшить деформации, обусловленные ТОН. Однако в готовой детали после механической обработки деформации остаточные напряжения остаются и в зависимости от условий эксплуатации могут оказывать существенное влияние на геометрическую форму конечного изделия.

В связи с вышеизложенным, повышению эффективности изготовления нежестких плоскостных алюминиевых деталей, как одному из основных видов конструкционных материалов, следует по-прежнему уделять особое внимание. Одним из путей решения данной проблемы является использование современной технологической оснастки, способной осуществлять базирование и закрепление тонкостенных нежестких алюминиевых заготовок таким образом, чтобы в процессе изготовления деталей все причины, вызывающие коробление готовых изделий, были сведены к минимуму.

Из удачных решений последнего времени следует упомянуть:

1. Введение в зону формообразования нежестких плоскостных алюминиевых деталей энергии ультразвукового поля, что существенно уменьшает теплосиловую напряженность съема припусков, следовательно, и интенсивность возникновения ТОН [4, 6].

2. Разработку технологической оснастки компании «SCHUNK» для закрепления заготовок при изготовлении плоских нежестких деталей – SCHUNK VERO-S Aviation<sup>6</sup> [6–8].

Целью настоящих исследований является выявление эффективности применения современной системы «нулевого базирования» SCHUNK VERO-S Aviation при изготовлении нежестких деталей из алюминия и в сравнении ее с существующей технологией мелкосерийного производства на отечественных самолетостроительных предприятиях.

## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Оснастка SCHUNK VERO-S Aviation основана на принципе прямого закрепления заготовки с применением системы «нулевого базирования» (обеспечение постоянства баз при снятии и установке заготовки с погрешностью <0,005 мм). Ряд точек базирования

заготовки детали в оснастке имеет способность «дышать», двигаться, когда это необходимо для уменьшения деформаций заготовки при ее закреплении. При этом происходит подстраивание оснастки под деформируемые поверхности заготовки при снятии напряжений в ходе ее раскрепления. Если в технологическом процессе (ТП) будет использована грамотная стратегия механической обработки, рационально распределяющая припуск по переходам и установкам, то это позволит осуществлять его съем при существующих поводках детали, постоянно оставаясь в массиве металла заготовки [9–22]. Иными словами, основная цель данной стратегии – разбить припуск таким образом, чтобы величина поводок детали при ее изготовлении не превышала его суммарную величину.

Последнее объясняется следующими причинами. Как уже упоминалось, на формирование ТОН наибольшее влияние оказывает теплосиловая напряженность механической обработки и физико-механические свойства самого обрабатываемого материала, определяющие структурно-фазовые изменения в поверхностном слое (ПС) заготовки. Однако необходимо учитывать, что в ходе ( $i+1$ )-й технологической операции изготовления деталей часть материала ПС снимается с припуском, а, следовательно, физико-механические свойства, сформированные в снимаемом слое материала, оказывают несколько уменьшенное влияние на свойства вновь образующегося ПС заготовки или готовой детали. Поэтому при расчете значений ТОН с учетом технологического наследования необходимо использовать следующее выражение [4]:

$$\sigma_{i+1}(h_a) = K_H \cdot \sigma_i(z_{i+1} + h_a) + \sigma_{i+1}^{TC}(h_a),$$

где  $h_a$  – глубина поверхностного слоя, на которой требуется определить значение остаточных напряжений, сформированных в ходе ( $i+1$ )-й операции, мкм;  $K_H$  – коэффициент наследования;  $Z_{i+1}$  – припуск, снимаемый на ( $i+1$ )-й операции, мкм;  $\sigma_i(Z_{i+1} + h_a)$  – значение остаточных напряжений после  $i$ -й операции ТП на глубине ( $Z_{i+1} + h_a$ ), МПа;  $\sigma_{i+1}^{TC}(h_a)$  –

значение остаточных напряжений на рассматриваемой глубине  $h_a$ , обусловленной теплосиловой напряженностью  $(i+1)$ -й операции, МПа.

Коэффициент наследования  $K_n$  является одним из основных оценочных критериев технологического наследования параметров качества ПС, полученных на предшествующей окончательной обработке заготовки технологической операции и оказывающий влияние на параметры готовой детали.

Основными особенностями использования оснастки SCHUNK VERO-S Aviation и технологии являются следующие аспекты:

1. До 95% объема металла удаляется резанием с минимально возможным количеством установов.

2. Компенсация температурного удлинения заготовок и внутренних напряжений без использования подкладок и прихватов.

3. Повторяемость позиционирования между черновой и чистовой обработками и контрольными переходами.

4. При реализации нового техпроцесса обеспечивается существенное сокращение затрат времени на установку и снятие заготовок.

Оснастка может подстроиться под изменение формы очень быстро и с сохранением баз.

Проиллюстрируем вышесказанное результатами опытно-промышленных испытаний, выполненных сотрудниками ГК «ХАЛ-ТЕК» на отечественных авиационных предприятиях.

Технология изготовления нежестких деталей с использованием данной оснастки предполагает непосредственное закрепление заготовки на модулях системы VERO-S. Для этого в заготовку вворачиваются специальные пальцы, которые обеспечивают соединение заготовки и приспособления. На рис. 1 показаны различные способы крепления пальцев [1–3].

Рассмотрим директивный техпроцесс с применением системы VERO-S Aviation на примере детали типа «Шпангоут». При существующем на действующем производстве технологическом процессе заготовка детали проходит 2-кратный процесс стабилизации.

Величина поводок при обработке достигает 10 мм, при этом готовая деталь подвергается дополнительной правке и слесарной подгонке по ответной детали. Длительность ТП изготовления детали по данной технологии составляет 300 ч.

Из курса технологии машиностроения общеизвестно о принципе базирования по плоскости, цилиндрическому и срезанному пальцу. Именно этот принцип использован при закреплении заготовки в системе VERO-S Aviation.

Система включает в себя следующие модули (рис. 2):

1. Модуль типа А – фиксированная, нулевая точка. Повторяемость закрепления осуществляется с погрешностью  $<0,005$  мм.

2. Модуль типа В – модуль, способный перемещаться только вдоль одной оси на  $\pm 6$  мм. Выполняет функцию срезанного пальца для защиты от проворота.

3. Модуль типа С – модуль, перемещающийся в двух осях X и Y на  $\pm 6$  мм. В сочетании с модулями А и В усиливает жесткость закрепления заготовки.

Вышеперечисленные модули А, В и С имеют одинаковую высоту. Таким образом, они образуют силовой треугольник ABC, определяющий позиционирование и нулевую точку заготовки при обработке.

4. Модуль типа D – 3D-модуль, подвижный во всех осях. Способен компенсировать движения заготовки по осям X, Y, Z на  $\pm 6$  мм и по углу наклона вдоль оси Z на  $\pm 2$  градуса.

**Типовой технологический процесс изготовления шпангоута** включает 4 установка:

1. OP00 – подготовительный. На данном установе осуществляется подготовка баз для зажимных штифтов и обработка габаритов детали (рис. 3).

2. OP10 – обработка контура, черновая и получистовая чистовая обработки поверхности № 1 со съемом припуска до 3 мм (с разбивкой припуска по переходам и снятием ТОН путем удаления материала заготовки и их временной релаксации после каждого прохода, рис. 4):

– обработка контура и снятие напряжений;

– сьем 50% припуска и снятие напряжений;

– обработка до припуска 15 мм, 5 мм и 3 мм и снятие припуска после каждого съема.

3. ОР20 – черновая, получистовая и чистовая обработка стороны № 2 со снятием напряжений после удаления каждого слоя припуска (рис. 5).

– сьем 50% припуска и снятие напряжений;

– обработка до припуска 15 мм, 5 мм, 3 мм, 1,5 мм и 0 мм. снятие напряжений после каждого прохода;

– обработка баз под зажимные штифты,

подрезка технических припусков по контуру.

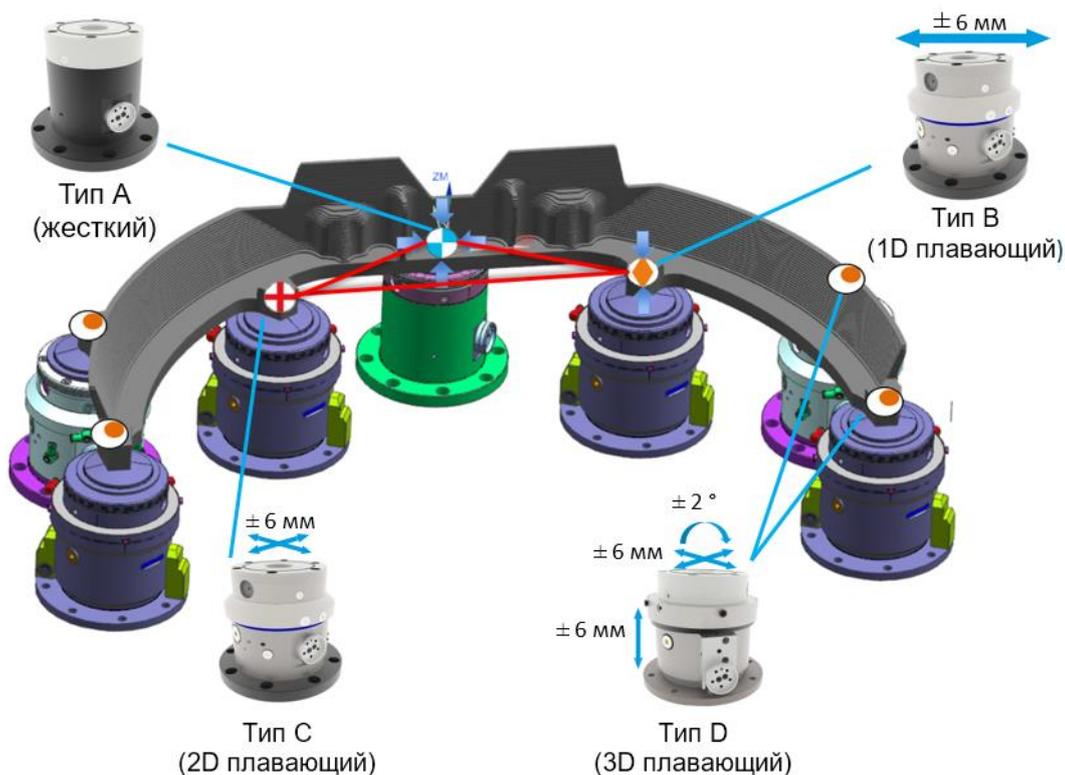
Снятие образующихся в процессе съема материала ТОН происходит на 1-м и 2-м установках.

На 3-м установе происходит обработка поверхности № 1 «как чисто» без снятия напряжений, т.к. согласно расчетам после съема 3 мм материала заготовки внутренних напряжений не образуется или они минимальны.

4. ОР30 – чистовая обработка стороны № 1, подрезка припуска по контуру, снятие детали (рис. 6).



**Рис. 1. Способы крепления базирющих пальцев системы SCHUNK VERO-S Aviation**  
**Fig. 1. Clamping methods of SCHUNK VERO-S Aviation system basing fingers**



**Рис. 2. Схема расстановки зажимных модулей**  
**Fig. 2. Diagram of clamping module arrangement**



Рис. 3. Подготовка технологических баз  
Fig. 3. Preparation of technological bases

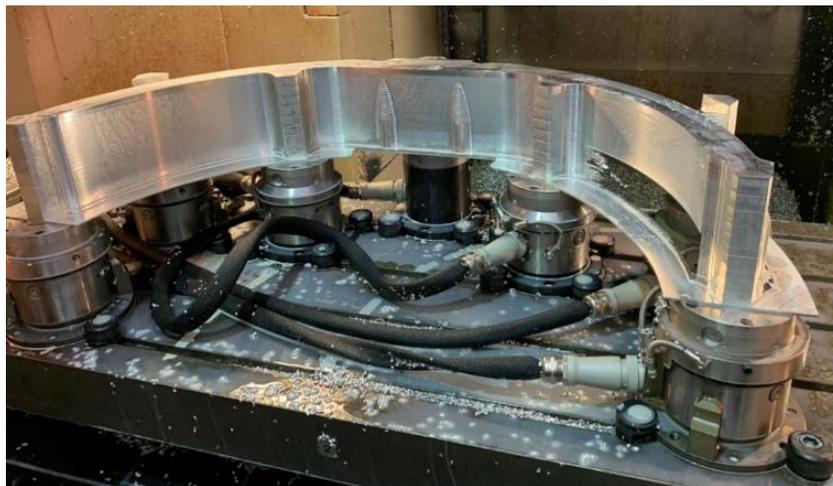


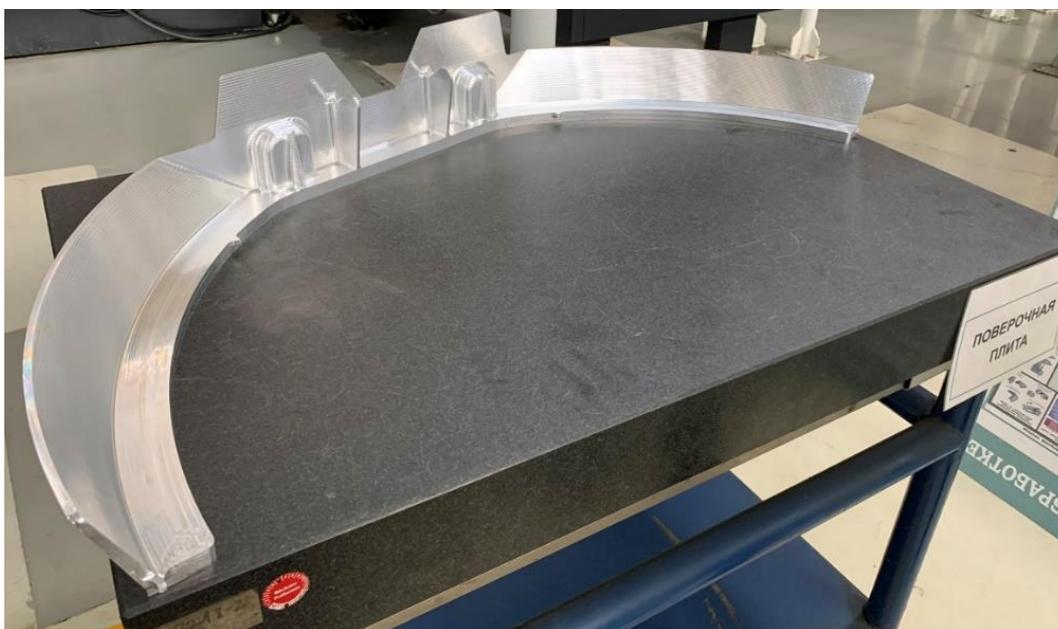
Рис. 4. Обработка контура и поверхности № 1  
Fig. 4. Contour and no.1 surface machining



Рис. 5. Закрепление заготовки при использовании оснастки VERO-S Aviation в процессе черновой, получистовой и чистовой обработок поверхности № 2 детали типа «шпангоут»  
Fig. 5. Workpiece clamping when using VERO-S Aviation tooling during rough, semi-finishing and finishing treatments of the surface no. 2 of the "frame"- type part



**Рис. 6. Закрепление заготовки при использовании оснастки VERO-S Aviation в процессе чистовой обработки поверхности № 1 детали типа «шпангоут»**  
**Fig. 6. Workpiece clamping when using VERO-S Aviation tooling in finishing treatment of No. 1 surface of the "frame"- type part**



**Рис. 7. Контроль плоскостности одной из поверхностей детали на контрольном столе**  
**Fig. 7. Flatness control of one of the part surfaces on the testing table**

На данном установе система VERO-S Aviation работает как классическая система нулевого базирования – без использования функции компенсации ТОН, т.к. снимаемый припуск очень мал.

Перемычки технологического припуска по контуру удаляются слесарным способом, позволяя получить готовую деталь (рис. 7).

Основными геометрическими параметрами, по которым производилась оценка каче-

ства конченого изделия и работоспособности системы SCHUNK VERO-S Aviation, соответственно, являются:

*Плоскостность, допуск  $\pm 0,1$  мм.* Контроль производился плоским щупами 0,1 и 0,05 мм на проход/непроход. Результат: непроход щупа 0,1 мм и 0,05 мм между плоскостью стола и детали свидетельствует об отличном показателе плоскостности.

*Номинальный габаритный размер по*

длине детали –  $1072 \pm 0,5$  мм. Полученный размер составил ровно 1072 мм.

Идентичные результаты получены замерами детали на КИМ.

Повторный контроль параметров производился каждую последующую неделю после производства в течение месяца, изменений параметров зафиксировано не было, дополнительной правки изделия не потребовалось.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Как следует из результатов опытно-промышленных испытаний, оснастка SCHUNK VERO-S Aviation в совокупности с предложенной стратегией механической обработки позволяет компенсировать деформации, вызванные остаточными напряжениями 1-го рода, которые возникают:

– в заготовке при ее изготовлении или термообработке вследствие механических нагрузок и ее неравномерного охлаждения (самые большие по величине);

– в детали-полуфабрикате при механической обработке вследствие силовых и тепловых нагрузок в процессе резания.

Перед каждой последующей операцией механической обработки система позволяет осуществить компенсацию поводов, вызванных остаточными напряжениями, которые, в свою очередь, были сформированы в процессе предыдущей операции (или присутствуют в заготовке в состоянии поставки). На последней операции или установке чистовой припуск (не более 1–1,5 мм) снимается фрезерованием с большими подачами, которое позволяет снизить силы резания и температуру в зоне обработки, сводя к минимуму остаточные напряжения. Представленный директивный технологический процесс был реализован российской инжиниринговой компанией «ХАЛТЕК» на одном из авиационных предприятий Российской Федерации. Длительность технологического процесса составила всего 14 ч. Данный результат был достигнут за счет исключения 2-х операций стабилизации, сокращения машинного времени (увеличены режимы резания при изготовлении нежесткой алюминиевой детали с использованием данной оснастки, изменена стратегия обработки и технологический про-

цесс в целом), а также за счет сокращения подготовительно-заключительного времени в 2 раза. Сравнение временных нормативов текущего технологического процесса предприятия и технологического процесса с применением SCHUNK VERO-S Aviation приведены на рис. 8.

Как следует из анализа результатов испытаний, представленных на рис. 8, данная оснастка позволяет более чем в два раза уменьшить штучно-калькуляционное время обработки заготовки данной детали на станке. Учитывая, что производственный цикл ее изготовления по действующей технологии в механических цехах (300 ч по заводским данным) включает еще операции правки, временной и термостабилизации, а использование оснастки SCHUNK VERO-S Aviation позволяет их исключить, то очевидно, что ее применение является весьма эффективным средством снижения себестоимости и уменьшения вероятности возникновения короблений тонкостенных и сложных по геометрической форме заготовок.

Однако высокая стоимость и сложность переналадки оснастки SCHUNK VERO-S Aviation при частой смене выпускаемой продукции препятствуют широкому использованию ее в единичном производстве:

$$T_{шт.к.} = T_{маш} + T_{всп} + T_{пзв},$$

где  $T_{шт.к.}$  – штучно-калькуляционное время, ч;  $T_{маш}$  – машинное время, ч;  $T_{всп}$  – вспомогательное время, ч;  $T_{пзв}$  – подготовительно-заключительное время, ч.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новая современная технология с использованием оснастки SCHUNK VERO-S Aviation доказывает свою эффективность в первую очередь при мелкосерийном и серийном производствах в процессе изготовления качественных нежестких тонкостенных деталей, соответствующих всем требованиям конструкторской документации без короблений, многочисленных операций правки, временной стабилизации (пролеживание) и термостабилизации.

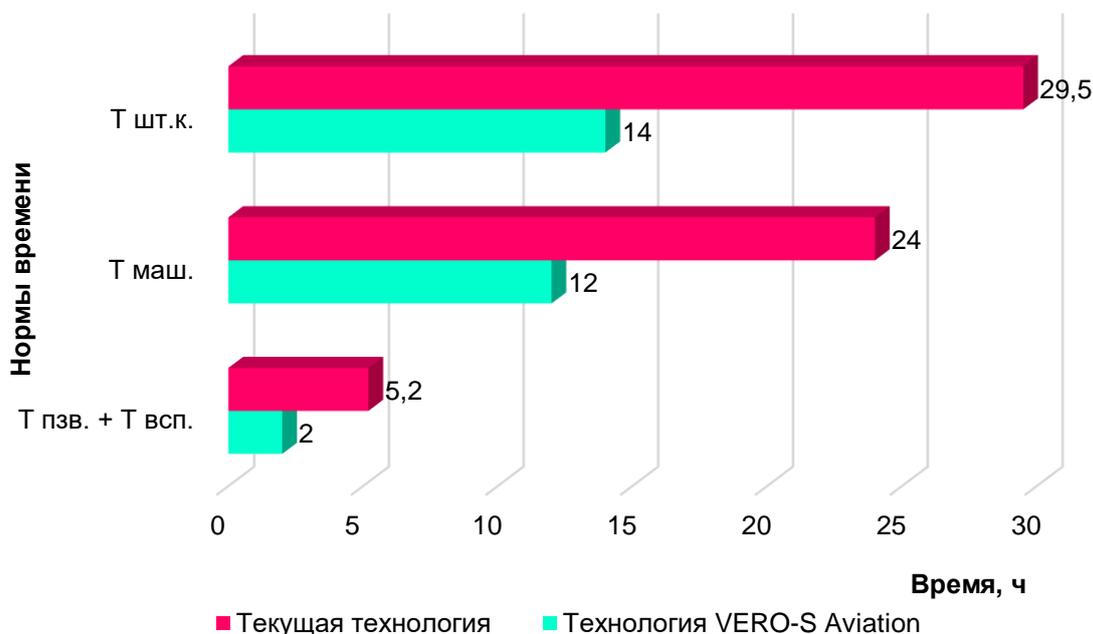


Рис. 8. Нормы времени текущего технологического процесса и технологического процесса с оснасткой SCHUNK VERO-S Aviation

Fig. 8. Time norms of the current technological process and the technological process equipped with SCHUNK VERO-S Aviation tooling

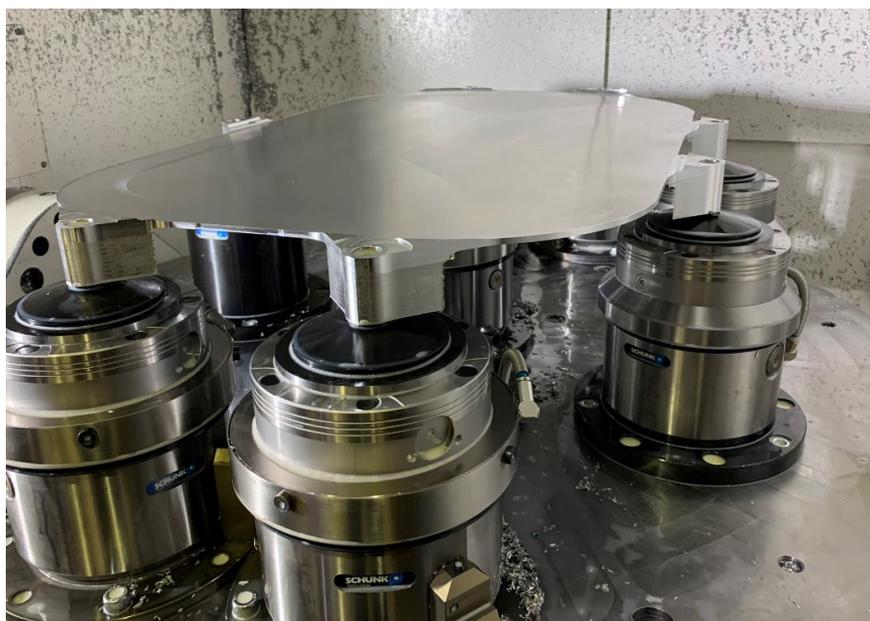
Все это является неотъемлемой частью качественного технологического процесса изготовления любого конечного продукта, будь то самолет, космический корабль, морское судно или пассажирский вагон современного железнодорожного состава, в состав которого входят многочисленные нежесткие и сложные по форме детали из алюминиевых сплавов. Применение данной оснастки позволяет существенно снизить издержки производства за счет снижения машинного и подготовительно-заключительного времени и исключения дополнительных и затратных операций стабилизации, что уменьшает себестоимость конечного продукта и повышает его конкурентоспособность.

Дальнейшее развитие машиностроения предполагает все более существенное снижение материалоемкости и массы изделий. Как упоминалось ранее, одним из направлений этой тенденции и является увеличение в общей номенклатуре машин деталей и узлов с тонкостенными, нежесткими элементами [9–12]. При этом достижение конструктивной прочности может осуществляться за счет применения материалов с бо-

лее высокими прочностными характеристиками (жаропрочные и титановые сплавы).

Изготовление изделий с существенно меньшей массой, но с меньшей прочностью часто связывают с использованием в качестве конструкционных материалов алюминий-магниево-литиевых и магниевых сплавов.

Как показывает анализ современных научно-технических печатных изданий, технологическая оснастка SCHUNK VERO-S Aviation находит широкое применение при производстве деталей летательных аппаратов не только из алюминиевых сплавов, но и из этих материалов [7, 23]. Системы SCHUNK VERO-S Aviation широко используются ведущими предприятиями аэрокосмической промышленности промышленно развитых стран: «Boeing», «Lockheed Martin Aeronautics», «GKN», «Leonardo». Существующие сложности в логистике поставок в Российскую Федерацию в настоящее время сдерживают широкое использование технологической оснастки VERO-S Aviation в действующем отечественном машиностроительном производстве. Российское авиастроение находится на заре их внедрения и применения.



**Рис. 9. Производство детали типа «Люк» с применением оснастки SCHUNK VERO-S Aviation**  
**Fig. 9. Manufacture of part cover type with using SCHUNK VERO-S Aviation system**



**Рис. 10. Производство детали типа «Балка» с применением оснастки SCHUNK VERO-S Aviation**  
**Fig. 10. Manufacture of part rail type with using SCHUNK VERO-S Aviation system**

Однако рациональное использование уже закупленных отечественными предприятиями данных систем (на рис. 9 и 10 представлены примеры закрепления деталей в ходе опытно-промышленных работ, проведенных российской инжиниринговой компанией ООО «ХАЛТЕК-ДоАПЛ» с применением оснастки SCHUNK VERO-S Aviation на ряде российских авиационных

предприятий), а также создание и производство им подобных в России, несомненно, является одним из важнейших резервов снижения себестоимости изготовления отечественной продукции, прежде всего аэрокосмического комплекса. Это обязательно позволит вывести российскую авиационную промышленность на мировой уровень.

**Список источников**

1. Васильевых С.Л., Саитов В.Е. Особенности обработки нежестких валов // Современные наукоемкие технологии. 2012. № 11. С. 67–68.
2. Uchiyama R., Inoue Y., Uchiyama F., Matsumura T. Optimization in Milling of Polymer Materials for High Quality Surfaces // International Journal of Automation Technology. 2021. Vol. 15. Iss. 4. P. 512–520. <https://doi.org/10.20965/ijat.2021.p0512>.
3. Вишняков Я.Д., Пискарев В.Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах. М.: Металлургия, 1989. 254 с.
4. Киселев Е.С., Благовский О.В. Управление формированием остаточных напряжений при изготовлении ответственных деталей. СПб: Лань, 2020, 160 с.
5. Kim Y.S., Wang E. Recognition of machining features for cast then machined parts // Computer-Aided Design. 2002. Vol. 34. Iss. 1. P. 71–87. [https://doi.org/10.1016/S0010-4485\(01\)00058-6](https://doi.org/10.1016/S0010-4485(01)00058-6).
6. Киселев Е.С., Назаров М.В. Особенности технологии изготовления нежестких корпусных деталей: монография. М.: Русайнс, 2022. 236 с.
7. Khramov A., Semdyankin I., Kiselev E. Application of the modern stationary workholding systems for increase capacity and quality of non-rigid aircraft parts // International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: MATEC Web Conference. 2021. Vol. 346. P. 03076. <https://doi.org/10.1051/matecconf/202134603076>.
8. Балашов А.В., Жидецкая А.С., Потапов И.С., Светлова Т.Г. Технологическое обеспечение точности фрезерования нежестких деталей // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. 2015. № 2. С. 18–22.
9. Подпоркин В.Г. Обработка нежестких деталей. М.: Машгиз, 1959. 210 с.
10. Добротворский С.С., Гасанов М.И., Басова Е.В. Опыт создания современных технологий изготовления нежестких деталей с применением передовых CAD/CAM/CAE систем // Вестник Национального технического университета «ХПИ»: сб. науч. тр. темат. вып. Харьков: НТУ «ХПИ», 2015. № 4. С. 37–40.
11. Kang Tzong-Shyan, Nnaji Bartholomew O. Feature representation and classification for automatic process planning systems // Journal of Manufacturing Systems. 1993. Vol. 12. Iss. 2. P. 133–145. [https://doi.org/10.1016/0278-6125\(93\)90013-J](https://doi.org/10.1016/0278-6125(93)90013-J).
12. Kailash S.B., Zhang Y.F., Fuh J.Y. A volume decomposition approach to machining feature extraction of casting and forging components // Computer-Aided Design. 2001. Vol. 33. Iss. 8. P. 605–617.
13. Насад Т.Г., Насад И.П., Шеров К.Т. Обоснование формирования качества поверхности деталей в результате термического воздействия // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2021. № 1. С. 73–78.
14. Насад Т.Г., Шеров К.Т., Насад И.П. Теплофизические аспекты гибридных технологий // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2020. № 1. С. 47–52.
15. Sherov K., Kuanov I., Imanbaev Y., Mussayev M., Karsakova N., Mardonov B., et al. The investigation and improvement of the hardness of the clad surface by thermal friction milling methods // International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. 2022. Vol. 11. Iss. 10. P. 784–792. <https://doi.org/10.18178/ijmerr.11.10.784-792>.
16. Mussayev M., Sherov K., Buzauova T., Ainabekova S., Taskarina A., Sherov A., Gabdyssalik R. Chip formation during thermal friction turn-milling // Journal of Applied Engineering Science. 2021. Vol. 19. Iss. 1. P. 142–147. <https://doi.org/10.5937/jaes0-27510>.
17. Donenbayev B., Sherov K., Mussayev M., Ainabekova S., Mazdubay A., Taskarina A., Tussupova S., Sherov A., Gabdyssalyk R. Investigation of the method of processing holes with a rotary cup cutter with surfacing // Journal of Applied Engineering Science. 2021. Vol. 19. Iss. 4. P. 862–867. <https://doi.org/10.5937/jaes0-27504>.
18. Татанов П.В., Янюшкин А.Р., Шеров К.Т., Янюшкин А.С. Использование вторичного ресурса твердосплавных сменных многогранных пластин в металлообработке // Наука и техника Казахстана. 2021. № 1. С. 85–96. <https://doi.org/10.48081/QEYA2314>.
19. Носов Н.В., Лавро В.Н., Балакиров С.Н. Технологии восстановления ресурса многогранных неперетачиваемых пластин // Известия Самарского научного центра РАН. 2020. Т. 22. № 3. С. 82–86. <https://doi.org/10.37313/1990-5378-2020-22-3-82-86>.
20. Шеров К.Т., Айнабекова С.С., Тусупова С.О., Сагитов А.А., Иманбаев Е.Б. Исследование термофрикционной отрезки с импульсным охлаждением методом конечных элементов // Вестник машиностроения. 2020. № 8. С. 75–78. <https://doi.org/10.36652/0042-4633-20-20-8-75-78>.
21. Седов Д.И., Насад Т.Г. Экспериментальные исследования процесса высокоскоростной обработки с низкотемпературным охлаждением // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. Т. 2. № 2. С. 129–134.
22. Komura N., Matsumoto K., Igari S., Ogawa T., Fujita S., Nakamoto K. Computer aided process planning for rough machining based on machine learning with certainty evaluation of inferred results // International Journal of Automation Technology. 2023. Vol. 17. Iss. 2. P. 120–127. <https://doi.org/10.20965/ijat.2023.p0120>.
23. Черепанов А.А., Балашов А.В., Светлова Т.Г. Совершенствование элементов технологической оснастки для обработки нежестких деталей // Ползуновский альманах. 2012. № 1. С. 223–227.

## References

1. Vasil'evykh S.L., Saitov V.E. Non-rigid shaft processing features. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2012;11:67-68. (In Russ.).
2. Uchiyama R., Inoue Y., Uchiyama F., Matsumura T. Optimization in milling of polymer materials for high quality surfaces. *International Journal of Automation Technology*. 2021;15(4):512-520. <https://doi.org/10.20965/ijat.2021.p0512>.
3. Vishnyakov Ya.D. Piskarev V.D. *Residual stresses control in metals and alloys*. Moscow: Metallurgiya; 1989, 254 p. (In Russ.).
4. Kiselev E.S., Blagovskij O.V. *Controlling residual stress formation in manufacturing of critical parts*. St Petersburg: Lan'; 2020, 160 p. (In Russ.).
5. Kim Y.S., Wang E. Recognition of machining features for cast then machined parts. *Computer-Aided Design*. 2002;34(1):71-87. [https://doi.org/10.1016/S0010-4485\(01\)00058-6](https://doi.org/10.1016/S0010-4485(01)00058-6).
6. Kiselev E.S., Nazarov M.V. *Features of non-rigid body part manufacturing technology*. Moscow: Rusajns; 2022, 236 p. (In Russ.).
7. Khramov A., Semdyankin I., Kiselev E. Application of the modern stationary workholding systems for increase capacity and quality of non-rigid aircraft parts. In: *International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: MATEC Web Conference*. 2021;346:03076. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202134603076>.
8. Balashov Aleksandr V., Zhidetskaya Anna S., Potapov Ivan S., Svetlova Tat'yana G. Technological support of accuracy millings of nonrigid details. *Vestnik Priamurskogo gosudarstvennogo universiteta im. Sholom-Alejhema*. 2015;2:18-22. (In Russ.).
9. Podporin V.G. *Processing of nonrigid parts*. Moscow: Mashgiz; 1959, 210 p. (In Russ.).
10. Dobrotvorskij, S.S., Gasanov M.I., Basova E.V. Experience of modern technology creation for manufacturing of non-rigid parts using advanced CAD/CAM/CAE systems. *Vestnik Nacional'nogo tekhnicheskogo universiteta «HPI»: sbornik nauchnykh trudov tematiceskogo vypuska = Bulletin of the National Technical University "KhPI": collected scientific works of the special issue*. Kharkiv: National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; 2015, iss. 4, p. 37–40. (In Russ.).
11. Kang Tzong-Shyan, Nnaji Bartholomew O. Feature representation and classification for automatic process planning systems. *Journal of Manufacturing Systems*. 1993;12(2):133-145. [https://doi.org/10.1016/0278-6125\(93\)90013-J](https://doi.org/10.1016/0278-6125(93)90013-J).
12. Kailash S.B., Zhang Y.F., Fuh J.Y. A volume decomposition approach to machining feature extraction of casting and forging components. *Computer-Aided Design*. 2001;33(8):605-617.
13. Nasad T.G., Nasad I.P., Sherov K.T. Forming quality characteristics of a workpiece surface by means of thermal effects. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik Saratov State Technical University*. 2021;1:73-78. (In Russ.).
14. Nasad T.G., Sherov K.T., Nasad I.P. Thermophysical aspects of hybrid technologies. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik Saratov State Technical University*. 2020;1:47-52. (In Russ.).
15. Sherov K., Kuanov I., Imanbaev Y., Mussayev M., Karsakova N., Mardonov B., et al. The investigation and improvement of the hardness of the clad surface by thermal friction milling methods. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*. 2022;11(10):784-792. <https://doi.org/10.18178/ijmerr.11.10.784-792>.
16. Mussayev M., Sherov K., Buzauova T., Ainabekova S., Taskarina A., Sherov A., Gabdyssalik R. Chip formation during thermal friction turn-milling. *Journal of Applied Engineering Science*. 2021;19(1):142-147. <https://doi.org/10.5937/jaes0-27510>.
17. Donenbayev B., Sherov K., Mussayev M., Ainabekova S., Mazdubay A., Taskarina A., Tussupova S., Sherov A., Gabdyssalyk R. Investigation of the method of processing holes with a rotary cup cutter with surfacing. *Journal of Applied Engineering Science*. 2021;19(4):862-867. <https://doi.org/10.5937/jaes0-27504>.
18. Tatanov P.V., Yanyushkin A.R., Sherov K.T., Yanyushkin A.S. Use of the secondary resource of hard-alloy replaceable multi-face plates in metalworking. *Nauka i tekhnika Kazahstana*. 2021;1:85-96. (In Russ.). <https://doi.org/10.48081/QEYA2314>.
19. Nosov N.V., Lavro V.N., Balakirov S.N. Technology of resource recovery of polyhedral non-reachable plates. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2020;22(3):82-86. <https://doi.org/10.37313/1990-5378-2020-22-3-82-86>.
20. Sherov K.T., Ainabekova S.S., Tusupova S.O., Sagitov A.A., Imanbaev E.B. Finite element method research of thermofriction cutting-off with pulsed cooling. *Vestnik mashinostroenie*. 2020;8:75-78. <https://doi.org/10.36652/0042-4633-20-20-8-75-78>. (In Russ.).
21. Sedov D.I., Nasad T.G. Experimental researches of process of high-speed processing with low temperature cooling. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik Saratov State Technical University*. 2011;2(2):129-134. (In Russ.).
22. Komura N., Matsumoto K., Igari S., Ogawa T., Fujita S., Nakamoto K. Computer aided process planning for rough machining based on machine learning with certainty evaluation of inferred results. *International Journal of Automation Technology*. 2023;17(2):120-127. <https://doi.org/10.20965/ijat.2023.p0120>.
23. Cherepanov A.A., Balashov A.V., Svetlova T.G. Improving tooling package elements for non-rigid part processing. *Polzunovskiy al'manakh*, 2012;1:223–227. (In Russ.).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Храмов Александр Владимирович,**  
заведующий базовой кафедрой «Инновационные технологии мехобработки»,  
Ульяновский государственный технический университет,  
432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32, Россия;  
президент ООО «ХАЛТЕК-ДоАЛЛ»,  
117638, г. Москва, ул. Одесская, 2, Россия  
Alexander.Khramov@haltec.ru

**Жирухин Кирилл Сергеевич,**  
ведущий инженер,  
ООО «ХАЛТЕК-ДоАЛЛ»,  
117638, г. Москва, ул. Одесская, 2, Россия  
✉ Kirill.Zhirukhin@haltec.ru

**Киселев Евгений Степанович,**  
д.т.н., профессор,  
вед.н.с. департамента научных исследований и инноваций,  
Ульяновский государственный технический университет,  
432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32, Россия  
kec.ulstu@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-1745-9016>

### Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

### Информация о статье

Статья поступила в редакцию 22.03.2022; одобрена после рецензирования 18.04.2022; принята к публикации 25.05.2023.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Alexander V. Khramov,**  
Head of the department «Innovative technologies of machining»  
Ulyanovsk State Technical University,  
32, Severny Venets, Ulyanovsk 432027, Russia;  
President of HALTEC-DoALL LLC,  
2, Odesskaya St., Moscow 117638, Russia  
Alexander.Khramov@haltec.ru

**Kirill S. Zhirukhin,**  
Chief Engineer,  
of "HALTEK – DoALL" LLC,  
2, Odesskaya St., Moscow 117638, Russia  
✉ Kirill.Zhirukhin@haltec.ru

**Evgeny S. Kiselev,**  
Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Leading Researcher of the Department of Scientific Research and Innovation,  
Ulyanovsk State Technical University,  
32, Severny Venets, Ulyanovsk 432027, Russia  
kec.ulstu@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-1745-9016>

### 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 22.03.2022; approved after reviewing 18.04.2022; accepted for publication 25.05.2023.



Научная статья  
УДК 662.62:662.75:662.94.069  
<https://elibrary.ru/xkcizp>  
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-297-309>

## Влияние кавитационной обработки на свойства водоугольных суспензий с добавками пирогенетической жидкости и характеристики их распыления пневматической форсункой

Д.В. Гвоздяков<sup>1✉</sup>, А.В. Зенков<sup>2</sup>, Л.И. Мальцев<sup>3</sup>, Ю.С. Поджаров<sup>4</sup>

<sup>1,2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

<sup>3,4</sup>Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

**Резюме.** Цель – проведение экспериментальных исследований, направленных на изучение реологических свойств и характеристик распыления пневматической форсункой водоугольных суспензий с добавками пирогенетической жидкости. Объектом исследования являлась водоугольная суспензия, приготовленная на основе длиннопламенного угля с помощью роторного гидродинамического генератора кавитаций. Динамическая вязкость водоугольных суспензий исследовалась при помощи ротационного вискозиметра Реотест-2. Размер капель распыленных суспензий определялся при помощи метода Interferometric Particle Imaging. При проведении экспериментов использовалась пневматическая форсунка, предназначенная для распыления водоугольных топлив. Значение теплотворной способности составов водоугольных суспензий оценивалось теоретическим методом при помощи уравнения Д.И. Менделеева для расчета низшей теплоты сгорания органических веществ с определенным элементным составом. Установлено, что после кавитационной обработки двухкомпонентного водоугольного топлива в течение 90 с значение вязкости снижается на 48%. Показано, что в случае замещения воды аналогичным по массе (от 5 до 20%) количеством пирогенетической жидкости вязкость водоугольного топлива увеличивается. Кавитационная обработка данных суспензий способствует снижению вязкости таких трехкомпонентных водоугольных топлив на 27–45%. Исследования статической седиментации показали, что после кавитационной обработки водоугольных суспензий осаждение частиц угля начинается после 24 часов. Установлено, что обработка суспензий в течение 27 и 90 с в роторном гидродинамическом генераторе кавитаций способствует снижению среднего размера капель в струе после распыления пневматической форсункой на 5,5% и 6,5%, соответственно. Введение в состав водоугольного топлива пирогенетической жидкости приводит к росту теплотворной способности топлива на 6,9%. Таким образом, использование пирогенетической жидкости в составе водоугольного топлива и его обработка в роторном гидродинамическом генераторе кавитаций позволяют решить проблему низкой реакционной способности водоугольных суспензий.

**Ключевые слова:** водоугольная суспензия, пирогенетическая жидкость, генератор кавитаций, вязкость, распыление, пневматическая форсунка

**Финансирование:** Исследования выполнены при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-79-00124).

**Для цитирования:** Гвоздяков Д.В., Зенков А.В., Мальцев Л.И., Поджаров Ю.С. Влияние кавитационной обработки на свойства водоугольных суспензий с добавками пирогенетической жидкости и характеристики их распыления пневматической форсункой // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 2. С. 297–309. EDN: XKCIZP, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-297-309>.

## Influence of cavitation treatment on the properties of coal-water slurries with pyrogenetic liquid and characteristics of their atomization by a pneumatic nozzle

Dmitry V. Gvozdyakov<sup>1✉</sup>, Andrey V. Zenkov<sup>2</sup>, Leonid I. Maltsev<sup>3</sup>, Yuri S. Podzharov<sup>4</sup>

<sup>1,2</sup>National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

<sup>3,4</sup>Federal State Budgetary Institution of Science named after S.S. Kutateladze Institute of Thermophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

**Abstract.** Experimental studies were conducted to investigate the rheological properties and atomization characteristics of coal-water slurries sprayed by a pneumatic nozzle with addition of pyrogenetic liquid. The research object was coal-water slurries prepared on the basis of long-flame coal using a rotary hydrodynamic cavitation generator. The dynamic viscosity of samples was investigated using a Reotest-2 rotary viscometer. The droplet size of atomized slurries was determined by the interferometric particle imaging method. A pneumatic nozzle designed for spraying of coal-water slurry fuels was used. The calorific value of coal-water slurry compositions was estimated by a theoretical method using Mendeleev's equation for calculating the lower heating value of combustion of organic substances with a certain elemental composition. It was found that cavitation treatment of a two-component coal-water fuel for 90 s leads to a 48% decrease in its viscosity. It was shown that substitution of water with a similar amount of pyrogenic liquid (5 to 20%) leads to an increase in the viscosity of coal-water fuels. The cavitation treatment of such slurries reduces the viscosity of the respective three-component coal-water fuels by 27–45%. According to the results of static sedimentation studies, coal particles start to precipitate 24 h after the onset of cavitation treatment. The treatment of the slurries under consideration for 27 and 90 s in a rotary hydrodynamic cavitation generator was established to reduce the average droplet size in the jet after spraying with a pneumatic nozzle by 5.5% and 6.5%, respectively. The introduction of pyrogenetic liquid into the composition of coal-water fuels increases their calorific value by 6.9%. It can be concluded that the use of pyrogenetic liquid in the composition of coal-water slurry fuels followed by their treatment in a rotary hydrodynamic cavitation generator can solve the problem of low reactivity of coal-water slurries.

**Keywords:** coal-water slurry, pyrogenetic liquid, cavitation generator, viscosity, spraying, pneumatic atomizer

**Funding:** The research was funded by the Russian Science Foundation (project No. 22-79-00124).

**For citation:** Gvozdyakov D.V., Zenkov A.V., Maltsev L.I., Podzharov Yu.S. Influence of cavitation treatment on the properties of coal-water slurries with pyrogenetic liquid and characteristics of their atomization by a pneumatic nozzle. *iPolytech Journal*. 2023;27(2):297-309. (In Russ.). EDN: XKCIZP, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-297-309>.

### ВВЕДЕНИЕ

Переход к экологически чистым энергетическим технологиям, обусловленный современными требованиями к охране окружающей среды, предполагает поиск и создание новых источников энергии, в том числе и топлив [1]. Одним из способов удовлетворить эти требования и сохранить на прежнем уровне показатели по выработке энергии тепловыми электростанциями является переход на многокомпонентные топлива [2]. В связи с этим изучение свойств и характеристик таких топлив во многих странах является актуальным [3]. Наиболее перспективными и доступными котельными топливами с точки зрения энергетики, экологии и экономики являются водоугольные суспензии (ВУС) [4]. Например, их использование в промышленной энергетике

позволяет снизить на 16–20% выбросы в атмосферу оксидов азота и серы [5, 6]. Именно наличие воды в составе таких топлив делает их конкурентоспособными по нескольким критериям. Первый, как отмечалось выше, – экологичность. Второй – пожаробезопасность. Третий – возможность изменять калорийность за счет введения в их состав горючих добавок в относительно небольших количествах. Последний критерий и позволяет считать ВУС многокомпонентным топливом. В качестве третьих компонентов водоугольных суспензий могут использоваться отходы различного происхождения [7], например, производственные. Их сжигание в составе ВУС позволяет решить проблему безопасной утилизации.

Одними из перспективных компонентов ВУС являются легкие продукты пиролиза

древесины – пирогенетическая жидкость (ПЖ). Количество такой жидкости составляет более 25–35 масс.% от получаемого продукта (например, древесный уголь), а ее свойства и характеристики зависят от технических условий процесса пиролиза. Прямая утилизация (сброс в систему канализации, отвод в почву или на открытый грунт) такой жидкости невозможна. Связано это с содержанием в ней различных химических соединений, количество которых зависит от условий процесса пиролиза. При этом пирогенетическая жидкость обладает энергетической ценностью (содержит остаточные углеводороды пиролизного масла) и может быть эффективно использована в качестве компонента водоугольных топлив. Введение в состав водоугольных топлив пирогенетической жидкости позволит решить проблему ее безопасной утилизации. Объясняется это тем, что в условиях высокотемпературного сжигания количество вредных компонентов снижается в результате осаждения, а объемы их выбросов в атмосферу становятся минимальными.

В настоящее время остается много нерешенных проблем, связанных с использованием пирогенетической жидкости в качестве компонента ВУС. Например, отсутствуют данные о допустимых значениях концентрации (С) пирогенетической жидкости в составе топлива в зависимости от марки угля; остаются неизвестными свойства и характеристики таких суспензий. Последние, как известно [8, 9], определяют эффективность процессов распыления и сжигания ВУС. Установление таких закономерностей позволит обеспечить необходимые условия для эффективного и безопасного сжигания ВУС в камерах сгорания энергетических котлов. Такая информация поможет в дальнейшем проектировщикам и конструкторам создавать энергетическое оборудование, обеспечивающее эффективное сжигание многокомпонентных топлив. Проведение экспериментальных и теоретических исследований свойств и характеристик водоугольных суспензий с добавками пирогенетической жидкости позволит получить основные закономерности ее влияния на реологические свойства и энергетические характеристики топлива.

В силу того, что ПЖ является достаточно сложной жидкостью, свойства и характеристики ВУС с добавками ПЖ (вязкость, плотность, параметры распыления, зажигания и горения) существенно зависят от ее компонентного состава [10, 11]. При этом введение в состав водоугольного топлива жидкого горючего компонента может изменить теплотворную способность топлива. Кроме того, исследования влияния пирогенетической жидкости на свойства и характеристики ВУС позволят установить действительное влияние такого производственного отхода на исследуемые параметры в сравнении с двухкомпонентным водоугольным топливом, что позволит существенно расширить информационную базу научно-технической информации о перспективных экологических водоугольных суспензиях. Поэтому целью работы является проведение экспериментальных исследований, направленных на изучение свойств и характеристик распыления пневматической форсункой водоугольных суспензий с добавками пирогенетической жидкости.

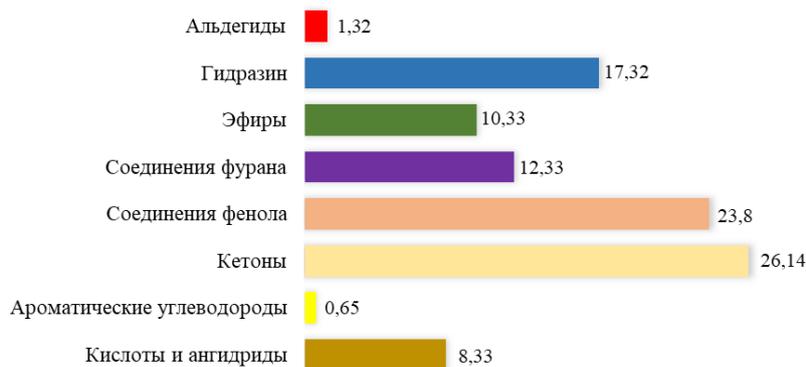
## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

При подготовке образцов водоугольных суспензий использовались следующие: измельченный до фракции менее 120 мкм длиннопламенный уголь, водопроводная вода из системы водоснабжения и пирогенетическая жидкость. Основные характеристики компонентов ВУС представлены ниже.

Уголь: зольность – 11,5%; выход летучих – 40,5%; содержание углерода – 56,4%; содержание водорода – 4%; суммарная доля кислорода, азота и серы – 15,8%; влажность – 11,5%, низшая теплота сгорания – 21,9 МДж/кг.

Водопроводная вода: плотность – 997,0 кг/м<sup>3</sup>; рН – 6,8.

Как отмечалось выше, свойства и компонентный состав пирогенетической жидкости могут отличаться от условий технологического процесса пиролиза, поэтому при проведении исследований использовались усредненные значения параметров: плотность – 1044,0 кг/м<sup>3</sup>, рН – 2,3, низшая теплота сгорания (Q) – 2,8 МДж/кг. Химический состав ПЖ представлен на рис. 1.



**Рис. 1. Усредненные значения основных компонент пирогенетической жидкости, %**  
**Fig. 1. Averaged values of the main components of the pyrogenetic fluid, %**

При проведении экспериментальных исследований использовалось несколько составов ВУС. Содержание угля в каждом топливе оставалось неизменным. Отличительной особенностью являлось то, что вода в составе ВУС замещалась аналогичным по массе количеством пирогенетической жидкости. Компонентные составы суспензий представлены в табл. 1.

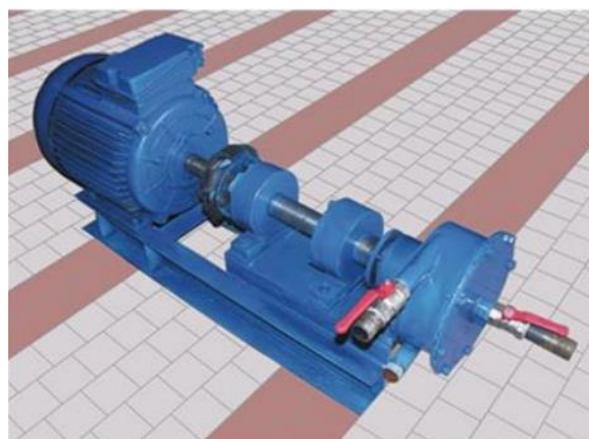
**Таблица 1. Водоугольные суспензии**  
**Table 1. Coal-water slurries**

ВУС <sub>количество ПЖ</sub>	Уголь	Вода	Пирогенетическая жидкость
	% по массе		
ВУС <sub>0</sub>	50	50	0
ВУС <sub>5</sub>		45	5
ВУС <sub>10</sub>		40	10
ВУС <sub>15</sub>		35	15
ВУС <sub>20</sub>		30	20

Примечания: ВУС – водоугольные суспензии;  
 ПЖ – пирогенетическая жидкость.

Кавитационная обработка водоугольных суспензий осуществлялась на роторном гидродинамическом генераторе кавитации (РГДГК), разработанном в Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук. Эффективность данного способа обусловлена тем, что при кавитационном воздействии на водоугольное топливо частицы угля подвергаются дополнительному разрушению. Возникает это явление после схлопывания паровых микропузырьков, возникающих возле частиц угля. Кавитационная обработка ВУС способ-

ствует увеличению пористости частиц угля, что вносит дополнительный положительный эффект при сжигании водоугольного топлива [13]. Данный способ обработки ВУС в составе с ПЖ способствует также гомогенизации пирогенетической жидкости. В исходном состоянии эта жидкость является существенно неоднородной из-за наличия в ней крупных нерастворенных фрагментов пиролизного масла. При этом получаемая суспензия обладает высокой стабильностью. На рис. 2 представлен роторный гидродинамический генератор кавитаций и время обработки ( $\tau$ ) ВУС (табл. 1).



**Рис. 2. Роторный гидродинамический генератор кавитации**  
**Fig. 2. Rotary hydrodynamic cavitation generator**

Исследуемые составы ВУС<sub>количество ПЖ</sub> время обработки.  
 1) ВУС<sub>0</sub><sup>27</sup>; 2) ВУС<sub>0</sub><sup>90</sup>; 3) ВУС<sub>5</sub><sup>27</sup>; 4) ВУС<sub>5</sub><sup>90</sup>;  
 5) ВУС<sub>10</sub><sup>27</sup>; 6) ВУС<sub>10</sub><sup>90</sup>; 7) ВУС<sub>15</sub><sup>27</sup>; 8) ВУС<sub>15</sub><sup>90</sup>;  
 9) ВУС<sub>20</sub><sup>27</sup>; 10) ВУС<sub>20</sub><sup>90</sup>.

Таким образом, при проведении исследований использовалось десять составов ВУС, отличающихся между собой компонентным составом и временем обработки в роторном гидродинамическом генераторе кавитаций.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Вязкость топлив, в том числе и угольных суспензий, является очень важным параметром, определяющим качественные и количественные характеристики газокапельного потока (например, средний размер ка-

пель) после распыления [14–16]. Также жидкости, обладающие малыми значениями вязкости, лучше подвержены диспергированию в среде воздуха (или окислителя в условиях высоких температур камер) [17]. Динамическая вязкость ВУС (см. табл. 1 и рис. 2) исследовалась при помощи ротационного вискозиметра Реотест-2. На рис. 3 и 4 представлены зависимости изменения динамической вязкости ВУС в зависимости от компонентного состава суспензии и времени обработки в РГДГК.

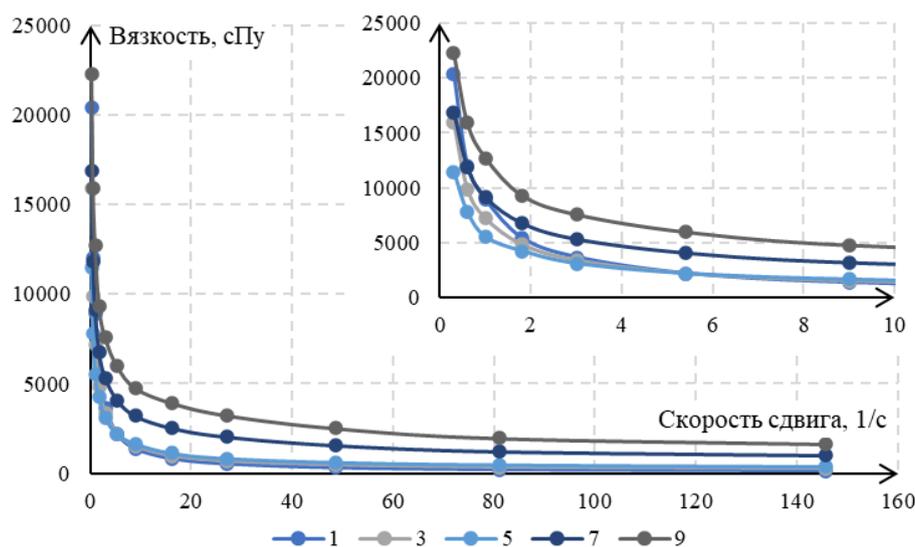


Рис. 3. Динамическая вязкость суспензий после 27 с в роторном гидродинамическом генераторе кавитаций  
Fig. 3. Dynamic viscosity of slurries after 27s treatment in a rotary hydrodynamic cavitation generator

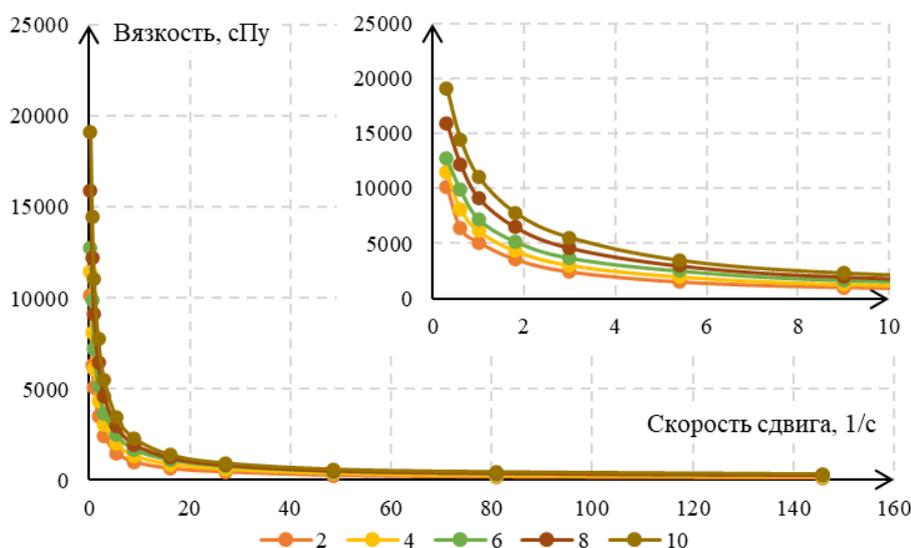


Рис. 4. Динамическая вязкость суспензий после 90 с в роторном гидродинамическом генераторе кавитаций  
Fig. 4. Dynamic viscosity of slurries after 90s treatment in a rotary hydrodynamic cavitation generator

Результаты экспериментальных исследований динамической вязкости ВУС с добавками ПЖ в зависимости от времени обработки в роторном гидродинамическом генераторе кавитаций показали, что продолжительность кавитационного воздействия на водоугольные суспензии (см. табл. 1, рис. 2) оказывает влияние на значение динамической вязкости ВУС. Установлено, что в исследованном диапазоне изменения времени кавитационной обработки ВУС от 27 до 90 с динамическая вязкость суспензий снижается:

- для ВУС<sub>0</sub> на 48%;
- для ВУС<sub>5</sub> на 27%;
- для ВУС<sub>10</sub> на 30%;
- для ВУС<sub>15</sub> на 33%;
- для ВУС<sub>20</sub> на 45%.

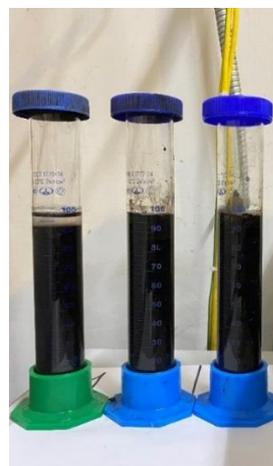
Существенное (на 48%) снижение вязкости двухкомпонентного водоугольного топлива объясняется тем, что при обработке ВУС в РГДГК кавитационный эффект приводит к дополнительному дроблению частиц угля и гомогенизации суспензии. В результате чего такая суспензия получается гомогенизированной. Замещение в составе ВУС воды аналогичным по массе количеством пирогенетической жидкости приводит к увеличению вязкости суспензии. При этом кавитационная обработка таких суспензий также способствует снижению вязкости. В сравнении с двухкомпонентным ВУС эффект менее значительный. Изменение составляет 27–45% в результате того, что, во-первых, вязкость ПЖ выше, чем вязкость воды; во-вторых, наличие в составе ПЖ фрагментов пиролизного масла способствует увеличению вязкости ВУС даже после кавитационной обработки суспензии.

Седиментационная устойчивость изучаемых суспензий оценивалась методом измерения объема отделившейся жидкой фазы ВУС в прозрачном сосуде со шкалой. Необходимость исследовать данный параметр вызвана тем, что для водоугольных суспензий характерно отделение взвеси в состоянии статики. На рис. 5 представлена иллюстрация результатов расслоения трех составов ВУС за 3 ч после наполнения емкостей.

В табл. 2 представлены результаты для всех топлив. Исходный объем ВУС составлял

100 мл. Исследования выполнены для трех временных диапазонов:

- расслоение топлива через 3 ч статической выдержки;
- расслоение топлива через 24 ч статической выдержки;
- расслоение топлива через 72 ч статической выдержки.



**Рис. 5. Стабильность образцов водоугольных суспензий через 3 ч: 1 – ВУС<sub>20</sub>; 2 – ВУС<sub>20</sub><sup>27</sup>; 3 – ВУС<sub>20</sub><sup>90</sup>**  
**Fig. 5. Stability of coal-water slurry (CWS) samples in 3 hours: 1 – CWS<sub>20</sub>; CWS<sub>20</sub><sup>27</sup>; 3 – CWS<sub>20</sub><sup>90</sup>**

**Таблица 2. Расслоение водоугольных суспензий**  
**Table 2. Coal-water slurry stratification**

Состав ВУС/Время выдержки ВУС	Расслоение ВУС, мл		
	3 ч	24 ч	72 ч
ВУС <sub>0</sub>	12	14	18
ВУС <sub>0</sub> <sup>27</sup>	0	2	3
ВУС <sub>0</sub> <sup>90</sup>	0	2	3
ВУС <sub>5</sub>	11	12	17
ВУС <sub>5</sub> <sup>27</sup>	0	0	1
ВУС <sub>10</sub>	9	11	13
ВУС <sub>10</sub> <sup>27</sup>	0	0	1
ВУС <sub>10</sub> <sup>90</sup>	0	0	1
ВУС <sub>15</sub>	7	10	12
ВУС <sub>15</sub> <sup>27</sup>	0	0	1
ВУС <sub>15</sub> <sup>90</sup>	0	0	1
ВУС <sub>20</sub>	6	10	12
ВУС <sub>20</sub> <sup>27</sup>	0	0	1
ВУС <sub>20</sub> <sup>90</sup>	0	0	1

*Примечание:* ВУС – водоугольных суспензий.

Анализ результатов исследования статической седиментации показал, что обработка ВУС в РГДГК оказывает существенное влияние на процесс расслоения суспензии. За

первый интервал времени не установлено эффекта осаждения частиц угля в составах, обработанных в кавитационном генераторе (табл. 1, цифры, выделенные жирным шрифтом). Расслоение ВУС характерно только для необработанных суспензий в РГДГК. Через 24 ч установлены первые характерные признаки расслоения ВУС, обработанных в РГДГК (составы ВУС<sub>0</sub>, ВУС<sub>0</sub><sup>27</sup> и ВУС<sub>0</sub><sup>90</sup>). Для суспензий с добавками пирогенетической жидкости в данном временном диапазоне осаждение частиц угля не выявлено. Через 72 ч выдержки ВУС расслоение установлено для всех изучаемых составов. При этом для вязких суспензий (в составе с пирогенетической водой) в сравнении с двухкомпонентным водоугольным топливом расслоение компонент суспензии составило не более 1 мл.

Для того, чтобы оценить влияние кавитационной обработки ВУС на характеристики распыления, проведены экспериментальные исследования дисперсного состава струи. При

проведении экспериментов использовалась пневматическая форсунка (рис. 6), предназначенная для распыления водоугольных топлив, разработанная Институтом теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук [12].

Процесс распыления ВУС пневматической форсункой на стенде (аэродинамический имитатор камеры сгорания энергетического котла) для исследования характеристик струи топлива после распыления, разработанный в Томском политехническом университете, представлен на рис. 7. Процесс распыления осуществлялся при давлении ВУС 0,05 МПа и давлении воздуха 0,3 МПа.

Эффект кавитационной обработки оценивался для двухкомпонентных ВУС (ВУС<sub>0</sub><sup>27</sup> и ВУС<sub>0</sub><sup>90</sup>) и наиболее вязких топлив (ВУС<sub>20</sub><sup>27</sup> и ВУС<sub>20</sub><sup>90</sup>) в сравнении с образцами суспензии, приготовленными в шаровой барабанной мельнице (ШБМ).



Рис. 6. Пневматическая форсунка  
Fig. 6. Pneumatic atomizer



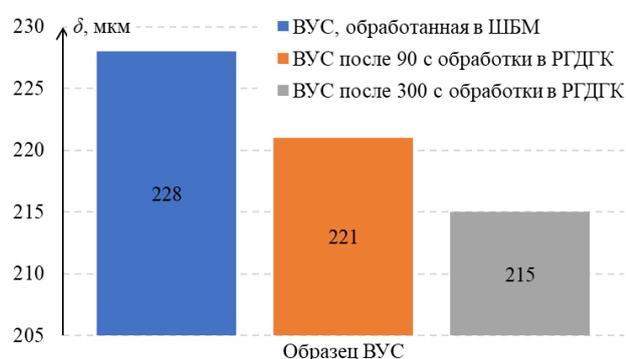
Рис. 7. Процесс распыления водоугольных суспензий  
Fig. 7. Spraying of coal-water slurries

Размер капель ( $\delta$ ) определялся при помощи метода IPI (от англ. Interferometric Particle Imaging) [18–20]. Метод применяется для измерения мгновенных пространственных распределений размеров (от 10 до 1000 мкм) капель в потоке. Основан на восстановлении размеров капель по частоте интерференционной картины от точечных источников света, возникающих на сферических каплях жидкости при освещении их мощным лазерным импульсом (лазерный нож). Высокоскоростная регистрация капель в струе осуществлялась на расстоянии 100 мм от сопла форсунки.

Влияние кавитационной обработки ВУС на изменение среднего размера капель после распыления представлены на рис. 8 и 9 в виде гистограмм. Анализ результатов показал, что увеличение времени обработки ВУС способствует снижению среднего размера капель суспензии в струе.

После обработки двухкомпонентного ВУС в РГДРК в течение 27 с происходит снижение среднего размера капель при распылении на 3,1%. При увеличении времени обработки до 90 с средний размер капель снижается на 5,7%. Обработка в течение 27 с в РГДРК суспензионного топлива с добавлением ПЖ приводит к снижению среднего размера капель на 1,7%, а обработка в течение 300 с – на 3,8%.

По результатам исследований влияния



**Рис. 8. Изменение средних размеров капель двухкомпонентной водоугольной суспензии (ВУС<sub>0<sup>27</sup></sub> и ВУС<sub>0<sup>90</sup></sub>)**

**Fig. 8. Variation of the average droplet sizes of a two-component coal-water slurry (CWS<sub>0<sup>27</sup></sub> and CWS<sub>0<sup>90</sup></sub>)**

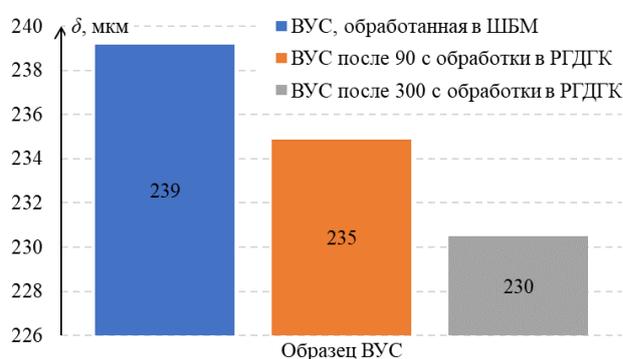
кавитационной обработки ВУС на изменение средних размеров капель топлива после распыления можно сделать следующий вывод. Снижение среднего размера капель ВУС, в том числе и в составе с пирогенетической жидкостью, окажет положительное влияние на характеристики зажигания и горения суспензии. Следует отметить, что снижение вязкости ВУС также окажет положительное влияние на работу насосного оборудования – снижение затрат энергии на перекачивание менее вязкого топлива (в сравнении с ВУС, приготовленными в ШБМ).

Значение теплотворной способности составов ВУС оценивалось теоретическим методом при помощи уравнения Д.И. Менделеева для расчета низшей теплоты сгорания органических веществ с определенным элементным составом<sup>5</sup>.

$$Q = 339 \cdot C + 1256 \cdot H - 109 \cdot (O - S) - 25,2 \cdot (9 \cdot H - W), \quad (1)$$

где  $C, H, O, S, W$  – %-е содержание элементов в исходном топливе.

На рис. 10 в виде зависимости представлено изменение значений теплотворной способности ВУС (см. табл. 1). Значение теплотворной способности двухкомпонентной ВУС составило 8,1 МДж/кг.



**Рис. 9. Изменение средних размеров капель водоугольной суспензии в составе с пирогенетической жидкостью (ВУС<sub>20<sup>27</sup></sub> и ВУС<sub>20<sup>90</sup></sub>)**

**Fig. 9. Variation of the average droplet sizes of a coal-water slurry (CWS) with pyrogenetic liquid (CWS<sub>20<sup>27</sup></sub> and CWS<sub>20<sup>90</sup></sub>)**

<sup>5</sup> Годовская К.И., Рябина Л.В., Новик Г.Ю., Гернер М.М. Технический анализ: учеб. пособ. Изд. 2-е, испр. и доп.: М.: Высш. школа, 1972. 48 с.

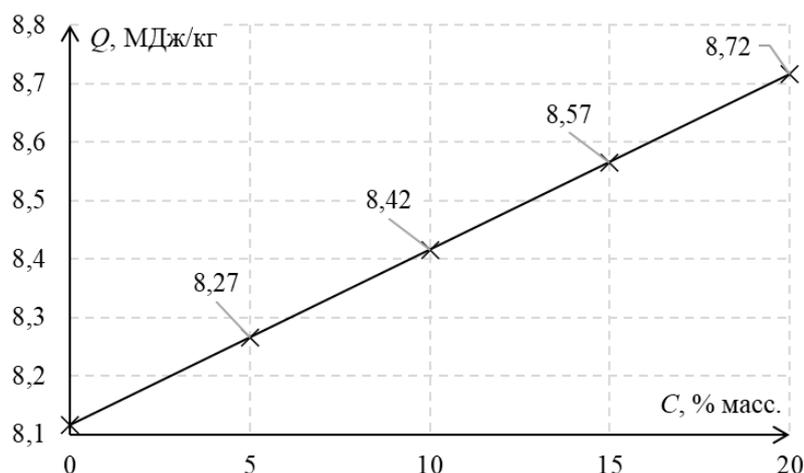


Рис. 10. Теплотворная способность водоугольных суспензий  
Fig. 10. Calorific value of coal-water slurries

Теоретические исследования влияния пирогенетической жидкости на теплотворную способность ВУС показали, что введение в состав двухкомпонентного водоугольного топлива третьего компонента взамен воды (равного количества) способствует росту  $Q$  суспензии. Для наиболее вязкого топлива (ВУС<sub>20</sub><sup>27</sup> и ВУС<sub>20</sub><sup>90</sup>) значение теплотворной способности увеличивается на 6,9%. Такой эффект может оказывать существенное влияние на качество топлива в случае использования отходов углеобогащительных комбинатов (фильтр-кек) для приготовления ВУС.

Можно сделать вывод, что замещение воды в составе ВУС аналогичным по массе количеством пирогенетической жидкости приводит к увеличению вязкости топлива, но и его теплотворной способности. При этом обработка такого топлива в роторном гидродинамическом генераторе кавитаций снижает его вязкость. Уменьшение вязкости и гомогенизация трехкомпонентных водоугольных топлив является причиной снижения среднего размера капель ВУС после распыления пневматической форсункой. Такие свойства и характеристики ВУС после ее обработки в роторном гидродинамическом генераторе кавитаций и последующем распылении позволяют рассматривать пирогенетическую жидкость как перспективный компонент ВУС. Использование РГДРК также позволяет решить проблему низкой реакционной способности ВУС – снизить средний размер капель

после распыления и как следствие сократить время задержки их зажигания.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены экспериментальные исследования влияния кавитационной обработки водоугольных суспензий с добавками пирогенетической жидкости на их свойства и характеристики распыления пневматической форсункой. Установлено, что после кавитационной обработки двухкомпонентного водоугольного топлива в течение 90 с значение вязкости снижается на 48%. Введение в состав водоугольного топлива пирогенетической жидкости в количестве от 5 до 20% по массе взамен воды приводит к увеличению вязкости таких суспензий. При этом обработка этих трехкомпонентных водоугольных суспензий в роторном гидродинамическом генераторе кавитаций способствует снижению их вязкости на 27–45%. Исследования статической седиментации показали, что после кавитационной обработки водоугольных суспензий осаждение частиц угля начинается после 24 ч. Образцы суспензии в составе с пирогенетической жидкостью показали лучшую стабильность по сравнению с двухкомпонентным водоугольным топливом. Эксперименты по распылению изучаемых водоугольных суспензий пневматической форсункой показали, что средний размер капель топлива в струе снижается на 1,7–5,7% при использовании кавитационной обработки. Установле-

но, что при введении в состав топлива 20% по массе пирогенетической жидкости значе-ние теплотворной способности увеличивается на 6,9%. Использование пирогенетической жидкости в составе водоугольного топлива и

его обработка в роторном гидродинамическом генераторе кавитаций позволят решить проблему низкой реакционной способности водоугольных суспензий.

#### Список источников

1. Кашин Е.М., Диденко В.Н. Технология подготовки и газификации экологичного вида топлива // Экологическое образование и охрана окружающей среды. Технические университеты в формировании единого научно-технологического и образовательного пространства СНГ. М.: Ассоциация технических университетов, 2014. Т. 2. С. 192–195.
2. Хрусталева Б.М., Пехота А.Н. Технология эффективного использования углеводородсодержащих отходов в производстве многокомпонентного твердого топлива // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2016. Т. 59. № 2. С. 122–140. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-2-122-140>.
3. Иванова И.Ю., Ижбулдин А.К., Тугузова Т.Ф., Майсюк Е.П. Эколого-экономическая эффективность применения альтернативных энергетических технологий для снижения антропогенной нагрузки в центральной экологической зоне байкальской природной территории // Альтернативная энергетика и экология. 2020. № 25-27. С. 138–146.
4. Герасимова Н.П., Федчишин В.В. Перспективы и возможности использования водоугольного топлива в энергетике // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: матер. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Иркутск, 21–24 апреля 2020 г.). Иркутск: ИРНТУ, 2020. Т. 2. С. 104–108.
5. Dmitrienko M.A., Strizhak P.A. Coal-water slurries containing petrochemicals to solve problems of air pollution by coal thermal power stations and boiler plants: an introductory review // Science of Total Environment. 2018. Vol. 613-614. P. 1117–1129. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.189>.
6. Alekseenko S.V., Dekterev A.A., Maltsev L.I., Kuznetsov V.A. Implementation of a three-stage scheme for the co-combustion of pulverized coal and coal-water slurry in an industrial boiler to reduce NO<sub>x</sub> emissions // Process Safety and Environmental Protection. 2023. Vol. 169. P. 313–327. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.11.034>.
7. Хрусталева Б.М., Пехота А.Н., Нгуен Нга Тху, Ву Фап Минь. Твердое топливо на основе отходов малоиспользуемых горючих энергоресурсов // Наука и техника. 2021. Т. 20. № 1. С. 58–65. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-1-58-65>.
8. Джундубаев А.К., Султаналиев М.С., Мурко В.И., Кулагина Л.В., Баранова М.П. Режимы течения топливных водоугольных суспензий в каналах распыливающих устройств // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2018. Т. 11. № 2. С. 242–249.
9. Syrodoy S.V. The influence of radiative-convective heat transfer on ignition of the drops of coal-water fuel // *Thermophysics and Aeromechanics*. 2018. Vol. 25. Iss. 3. P. 429–443. <https://doi.org/10.1134/S0869864318030101>.
10. Baranova M.P., Kulagin V.A., Taraban'ko V.E. Nature of stabilization of water-coal fuel suspensions // Russian Journal of Applied Chemistry. 2011. Vol. 84. Iss. 6. P. 939–944. <https://doi.org/10.1134/S1070427211060073>.
11. Дмитриенко М.А., Няшина Г.С., Шлегель Н.Е., Шевырев С.А. Снижение антропогенных выбросов при сжигании углей и отходов их переработки в качестве компонентов органоводоугольных суспензий // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19. № 3-4. С. 41–52.
12. Алексеенко С.В., Мальцев Л.И., Кравченко И.В., Дектерев А.А., Кузнецов В.А. Технология приготовления водоугольного топлива и его сжигания в котлах малой мощности // Химия и химическая технология. Современные проблемы: сб. статей / под ред. З.А. Мансурова. Вып. 7. Алматы: Казахский нац. ун-т им. аль-Фараби, 2022. 355 с.
13. Mal'tsev L.I., Belogurova T.P., Kravchenko I.V. Influence of high-energy impact on the physical and technical characteristics of coal fuels // Thermal Engineering. 2017. Vol. 64. Iss. 8. P. 585–590. <https://doi.org/10.1134/S0040601517080067>.
14. Kuznetsov G.V., Romanov D.S., Vershinina K.Yu., Strizhak P.A. Rheological characteristics and stability of fuel slurries based on coal processing waste, biomass and used oil // Fuel. 2021. Vol. 302. P. 121203. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121203>.
15. Loureiro L.M.E.F., Gil P.B.F., Campos F.V.V., Nunes L.J.R., Ferreira J.M.F. Dispersion and flow properties of char-coal oil slurries (ChOS) as potential renewable industrial liquid fuels // Journal of the Energy Institute. 2018. Vol. 91. Iss. 6. P. 978–983. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2017.08.001>.
16. Tareq M.M., Dafsari R.A., Jung Seungchae, Lee Jeekeun. Effect of the physical properties of liquid and ALR on the spray characteristics of a pre-filming airblast nozzle // International Journal of Multiphase Flow. 2020. Vol. 126. P. 103240. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2020.103240>.
17. Mlkvik M., Stähle P., Schuchmann H.P., Gaukel V., Jedelsky J., Jicha M. Twin-fluid atomization of viscous liquids: the effect of atomizer construction on breakup process, spray stability and droplet size // International Journal of Multiphase Flow. 2015. Vol. 77. P. 19–31. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2015.06.010>.
18. Anufriev I.S., Shadrin E.Yu., Kopyev E.P., Alekseenko S.V., Sharypov O.V. Study of liquid hydrocarbons atomization

by supersonic air or steam jet // *Applied Thermal Engineering*. 2019. Vol. 163. P. 114400. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114400>.

19. Alekseenko S.V., Anufrieva I.S., Dektereva A.A., Kuznetsova V.A., Maltsev L.I., Minakova A.V., et al. Experimental and numerical investigation of aerodynamics of a pneumatic nozzle for suspension fuel // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2019. Vol. 77. P. 288–298. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2019.04.013>.

20. Alekseenko S.V., Bilsky A.V., Dulin V.M., Markovich D.M. Experimental study of an impinging jet with different swirl rates // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2007. Vol. 28. Iss. 6. P. 1340–1359. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2007.05.011>.

## References

1. Kashin E.M., Didenko V.N. Technology for environmentally friendly fuel preparation and gasification. In: *Tekhnicheskie universitety v formirovaniy edinogo nauchno-tekhnologicheskogo i obrazovatel'nogo prostranstva SNG = Ecological education and environmental protection. Technical universities in the formation of a single scientific, technological and educational space of the Commonwealth of Independent States*. Moscow: Associaciya tekhnicheskikh universitetov; 2014, vol. 2, p. 192-195. (In Russ.).
2. Hrustalev B.M., Pekhota A.N. Technology for efficient usage of hydrocarbon-containing waste in production of multi-component solid fuel. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij i energeticheskikh ob'edinenij SNG. Energetika = Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*. 2016;59(2):122-140. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-2-122-140>.
3. Ivanova I.Yu., Izhduldin A.K., Tuguzova T.F., Majsyuk E.P. Ecological and economic efficiency of the use of alternative energy technologies to reduce of the anthropogenic load in the central ecological area of the Baikal natural territory. *Alternativnaya energetika i ekologiya = Alternative Energy and Ecology*. 2020;25-27:138-146. (In Russ.).
4. Gerasimova N.P., Fedchishin V.V. Prospects and possibilities of using coal-water fuel in power engineering. In: *Povysheniye effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyakh Sibiri: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem = Increasing the efficiency of energy production and use in Siberia: Materials of the All-Russian scientific-practical conference with international participation*. 21–24 April 2020, Irkutsk. Irkutsk: National Research Irkutsk Technical Research; 2020, vol. 2, p. 104-108. (in Russ.).
5. Dmitrienko M.A., Strizhak P.A. Coal-water slurries containing petrochemicals to solve problems of air pollution by coal thermal power stations and boiler plants: an introductory review. *Science of Total Environment*. 2018;613-614:1117-1129. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.189>.
6. Alekseenko S.V., Dekterev A.A., Maltsev L.I., Kuznetsov V.A. Implementation of a three-stage scheme for the co-combustion of pulverized coal and coal-water slurry in an industrial boiler to reduce NOx emissions. *Process Safety and Environmental Protection*. 2023;169:313-327. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.11.034>.
7. Khroustalev B.M., Pekhota A.N., Nguyen Nga Thuy, Vu Phap Minh. Solid fuel based on waste of low-utilized combustible energy resources. *Nauka i tekhnika = Science & Technique*. 2021;20(1):58-65. (In Russ.). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-1-58-65>.
8. Dzhundubaev A.K., Sultanaliyev M.S., Murko V.I., Kulagina L.V., Baranova M.P. The flow regimes of the fuel water coal slurries in the canals of spraying devices. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2018;11(2):242-249. (In Russ.).
9. Syrodoy S.V. The influence of radiative-convective heat transfer on ignition of the drops of coal-water fuel. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2018;25(3):429-443. <https://doi.org/10.1134/S0869864318030101>.
10. Baranova M.P., Kulagin V.A., Taraban'ko V.E. Nature of stabilization of water-coal fuel suspensions. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2011;84(6):939-944. <https://doi.org/10.1134/S1070427211060073>.
11. Dmitrienko M.A., Nyashina G.S., Shlegel' N.E., Shevyrev S.A. The reduction anthropogenic emission at the combustion of coals and coal processing waste as a component coal-water slurry containing petrochemicals. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy energetiki = Power engineering: research, equipment, technology*. 2017;19(3-4):41-52. (In Russ.).
12. Alekseenko S.V., Mal'cev L.I., Kravchenko I.V., Dekterev A.A., Kuznecov V.A. Technology for coal-water fuel preparation and its combustion in low-power boilers. In: *Mansurov Z.A. (eds.). Himiya i himicheskaya tekhnologiya. Sovremennye problemy: sbornik statej = Chemistry and Chemical Technology. Modern problems: collected articles*. Almaty: Al-Farabi Kazakh National University; 2022, iss. 7, 355 p. (In Russ.).
13. Mal'tsev L.I., Belogurova T.P., Kravchenko I.V. Influence of high-energy impact on the physical and technical characteristics of coal fuels. *Thermal Engineering*. 2017;64(8):585-590. <https://doi.org/10.1134/S0040601517080067>.
14. Kuznetsov G.V., Romanov D.S., Vershinina K.Yu., Strizhak P.A. Rheological characteristics and stability of fuel slurries based on coal processing waste, biomass and used oil. *Fuel*. 2021;302:121203. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121203>.
15. Loureiro L.M.E.F., Gil P.B.F., Campos F.V.V., Nunes L.J.R., Ferreira J.M.F. Dispersion and flow properties of char-coal oil slurries (ChOS) as potential renewable industrial liquid fuels. *Journal of the Energy Institute*. 2018;91(6):978-983. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2017.08.001>.

16. Tareq M.M., Dafsari R.A., Jung Seungchae, Lee Jeekeun. Effect of the physical properties of liquid and ALR on the spray characteristics of a pre-filming airblast nozzle. *International Journal of Multiphase Flow*. 2020;126:103240. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2020.103240>.
17. Mlkvik M., Stähle P., Schuchmann H.P., Gaukel V., Jedelsky J., Jicha M. Twin-fluid atomization of vis-cous liquids: the effect of atomizer construction on breakup process, spray stability and droplet size. *Inter-national Journal of Multi-phase Flow*. 2015;77:19-31. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2015.06.010>.
18. Anufriev I.S., Shadrin E.Yu., Kopyev E.P., Alekseenko S.V., Sharyov O.V. Study of liquid hydrocarbons atomization by super-sonic air or steam jet. *Applied Thermal Engineering*. 2019;163:114400. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114400>.
19. Alekseenko S.V., Anufrieva I.S., Dektereva A.A., Kuznetsova V.A., Maltsev L.I., Minakova A.V., et al. Experimental and numerical investigation of aerodynamics of a pneumatic nozzle for suspension fuel. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2019;77:288-298. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2019.04.013>.
20. Alekseenko S.V., Bilsky A.V., Dulin V.M., Markovich D.M. Experimental study of an impinging jet with different swirl rates. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2007;28(6):1340-1359. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2007.05.011>.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Гвоздяков Дмитрий Васильевич,**

к.т.н., доцент,  
доцент Научно-образовательного центра  
И.Н. Бутакова,  
Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет,  
634050, г. Томск, просп. Ленина, 30 а, Россия  
✉ dim2003@tpu.ru

**Dmitry V. Gvozdyakov,**

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Butakov  
Research Center,  
National Research Tomsk Polytechnic University,  
30a, Lenin pr., Tomsk 634050, Russia  
✉ dim2003@tpu.ru

**Зенков Андрей Викторович,**

к.т.н.,  
доцент Научно-образовательного центра  
И.Н. Бутакова,  
Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет,  
634050, г. Томск, просп. Ленина, 30 а, Россия  
avz41@tpu.ru

**Andrey V. Zenkov,**

Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor of the Butakov  
Research Center,  
National Research Tomsk Polytechnic University,  
30a, Lenin pr., Tomsk 634050, Russia  
avz41@tpu.ru

**Мальцев Леонид Иванович,**

д.т.н., старший научный сотрудник,  
главный научный сотрудник,  
Институт теплофизики  
им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика  
Лаврентьева, 1, Россия  
maltzev@itp.nsc.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-4699-8289>

**Leonid I. Maltsev,**

Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher,  
Chief Researcher of the Federal State Budgetary  
Institution of Science named after S.S. Kutateladze  
Institute of Thermophysics of the Siberian Branch  
of the Russian Academy of Sciences,  
630090, Novosibirsk, Academician Lavrentiev ave., 1,  
Russia  
maltzev@itp.nsc.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-4699-8289>

**Поджаров Юрий Сергеевич,**

лаборант,  
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика  
Лаврентьева, 1, Россия  
yura\_p@ngs.ru

**Yuri S. Podzharov,**

Laboratory Assistant,  
Federal State Budgetary Institution of Science named  
after S.S. Kutateladze Institute of Thermophysics  
of the Siberian Branch of the Russian Academy of  
Sciences,  
630090, Novosibirsk, Academician Lavrentiev ave., 1,  
Russia  
yura\_p@ngs.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 06.04.2023; одобрена после рецензирования 04.05.2023; принята к публикации 08.06.2023.

**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 06.04.2023; approved after reviewing 04.05.2023; accepted for publication 08.06.2023.



Научная статья  
УДК 662.739  
<https://elibrary.ru/xchbhh>  
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-310-321>

## Актуальность применения твердотопливной смеси на основе бурого угля Большесырского разреза и отходов лесоперерабатывающей промышленности из березы в энергетических установках

А.В. Жуйков<sup>1✉</sup>, А.И. Матюшенко<sup>2</sup>, С.Г. Степанов<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

<sup>3</sup>АО «СУЭК-Красноярск», г. Красноярск, Россия

**Резюме:** Цель – определение возможности применения твердотопливной смеси на основе бурого угля Большесырского разреза и отходов лесоперерабатывающей промышленности из березы в энергетических установках с учетом наличия синергетических взаимодействий между компонентами смеси. Для определения основных характеристик процесса горения угля, биомассы и их смесей использовался синхронный термический анализ. Неизотермический нагрев проводился со скоростью 20°С/мин в диапазоне температур 25–800°С в потоке воздуха с расходом 50 мл/мин, масса навески составляла около 6 мг. Для угля и биомассы в соответствии со стандартными методиками были проведены технический анализ и элементный. В работе описаны преимущества и недостатки при переводе энергетических установок, сжигающих твердое ископаемое топливо, на твердотопливную смесь угля и биомассы. Определены основные характеристики горения угля, биомассы и их смесей. Температура, при которой происходит воспламенение коксового остатка угля, составляет 365°С, биомассы – 299°С. Температура, при которой завершается процесс горения угля – 551°С, а биомассы – 464°С. Показано, что горение биомассы проходит в области более низких температур по сравнению с углем за счет высокого содержания летучих веществ. Установлено, что добавление биомассы к углю снижает температуру, при которой происходит воспламенение коксового остатка и завершается процесс горения. При анализе процесса горения летучих веществ и коксового остатка обнаружены как положительные, так и отрицательные синергетические взаимодействия между частицами угля и биомассы, влияющие на максимальную скорость горения и реакционную способность смесей. Полученные результаты можно применять при проектировании энергетических установок, сжигающих твердотопливные смеси на основе угля и биомассы.

**Ключевые слова:** уголь, биомасса, березовые опилки, термический анализ, нагрев, совместное горение

**Для цитирования:** Жуйков А.В., Матюшенко А.И., Степанов С.Г. Актуальность применения твердотопливной смеси на основе бурого угля Большесырского разреза и отходов лесоперерабатывающей промышленности из березы в энергетических установках // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 2. С. 310–321. EDN: XCHBHH, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-310-321>.

### POWER ENGINEERING

Original article

## Application a solid fuel mixture based on Bolshesyrsky lignite and birch wood waste in power plants

Andrey V. Zhuikov<sup>1✉</sup>, Anatoly I. Matyushenko<sup>2</sup>, Sergey G. Stepanov<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

<sup>2</sup>JSC «SUEK-Krasnoyarsk», Krasnoyarsk, Russia

© Жуйков А.В., Матюшенко А.И., Степанов С.Г., 2023

**Abstract.** In this paper, we investigate the possibility of using a solid fuel mixture based on lignite from the Bolshesyrsky coal mine and birch wood waste in power plants, taking synergistic interactions between the mixture components into account. Simultaneous thermal analysis was used to determine the main combustion characteristics of lignite, biomass and their mixtures. Non-isothermal heating was performed at a rate of 20°C/min across the temperature range of 25–800°C under the air flow of 50 ml/min. The sample weight was about 6 mg. Proximate and elemental analyses of lignite and biomass samples were performed according to conventional methods. The advantages and disadvantages of converting power plants operated on solid fossil fuels to a solid fuel mixture of lignite and biomass are discussed. The main combustion characteristics of lignite, biomass and their mixtures were defined. The ignition temperature of the coke residue and biomass was found to comprise 365 and 299°C, respectively. The temperature of combustion completion for lignite and biomass was 551 and 464°C, respectively. In comparison with lignite, biomass burns at lower temperatures due to the high content of volatile substances. The addition of biomass to lignite was found to reduce both the ignition temperature of the coke residue and that of combustion completion. An analysis of the combustion process of volatile substances and coke residue established the presence of both positive and negative synergistic interactions between lignite and biomass particles, affecting the maximum combustion rate and the mixture reactivity. The results obtained can be applied when designing power plants operated on solid fuel mixtures of lignite and biomass.

**Keywords:** coal, biomass, birch sawdust, thermal analysis, heating, co-combustion

**For citation:** Zhuikov A.V., Matyushenko A.I., Stepanov S.G. Application of a solid fuel mixture based on Bolshesyrsky lignite and birch wood waste in power plants. *iPolytech Journal*. 2023;27(2):310-321. (In Russ.). EDN: XCHBHH, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-310-321>.

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие промышленности влияет на увеличение потребления тепловой и электрической энергии, выработка которой непосредственно связана с увеличением потребления твердых ископаемых топлив. Большинство объектов теплоэнергетики в качестве проектного топлива используют угли разной степени метаморфизма вследствие их низкой стоимости, апробированных десятилетиями технологий их сжигания, развитыми логистическими сетями поставок. Основным недостатком сжигания твердых ископаемых топлив является повышенное негативное воздействие на окружающую среду и здоровье человека [1, 2]. При горении угля в атмосферу, помимо мелкодисперсных частиц золы, выбрасываются оксиды азота, оксиды серы, оксид углерода, бенз(а)пирен и др. Промышленные отходы в виде золы складироваются на золоотвалах, занимая огромные территории, которые со временем только увеличиваются, а также загрязняют воздух и воду. Одним из ключевых направлений по снижению негативного воздействия на окружающую среду является переход к ресурсосберегающей и экологически безопасной теплоэнергетике.

Снижение потребления угля и улучшение экологических характеристик объектов теплоэнергетики возможно путем частичного вовлечения в топливно-энергетический комплекс лесной биомассы [3–5]. Основным ис-

точником биомассы являются лесозаготовительные, лесоперерабатывающие и деревообрабатывающие предприятия. Биомасса обладает рядом преимуществ по сравнению с твердым ископаемым топливом, которые заключаются в следующем [6–8]:

- низкая себестоимость, т.к. основные затраты связаны только с доставкой и подготовкой ее к сжиганию. В большинстве случаев лесная биомасса является бесплатным топливом, так как хранить ее в виде отходов небезопасно из-за высокой склонности к возгоранию и негативного воздействия на окружающую среду при длительном хранении на открытом воздухе;

- нулевые выбросы диоксида углерода вследствие того, что биомасса в процессе своего роста потребляет из окружающей среды ровно столько CO<sub>2</sub>, сколько выделяется при ее сжигании;

- минимальное содержание серы;
- высокая реакционная способность за счет высокого содержания летучих веществ;
- низкая зольность;
- биомасса является возобновляемым источником энергии.

Из недостатков использования биомассы в качестве энергетического топлива можно отметить следующее [9]:

- себестоимость биомассы прямо пропорциональна расстоянию ее доставки до объектов теплоэнергетики;
- низкая теплота сгорания;

– повышенная гидрофильная способность поверхности частиц, влияющая на увеличение влажности при доставке и хранении;

– различная вариативность размеров и форм частиц, влияющая на процесс горения;

– волокнистая структура частиц биомассы негативно сказывается на ее размолоспособности;

– высокая склонность к загрязнению поверхностей нагрева энергетических установок и к агломерации слоя (при слоевом сжигании), обусловленная высоким содержанием щелочных и щелочно-земельных элементов в минеральной части, а также содержание хлора и фосфора [6];

– содержание хлора влияет на интенсификацию коррозии поверхностей нагрева [6];

– высокая склонность к самовоспламенению.

Перевод объектов теплоэнергетики на сжигание биомассы в чистом виде связан с рядом трудностей, обусловленных необходимостью существенной реконструкции энергетических установок, предназначенных для сжигания угля, а также отсутствием необходимых запасов биомассы для снабжения всех объектов теплоэнергетики, тем более таких крупных как ТЭЦ, ГРЭС и др., на которые проектное топливо доставляется железнодорожным транспортом в больших объемах. Учитывая все недостатки, связанные со сжиганием биомассы в энергетических установках, был реализован перспективный способ ее частичного сжигания в смеси с углем. Данный способ был успешно реализован на объектах теплоэнергетики разной мощности, как в России, так и за рубежом [10, 11]. Частичное добавление биомассы к углю имеет следующие преимущества [12, 13]:

1) снижение общей зольности смеси, влияющее на снижение выбросов мелкодисперсных минеральных веществ в окружающую среду и скорость заполнения золоотвалов;

2) снижение потребления твердого ископаемого топлива;

3) снижение выбросов газообразных вредных продуктов сгорания и CO<sub>2</sub>;

4) повышение реакционной способности смеси за счет увеличения содержания лету-

чих веществ;

5) минимальная реконструкция теплоэнергетического оборудования, в основном связанная с хранением, смешением, топливоподачей и топливоподготовкой;

6) в случае отсутствия поставок биомассы быстрый возврат к сжиганию только проектного топлива;

7) утилизация органических отходов лесозаготовительной и лесоперерабатывающей промышленности.

В настоящее время особый научный интерес направлен на исследование синергетического взаимодействия между компонентами твердотопливной смеси, оказывающего влияние на характеристики их совместного горения [14, 15]. Для исследования склонности компонентов смеси к синергетическим эффектам, влияющим на характеристики горения, лучше всего применим синхронный термический анализ, проводимый в окислительной среде [16].

## **ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Оценить возможность применения твердотопливной смеси в энергетических установках на основе бурого угля Большесырского разреза и отходов лесоперерабатывающей промышленности из березы с учетом присутствия синергетических взаимодействий между компонентами смеси, влияющих на реакционную способность топлив, а также определить наиболее энергоэффективную пропорцию компонентов в смеси.

## **МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

В качестве объектов исследования выбраны следующие топлива:

1. Большесырский бурый уголь марки ЗБ Канско-Ачинского угольного бассейна (далее – уголь). Данный уголь относится к углям низкой степени метаморфизма, но обладает отличительными свойствами по сравнению с другими бурыми углями данного угольного бассейна – низкой зольностью и высокой теплотой сгорания. Многие угольные котельные Красноярского края и других регионов используют этот уголь как основное энергетическое топливо при производстве тепловой энергии.

2. Биомасса в виде березовых опилок (далее – биомасса) – это распространенная разновидность отходов лесоперерабатывающей промышленности, например, на производстве столовых приборов для Восточной Азии, представляющих собой пару тонких березовых палочек.

Для удобства обозначения твердотопливных смесей применялись следующие сокращения: уголь – ЗБ, биомасса – БО. Для обозначения индивидуальных топлив и массовых концентраций компонентов в топливных смесях на их основе приняты следующие маркировки: ЗБ – 100%; ЗБ 75% + БО 25%; ЗБ 50% + БО 50%; ЗБ 25% + БО 75% и БО 100%.

Уголь и биомассу с начальным размером менее 10 мм по отдельности измельчали в дисковой мельнице Retsch DM 200 (Retsch GmbH, Germany). Для получения нужного гранулометрического состава 100–200 мкм использовалась аналитическая просеивающая машина Retsch AS 200 BASIC (Retsch GmbH, Germany), что соответствует размерам пылеугольного топлива, используемого при факельном сжигании в энергетических

котлах [17]. Теплоту сгорания топливных образцов определяли в калориметре ИКА С6000. Анализатор Vario MACRO cube (Elementar, Германия) использовался для определения углерода, водорода и азота. Содержание серы определялось по ГОСТ 8606-2015<sup>4</sup>, кислород рассчитывался по разности согласно ГОСТ Р 27313-2015<sup>5</sup>. Аналитическая влага после достижения топливом воздушно-сухого состояния определялась по ГОСТ Р 33503-2015<sup>6</sup>; зольность – по ГОСТ Р 55661-2013<sup>7</sup>; выход летучих компонентов – по ГОСТ Р 55660-2013<sup>8</sup>; теплота сгорания – по ГОСТ Р 147-2013<sup>9</sup>. Результаты технического и элементного анализа угля и биомассы приведены в табл. 1. В табл. 1 влажность ( $W^a$ , %) представлена в аналитическом состоянии; зольность ( $A^d$ , %) в сухом состоянии; содержание летучих веществ ( $V^{daf}$ , %) в сухом беззольном состоянии; содержание углерода ( $C^{daf}$ , %), водорода ( $H^{daf}$ , %), азота ( $N^{daf}$ , %), серы ( $S^{daf}$ , %) и кислорода ( $O^{daf}$ , %) представлены в сухом беззольном состоянии; низшая теплота сгорания ( $Q_{if}$ , МДж/кг) – в рабочем состоянии.



Рис. 1. Топлива: а – Большесырский бурый уголь; б – опилки березы  
Fig. 1. Fuels: a – Bolshesyrsky lignite coal; b – birch sawdust

<sup>4</sup>ГОСТ 8606-2015. Топливо твердое минеральное. Определение общей серы. Метод Эшка. Введ. 01.04.2017. М.: Стандартинформ, 2019.

<sup>5</sup>ГОСТ Р 27313-2015. Топливо твердое минеральное. Обозначение показателей качества и формулы пересчета результатов анализа на различные состояния топлива. Введ. 12.11.2015. М.: Стандартинформ, 2016.

<sup>6</sup>ГОСТ Р 33503-2015. Топливо твердое минеральное. Методы определения влаги в аналитической пробе. Введ. 12.11.2015. М.: Стандартинформ, 2016.

<sup>7</sup>ГОСТ Р 55661-2013. Топливо твердое минеральное. Определение зольности. Введ. 28.10.2013. М.: Стандартинформ, 2014.

<sup>8</sup>ГОСТ Р 55660-2013. Топливо твердое минеральное. Определение выхода летучих веществ. 28.10.2013. М.: Стандартинформ, 2014.

<sup>9</sup>ГОСТ Р 147-2013. Топливо твердое минеральное. Определение высшей теплоты сгорания и расчет низшей теплоты сгорания. 5.11.2013. М.: Стандартинформ, 2019.

**Таблица 1.** Технические характеристики и элементный состав образцов  
**Table 1.** Specifications and elemental composition of samples

Топлива	W <sup>a</sup> , %	A <sup>d</sup> , %	V <sup>daf</sup> , %	Элементный состав					Q <sub>r</sub> <sup>r</sup>
				C <sup>daf</sup>	H <sup>daf</sup>	N <sup>daf</sup>	S <sup>daf</sup>	O <sup>daf</sup>	
%									МДж/кг
Уголь	4,8	6,5	44,6	74,1	5,0	0,9	0,3	19,7	20,5
Биомасса	4,3	0,3	81,1	51,2	5,8	–	–	43,0	16,5

Термический анализ проводился с применением синхронного термоанализатора SDT Q600 (USA). Кривые термогравиметрии (ТГ), дифференциальной термогравиметрии (ДТГ) и дифференциальную сканирующую калориметрию (ДСК) получали в диапазоне температур 25–800 °С при нагреве навески топлива массой 6,0±0,25 мг в потоке воздуха с расходом 50 мл/мин и при скорости нагрева 20 °С/мин. Для обработки полученных термограмм применялась программа Universal Analysis 2000 (USA).

По кривым ТГ, ДТГ и ДСК определяли основные характеристики горения, такие как температура, при которой происходит воспламенение коксового остатка ( $T_{вспл}$ , °С); температура, при которой заканчивается горение топлива ( $T_{вг}$ , °С); максимальная скорость убыли массы или максимальная скорость горения ( $ДТГ_{max}$ , %/мин) и температура, соответствующая ей ( $T_{ДТГ}$ , °С); максимальная интенсивность теплового потока ( $ДСК_{max}$ , мВт/мг) и температура, соответствующая ей ( $T_{ДСК}$ , °С).  $T_{вспл}$  и  $T_{вг}$  определяли по методу пересечения кривых, визуализация которой была опубликована в нашей предыдущей работе [18].

Наличие синергетических эффектов между углем и биомассой, влияющих на основные характеристики горения смеси, определяли по известной методике [19, 20] путем сравнения на термограммах ДТГ профилей кривых, построенных по расчетным и экспериментальным значениям. Расчетные значения профилей кривых ДТГ получали по выражению:

$$ДТГ_{расч} = (\alpha_1 ДТГ_1) + (\alpha_2 ДТГ_2), \quad (1)$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – массовые доли биомассы и угля в смеси,  $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ ;  $ДТГ_1$  и  $ДТГ_2$  – значения изменения массы для биомассы и угля (%/мин), соответственно.

Максимальная скорость горения ( $ДТГ_{max}$ ) прямо пропорционально характеризует реакционную способность топлива, а температура  $T_{ДТГ}$  характеризует реакционную способность топлива обратно пропорционально [20].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Процесс нагрева угля, биомассы и их смесей в диапазоне температур 25–800 °С представлен на рис. 2 кривыми ТГ, ДТГ и ДСК. Весь процесс нагрева топлив разделен на четыре условных стадии, обозначенных на рис. 2 цифрами I–IV. Температурный диапазон 25–100 °С стадии I для топлив и их смесей одинаков и характеризует испарение адсорбированной влаги. Данная стадия из-за низкой влажности топлив (см. табл. 1) сопровождается небольшими изменениями кривых ТГ, ДТГ и ДСК, связанных с убылью массы (рис. 2 а), увеличением скорости убыли массы (рис. 2 б) и небольшим эндотермическим эффектом за счет поглощения тепла при испарении влаги (рис. 2 с). При нагреве топлива после стадии I начинается стадия II, в которой никаких процессов не происходит, об этом свидетельствует почти горизонтальные кривые ТГ и ДТГ для всех исследуемых топлив.

Стадия III соответствует началу термического разложения топлив, в которой происходит отщепление от углеродной матрицы низкомолекулярных соединений в виде газообразных веществ. При дальнейшем нагреве газообразные вещества воспламеняются и горят на поверхности топливных частиц. Для данной стадии нагрева характерны изменения кривых ТГ, ДТГ и ДСК (см. рис. 2). При выделении летучих веществ начинается убыль массы навески, а также происходит увеличение скорости убыли массы. Горение

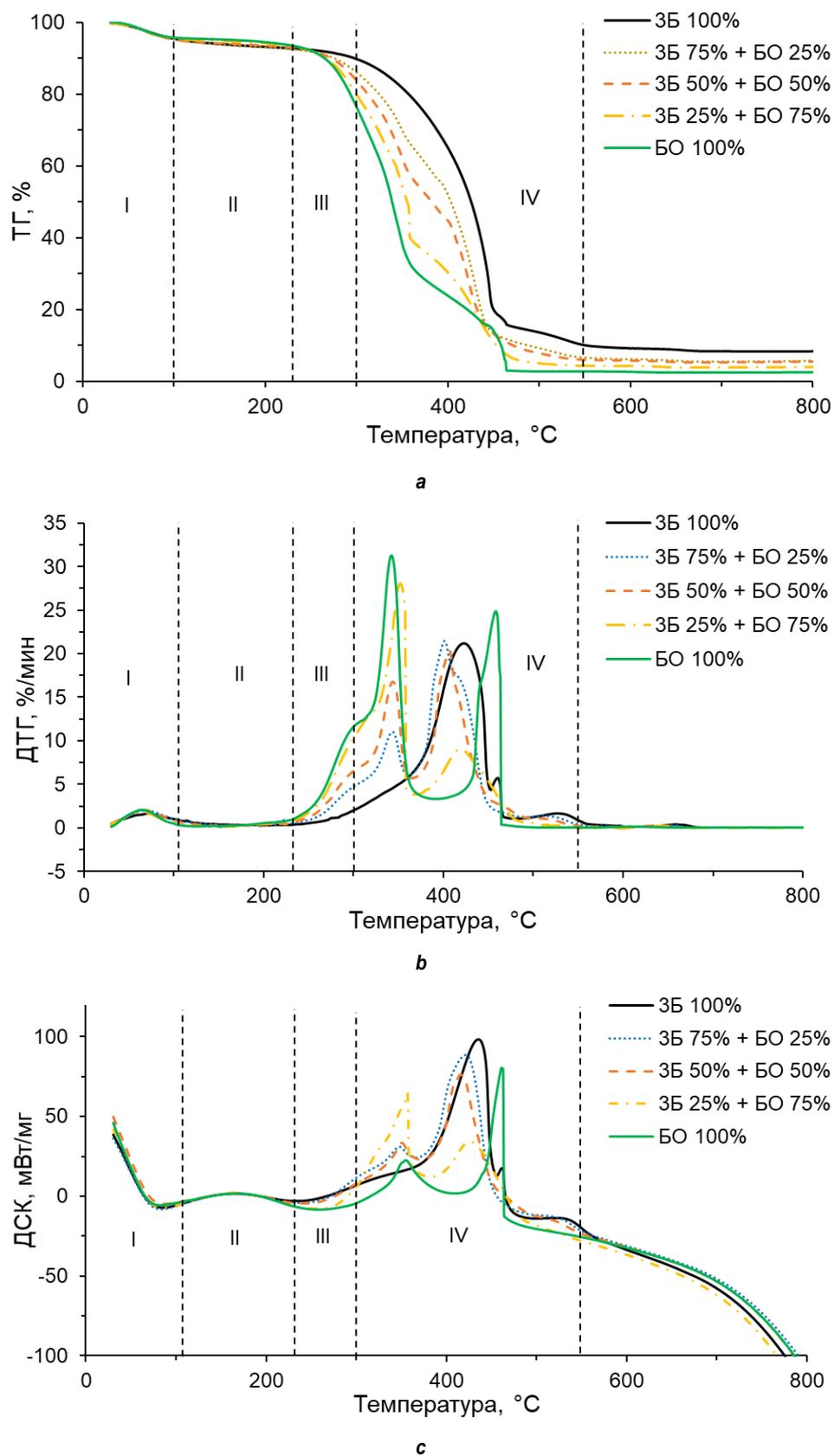


Рис. 2. Профили кривых нагрева угля, биомассы и их смесей (I-IV – условные стадии нагрева):  
а – кривые термогравиметрии; б – кривые дифференциальной термогравиметрии; с – кривые  
дифференциальной сканирующей калориметрии

Fig. 2. Heating curve profiles of coal, biomass and their mixtures (I-IV – conditional heating stages):  
a – thermogravimetry curves; b – differential thermogravimetry curves; c – differential scanning calorimetry curves

**Таблица 2.** Диапазон температур основных стадий нагрева топлив  
**Table 2.** Temperature range of the main stages of fuel heating

Топлива	Диапазон температур, °С			
	Стадия I	Стадия II	Стадия III	Стадия IV
ЗБ – 100%	25–120	120–300	300–365	365–551
ЗБ 75% + БО 25%	25–118	118–256	256–309	309–537
ЗБ 50% + БО 50%	25–112	112–250	250–307	307–532
ЗБ 25% + БО 75%	25–110	110–241	241–304	304–480
БО – 100%	25–105	105–233	233–299	299–464

летучих веществ сопровождается началом увеличения интенсивности теплового потока (см. рис. 2 с). Температурные диапазоны всех стадий нагрева представлены в табл. 2.

Далее рассмотрим для каждого топлива и смеси стадию IV, так как это основная стадия нагрева, сопровождающаяся воспламенением и горением коксового остатка, а также догоранием летучих веществ. Температурные диапазоны всех стадий имеют различные значения для всех топлив вследствие отличающихся теплотехнических характеристик и элементного состава угля, биомассы и их смесей. Характеристики процесса горения топлив представлены в табл. 3. Основная убыль массы навески для всех топлив происходит на четвертой стадии нагрева при сгорании коксового остатка и летучих веществ (рис. 2 а).

Температура, при которой происходит воспламенение коксового остатка угля, составляет 365°С и имеет самое высокое значение среди исследуемых топлив вследствие низкого содержания летучих веществ (см. табл. 1). При неизотермическом нагреве содержание летучих веществ имеет ключевое значение и пропорционально температуре, при которой происходит воспламенение коксового остатка, а при изотермическом нагреве высокое содержание летучих веществ может оказать обратный эффект. Стадия IV для

угля представлена на кривых ДТГ и ДСК одним выраженным пиком с широкими температурными диапазонами (рис. 2 b и 2 с). Максимальная скорость горения коксового остатка угля составила 21,2 %/мин и сопровождалась экзотермическим эффектом с максимальной интенсивностью теплового потока 98,3 мВт/мг. Температура, при которой заканчивается горение угля, составила 551°С.

Стадия IV при нагреве биомассы представлена на кривых ДТГ и ДСК двумя пиками с короткими температурными интервалами. В первом пике происходит горение летучих веществ и части коксового остатка, во втором пике происходит горение коксового остатка и догорание летучих веществ. Температура, при которой воспламеняется коксовый остаток биомассы, на 66°С ниже, чем у угля (см. табл. 3). Максимальная скорость горения достигается при окислении летучих веществ – 31,3%/мин при температуре 342°С и сопровождается экзотермическим эффектом с максимальной интенсивностью теплового потока 22,7 мВт/мг. Горение коксового остатка карбонизации лигнина согласно  $DTG_{max}$  составило 24,9%/мин при температуре 458°С (рис. 2 b и 2 с), при этом максимальная интенсивность теплового потока достигла 82,1 мВт/мг. При горении целлюлозы, гемицеллюлозы и части лигнина в виде летучих веществ тепла выделяется меньше, чем при

**Таблица 3.** Характеристики горения угля, биомассы и их смесей  
**Table 3.** Combustion characteristics of coal, biomass and their mixtures

Топлива	$T_{вспл}, °С$	$T_{вр}, °С$	$DTG_{max}, \%/мин$	$T_{дтг}, °С$	$ДСК_{max}, мВт/мг$	$T_{дск}, °С$
ЗБ – 100%	365	551	21,2	422	98,3	436
ЗБ 75% + БО 25%	309	537	21,5	401	88,5	421
ЗБ 50% + БО 50%	307	532	20,3	407	76,1	417
ЗБ 25% + БО 75%	304	480	28,0	352	64,2	357
БО – 100%	299	464	31,3	342	82,1	463

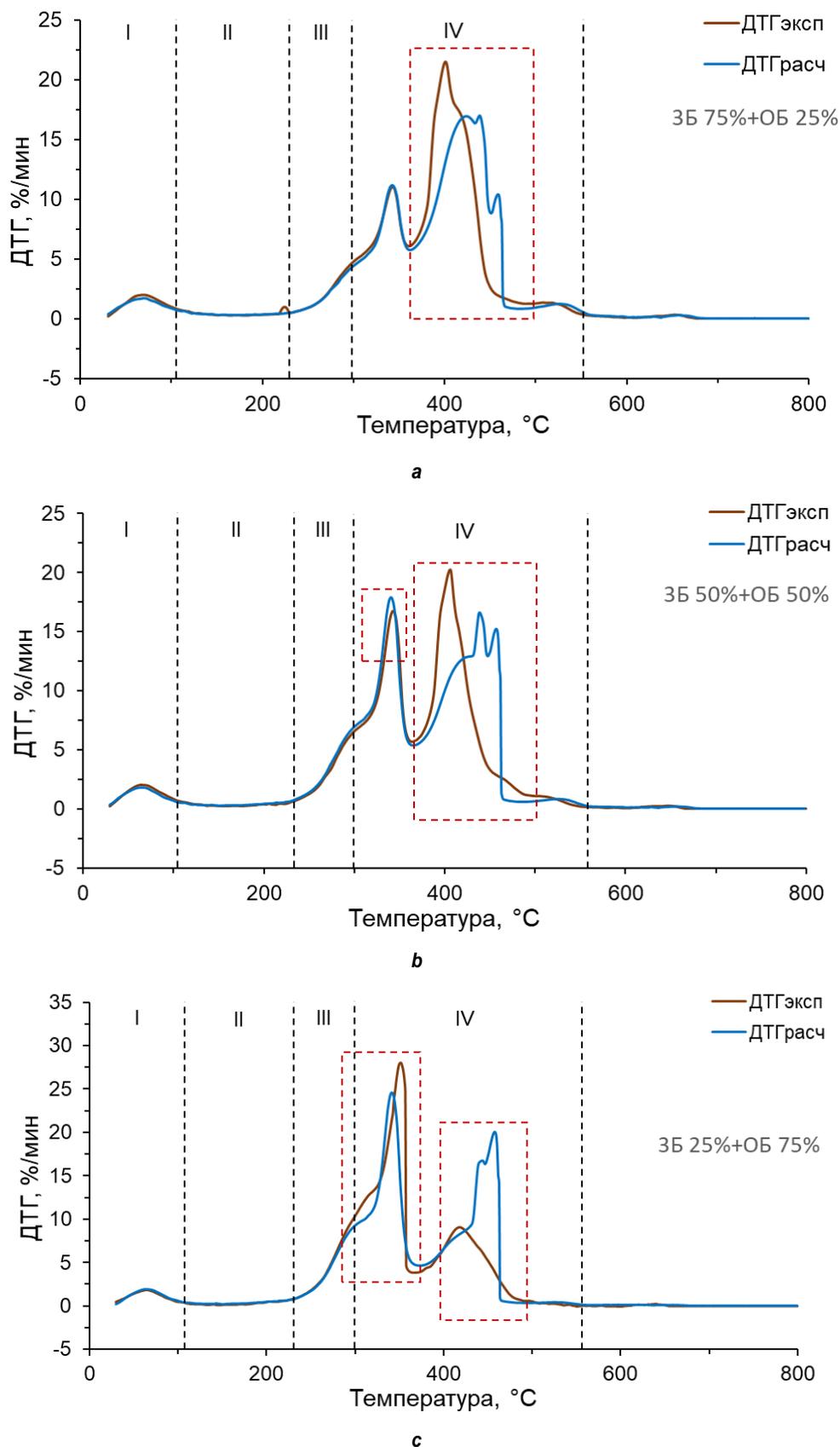


Рис. 3. Профили кривых дифференциальной термогравиметрии нагрева топливных смесей (I–IV – условные стадии нагрева): а – смесь ЗБ 75% + БО 25%; б – смесь ЗБ 50% + БО 50%; с – смесь ЗБ 25% + БО 75%  
Fig. 3. Profiles of differential thermogravimetry curves for heating fuel mixtures (I–IV – conditional stages of heating): а – ЗБ 75% + БО 25% mixture; б – ЗБ 50% + БО 50% mixture; с – ЗБ 25% + БО 75% mixture

горении коксового остатка, но при этом скорость горения летучих веществ выше на 6%/мин. В целом теплотехнические характеристики опилок из березы имеют высокие значения, что доказывает правильность их выбора в качестве добавочного топлива к бурому углю.

Добавление 25% биомассы к углю влияет в первую очередь на снижение температуры, при которой происходит воспламенение коксового остатка, уменьшая ее на 56°C по сравнению с углем и увеличивает максимальную скорость горения коксового остатка на 0,3%/мин. Максимальная интенсивность теплового потока снижается на 9,8 мВт/мг. Температура, соответствующая завершению горения смеси по сравнению с углем, снижается на 4°C (см. табл. 3).

Увеличение массового содержания биомассы в смеси до 50 % влечет снижение температуры, при которой создаются условия для воспламенения коксового остатка по сравнению с углем на 54°C, но при этом происходит снижение максимальной скорости горения на 0,9%/мин. Максимальная интенсивность теплового потока снижается на 22,2 мВт/мг, а температура, при которой завершается процесс горения, смещается в область более низких температур на 19°C.

При добавлении 75% биомассы происходит увеличение пика ДТГ при температуре 352°C, характеризующее сгорание летучих веществ. Максимальная скорость горения при этом составила 28%/мин при экзотермическом эффекте с максимальной интенсивностью теплового потока 64,2 мВт/мг (см. рис. 2 б и 2 с). Максимальная скорость горения второго пика ДТГ, соответствующего горению коксового остатка угля и биомассы, снизилась до 9%/мин при температуре 418°C с максимальной интенсивностью теплового потока 34,3 мВт/мг. Температура, при которой происходит воспламенение коксового остатка, составила 304°C, а температура, при которой завершается горение – 464°C (см. табл. 3).

При сжигании смеси на основе двух разных по химическому составу топлив возможны синергетические взаимодействия, выра-

жающиеся в изменении характеристик горения. Далее рассмотрим каждую топливную смесь на предмет аддитивного и синергетического взаимодействия компонентов. На рис. 3 представлено сравнение профилей кривых ДТГ, полученных экспериментальным путем (ДТГ<sub>эксп</sub>) и расчетным методом по формуле 1 (ДТГ<sub>расч</sub>). Стадии I–III у всех трех смесей подчиняются принципам аддитивности, об этом свидетельствует схожесть профилей кривых, построенных по экспериментальным и расчетным значениям. Анализируя стадию IV, в которой происходит горение летучих веществ и коксового остатка, можно отметить расхождение профилей кривых ДТГ (рис. 3).

При добавлении 50% биомассы к углю на стадии нагрева IV наблюдается отрицательное синергетическое взаимодействие компонентов смеси при горении летучих веществ, снижающее максимальную скорость горения на 1%/мин. Этот эффект объясняется тем, что угольные частицы, находящиеся среди частиц биомассы, препятствуют интенсивному выделению летучих веществ. Это подтверждает и увеличение скорости горения на 4%/мин, которое обусловлено догоранием оставшихся летучих веществ, создающим благоприятные температурные условия для смещения горения коксового остатка смеси в область более низких температур по сравнению с расчетными значениями (рис. 3 б).

При добавлении 75% биомассы к углю происходит положительное синергетическое взаимодействие компонентов смеси – увеличение максимальной скорости горения на 3%/мин в диапазоне температур 250–380°C. В данном температурном интервале происходит горение летучих веществ и большей части коксового остатка, о чем свидетельствует отсутствие высокого пика ДТГ в температурном диапазоне 380–480°C, который получается при расчетных значениях (рис. 3 с).

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Проведенный термический анализ большесырского угля, опилок березы и их смесей при скорости нагрева 20°C/мин показал, что увеличение массовой доли биомассы в сме-

си не влияет на интенсивное снижение температуры, при которой происходит воспламенение коксового остатка. Данная температура снижается однократно при добавлении 25% биомассы, снижение температуры воспламенения коксового остатка менее интенсивное. Увеличение массовой доли биомассы в смеси влияет на снижение температуры выгорания смесей вследствие того, что температура, при которой завершается процесс горения, у биомассы ниже, чем у угля. Помимо этого, увеличение массовой доли биомассы в смеси оказывает влияние на снижение интенсивности теплового потока, что связано со снижением теплоты сгорания смеси при увеличении массовой доли биомассы, так как теплота сгорания биомассы меньше на 4 Мдж/кг по сравнению с углем. Благоприятное синергетическое взаимодействие между компонентами смеси выражается в увеличении максимальной скорости горения и в улучше-

нии реакционных свойств смесей. В смеси на основе 75% угля и 25% биомассы благоприятное синергетическое взаимодействие наблюдается только при горении коксового остатка, в остальных случаях взаимодействие подчиняется принципам аддитивности. При добавлении 50% биомассы положительное синергетическое взаимодействие между компонентами смеси наблюдается только при горении коксового остатка, при горении же летучих веществ наблюдается отрицательное синергетическое взаимодействие. Добавление 75% биомассы усиливает синергетическое взаимодействие компонентов только при горении летучих веществ.

С точки зрения практического применения твердотопливных смесей в энергетических установках наилучшими характеристиками горения обладает смесь на основе 75% угля и 25% биомассы.

#### Список источников

1. Zhou Zhiyong, Lu Jianyi, Feng Qian, Liu Wenting. Review on occurrence, speciation, transition and fate of sulfur in typical ultra-low emission coal-fired power plants // *Journal of the Energy Institute*. 2022. Vol. 100. P. 259–276. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2021.12.004>.
2. Zhuikov A.V., Matyushenko A.I., Panfilov V.I. Nastevich O.E. Experience of using synthetic gas as the main fuel in an industrial heating boiler house // *Power Technology and Engineering*. 2021. Vol. 55. Iss. 1. P. 92–95. <https://doi.org/10.1007/s10749-021-01325-z>.
3. Merzic A., Turkovic N., Ikanovic N., Lapandic E., Kazagic A., Music M. Towards just transition of coal regions - Cultivation of short rotation coppice and dedicated energy crops for biomass co-firing vs photo voltaic power plants // *Energy Conversion and Management*: X. 2022. Vol. 15. P. 100267. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100267>.
4. Xiao Zhongzheng, Wang Shuzhong, Luo Ming, Cai Jianjun. Combustion characteristics and synergistic effects during co-combustion of lignite and lignocellulosic components under oxy-fuel condition // *Fuel*. 2022. Vol. 310. Part. B. P. 122399. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122399>.
5. Armakan S., Civan M., Yurdakul S. Determining co-combustion characteristics, kinetics and synergy behaviors of raw and torrefied forms of two distinct types of biomass and their blends with lignite // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2022. Vol. 147. Iss. 22. P. 12855–12869. <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11432-2>.
6. Рябов Г.А. Совместное сжигание биомассы и ископаемых топлив – путь к декарбонизации производства тепла и электроэнергии (Обзор) // *Теплоэнергетика*. 2022. № 6. С. 17–32. <https://doi.org/10.1134/S0040363622060054>.
7. Rahman A., Farrok O., Haque M.M. Environmental impact of renewable energy source based electrical power plants: Solar, wind, hydroelectric, biomass, geothermal, tidal, ocean, and osmotic // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022. Vol. 161. P. 112279. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112279>.
8. Saidur R., Abdelaziz E.A., Demirbas A., Hossain M.S., Mekhilef S. A review on biomass as a fuel for boilers // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011. Vol. 15. Iss. 5. p. 2262–2289. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.015>.
9. Unchaisri T., Fukuda S. Investigation of ash formation and deposit characteristics in CFB co-combustion of coal with various biomass fuels // *Journal of the Energy Institute*. 2022. Vol. 105. P. 42–52. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2022.08.005>.
10. Сосин Д.В., Литун Д.С., Рыжий И.А., Штегман А.В., Шапошников Н.А. Опыт сжигания лузги подсолнечника в пылеугольных котлах Кумертауской ТЭЦ // *Теплоэнергетика*. 2020. № 1. С. 15–22. <https://doi.org/10.1134/S0040363619120099>.
11. Melikoglu M. Vision 2023: status quo and future of biomass and coal for sustainable energy generation in Turkey // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 74. P. 800–808. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.005>.
12. Ashraf A., Sattar H., Munir S. A comparative performance evaluation of co-combustion of coal and biomass in drop tube furnace // *Journal of the Energy Institute*. 2022. Vol. 100. P. 55–65. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2021.10.008>.
13. Allguren T., Andersson K., Fry A., Eddings E.G. NO formation during co-combustion of coal with two thermally treated biomasses // *Fuel Processing Technology*. 2022. Vol. 235. P. 107365. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2022.107365>.
14. Wang Shusen, Zou Chun, Lou Chun, Yang Haiping, Pu Yang, Luo Jianghui, et al. Influence of the synergistic effects

between coal and hemicellulose/cellulose/lignin on the co-combustion of coal and lignocellulosic biomass // *Fuel*. 2022. Vol. 311. P. 122585. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122585>.

15. Cong Kunlin, Han Feng, Zhang Yanguo, Li Qinghai. The investigation of co-combustion characteristics of tobacco stalk and low rank coal using a macro-TGA // *Fuel*. 2019. Vol. 237. P. 126–132. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.09.149>.

16. Guo Feihong, He Yi, Hassanpour Ali, Gardy Jabbar, Zhong Zhaoping. Thermogravimetric analysis on the co-combustion of biomass pellets with lignite and bituminous coal // *Energy*. 2020. Vol. 197. P. 117147. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117147>.

17. Glushkov D.O., Matiushenko A.I., Nurpeiis A.E., Zhuikov A.V. An experimental investigation into the fuel oil-free start-up of a coal-fired boiler by the main solid fossil fuel with additives of brown coal, biomass and charcoal for ignition enhancement // *Fuel Processing Technology*. 2021. Vol. 223. P. 106986. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106986>.

18. Жуйков А.В., Логинов Д.А., Монгуш Г.Р., Чичерин С.В., Землянский Н.А. Термогравиметрический анализ горения каменных углей Республики Тыва до и после их карбонизации // *iPolytech Journal*. 2022. Т. 26. № 2. С. 270–283. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-270-2835>.

19. Larina O.M., Sinelshchikov V.A., Sytchev G.A. Thermogravimetric analysis of fuel blends of biomass and high-ash coal-containing Waste // *High Temperature*. 2020. Vol. 58. Iss. 5. P. 710–715. <https://doi.org/10.1134/S0018151X20050041>.

20. Chen Lichun, Wen Chang, Wang Wenyu, Liu Tianyu, Liu Enze, Liu Haowen, et al. Combustion behaviour of biochars thermally pretreated via torrefaction, slow pyrolysis, or hydrothermal carbonisation and co-fired with pulverised coal // *Renewable Energy*. 2020. Vol. 161. P. 867–877. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.06.148>.

### References

1. Zhou Zhiyong, Lu Jianyi, Feng Qian, Liu Wenting. Review on occurrence, speciation, transition and fate of sulfur in typical ultra-low emission coal-fired power plants. *Journal of the Energy Institute*. 2022;100:259-276. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2021.12.004>.

2. Zhuikov A.V., Matyushenko A.I., Panfilov V.I. Nastevich O.E. Experience of using synthetic gas as the main fuel in an industrial heating boiler house. *Power Technology and Engineering*. 2021;55(1):92-95. <https://doi.org/10.1007/s10749-021-01325-z>.

3. Merzic A., Turkovic N., Ikanovic N., Lapandic E., Kazagic A., Music M. Towards just transition of coal regions – cultivation of short rotation crops and dedicated energy crops for biomass co-firing vs photo voltaic power plants. *Energy Conversion and Management: X*. 2022;15:100267. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100267>.

4. Xiao Zhongzheng, Wang Shuzhong, Luo Ming, Cai Jianjun. Combustion characteristics and synergistic effects during co-combustion of lignite and lignocellulosic components under oxy-fuel condition. *Fuel*. 2022;310(B):122399. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122399>.

5. Armakan S., Civan M., Yurdakul S. Determining co-combustion characteristics, kinetics and synergy behaviors of raw and torrefied forms of two distinct types of biomass and their blends with lignite. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2022;147(22):12855-12869. <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11432-2>.

6. Ryabov G.A. Cofiring of coal and fossil fuels is a way to decarbonization of heat and electricity generation (review). *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2022;6:17-32. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0040363622060054>.

7. Rahman A., Farrok O., Haque M.M. Environmental impact of renewable energy source based electrical power plants: Solar, wind, hydroelectric, biomass, geothermal, tidal, ocean, and osmotic. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022;161:112279. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112279>.

8. Saidur R., Abdelaziz E.A., Demirbas A., Hossain M.S., Mekhilef S. A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011;15(5):2262-2289. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.015>.

9. Unchaisri T., Fukuda S. Investigation of ash formation and deposit characteristics in CFB co-combustion of coal with various biomass fuels. *Journal of the Energy Institute*. 2022;105:42-52. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2022.08.005>.

10. Sosin D.V., Litun D.S., Ryzhii I.A., Shtegman A.V., Shaposhnikov N.A. Experience of burning sunflower husks in the Kumertau CHP pulverized coal-fired boilers. *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2020;1:15-22. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0040363619120099>.

11. Melikoglu M. Vision 2023: status quo and future of biomass and coal for sustainable energy generation in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;74:800-808. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.005>.

12. Ashraf A., Sattar H., Munir S. A comparative performance evaluation of co-combustion of coal and biomass in drop tube furnace. *Journal of the Energy Institute*. 2022;100:55-65. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2021.10.008>.

13. Allguren T., Andersson K., Fry A., Eddings E.G. NO formation during co-combustion of coal with two thermally treated biomasses. *Fuel Processing Technology*. 2022;235:107365. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2022.107365>.

14. Wang Shusen, Zou Chun, Lou Chun, Yang Haiping, Pu Yang, Luo Jianghui, et al. Influence of the synergistic effects between coal and hemicellulose/cellulose/lignin on the co-combustion of coal and lignocellulosic biomass. *Fuel*. 2022;311:122585. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122585>.

15. Cong Kunlin, Han Feng, Zhang Yanguo, Li Qinghai. The investigation of co-combustion characteristics of tobacco stalk and low rank coal using a macro-TGA. *Fuel*. 2019;237:126-132. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.09.149>.

16. Guo Feihong, He Yi, Hassanpour Ali, Gardy Jabbar, Zhong Zhaoping. Thermogravimetric analysis on the co-combustion of biomass pellets with lignite and bituminous coal. *Energy*. 2020;197:117147. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117147>.

17. Glushkov D.O., Matiushenko A.I., Nurpeiis A.E., Zhuikov A.V. An experimental investigation into the fuel oil-free start-

up of a coal-fired boiler by the main solid fossil fuel with additives of brown coal, biomass and charcoal for ignition enhancement. *Fuel Processing Technology*. 2021;223:106986. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106986>.

18. Zhuikov A.V., Loginov D.A., Mongush G.R., Chicherin S.V., Zemlyansky N.A. Thermogravimetric analysis of the combustion of Tuva coals before and after their carbonization. *iPolytech Journal*. 2022;26(2):270-283. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-270-283>.

19. Larina O.M., Sinelshchikov V.A., Sytchev G.A. Thermogravimetric analysis of fuel blends of biomass and high-ash coal-containing waste. *High Temperature*. 2020;58(5):710-715. <https://doi.org/10.1134/S0018151X20050041>.

20. Chen Lichun, Wen Chang, Wang Wenyu, Liu Tianyu, Liu Enze, Liu Haowen, et al. Combustion behaviour of biochars thermally pretreated via torrefaction, slow pyrolysis, or hydrothermal carbonisation and co-fired with pulverised coal. *Renewable Energy*. 2020;161:867-877. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.06.148>.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

##### Жуйков Андрей Владимирович,

к.т.н.,  
заведующий лабораторией  
кафедры теплотехники и гидрогазодинамики,  
Сибирский федеральный университет,  
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, Россия  
✉ [azhuikov@sfu-kras.ru](mailto:azhuikov@sfu-kras.ru)  
<https://orcid.org/0000-0001-9809-8285>

##### Матюшенко Анатолий Иванович,

д.т.н., доцент,  
заведующий кафедрой инженерных систем зданий  
и сооружений,  
Сибирский федеральный университет,  
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, Россия  
[amatyushenko@sfu-kras.ru](mailto:amatyushenko@sfu-kras.ru)

##### Степанов Сергей Григорьевич,

д.т.н.,  
начальник управления инновационных  
технологий переработки угля  
АО «СУЭК-Красноярск»,  
660049, Красноярск, ул. Ленина 35/2, Россия  
[stepanovsg@suek.ru](mailto:stepanovsg@suek.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 20.02.2023; одобрена после рецензирования 27.03.2023; принята к публикации 25.04.2023.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

##### Andrey V. Zhuikov,

Cand. Sci. (Eng.),  
Head of the Laboratory of  
the Department of Heat Engineering and Fluid Gas  
Dynamics,  
Siberian Federal University,  
79, Svobodny pr., Krasnoyarsk 660041, Russia  
✉ [azhuikov@sfu-kras.ru](mailto:azhuikov@sfu-kras.ru)  
<https://orcid.org/0000-0001-9809-8285>

##### Anatoly I. Matyushenko,

Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Head of the Department of Engineering  
Systems of Buildings and Structures,  
Siberian Federal University,  
79, Svobodny pr., Krasnoyarsk 660041, Russia  
[amatyushenko@sfu-kras.ru](mailto:amatyushenko@sfu-kras.ru)

##### Sergey G. Stepanov,

Dr. Sci. (Eng.),  
Head of the Department of Innovative Technologies of  
Coal Processing,  
JSC «SUEK-Krasnoyarsk»,  
35/2, Lenin St., Krasnoyarsk 660049, Russia  
[stepanovsg@suek.ru](mailto:stepanovsg@suek.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 20.02.2023; approved after reviewing 27.03.2023; accepted for publication 25.04.2023.

## ЭНЕРГЕТИКА



Научная статья  
УДК 621.314.22.08  
<https://elibrary.ru/tqsdvv>  
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-322-338>

## Анализ методов контроля технического состояния оборудования на применимость к высоковольтным электронным измерительным трансформаторам

С.Н. Литвинов<sup>1✉</sup>, В.Д. Лебедев<sup>3</sup>, А.В. Гусенков<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, г. Иваново, Россия

**Резюме.** Цель – подробный анализ статистических данных о причинах выхода из строя высоковольтного оборудования, в частности измерительных трансформаторов тока и напряжения; тщательное изучение факторов, влияющих на техническое и функциональное состояния измерительных трансформаторов; исследование существующих методов контроля технического функционирования высоковольтного оборудования на применимость к электронным измерительным трансформаторам; разработка основных принципов построения стационарной системы контроля технических возможностей электронных измерительных трансформаторов. При помощи глубокого анализа исследованы существующие научные публикации и объекты авторского права по обозначенной тематике, применен системный подход к проблеме, рассмотрены методы индукции и дедукции, метод классификации, метод абстрагирования. Результатом проведенного исследования стало детальное изучение существующих методов контроля технических способностей высоковольтного оборудования на применимость к электронным измерительным трансформаторам. Рассмотрено влияние различных режимных и внешних факторов на техническое и функциональное состояния измерительных трансформаторов. Представлены основные принципы построения стационарной системы контроля технического состояния электронных измерительных трансформаторов. На основе проведенного анализа установлено, что повреждаемость измерительных трансформаторов в сетях среднего напряжения составляет порядка 6% от всех аварий, а в сетях 110 кВ и выше – порядка 7. Сделан вывод, что аварии связаны с повреждением изоляции, с некачественным изготовлением и монтажом, с воздействием на оборудование на техническое и функциональное состояния измерительных трансформаторов режимных параметров и внешних факторов. С учетом рассмотренных методов контроля технического состояния высоковольтного оборудования авторами предложена функциональная схема стационарной системы контроля технических возможностей электронных измерительных трансформаторов на цифровой подстанции.

**Ключевые слова:** цифровая подстанция, электронный измерительный трансформатор, стационарная система мониторинга, контроль технического состояния, техническая диагностика, методы контроля технического состояния

**Финансирование:** Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» ГК 14.577.21.0276.

**Для цитирования:** Литвинов С.Н., Лебедев В.Д., Гусенков А.В. Анализ методов контроля технического состояния оборудования на применимость к высоковольтным электронным измерительным трансформаторам // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 2. С. 322–338. EDN: TQSDVV, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-322-338>.

## POWER ENGINEERING

Original article

## Analysis of methods for monitoring the technical condition of high-voltage electronic measuring transformers

Sergey N. Litvinov<sup>1✉</sup>, Vladimir D. Lebedev<sup>2</sup>, Aleksey V. Gusenkov<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russia

© Литвинов С.Н., Лебедев В.Д., Гусенков А.В., 2023

**Abstract.** The objectives of the present study included an analysis of statistical data on the failure causes of high-voltage equipment with a particular focus on current and voltage measuring transformers; a study of factors affecting the technical and functional condition of measuring transformers; a review of available methods for monitoring the technical condition of high-voltage electronic measuring transformers; the development of the basic principles of a stationary system for monitoring the technical capabilities of electronic measuring transformers. A review of available scientific publications and copyright objects on the aforementioned problems was conducted. The results were processed using the principles of systematic approach, as well as induction, deduction, classification and abstraction methods. The existing methods for monitoring the technical condition of high-voltage electronic measuring transformers were analyzed. The influence of various regimes and external factors on the technical and functional state of measuring transformers was investigated. The main principles for developing a stationary system for monitoring the technical condition of electronic measuring transformers were formulated. It was established that the failure of measuring transformers in medium voltage networks accounts for 6% of all failures. In 110 kV and higher-voltage networks, this level reaches 7%. It was found that the majority of accidents is associated with damaged insulation, poor-quality manufacturing and installation of the equipment, the impact of operating parameters and external factors on the technical and functional state of measuring transformers. Based on the considered methods for monitoring the technical condition of high-voltage equipment, a functional scheme of a stationary system for monitoring the technical capabilities of electronic measuring transformers at a digital substation is proposed.

**Keywords:** digital substation, electronic instrument transformer, stationary monitoring system, technical condition monitoring, technical diagnostics, methods of technical condition monitoring

**Funding:** The work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the Federal Target Program “Research and Development in Priority Areas of Development of the Scientific and Technological Complex of Russia for the period from 2014 to 2020”, project 14.577.21.0276.

**For citation:** Litvinov S.N., Lebedev V.D., Gusenkov A.V. Analysis of methods for monitoring the technical condition of high-voltage electronic measuring transformers. *iPolytech Journal*. 2023;27(2):322-338. (In Russ.). EDN: TQSDVV, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-322-338>.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время растет уровень автоматизации объектов электроэнергетики, в частности электрических подстанций. Согласно концепции программы «Цифровая трансформация 2030»<sup>4</sup>, положительный эффект, связанный с ростом автоматизации, заключается в повышении надежности и экономичности генерации, распределения и потребления электроэнергии. Достигается он в том числе и за счет применения современных технических средств и аппаратно-программных комплексов, которые представляют собой интегрированные в технологический процесс цифровые системы измерения параметров электроэнергии, управления высоковольтным оборудованием, релейной защиты и автоматики. Доступ к информации, ее передача и обработка на такой подстанции производятся в цифровом виде, в связи с чем подстанция получила

название «цифровая»<sup>5</sup>.

В соответствии со стандартом<sup>6</sup>, для локальной передачи данных между отдельными устройствами на таких подстанциях применяются общеизвестные протоколы сетевой модели TCP/IP и специальные протоколы [1–3]: об измеренных мгновенных значениях токов и напряжений МЭК 61850-9.2 (англ. Sampled values (SV) – выборочные значения), об изменении состояния дискретных систем МЭК 61850-8.1 (англ. Generic Object-Oriented Substation Event (GOOSE) – объектно-ориентированное событие на подстанции), сервисных и конфигурационных данных в клиент-серверной архитектуре ИСО/МЭК 9506 (англ. Manufacturing Message Specification (MMS) – спецификация производственных сообщений). В информационной структуре подстанции, согласно стандарту<sup>7</sup>, выделяют три иерархических уровня [4, 5].

<sup>4</sup>Концепция «Цифровая трансформация 2030» URL:

[http://www.rosseti.ru/investment/Kontseptsiya\\_Tsifrovaya\\_transformatsiya\\_2030.pdf](http://www.rosseti.ru/investment/Kontseptsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030.pdf) (10.01.2023).

<sup>5</sup>Программа инновационного развития ПАО «Россети» на 2016-2020 гг. с перспективой до 2025 г. URL: [http://www.rosseti.ru/investment/policy\\_innovation\\_development/doc/innovation\\_program.pdf](http://www.rosseti.ru/investment/policy_innovation_development/doc/innovation_program.pdf) (10.01.2023).

<sup>6</sup>ГОСТ Р МЭК 61850. Сети и системы связи на подстанциях. Введ. 01.01.2011.

<sup>7</sup>СТО 56947007-29.240.10.299-2020. Цифровая подстанция. Методические указания по проектированию ЦПС. Введ. 26.02.2020. М.: ПАО «ФСК ЕЭС», 2020.

Однако трехуровневое исполнение цифровой подстанции является не единственно возможным. Существует также вариант, в котором все критические функции (защиты, измерения, управления) выполняются программными модулями, которые могут быть развернуты на различных аппаратных платформах. Соответствующий программно-технический комплекс (ПТК) подстанции носит название iSAS (integrated Substation Automation System) или «интегрированная система автоматизации подстанции» [6]. Архитектура, в которой основные функции распределены между электронными модулями комплексного ПТК с возможностью взаимного резервирования критически важных функций, получила название «кластерная подстанция» или FDA (англ. Flexible Dynamic Architecture – функционально-динамическая архитектура) [7].

В описанных структурах цифровых или высокоавтоматизированных подстанций (ВАПС) важную функцию выполняют измерительные трансформаторы. Могут использоваться традиционные электромагнитные трансформаторы в связке с преобразователями аналоговых сигналов. Однако все больше применение находят электронные измерительные трансформаторы. Электронные или, как их называют в научно-популярной литературе, «цифровые» (далее используется как синоним) трансформаторы имеют существенные преимущества перед электромагнитными трансформаторами и емкостными делителями напряжения [8–10]. Опыт внедрения цифровых трансформаторов показывает, что их стоимость выше классических измерительных трансформаторов. При этом относительная цена снижается с ростом класса напряжения. В связи с этим научный интерес представляет вопрос надежности работы этого нового вида оборудования.

## **ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ**

В своем жизненном цикле цифровые трансформаторы проходят сертификационные, приемо-сдаточные, пуско-наладочные, периодические испытания с целью подтверждения обеспечения критически важных па-

раметров функционирования. Однако в отечественной нормативной документации, содержащей сведения об испытаниях и общие технические требования, не учтены все особенности конструкции и режимов работы цифровых трансформаторов. Поэтому, во-первых, некоторые испытания не дают необходимой информации о техническом состоянии отдельных узлов и трансформатора в целом. Во-вторых, из-за отсутствия опыта эксплуатации нового вида оборудования нет информации о его показателях надежности, а нормативная периодичность испытаний не позволяет оценить текущее состояние оборудования и выявить дефекты на ранней стадии.

В работе ставится цель анализа статистики причин выхода из строя высоковольтного оборудования, в частности измерительных трансформаторов, анализа факторов, влияющих на техническое и функциональное состояние измерительных трансформаторов, анализа существующих методов контроля технического состояния высоковольтного оборудования на применимость к электронным измерительным трансформаторам, разработка основных принципов построения стационарной системы контроля технического состояния электронных измерительных трансформаторов. Данная система позволит нивелировать ущерб от нарушения электропитания при отказе трансформатора благодаря раннему обнаружению дефектов. При этом удельная стоимость трансформатора с системой контроля технического состояния может оказаться ниже таких затрат.

## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Ввиду сложности комплексного анализа аварийности за длительный период судить о повреждении электротехнического оборудования можно только по немногочисленным открытым источникам. Так, согласно отчету Министерства энергетики, в период с 2014 по 2016 г. на долю повреждений электротехнического оборудования подстанций (ПС) и открытых распределительных устройств (ОРУ), приведших к нарушению электроснабжения потребителей мощностью 10 МВт и более, приходилось порядка 30% от общего количе-

ства аварий. При этом на измерительные трансформаторы наблюдалось 2% отказов [11]. Частой причиной выхода из строя измерительных трансформаторов в классах напряжений 6–35 кВ является повреждение изоляции, а трансформаторов напряжения – феррорезонансы [12].

Согласно [13], за период 1997–2007 гг. на долю измерительных трансформаторов тока в классе 110 кВ и выше приходилось 3,8%, а трансформаторов напряжения – 4,4% от общего числа аварий на ПС и ОРУ. Наибольшее количество повреждений приходится на трансформаторы тока и напряжения класса 110 кВ (порядка 68%). Причины повреждения измерительных трансформаторов приведены на рис. 1. Как видно из рис. 1, одной из основных причин повреждения традиционных измерительных трансформаторов является нарушение изоляции. Стоит отметить, что

повреждаемость маслонаполненных трансформаторов тока составила 87,9%, а элегазовых – 12,1%. Это связано и с малым количеством установленного элегазового оборудования. Кроме того, известны случаи, когда повреждения измерительных трансформаторов сопровождались их возгоранием и пожарами в распределительных устройствах, кумулятивными взрывами с повреждением рядом стоящего оборудования, что вызывало каскадное развитие аварии. К категориям «прочие» и «посторонние воздействия» можно отнести повреждения, связанные с природными явлениями, например, с нерасчетными тепловыми нагрузками. Согласно данным [14], в 2010 и 2011 гг. произошел ряд повреждений измерительных трансформаторов тока и напряжения в связи с длительным периодом аномально высоких температур.

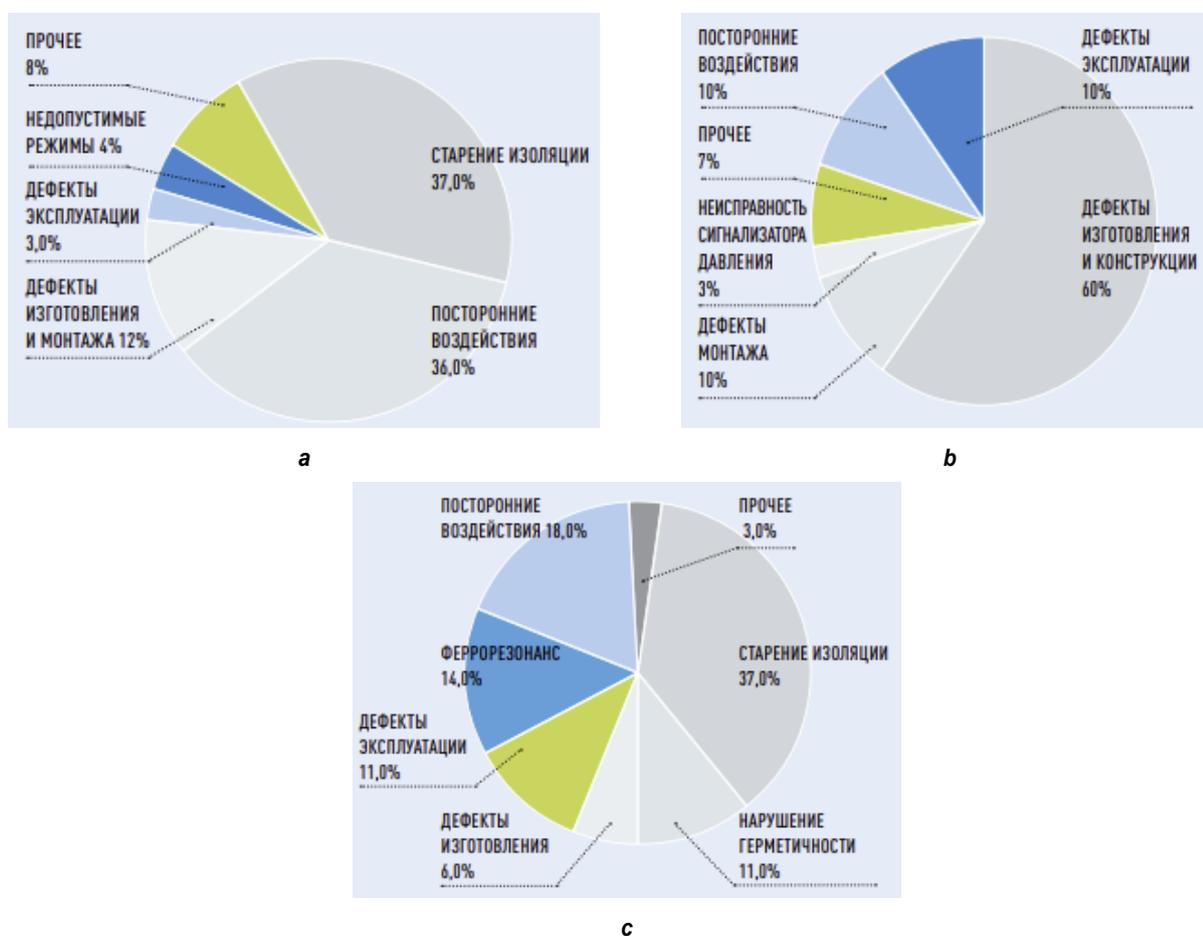


Рис. 1. Причины повреждения измерительных трансформаторов: а – маслонаполненные трансформаторы тока; б – элегазовые трансформаторы тока; с – маслонаполненные трансформаторы напряжения  
Fig. 1. Instrument transformer damage causes: a – oil-filled current transformers; b – SF6 current transformers; c – oil-filled voltage transformers

Также участились случаи негативного влияния низких температур.

Из анализа приведенной выше статистики следует, что надежность работы крупных энергосистем и отдельных ее компонентов в большей степени определяется надежностью работы электрооборудования, в частности измерительных трансформаторов. Статистика показывает, что основными причинами отказов являются как естественные процессы, например старение изоляции, так и человеческий фактор – дефекты изготовления и конструкции или неправильная эксплуатация. Дефекты сами по себе могут приводить к полному или частичному (нарушение функционирования) отказу. Появление дефектов в конструктивных частях оборудования возможно на всех стадиях жизненного цикла оборудования. Функциональное нарушение для измерительного трансформатора означает, прежде всего, ухудшение точности преобразования, что негативно сказывается на работе вторичных систем. Поэтому необходимо выявлять дефекты на ранней стадии их возникновения и развития для оценки степени их влияния на техническое состояние трансформатора. Это позволит предсказать момент выхода оборудования из строя и своевременно вывести его из эксплуатации или отбраковать трансформатор на этапе производства или пусконаладочных работ, что, в свою очередь, приведет к снижению затрат на ликвидацию аварий.

В то же время цифровой трансформатор является более сложным объектом, поскольку содержит как маломощные (нетрадиционные) первичные преобразователи, так и устройства электроники и вычислительной техники, объединенные в единую систему, а также в нем используется полимерная внутренняя изоляция [15–18]. Ввиду наличия микроконтроллера и других полупроводниковых элементов надежность трансформатора снижается по отношению к традиционным применяемым решениям, следовательно, требуется принять меры по повышению надежности. Среди основных известных методов в первую очередь применяются резервирование. Оно может быть аппаратным, например, дублирование. Однако данный

метод не всегда оправдан экономически. Другими методами резервирования является функциональное и информационное. Для их применения необходим алгоритм определения однозначного состояния, в котором в данный момент времени находится оборудование. На этот вопрос может ответить техническая диагностика, которая позволяет с помощью различных методов и средств контролировать состояние электрооборудования даже в процессе эксплуатации, т.е. непрерывно [19].

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

Среди факторов, воздействующих на цифровой трансформатор и определяющих его техническое и функциональное состояние, можно выделить те, которые формируются режимом его работы, т.е. внутренние, и те, которые являются внешними по отношению к нему (погодные, климатические, электромагнитные).

К основным внутренним факторам можно отнести:

– рабочее напряжение или перенапряжения (электрическая компонента электромагнитного поля), вызывающие старение [20, 21] и повреждение изоляции (потерю диэлектрических свойств), особенно при наличии механических дефектов, появившихся при изготовлении (вследствие несовершенства технологического процесса), транспортировке, монтаже или в процессе работы цифровых трансформаторов;

– нагрев основных токопроводящих элементов [22], таких как первичная обмотка трансформатора, безиндуктивный шунт, вторичные обмотки трансформатора тока и катушки Роговского, резистивный делитель;

– насыщение магнитопровода трансформатора тока при протекании значительных токов в первичной обмотке (в том числе за счет наличия в токе апериодической составляющей) [23] и его остаточная намагниченность при снятии действия тока [24, 25], что приводит к ухудшению метрологических свойств и как следствие искажению данных;

– питающее напряжение (в том числе опорные напряжения электронных компонен-

тов электронного блока). Ухудшение качества питающего напряжения может привести как к функциональному нарушению, так и к полному отказу трансформатора (как в аналоговой, так и в цифровой его части);

- мощность светового потока на выходе источника и входе приемника данных;
- деградация полупроводников [26].

Основными внешними факторами являются:

- инсоляция (влияние солнечной радиации на нагрев трансформатора);
- температура окружающей среды и движение воздушных потоков (определяет тепловое состояние трансформатора в целом);
- влага, содержащаяся в воздухе, окружающем элементы конструкции измерительного трансформатора, в том числе изоляцию [27];

– пыль и грязь, содержащаяся в воздухе. Она может вызвать снижение пробивного напряжения внешней изоляции;

- ошибки при проектировании, конструировании, сборе и монтаже трансформаторов;

– внешние электромагнитные поля, создаваемые токами, протекающими в первичных и вторичных контурах оборудования, расположенного рядом с цифровым трансформатором, токами молний и т.п. [28]. Электрические и магнитные компоненты полей определяют состояние изоляции трансформатора, электромагнитной системы первичных преобразователей, электромагнитную совместимость электронных модулей и блоков [29]. Изменение электромагнитной обстановки, в которой находится трансформатор, также может привести к нарушению функционального состояния или его отказу.

Таким образом, контролируя ряд параметров в ходе испытаний и в процессе эксплуатации трансформатора, можно определить его текущее состояние, скорректировать точность преобразования с учетом влияния внутренних и внешних факторов и за счет своевременного выявления дефекта и оперативного (при необходимости) вывода оборудования из эксплуатации повысить в целом надежность его работы.

В настоящее время статистика работы цифровых и оптических трансформаторов

[30] в нашей стране практически отсутствует ввиду того, что отечественная промышленность начала выпуск подобного оборудования сравнительно недавно, а объемы закупаемых импортных устройств незначительны. В большинстве случаев производимое и (или) закупленное оборудование используется для реализации пилотных проектов, которые направлены, прежде всего, на совместимости работы устройств разных производителей и апробацию технологии [31–34]. Несмотря на то, что ряд факторов, воздействующих на работу цифровых трансформаторов, определяет работу и традиционных измерительных трансформаторов, благодаря особенностям конструкции первых это воздействие осуществляется иным образом с точки зрения количественных и качественных характеристик. Кроме того, появляются дополнительные факторы, влияющие на техническое состояние цифровых трансформаторов. Рассмотрим существующие способы контроля технического состояния традиционных измерительных трансформаторов и схожего энергетического оборудования, проанализируем их применимость к цифровым трансформаторам и поставим задачу адаптации существующих и разработки новых способов контроля с учетом конструктивных и эксплуатационных особенностей цифровых трансформаторов:

**Контроль диэлектрических свойств изоляции измерительного трансформатора.** Изоляционные конструкции измерительных трансформаторов должны выдерживать приложенное в ходе испытаний и эксплуатации напряжение, не разрушаясь при этом. Среди основных причин возможного пробоя изоляции можно выделить нарушение целостности изоляции при изготовлении, транспортировке и монтаже трансформаторов, естественные процессы электрического и термического старения, при котором снижается электрическая прочность, аварийное повышение напряжения в процессе эксплуатации, ослабление изоляции при высоковольтных испытаниях [35–38].

Наличие дефектных зон в изоляции, а значит и качество изоляции в целом определяется в ходе испытаний. В настоящее время

не существует нормативных документов, определяющих порядок и виды испытаний для цифровых трансформаторов, поэтому следует руководствоваться существующими на сегодняшний день нормативными документами<sup>8-11</sup>.

Основные методы контроля качества изоляции можно разбить на две группы: неразрушающие и условно разрушающие [39]. К неразрушающим методам можно отнести определение тангенса угла диэлектрических потерь  $tg(\delta)$ , измерение тока утечки, измерение характеристик частичных разрядов и т.д. [40, 41]. К условно разрушающим испытаниям относятся одноминутное испытание изоляции повышенным напряжением, испытание изоляции грозовым импульсом и измерение сопротивления изоляции [40, 42]. Метод испытания повышенным напряжением не всегда является оправданным [43, 44]. Ситуация осложняется тем, что в конструкции цифровых трансформаторов напряжения и в комбинированных (тока и напряжения) присутствует резистивный делитель. Он частично шунтирует изоляцию, а повышенное напряжение может вызвать его тепловое разрушение. Поэтому для цифровых трансформаторов актуальными становятся вопросы определения состояния изоляции при изготовлении и в процессе эксплуатации неразрушающими методами.

Среди неразрушающих методов наиболее перспективным, с точки зрения авторов, является метод измерения характеристик частичных разрядов в изоляции [45], поскольку его можно адаптировать для конструкции цифрового трансформатора. Возникновение частичных разрядов сопровождается различными физическими явлениями, которые используются для их регистрации. Наиболее досто-

верным способом регистрации частичных разрядов можно назвать электрический, поскольку при его применении регистрируемые сигналы имеют наибольшую мощность, что позволяет легче выделять их на фоне помех. Регистрация проводится в соответствии с требованиями международных и отраслевых стандартов в высокочастотном диапазоне частот (0,5–200 МГц). К преимуществам относят наличие стандартов с описанием схем измерения и градуировки для различного оборудования. К недостаткам – сложность локализации частичных разрядов, среднюю помехозащищенность [46, 47]. Суть электрических методов заключается в регистрации импульсного напряжения, формируемого токами частичных разрядов с помощью индуктивных и емкостных датчиков, установленных в цепи протекания этих токов. Результаты применения данного метода при исследовании на макете цифрового трансформатора приведены в [48].

**Контроль теплового состояния высоковольтного оборудования.** Основным источником нагрева оборудования, в том числе и трансформаторов, является ток, протекающий по токоведущим частям в узлах конструкции (например, в обмотках). Несмотря на то что в номинальном и близких к нему режимах выделенное тепло успевает рассеяться за счет естественной конвекции, в условиях перегрузки и в аварийных режимах тепловыделение может вызвать термическое разрушение элементов конструкции трансформатора. В настоящее время допустимый нагрев обмоток трансформатора тока ведется косвенными методами – по допустимому току (в режимах перегрузки) или интегралу Джоуля (в аварийных режимах)<sup>12</sup>. При этом не учитываются изменения внешних условий, в которых находится трансформатор (темпе-

<sup>8</sup> РД 34.45-41.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования. Введ. 25.12.2009 (изм. 01.03.2001). М.: НЦ Энас, 2004.

<sup>9</sup> ГОСТ 1516.3-96. Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции. Введ. 07.04.1998. М.: ИПК Изд-во стандартов, 1998.

<sup>10</sup> ГОСТ 1983-2015. Трансформаторы напряжения. Общие технические условия. Введ. 01.03.2017. М.: Стандартинформ, 2016.

<sup>11</sup> ГОСТ 7746-2015. Трансформаторы тока. Общие технические условия. Введ. 01.03.2017. М.: Стандартинформ, 2016.

<sup>12</sup> Васильев А.А., Крючков И.П., Наяшкова Е.Ф., Околович М.Н. Электрическая часть станций и подстанций: учебник. 2-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1990. 575 с.

ратура окружающей среды, интенсивность теплоотвода, инсоляция и т.п.). Для трансформатора напряжения подобные расчеты и вовсе не выполняются. Кроме того, изменение температуры вызывает изменение погрешности преобразования и срока службы изоляции [49–52], которые также обычно не оцениваются в процессе эксплуатации.

Одним из способов получить представление о тепловом состоянии электрооборудования в настоящее время является инфракрасная термография [53–56]. Этот метод основан на регистрации тепловизором ИК-излучения с поверхности электрооборудования. Однако, во-первых, она выполняется периодически, с большим временным интервалом, а во-вторых, позволяет измерять значения температуры только на поверхности, при этом дополнительная погрешность измерения может вноситься неправильной настройкой коэффициента отражения, коэффициента излучения поверхности, внешними погодными условиями (инсоляция, движение воздушных масс, температура и влажность окружающей среды и т.д.). В цифровых трансформаторах напряжения (или комбинированных) дополнительным источником тепла является резистивный делитель, что изменяет картину температурного поля по сравнению с традиционными преобразователями, а в качестве изоляции используются полимерные материалы. Помимо прочего, цифровой трансформатор оснащен электронным блоком, в котором имеется ряд компонентов с интенсивным тепловыделением.

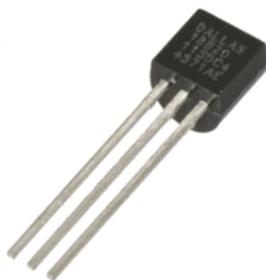
Наличие источника питания в цифровом трансформаторе и оптоволоконной системы передачи информации позволяет создать

систему мониторинга температуры в режиме реального времени. Инструментальные средства, способные дать адекватное значение температуры локально (в том числе и внутри трансформатора) – это датчики температуры. Современные датчики температуры представляют собой комбинированные устройства аналоговой и цифровой техники (см. рис. 2 а), поэтому в наибольшей степени подходят для мониторинга и оценки технического состояния цифровых трансформаторов. Структурная схема такого датчика показана на рис. 2 б).

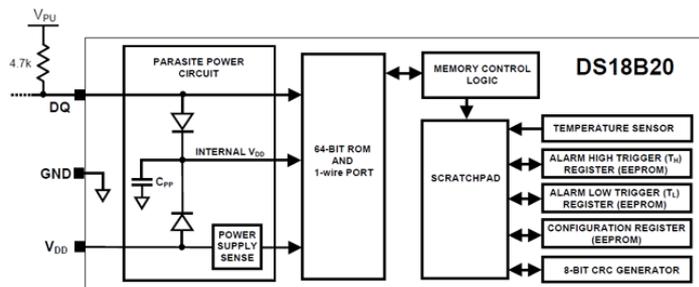
Таким образом, для своевременного выявления предаварийного состояния цифрового трансформатора необходимо решить следующие задачи:

- определить критические точки конструкции, контроль температуры в которых позволит наиболее точно оценивать техническое состояние и ресурс трансформатора;

- сформулировать подходы к организации мониторинга температуры в критически значимых точках конструкции цифрового измерительного трансформатора в темпе процесса нагрева, разработать алгоритм оценки технического состояния трансформатора на основе данных мониторинга температуры. Для определения диагностических критериев перехода в неработоспособное состояние при перегреве отдельных элементов конструкции трансформатора с учетом воздействия внутренних и внешних факторов были проведены исследования на физических моделях, которые показали правильность и обоснованность принятых решений в части постановки эксперимента и гипотез о процессе нагрева трансформатора [57, 58].



a



b

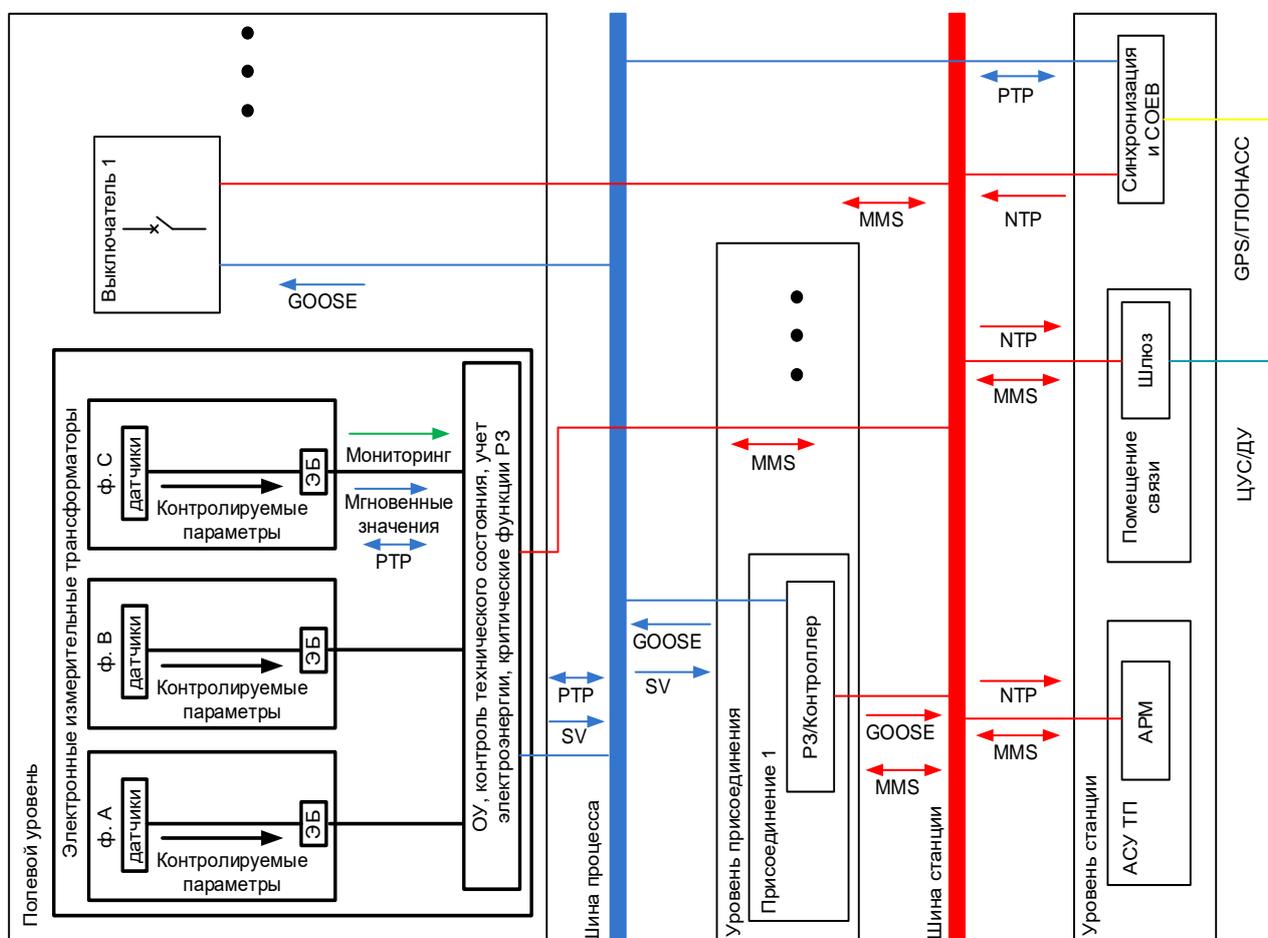
Рис. 2. Внешний вид электронного датчика температуры (а) и его структурная схема (б)

Fig. 2. An image of the electronic temperature sensor (a) and its block diagram (b)

3. Контроль насыщения и остаточной намагниченности магнитопровода трансформатора тока.

Сталь электромагнитных преобразователей тока подвержена насыщению и остаточной намагниченности, которые приводят к искажениям формы сигнала, что в свою очередь увеличивает погрешности преобразования [59, 60]. Насыщение трансформаторов тока и остаточная намагниченность материала магнитопровода опасны, прежде всего, тем, что могут привести к отказам, излишнему или ложному действию релейной защиты [61–63]. В цифровых трансформаторах основным источником сигнала для целей релейной защиты является катушка Роговского, которая не подвержена эффектам насыщения и остаточной намагниченности, а мало-мощный/малогабаритный трансформатор

тока используется для целей коммерческого учета и контроля параметров качества электроэнергии. При отказе катушки Роговского в качестве резервного источника сигнала для релейной защиты может быть использован трансформатор тока. При этом как в нормальном, так и в аварийном режимах может произойти насыщение сердечника трансформатора тока, что приведет к функциональному нарушению работы вторичных систем. Поэтому задача своевременного выявления насыщения и остаточной намагниченности является актуальной. Существует ряд математических методов восстановления сигнала тока при насыщении [64–67], однако в них заложена погрешность, обусловленная отсутствием информации о реальных значениях тока в переходном и установившемся режимах.



**Рис. 3. Функциональная схема стационарной системы контроля технического состояния электронных измерительных трансформаторов на цифровой подстанции**  
**Fig. 3. Functional diagram of a stationary technical condition monitoring system for electronic instrument transformers at a digital substation**

Система мониторинга насыщения и остаточной намагниченности построена с учетом предположения, что в качестве эталонного сигнала может использоваться сигнал с катушки Роговского. Сравнение амплитудных спектров вторичного тока трансформатора тока и катушки Роговского покажет наличие таких явлений, как насыщение и остаточная намагниченность. Для определения диагностических признаков и их количественной оценки были проведены исследования явлений на математических моделях и экспериментальных образцах преобразователей, которые показали правильность и обоснованность принятых решений в части постановки эксперимента и гипотез о процессах насыщения и остаточной намагниченности [68, 69].

С учетом подходов к организации систем контроля технического состояния высоковольтного электрооборудования изложенных выше и проведенных исследований предложена следующая функциональная схема стационарной системы контроля технического состояния электронных измерительных трансформаторов на цифровой подстанции (рис. 3).

Рис. 3 отражает концепцию максимальной интеграции различных функций (защиты, измерений, учета электроэнергии, контроля технического состояния) в одном устройстве, выполненном на базе электронного трансформатора, имеющего модульную структуру, что расширяет технические возможности, обеспечивает компактность устройства, снижает удельную стоимость. Кроме того, при комплектном исполнении подобной системы совместно с высоковольтным выключателем

можно добиться универсального решения, позволяющего сократить затраты на кабельную и шкафную продукцию, повысить надежность сети. Данные мониторинга поступают в систему управления надежностью цифровой подстанции. В результате мониторинга формируется информация о состоянии трансформатора и режиме его работы, что позволяет предотвратить аварийные ситуации, связанные с повреждением его элементов или нарушением функционирования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа повреждений высоковольтного оборудования можно сделать вывод о том, что регулярная диагностика снижает аварийность, однако существенного снижения можно добиться благодаря непрерывному мониторингу технического состояния критически важных узлов оборудования. Как показано в работе, успешное массовое внедрение цифровых измерительных трансформаторов может быть достигнуто при использовании мониторинга текущего состояния критически важных параметров, таких как температура токопроводящих элементов и элементов резистивного делителя, остаточная намагниченность сердечника встроенного трансформатора тока, наличие и интенсивность частичных разрядов, качество и уровень напряжения на элементах питания электронных модулей цифрового трансформатора. Такой подход позволяет осуществлять предиктивную аналитику, максимально быстро выявляя неисправности трансформатора еще до окончательного выхода его из строя.

## Список источников

1. Wang Yu-duo, Dai Xiao-miao. A Ethernet interface solution based on TCP/IP protocol // IEEE 11th International Conference on Signal Processing. 2012. P. 1521–1525. <https://doi.org/10.1109/ICoSP.2012.6491863>.
2. Zhijian Qu, Mingguang Liu, Zhiling Jiang, Feng Wu, Jing Liu, Lichao Sun. Study of communication gateway based on IEC61850 Protocol // International Conference on Communication Software and Networks. 2009. P. 659–662. <https://doi.org/10.1109/ICCSN.2009.17>.
3. Adamiak M., Baigent D. IEC 61850 Communication networks and systems in substations: an overview for users // The Protection & Control Journal. 2009. P. 61–68.
4. Чичёв С.И., Калинин В.Ф., Глинкин Е.И. Методология проектирования цифровой подстанции в формате новых технологий. М.: Спектр. 2014. 228 с.
5. Чичёв С.И., Калинин В.Ф., Глинкин Е.И. Информационно-измерительная система электросетевой компании. М.: Спектр, 2011. 156 с.
6. Дорофеев И.Н., Серрато А.Э., Чаркин А.В. Реализация системы защиты и управления цифровой подстанции

- на базе программного комплекса iSAS // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем: сб. презентаций участников IV Междунар. науч.-техн. конф. РНК Cigre (г. Екатеринбург, 3–7 июня 2013 г.). Екатеринбург: Российский национальный комитет СИГРЭ, 2013. С. 1–5.
7. Власов М., Иванов А., Кириллов А., Перегудов С., Сердцев А. АСУ с гибкой динамической архитектурой для цифровых подстанций // Электроэнергия. Передача и распределение. 2012. № 5. С. 92–96.
8. Хренников А., Галиев И., Скрыдлов Е. Цифровые трансформаторы тока. Устройства для вычисления силы тока // Новости электротехники. 2015. № 6. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2015/96/06.php> (09.01.2023).
9. Янин М.А., Канафеев Р.И., Иванов Н.А., Шеметов А.С., Козырев А.В. Текущие результаты опытной эксплуатации электронных ТТ и ТН 500 кВ // Энергоэксперт. 2020. № 1. С. 62–67.
10. Сержаский В.П., Басмановский М.А. Анализ современного состояния измерительных датчиков тока, их преимущества и недостатки // Modern Science. 2019. № 12-1. С. 613–617.
11. Грабчак Е.П., Байков И.А., Медведева Е.А., Дунаев П.А. Основные результаты функционирования объектов электроэнергетики в 2016 году. Итоги прохождения ОЗП 2016–2017 годов. Задачи на среднесрочную перспективу. 2017. [Электронный ресурс]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/6575> (09.01.2023).
12. Саенко Ю.Л., Попов А.С. Исследование причин повреждения трансформаторов напряжения контроля изоляции // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2011. № 7. С. 59–66.
13. Богомолов В.С., Зихерман М.Х., Львов Ю.Н., Назаров И.А., Тимашова Л.В., Шлейфман И.Л. [и др.]. Повреждаемость основного электрооборудования ПС напряжением 110-750 кВ в РФ // Энергия единой сети. 2013. № 2. С. 14–21.
14. Хренников А.Ю., Мажурин Р.В. Диагностика и мероприятия по снижению аварийности высоковольтных измерительных трансформаторов тока и напряжения в электрических сетях 110-750 кВ // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2013. № 1. С. 52–54.
15. Нечаев Е.В., Яблоков А.А., Лебедев В.Д. Разработка и исследование резистивного делителя напряжения 6-10 кВ // Наука и инновации в технических университетах: матер. IX Всерос. форума студ., асп. и молодых ученых (г. Санкт-Петербург, 27–30 октября 2015 г.). Санкт-Петербург, 2015. С. 31–33.
16. Лылов П.В., Лебедев В.Д., Фомичев А.А. Разработка и исследование системы передачи оцифрованных значений токов и напряжений на подстанции // ЭНЕРГИЯ-2016: матер. XI Междунар. науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых ученых (г. Иваново, 5–7 апреля 2016 г.). Иваново, 2016. Т. 3. С. 31–33.
17. Лебедев В.Д., Яблоков А.А., Филатова Г.А., Литвинов С.Н., Панащатенко А.В., Готовкина Е.Е. Исследование характеристик и перспективы использования цифровых трансформаторов тока и напряжения // Электроэнергия. Передача и распределение. 2018. № 2. С. 22–27.
18. Нечаев Е.В., Шелудько М.В., Яблоков А.А. Исследование характеристик и оптимизация параметров датчика тока цифрового измерительного трансформатора тока // ЭНЕРГИЯ-2017: матер. XII Междунар. науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых ученых (г. Иваново, 4–6 апреля 2017 г.). Иваново, 2017. Т. 3. С. 31–33.
19. Загоскин Р.И., Гук А.А. Опыт эксплуатации систем мониторинга высоковольтного оборудования на объектах ПАО "ФСК ЕЭС" // Энергия единой сети. 2016. № 5. С. 48–54.
20. Бояршинов Б.С., Хожайнова Г.И. Процессы старения и разрушения электрической изоляции // Экономика и практический менеджмент в России и за рубежом: матер. Междунар. науч.-практ. конф. (г. Коломна, 15 апреля 2014 г.). Коломна: Коломенский институт, филиал Московского государственного машиностроительного университета (МАМИ), 2014. С. 225–227.
21. Бояршинов Б.С., Хожайнова Г.И. Экспериментальная проверка теории старения диэлектрической изоляции Журкова-Дмитревского // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2010. Т. 316. № 2. С. 107–109.
22. Cesky L., Janicek F., Kubica J., Skudrik F. Overheating of primary and secondary coils of voltage instrument transformers // 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering. 2017. <https://doi.org/10.1109/EPE.2017.7967359>.
23. Ахмедова О.О., Грачева М.Н., Кирюхина Е.И. Современное развитие измерительных преобразователей тока для релейной защиты и автоматики в энергетике // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2016. № 5. С. 47–51.
24. Славутский А.Л. Учет остаточной намагниченности в трансформаторе при моделировании переходных процессов // Вестник Чувашского университета. 2015. № 1. С. 122–130.
25. Евдокунин Г.А., Дмитриев М.В. Моделирование переходных процессов в электрической стали, содержащей трансформаторы при учете конфигурации их магнитной системы // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2009. № 2. С. 37–48.
26. Андреев Д.В., Столяров А.А., Андреев В.В., Царьков А.В. Исследование необратимых процессов деградации подзатворного диэлектрика структур металл-диэлектрик-полупроводник // Необратимые процессы в природе и технике: тр. X Всерос. конф. (г. Москва, 29–31 января 2019 г.). М.: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 2019. С. 114–117.
27. Raetzke S., Koch M., Anghuber M. Modern insulation condition assessment for instrument transformers // IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (Bali, 23–27 September 2012). Bali: IEEE, 2012.

P. 52–55. <https://doi.org/10.1109/CMD.2012.6416177>.

28. Wu Yan, Hu Yi-Fan, He Ri, Jiao Chong-Qing. Measurement and analysis of electromagnetic disturbance at the secondary side of electronic voltage transformer due to switching operations via a 6 kv switchgear // IEEE 5th International Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2017. <https://doi.org/10.1109/EMC-B.2017.8260347>.
29. Suttner C., Tenbohlen S., Ebbinghaus W. Impact of Rogowski sensors on the EMC performance of medium voltage power substations // IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2015. <https://doi.org/10.1109/ISEMC.2015.7256159>.
30. Найденев А.Д. Оптические трансформаторы тока // Вестник науки и образования. 2020. № 8-1. С. 19–23.
31. Морозов А.Н., Степанов А.А., Малахов С.В., Иванов В.В. Разработка и опытная эксплуатация полностью оптического трехфазного трансформатора напряжения 220 кВ с цифровым выходом // Электрические станции. 2020. № 2. С. 28–36. <http://doi.org/10.34831/EP.2020.1063.2.005>.
32. Топольский Д.В., Топольская И.Г. Система автоматизации цифровой подстанции // Наука ЮУрГУ: матер. 71-й науч. конф. (г. Челябинск, 10–12 апреля 2019 г.). Челябинск: ЮУрГУ, 2019. С. 259–265.
33. Моржин Ю.И., Попов С.Г., Румянцев А.А., Ильин М.Д. Опытный полигон ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» - первая в России «Цифровая подстанция», использующая стандарт IEC 61850. Testing-field of "R&D FGC UES" – "Digital Substation" // Энергия единой сети. 2014. № 3. С. 16–25.
34. Курьянов В.Н., Куш Л.Р., Горбунова Н.Р., Бондарев И.В., Цыпик В.В. Цифровые подстанции. Опыт реализации // Наука, образование и культура. 2018. № 3. С. 9–12.
35. Вершинин Ю.Н. Механизм электронного пробоя твердых диэлектриков (эволюция представлений) // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2003. № 2. С. 152–157.
36. Зарубин В.С., Савельева И.Ю., Станкевич И.В. Температурное состояние плоского слоя полимерного диэлектрика с зависящей от температуры теплопроводностью // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Естественные науки. 2018. № 4. С. 14–23. <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2018-4-14-23>.
37. Гефле О.С., Черкашина Е.И. Диагностика предпробивного состояния полимерных диэлектриков по тепловым эффектам // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2005. Т. 308. № 1. С. 54–59.
38. Собчук Н.В., Слободянюк Е.В. Определение оптимальной величины испытательного напряжения для эффективного контроля изоляции // Научные труды Винницкого национального технического университета. 2016. № 2. С. 70–74.
39. Саушев А.В., Шерстнев Д.А., Широков Н.В. Анализ методов диагностики аппаратов высокого напряжения // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2017. Т. 9. № 5. С. 1073–1085.
40. Лисина Л.Ф. Методы испытания и диагностики изоляции высоковольтного оборудования // Вестник Ангарской государственной технической академии. 2014. № 8. С. 61–65.
41. Сви П.М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1992. 240 с.
42. Сви П.М. Контроль изоляции оборудования высокого напряжения. М.: Энергия, 1980. 112 с.
43. Балобанов Р.Н., Зацаринная Ю.Н. Особенности диагностирования высоковольтного оборудования с элегазовой изоляцией // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т. 2. № 18. С. 257–258.
44. Агафонов Г.Е., Бабкин И.В., Берлин Б.Е. Электрические аппараты высокого напряжения с элегазовой изоляцией: монография. СПб.: Энергоатомиздат, 2002. 728 с.
45. Khalyasmaa A., Stepanova A., Eroshenko S., Bolgov V., Duc Chung T. The application of partial discharge monitoring system for instrument transformers: special issues // 21st International Symposium on Electrical Apparatus & Technologies. 2020. <https://doi.org/10.1109/SIELA49118.2020.9167108>.
46. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. Л.: Энергия, 1979. 224 с.
47. Овсянников А.Г., Марюшко Е.А. Разработка рекомендаций по проведению оперативной диагностики частичных разрядов в комплектных элегазовых распределительных устройствах // Электроэнергетика глазами молодежи: тр. VI Междунар. науч.-техн. конф. (г. Иваново, 9–13 ноября 2015 г.). Иваново, 2015. Т. 1. С. 536–539.
48. Гусенков А.В., Лебедев В.Д., Литвинов С.Н., Словесный С.А., Яблоков А.А. Экспериментальное определение частичных разрядов в макете цифрового измерительного трансформатора дифференциальным методом // Вестник ИГЭУ. 2019. Вып. 2. С. 32–42.
49. Bartnikas R. Partial discharges. Their mechanism, detection and measurement // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2002. Vol. 9. Iss. 5. P. 763–808. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2002.1038663>.
50. Robalino Vanegas D.M., Mahajan S.M. Effects of thermal accelerated ageing on a medium voltage oil-immersed current transformer // Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Vancouver, 9–12 June 2008). Vancouver: IEEE, 2008. P. 470–473. <https://doi.org/10.1109/ELINSL.2008.4570375>.
51. Gupta B.K., Densley J., Narang A. Diagnostic practices used for instrument transformers // Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Vancouver, 9–12 June 2008). Vancouver: IEEE, 2008. P. 239–242. <https://doi.org/10.1109/ELINSL.2008.4570319>.
52. Ruijin Liao, Chao Tang, Lijun Yang, Huanchao Chen. Thermal aging studies on cellulose insulation paper of power

- transformer using AFM // IEEE 8th International Conference on Properties & Applications of Dielectric Materials (Bali, 26–30 June 2006). Bali: IEEE, 2006. P. 722–725. <https://doi.org/10.1109/ICPADM.2006.284279>.
53. Елтышев Д.К., Хорошев Н.И. Диагностика силового маслонаполненного трансформаторного оборудования тепловых электростанций // Теплоэнергетика. 2016. № 8. С. 32–40.
54. Korenciak D., Sebok M., Gutten M. Thermal measurement and its application for diagnostics of distribution oil transformers // Энергетика. Известия высших учебных и энергетических объединений СНГ. 2019. Т. 62. № 6. С. 583–594. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-583-594>.
55. Dan-yi Chi, Fucun Huang, Dong-peng Sui, Li-na Geng, Dan Zhao. The analysis of overheat failure for 220 kV voltage transformer with live detection // The Journal of Engineering. 2019. Vol. 2019. Iss. 16. P. 2058–2059. <https://doi.org/https://doi.org/10.1049/joe.2018.8825>.
56. Ciric R.M., Milkov M. Application of thermal imaging in assessment of equipment in power plants // Monitoring Expertise and Safety Engineering. 2014. Vol. 4. Iss. 2. P. 1–9.
57. Litvinov S., Lebedev V., Smirnov N., Tyutikov V., Shuvalov S. Thermal and aerodynamic tests of a digital combined current and voltage transformer // 22nd International Conference on Innovative Manufacturing Engineering and Energy - IManE&E: MATEC Web Conference. 2018. Vol. 178. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201817809006>.
58. Litvinov S., Lebedev V., Smirnov N., Tyutikov V., Makhsumov I. Physical simulation of heat exchange between 6(10) kV voltage instrument transformer and its environment with natural convection and insulation // Heat and Mass Transfer in the Thermal Control System of Technical and Technological Energy Equipment: MATEC Web Conference. Tomsk. 2018. Vol. 194. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819401035>.
59. Кужеков С.Л., Дегтярев А.А. О восстановлении периодической составляющей первичного тока трансформатора тока в переходном режиме // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2011. № 3. С. 29–31.
60. Сивков А.С., Щеглов Л.В., Ведерников Г.А., Петрова О.В. Дополнительные параметры трансформаторов тока для обеспечения надежной работы сети // Энергоэксперт. 2018. № 3. С. 44–47.
61. Кужеков С.Л., Дегтярев А.А., Дони Н.А., Шурупов А.А., Петров А.А., Костарев Л.Н. [и др.]. Анализ неселективных действий дифференциальных защит сборных шин при внешних однофазных коротких замыканиях с насыщением трансформатора тока в неповрежденной фазе // Релейная защита. 2019. № 1. С. 28–36.
62. Воробьев В.С. О неправильной работе устройств РЗА в переходных режимах при насыщении трансформаторов тока // Заседание некоммерческого партнерства «Научно-технический совет единой энергетической системы» (г. Москва, 11 сентября 2015 г.). М., 2015. С. 12–43.
63. Дони Н.А. Возможность неселективного действия быстродействующих дистанционных защит при внешних повреждениях с большими токами КЗ // Релейщик. 2015. № 4. С. 30–33.
64. Рыбалкин А.Д., Шурупов А.А., Ермолкин И.А. Прогнозирование тока короткого замыкания при насыщении магнитопровода трансформатора тока // Цифровая электротехника: проблемы и достижения: сб. науч. ст. Чебоксары: СРЗАУ, 2012. Вып. I. 120 с.
65. Одинаев И.Н., Мурзин П.В., Паздерин А.В., Ташилин В.А., Шукало А. Анализ математических методов снижения погрешности трансформатора тока в режиме насыщения // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 2. С. 11–18. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-11-18](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-11-18).
66. Дони Н.А., Иванов И.Ю., Иванова В.Р. Моделирование дифференциальной защиты линий электропередачи, работающей на базе векторных значений токов // Релейная защита и автоматизация. 2014. № 1. С. 14–17.
67. Лямец Ю.Я., Романов Ю.В., Широкин М.Ю. Быстрое оценивание периодической составляющей тока короткого замыкания // Электричество. 2012. № 4. С. 9–13.
68. Яблоков А.А., Евдаков А.Е., Готовкина Е.Е. Экспериментальное исследование алгоритма мониторинга насыщения и остаточной намагниченности магнитопровода трансформатора тока // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (Бенардосовские чтения): матер. Междунар. (XX Всероссийской) науч.-техн. конф. (г. Иваново, 29–31 мая 2019 г.). Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2019. С. 307–309.
69. Пат. 2674580, Российская Федерация, G01R 33/12 (2006.01). Способ определения насыщения магнитопровода трансформатора тока / В.Д. Лебедев, А.Е. Евдаков, С.Н. Литвинов, А.В. Гусенков; заявитель и патентообладатель Ивановский государственный энергетический университет. Заявл. 27.12.2017; опубл. 11.12.2018. Бюл. № 35.

## References

1. Wang Yu-duo, Dai Xiao-miao. A Ethernet interface solution based on TCP/IP protocol. In: *IEEE 11th International Conference on Signal Processing*. 2012;1521-1525. <https://doi.org/10.1109/ICoSP.2012.6491863>.
2. Zhijian Qu, Mingguang Liu, Zhiling Jiang, Feng Wu, Jing Liu, Lichao Sun. Study of communication gateway based on IEC61850 Protocol. In: *International Conference on Communication Software and Networks*. 2009;659-662. <https://doi.org/10.1109/ICCSN.2009.17>.
3. Adamiak M., Baigent D. IEC 61850 Communication networks and systems in substations: an overview for users. *The Protection & Control Journal*. 2009;61-68.
4. Chichev S.I., Kalinin V.F., Glinkin E.I. *Designing methodology of a digital sub-station based on new technologies*.

Moscow: Spektr; 2014, 228 p. (In Russ.).

5. Chichev S.I., Kalinin V.F., Glinkin E.I. *Information and measuring system of the electric grid company*. Moscow: Spektr; 2011, 156 p. (In Russ.).

6. Dorofeev I.N., Serrato A.E., Charkin A.V. Implementation of the protection and monitoring system of a digital substation based on the iSAS software package. *Sovremennye napravleniya razvitiya sistem relejnoj zashchity i avtomatiki energosistem: sb. prezentacij uchastnikov IV Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii RNK Cigre = Modern development trends of power grid relay protection systems and automation: Collected presentations of the participants of the 4<sup>th</sup> International scientific and technical conference*. RNC Cigre. 3–7 June 2013, Ekaterinburg. Ekaterinburg: Rossijskij nacional'nyj komitet SIGRE; 2013, p. 1-5. (In Russ.).

7. Vlasov M., Ivanov A., Kirillov A., Peregodov S., Serdtsev A. ACS with flexible dynamic architecture for digital substations. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie = Electric Power. Transmission and distribution*. 2012;5:92-96. (In Russ.).

8. Khrennikov A., Galiev I., Skrydlov E. Digital current transformers. Devices for current strength calculation. *Novosti elektrotehniki*. 2015;6. Available from: <http://www.news.elteh.ru/arh/2015/96/06.php> [Accessed 9th January 2023].

9. Yanin M.A., Kanafeev R.I., Ivanov N.A., Shemetov A.S., Kozyrev A.V. Current results of pilot operation of electronic 500 kV CTs and VTs. *Energoekspert*. 2020;1:62-67. (In Russ.).

10. Serzhaskii V.P., Basmanovskii M.A. Analysis of the current state of measuring current sensors, their advantages and disadvantages. *Modern Science*. 2019;12-1:613-617. (In Russ.).

11. Grabchak E.P., Bajkov I.A., Medvedeva E.A., Dunaev P.A. The main results of electric power facilities operation in 2016. The results of the autumn-winter period 2016–2017. Medium term tasks. 2017. Available from: <https://minenergo.gov.ru/node/6575> [Accessed 9th January 2023]. (In Russ.).

12. Sayenko Y.L., Popov A.S. Investigation of the damage cause of the voltage transformers using for insulation checking. *Energoberezhenie. Energetika. Energoaudit = Energy saving. Power engineering. Energy audit*. 2011;7:59-66. (In Russ.).

13. Bogomolov V.S., Zikherman M.Kh., L'vov Yu.N., Nazarov I.A., Timashova L.V., Shleifman I.L., et al. Damageability of the main electrical equipment of 110-750 kV substations in the Russian Federation. *Energiya edinoj seti = Energy of Unified Grid*. 2013;2:14-21. (In Russ.).

14. Khrennikov A.Yu., Mazhurin R.V. Diagnostics and measures to reduce the accident rate of high-voltage current and voltage measuring transformers in electrical networks 110-750 kV. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika*. 2013;1:52-54. (In Russ.).

15. Nechaev E.V., Yablokov A.A., Lebedev V.D. Development and research of a 6-10 kV resistive voltage divider. In: *Nauka i innovatsii v tekhnicheskikh universitetakh: materialy Devyatogo Vserossiiskogo foruma studentov, aspirantov i molodykh uchenykh = Science and innovations in technical universities: materials of the Ninth All-Russian Forum of students, graduate students and young scientists*. 27–30 October 2015, St. Petersburg. St. Petersburg; 2015, p. 31-33. (In Russ.).

16. Lylov P.V., Lebedev V.D., Fomichev A.A. Development and research of a system for transmitting digitized values of currents and voltages at a substation. In: *ENERGIYA-2016: materialy XI Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh = Energy – 2016: materials of the 11<sup>th</sup> International scientific and technical conference of students, postgraduates and young scientists*. 5–7 April 2016, Ivanovo. Ivanovo; 2016, vol. 3, p. 31-33. (In Russ.).

17. Lebedev V.D., Yablokov A.A., Filatova G.A., Litvinov S.N., Panashchatenko A.V., Gotovkina E.E. Study of the characteristics and application prospects of digital current and voltage transformers. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie = Electric Power. Transmission and distribution*. 2018;2:22-27. (In Russ.).

18. Nechaev E.V., Shelud'ko M.V., Yablokov A.A. Study of the characteristics and optimization of the parameters of the current sensor of a digital measuring current transformer. In: *Energiya-2017: materialy XII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh = Energy-2017: materials of the 12<sup>th</sup> International scientific and technical conference of students, postgraduates and young scientists*. 4–6 April 2017, Ivanovo. Ivanovo; 2017, vol. 3, p. 31-33. (In Russ.).

19. Zagoskin R.I., Guk A.A. Operating experience of monitoring systems for high-voltage equipment at the facilities of the Federal Grid Company of the Unified Energy System (PAO "FSK EES"). *Energiya edinoj seti = Energy of Unified Grid*. 2016;5:48-54. (In Russ.).

20. Boyarshinov B.S., Khozhainova G.I. Aging and destruction of electrical insulation. In: *Ekonomika i prakticheskii menedzhment v Rossii i za rubezhom: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Economics and practical management in Russia and abroad: Proceedings of the International scientific and practical conference*. 15 April 2014, Kolomna. Kolomna: Kolomna Institute, branch of the Moscow State Engineering University (MAMI); p. 225-227. (In Russ.).

21. Boyarshinov B.S., Khozhainova G.I. Experimental verification of Zhurkov-Dmitrevsky theory of dielectric insulation aging. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2010;316(2):107-109. (In Russ.).

22. Cesky L., Janicek F., Kubica J., Skudrik F. Overheating of primary and secondary coils of voltage instrument transformers.

- In: *18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering*. 2017. <https://doi.org/10.1109/EPE.2017.7967359>.
23. Akhmedova O.O., Gracheva M.N., Kiryuhina E.I. The modern development of the measuring current transformers for relay protection and automation in the energy sector. *Energoi resursosberezhenie: Promyshlennost' u transport = Energy and Resource Saving: Industry and Transport*. 2016;5:47-51. (In Russ.).
24. Slavutskiy A. Accounting the residual magnetization in the transformer for the modeling of transients. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*. 2015;1:122-130. (In Russ.).
25. Evdokunin G.A., Dmitriev M.V. Transients modeling in electrical steel containing transformers when taking into account their magnetic system configuration. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Energetika = Thermal Engineering*. 2009;2:37-48. (In Russ.).
26. Andreev D.V., Stolyarov A.A., Andreev V.V., Car'kov A.V. Study of irreversible degradation processes of the gate dielectric of metal-dielectric-semiconductor structures. *Neobratimye processy v prirode i tekhnike: trudy X Vserossijskoj konferencii (gorod, chislo, mesyac provedeniya) = Irreversible processes in nature and technical equipment: proceeding of the 10<sup>th</sup> All-Russian conference*. 29-31 January 2019, Moscow. Moscow: Moscow State Technical University named after N.E. Bauman; 2019, p. 114-117. (In Russ.).
27. Raetzke S., Koch M., Anglhuber M. Modern insulation condition assessment for instrument transformers. In: *IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*. 23-27 September 2012, Bali. Bali: IEEE; 2012, p. 52-55. <https://doi.org/10.1109/CMD.2012.6416177>.
28. Wu Yan, Hu Yi-Fan, He Ri, Jiao Chong-Qing. Measurement and analysis of electromagnetic disturbance at the secondary side of electronic voltage transformer due to switching operations via a 6 kV switchgear. In: *IEEE 5th International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. 2017. <https://doi.org/10.1109/EMC-B.2017.8260347>.
29. Suttner C., Tenbohlen S., Ebbinghaus W. Impact of Rogowski sensors on the EMC performance of medium voltage power substations. In: *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. 2015. <https://doi.org/10.1109/ISEMC.2015.7256159>.
30. Najdenov A.D. Optical current transformers. *Vestnik nauki i obrazovaniya*. 2020;8-1:19-23. (In Russ.).
31. Morozov A.N., Stepanov A.A., Malahov S.V., Ivanov V.V. Development and pilot operation of a fully optical three-phase voltage transformer 220 kV with a digital output. *Elektricheskie stancii*. 2020;2:28-36. <http://doi.org/10.34831/EP.2020.1063.2.005>. (In Russ.).
32. Topol'skij D.V., Topol'skaya I.G. *Digital substation automation system*. *Nauka YuUrGU: materialy 71-j nauchnoj konferencii = Science of the South Ural State University: materials of the 71<sup>st</sup> scientific conference*. 10-12 April 2019, Chelyabinsk. Chelyabinsk: South Ural State University; 2019, p. 259-265. (In Russ.).
33. Morzhin Yu.I., Popov S.G., Rumyantsev A.A., Il'in M.D. Testing-field of "R&D FGC UES" – "Digital Substation". *Energiya edinoj seti = Energy of Unified Grid*. 2014.3:16-25. (In Russ.).
34. Kur'yanov V.N., Kushch L.R., Gorbunova N.R., Bondarev I.V., Cypik V.V. Digital substations. Implementation experience. *Nauka, obrazovanie i kul'tura*. 2018;3:9-12. (In Russ.).
35. Vershinin Yu.N. Mechanism of electronic breakdown of solid dielectrics (evolution of ideas). *Izvestiya rossijskoj akademii nauk. Energetika = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Energy*. No 2, 2003. pp. 152-157. (In Russ.).
36. Zarubin V.S., Savelyeva I.Yu., Stankevich I.V. The temperature state of a plane polymer dielectric layer with temperature-dependent heat conduction. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni N.E. Baumana. Seriya: Estestvennye nauki*. 2018;4:14-23. <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2018-4-14-23>. (In Russ.).
37. Gefle O.S., Cherkashina E.I. Thermal effect-based trouble-shooting of the pre-breakdown state of polymeric dielectrics. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2005;308(1):54-59. (In Russ.).
38. Sobchuk N.V., Slobodyanyuk E.V. Determining the optimal value of the test voltage for effective insulation control. *Nauchnye trudy Vinnickogo nacional'nogo tekhnicheskogo universiteta*. 2016;2:70-74. (In Russ.).
39. Saushev A.V., Sherstnev D.A., Shirokov N.V. Analysis of the trouble-shooting methods for high-voltage devices. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova*. 2017;9(5):1073-1085. (In Russ.).
40. Lisina L.F. Methods of testing and diagnostics of high-voltage equipment insulation. *Vestnik Angarskoj gosudarstvennoj tekhnicheskoi akademii*. 2014;8:61-65. (In Russ.).
41. Svi P.M. *Methods and means of high voltage equipment diagnostics*. Moscow: Ergoatomizdat; 1992, 240 p. (In Russ.).
42. Svi P.M. *Insulation control of high voltage equipment*. Moscow: Energy; 1980, 112 p. (In Russ.).
43. Balobanov R.N., Zacarinnaya Yu.N. Features of trouble-shooting of high-voltage equipment with SF6 insulation. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2015;2(18):257-258. (In Russ.).
44. Agafonov G.E., Babkin I.V., Berlin B.E. *Electrical devices of high voltage with SF6 insulation*. St. Petersburg: Ergoatomizdat; 2002, 728 p. (In Russ.).
45. Khalyasmaa A., Stepanova A., Eroshenko S., Bolgov V., Duc Chung T. The application of partial discharge monitoring system for instrument transformers: special issues. In: *21st International Symposium on Electrical Apparatus & Technologies*. 2020. <https://doi.org/10.1109/SIELA49118.2020.9167108>.

46. Kuchinskii G.S. *Partial discharges in high-voltage structures. Leningrad: Energy. Leningrad. Energiya; 1979, 224 p. (In Russ.)*.
47. Ovsyannikov A.G., Maryushko E.A. Development of recommendations for rapid diagnosis of partial discharges in gas insulated switchgear. In: *Elektroenergetika glazami molodezhi: trudy VI Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii = Electrical engineering through the eyes of youth: proceedings of the 6<sup>th</sup> International scientific and technical conference. 9–13 November 2015, Ivanovo. Ivanovo; 2015, vol. 1, p. 536-539. (In Russ.)*.
48. Gusenkov A.V., Lebedev V.D., Litvinov S.N., Slovesny S.A., Yablokov A.A. Experimental determination of partial discharges in a model of a digital instrument transformer by differential method. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta. 2019;2:32-42. (In Russ.)*.
49. Bartnikas R. Partial discharges. Their mechanism, detection and measurement. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2002;9(5):763-808. https://doi.org/10.1109/TDEI.2002.1038663*.
50. Robalino Vanegas D.M., Mahajan S.M. Effects of thermal accelerated ageing on a medium voltage oil-immersed current transformer. In: *Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. 9–12 June 2008, Vancouver. Vancouver: IEEE; 2008, p. 470-473. https://doi.org/10.1109/ELINSL.2008.4570375*.
51. Gupta B.K., Densley J., Narang A. Diagnostic practices used for instrument transformers. In: *Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. 9–12 June 2008, Vancouver. Vancouver: IEEE; 2008, p. 239-242. https://doi.org/10.1109/ELINSL.2008.4570319*.
52. Ruijin Liao, Chao Tang, Lijun Yang, Huanchao Chen. Thermal aging studies on cellulose insulation paper of power transformer using AFM. In: *IEEE 8th International Conference on Properties & applications of Dielectric Materials. 26–30 June 2006, Bali. Bali: IEEE; 2006, p. 722–725. https://doi.org/10.1109/ICPADM.2006.284279*.
53. Eltyshv D.K., Horoshev N.I. Diagnostics of the power oil-filled transformer equipment of thermal power plants. *Teploenergetika. 2016;8:32-40. (In Russ.)*.
54. Korenciak D., Sebok M., Gutten M. Thermal measurement and its application for diagnostics of distribution oil transformers. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij i energeticheskikh objedinenij SNG. Energetika = Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations. (In Russ.) https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-583-594*.
55. Dan-yi Chi, Fucun Huang, Dong-peng Sui, Li-na Geng, Dan Zhao. The analysis of overheat failure for 220 kV voltage transformer with live detection. *The Journal of Engineering. 2019;2019(16):2058-2059. https://doi.org/https://doi.org/10.1049/joe.2018.8825*.
56. Ciric R.M., Milkov M. Application of thermal imaging in assessment of equipment in power plants. *Monitoring Expertise and Safety Engineering. 2014;4(2):1-9*.
57. Litvinov S., Lebedev V., Smirnov N., Tyutikov V., Shuvalov S. Thermal and aerodynamic tests of a digital combined current and voltage transformer. In: *22nd International Conference on Innovative Manufacturing Engineering and Energy – IManE&E: MATEC Web Conference. 2018;178. https://doi.org/10.1051/mateconf/201817809006*.
58. Litvinov S., Lebedev V., Smirnov N., Tyutikov V., Makhsumov I. Physical simulation of heat exchange between 6(10) kV voltage instrument transformer and its environment with natural convection and insolation. In: *Heat and Mass Transfer in the Thermal Control System of Technical and Technological Energy Equipment: MATEC Web Conference. Tomsk. 2018;194. https://doi.org/10.1051/mateconf/201819401035*.
59. Kuzhekov S.L., Degtyarev A.A. On the recovery of the primary current periodic component of the current transformer in the transient mode. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Elektromekhanika. 2011;3:29-31. (In Russ.)*.
60. Sivkov A.S., Shcheglov L.V., Vedernikov G.A., Petrova O.V. Additional parameters of current transformers to ensure reliable operation of the network. *Energoekspert. 2018;3:44-47. (In Russ.)*.
61. Kuzhekov S.L., Degtyarev A.A., Doni N.A., Shurupov A.A., Petrov A.A., Kostarev L.N., et al. Analysis of non-selective actions of busbar differential protection at external single-phase short circuits with saturation of current transformer in a healthy phase. *Relejnaya zashchita. 2019;1:28-36. (In Russ.)*.
62. Vorob'ev V.S. On incorrect operation of relay protection and automation devices in transient modes with saturated current transformers. In: *Zasedanie nekommercheskogo partnerstva "Nauchno-tehnicheskij sovet edinoj energeticheskoy sistemy" = Meeting of the non-profit partnership "Scientific and Technical Council of the Unified Energy System". 11 September 2015, Moscow. Moscow; 2015, p. 12-43. (In Russ.)*.
63. Doni N.A. Possibility of non-selective action of high-speed distance protection under external damage with high short-circuit currents. *Relejschik. 2015;4:30-33. (In Russ.)*.
64. Rybalkin A.D., Shurupov A.A., Ermolkin I.A. Prediction of the short-circuit current under current transformer magnetic circuit saturation. In: *Cifrovaya elektrotehnika: problemy i dostizheniya: sbornik nauchnyh statej = Digital Electrical Engineering: Problems and Achievements: collected scientific articles. Cheboksary: SRZAU; 2012, iss. I, 120 p. (In Russ.)*.
65. Odinaev I.N., Murzin P.V., Pazderin A.V., Tashchilin V.A., Shukalo A. Analysis of mathematical methods for decreasing the saturated current transformer error. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы. 2020;2:11-18. https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-11-18. (In Russ.)*.
66. Doni N.A., Ivanov I.Yu., Ivanova V.R. Simulation line differential protection operating on the basis of vector values current. *Relejnaya zashchita i avtomatizaciya. 2014;1:14-17. (In Russ.)*.
67. Lyamets Yu.Ya., Romanov Yu.V., Shirokin M.Yu. Fast estimation of the periodic component of the short circuit cur-

rent. *Elektrichestvo*. 2012;4:9-13. (In Russ.).

68. Yablokov A.A., Evdakov A.E., Gotovkina E.E. Experimental verification algorithm for monitoring saturation and the residual magnetization of current transformer magnetic core. *Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii (Bernardosovskie chteniya): materialy Mezhdunarodnoj (HH Vserossijskoj) nauchno-tekhnicheskoy konferencii = State and development prospects of electrical and thermal technology (Bernardosovskie readings): materials of the International (20<sup>th</sup> All-Russian) scientific and technical conference*. 29–31 May 2019, Ivanovo. Ivanovo: Ivanovo State Power University named after V.I. Lenin; 2019, p. 307-309. (In Russ.).

69. Lebedev V.D., Evdakov A.E., Litvinov S.N., Gusenkov A.V. *Method to determine magnetic circuit saturation of a current transformer*. Patent RF, no. 2674580; 2017. (In Russ.).

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

##### **Литвинов Сергей Николаевич,**

старший преподаватель кафедры электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования, Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, Россия  
✉ litvinov.sn@yandex.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-0618-2621>

##### **Лебедев Владимир Дмитриевич,**

к.т.н., доцент, заведующий кафедрой автоматического управления электроэнергетическими системами, Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, Россия  
vd\_lebedev@mail.ru

##### **Гусенков Алексей Васильевич**

к.т.н., доцент, заведующий кафедрой электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования, Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, Россия  
avgus@ispu.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 18.01.2023; одобрена после рецензирования 21.02.2023; принята к публикации 27.03.2023.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

##### **Sergey N. Litvinov,**

Senior Lecturer of the Department of Power stations, Substations and Electrical Equipment Diagnostics, Ivanovo State Power Engineering University, 34, Rabfakovskaya St., Ivanovo 153003, Russia  
✉ litvinov.sn@yandex.ru

##### **Vladimir D. Lebedev,**

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Automatic Control of Electric Power Systems, Ivanovo State Power Engineering University, 34, Rabfakovskaya St., Ivanovo 153003, Russia  
vd\_lebedev@mail.ru

##### **Aleksey V. Gusenkov,**

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Power stations, Substations and Electrical Equipment Diagnostics, Ivanovo State Power Engineering University, 34, Rabfakovskaya St., Ivanovo 153003, Russia  
avgus@ispu.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 18.01.2023; approved after reviewing 21.02.2023; accepted for publication 27.03.2023.



Научная статья  
УДК 621.315.1:621.3.051  
<https://elibrary.ru/prkwcm>  
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-339-353>

## Выбор оптимальной марки провода высоковольтных воздушных линий электропередачи на основе критериального анализа

Н.В. Савина<sup>1</sup>, А.О. Варыгина<sup>2✉</sup>

<sup>1,2</sup>Амурский государственный университет, г. Благовещенск, Россия

**Резюме.** Цель – разработать универсальный инструмент выбора оптимальной марки провода воздушной линии для проектной практики, адаптированный под классические провода и провода нового поколения. Для реализации многокритериальной оценки влияющих параметров, факторов и ограничений при выборе марки провода использованы метод системного анализа – метод анализа иерархий, а также метод сравнительного анализа. Разработаны метод выбора оптимальной марки провода на основе метода анализа иерархии и алгоритм его применения при проектировании или реконструкции воздушных линий. Реализация метода и алгоритма показаны на примерах строительства и реконструкции воздушной линии 220 кВ с традиционным проводом марки АС и отечественными марками проводов нового поколения АСВТ, АСВП, АСк2у и АСТ. В рассмотренных примерах ограничениями технической реализуемости проекта нового строительства воздушной линии стало значение стрелы провеса, а для проекта реконструкции – значение удельной массы провода. Критериями отбора приняты длина пролета, стоимость провода и длительно допустимый ток. Наибольшее соответствие критериям отбора показали марки АСВП и АСТ со значениями 27,5% и 55,9%. Таким образом, при минимальных капитальных вложениях в проект для нового строительства воздушной линии марка АСВП обеспечивает оптимальную длину пролета, а при реконструкции линии – марка АСТ обеспечивает максимальную пропускную способность линии. Верификационные технико-экономические расчеты и анализ подтвердили корректность и преимущество применения метода выбора марки провода, основанного на методе анализа иерархий. На базе проведенных исследований установлено, что предложенный метод является универсальным несложным инструментом выбора марки провода, который позволяет определить оптимальный вариант, наилучшим образом отвечающий поставленным техническим и экономическим ограничениям и критериям реализации проекта в электросетевом комплексе.

**Ключевые слова:** воздушная линия электропередачи, марка провода, провод нового поколения, метод анализа иерархий, критерий, конструкция

**Для цитирования:** Савина Н.В., Варыгина А.О. Выбор оптимальной марки провода высоковольтных воздушных линий электропередачи на основе критериального анализа // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 2. С. 339–353. EDN: PRKWCM, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-339-353>.

### POWER ENGINEERING

Original article

## Selection of an optimal cable brand for high-voltage overhead power lines based on criterion analysis

Natalia V. Savina<sup>1</sup>, Aleksandra O. Varygina<sup>2✉</sup>

<sup>1,2</sup>Amur State University, Blagoveshchensk, Russia

**Abstract.** This paper is aimed at developing a versatile approach to selecting an optimal cable brand for overhead transmission lines for use in design practice, adapted to conventional and new-generation cable types. To implement multi-criterion evaluation of external factors and limitations when selecting a cable type, the methods of systems, hierarchy and comparative analysis were used. A method for selecting an optimal cable brand based on hierarchy analysis was developed along with an algorithm for its implementation when designing new or modernizing existing overhead

lines. The developed approach is demonstrated on the example of construction and modernization of 220 kV overhead lines with the conventional AC cable and such new-generation domestic brands, as ACBT, ACBP, ACk2y and ACT. In the considered examples, the technical feasibility of the construction of a new overhead line was limited by the value of the sag. For the modernization project, the specific weight of the cable was of greater importance. The selection criteria included the span length, cable cost and admissible continuous current. The ACBP and ACT cable brands showed the greatest compliance with the selection criteria (27.5% and 55.9%, respectively). Therefore, at minimum capital investments, the ACBP brand ensures the optimum span length in the construction of a new overhead line, whereas the ACT brand ensures the maximum capacity in the modernization of an existing line. The conducted verification calculations confirmed the feasibility and versatility of the proposed method for selecting a cable brand.

**Keywords:** overhead power line, wire type, new generation wire, method of hierarchy analysis, criterion, construction

**For citation:** Savina N.V., Varygina A.O. Selection of an optimal cable brand for high-voltage overhead power lines based on criterion analysis. *iPolytech Journal*. 2023;27(2):339-353. (In Russ.). EDN: PRKWCM, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-339-353>.

## ВВЕДЕНИЕ

При проектировании высоковольтных воздушных линий электропередачи (ВЛЭП), когда речь заходит о выборе провода, то, как правило, традиционно все сводится к выбору его сечения. Исходя из опыта эксплуатации и проектирования признанных и нормативно закрепленных методов выбора сечения, в проектной документации для ВЛЭП различных классов номинального напряжения свыше 1 кВ наиболее частым решением является выбор сталеалюминевых проводов традиционной конструкции. Этот факт подтверждает конструктивное исполнение ВЛЭП электросетевого комплекса, как в России, так и за рубежом.

Анализируя наиболее распространенную справочную литературу, например<sup>3</sup>, можно отметить, что в ней зачастую приводится описание конструкций традиционных марок проводов, применяемых в ВЛЭП. Это марки М, А, Ап, АКП, АпКП, АС, АпС, АСКС, АпСКС, АСКП, АпСКП, АСК, АпСК, АН, АНКП, АЖ, АЖКП, которые при описании основных параметров и характеристик группируются в таблицы с одинаковыми данными: в первой группе это марки АС, АСКП, АСКС, АСК, АпС, АпСКП, АпСКС, АпСК, во второй группе – марки А, АКП, Ап, АпКП и в третьей группе – марка М. Однако в справочной литературе нет конкретных рекомендаций, алгоритмов, методов или методик по выбору непосредственно самой марки провода даже среди традиционных конструкций, а лидирующую позицию прочно занимает провод марки АС.

Таким образом, открытым остаются вопросы: как осуществлять выбор марки провода на практике, что на это может повлиять и является ли это необходимостью. Ведь даже традиционных марок достаточно немало, а с течением времени ряд марок проводниковой продукции только пополняется.

В качестве примера рассмотрим проект 2004 г. по выдаче мощности Калининградской ТЭЦ-2, где в разделе «Провода и грозозащитные тросы» для двухцепной ВЛ 110 кВ ТЭЦ-2 – ПС 330 кВ «Северная» выбран по электрическим нагрузкам: провод с расщепленными фазами – 2хАС240/32, а для реализации перехода выбор уже осуществлялся между проводами АС500/336 и АС500/243 с учетом требований прочностных характеристик, величин стрел провеса и простоты монтажа. При этом провод АС500/243 показал лучшие характеристики, обеспечивая минимальную высоту опор и снижение нагрузки от тяжения на 33%. Но в итоге экспертной оценки, учитывая еще и условия атмосферы (наличие вредных веществ) и близость Балтийского моря, для реализации перехода выбрана марка АСКС500/204. Таким образом, проектом для использования приняты две традиционные марки провода, которые, учитывая начальные условия и имеющиеся ограничения, позволили получить наиболее приемлемый вариант. И, несмотря на то, что в проекте сделан акцент на марку провода АС (безусловно, здесь стоит учесть год проекта: линейка марок была еще не настолько широка, как сейчас), показано, что другие

<sup>3</sup>Кабели, провода, материалы для кабельной индустрии: технический справочник. 3-е изд., перераб. и доп. М.: НКП «Эллипс», 2006. 360 с.

марки могут не только быть применимы, но и осуществлять лучшее соответствие проекту и поставленным целям. В то же время в проекте не раскрыты ни четкий алгоритм, ни механизм выбора марки провода. Определяющими факторами в таком случае являются знания и опыт проектировщика-эксперта.

По сравнению со временем, когда марок проводов было гораздо меньше и многие из них были подобны друг другу конструктивно, по параметрам и характеристикам, в настоящее время ряд марок существенно увеличился. И если раньше именно сечение определяло характеристики провода, а встретить применение или выбор другой марки провода, кроме марки АС, можно было достаточно редко, то теперь при одинаковом сечении различные марки проводов могут существенно отличаться по конструктивному исполнению и допустимому току из условий нагрева, весу и прочности провода единичной длины, сопротивлению и величине потерь [1] и разнообразие других марок можно встретить гораздо чаще.

Опыт применения проводов новых марок положительно себя зарекомендовал как в отечественной практике [2–4], так и за рубежом [5–7] за счет получаемых положительных эффектов, таких как повышение надежности [8], увеличение пропускной способности и срока эксплуатации ВЛЭП, снижение нагрузки на опоры, снижение электрических и тепловых потерь, получение меньшей стрелы провеса. Положительные эффекты в каждом конкретном случае применения той или иной марки провода могут быть различны.

Например, одним из признанных способов борьбы с гололедообразованием является применение провода марки АЕРО-Z [9]. Провода этой марки дороже проводов марки АС, поэтому, кроме стоимостных показателей, необходимо учитывать получаемые дополнительные эффекты. В противном случае инновационные решения, которые способны дать существенные преимущества, могут быть так и не выбраны. Например, в проекте 2014 г. для одноцепной ВЛЭП 220 кВ Фев-

ральск – Рудная, расположенной в Амурской области, выбран провод АС-300/39, одновременно с которым рассматривался на принципе «близости по сечению» провод АЕРО-Z-366-А3Ф. По причине более высокой стоимости он уступил марке АС, оценка эффектов не была произведена.

С развитием науки и техники, процесс выбора провода усложняется все сильнее, ведь появляется все больше новых марок, стоимость которых может как превышать традиционные решения, так и быть сопоставимой с ними (отечественные высокотемпературные провода АСВТ и АСВП сопоставимы по стоимости с проводами марки АС), а технические характеристики могут существенно отличаться за счет конструктивных особенностей.

Как показал анализ, вопрос выбора марки провода не раскрыт на сегодняшний день ни в справочниках, ни в монографиях, ни в других авторских работах. С учетом постоянного пополнения ряда марок проводов справочная литература просто не будет успевать за изменениями, к тому же все больше набирает обороты индивидуальное проектирование, постоянно меняются экономические условия, растут требования к электроэнергетическим объектам, а в нормативных документах<sup>4</sup> отражены условия применения только провода АС. Заводы-изготовители публикуют отдельные брошюры по выпускаемым только ими проводам, которые не позволяют в полной мере систематизировать данные для нужд проекта, так как необходимо рассматривать различные варианты проводов и других изготовителей.

Таким образом, возникла острая необходимость в получении инструментария, который позволит осуществить выбор оптимального проектного решения по маркам для ВЛЭП.

Для упрощения работы и получения оптимальных проектных решений для сетевого комплекса ПАО «ФСК ЕЭС» выпущен стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС» «Указания по проектированию ВЛ 220 кВ и выше с неизолированными проводами нового поко-

<sup>4</sup>Правила устройства электроустановок. 7-е изд. СПб.: ДЕАН, 2008. 704 с.

ления»<sup>5</sup>, систематизирующий информацию по различным маркам проводов, отличных от сталеалюминевых, изготавливаемых по ГОСТ 839<sup>6</sup>. В этом стандарте приведена таблица с рекомендованными областями применения неизолированных проводов нового поколения для ВЛЭП напряжением 220 кВ и выше. Всего выделено 4 области: 1 – участки ЕНЭС для передачи большой мощности поставщиков электрической энергии; 2 – на ВЛЭП как альтернативный вариант ее перевода на более высокий класс напряжения, строительству двух цепей или увеличению сечения существующего провода; 3 – на больших переходах для соблюдения габаритных расстояний; 4 – на протяженных прямолинейных участках трассы ВЛ с возможностью снижения количества промежуточных опор. Каждой выделенной области соответствует несколько марок проводов, при этом ряд марок соответствует нескольким областям, а другие – всем четырем. К тому же в этом стандарте отражены не все существующие марки, а рекомендации даны только для классов напряжения 220 кВ и выше. В итоге проблема выбора марки провода для конкретного случая остается нерешенной. Для других электросетевых комплексов рассматриваемая проблема стоит еще острее.

Несмотря на получение различных положительных эффектов, при применении новых марок проводов необходимо принимать во внимание не только технические, но и экономические аспекты. Хорошо известно, что новые технические решения, как правило, являются более дорогостоящими по сравнению с традиционными, но могут быть и сопоставимы по стоимости.

Учитывая существующее разнообразие марок проводов, определение оптимального решения при строительстве новой ВЛЭП или модернизации / реконструкции действующей (в части выбора провода и его параметров) существенно усложнилось ввиду отсутствия какого-либо подхода или методики выбора

марки провода. Далее эта проблема имеет тенденцию только усиливаться, и, как показывает практика, ряд проводниковой продукции только пополняется.

## **ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Выбор марки провода представляет собой многокритериальную задачу, которая должна учитывать совокупность различных факторов, параметров, условий и критериев, так как проектные решения должны быть обоснованы технически и экономически.

В современных условиях технико-экономическое обоснование должно строиться на большом количестве показателей и оценке возможности достижения различных положительных эффектов: снижении капитальных вложений и/или эксплуатационных издержек, повышении надежности и пропускной способности ВЛ, обеспечении безопасных габаритов проводов до земли и до пересекаемых объектов и т.д. В итоге определение некоего единого критерия, который будет подходить для любых случаев и условий проектирования не представляется возможным. Важно, чтобы принятое проектное решение максимально полно отвечало заданным условиям и критериям.

К тому же ранее выбор марки проводов практически не рассматривался, так как в основном при проектировании речь шла о сталеалюминевых проводах традиционной конструкции, которые являлись равнонадежными, отличными друг от друга по большей части только сечениями. Заложенные плановой экономикой принципы выбора провода из унифицированного ряда, безусловно, упрощали задачу, но устарели с течением времени. В результате на текущий момент просто отсутствует инструмент выбора оптимального провода из большого разнообразия предлагаемых технических решений заводоизготовителей.

Целью работы является разработка универсального инструментария получения

<sup>5</sup>СТО 56947007-29.060.50.268-2019. Указания по проектированию ВЛ 220 кВ и выше с неизолированными проводами нового поколения. Введ. 01.07.2019. М.: ПАО «ФСК ЕЭС», 2019.

<sup>6</sup>ГОСТ 839-80. Провода неизолированные для воздушных линий электропередачи. Технические условия (с изм. № 1-2). Введ. 01.01.1981. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002.

обоснованного выбора марки провода любой конструкции, адаптированного к конкретным условиям проектирования ВЛЭП.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Требование многокритериальной оценки влияющих параметров, факторов и ограничений свидетельствует о необходимости использования системного анализа для выбора марок проводов с помощью соответствующего метода или методов. Для реализации многокритериального анализа существует свыше 70 методов [10], наиболее востребованным из которых в инвестиционно-строительной деятельности (к которой относятся проекты строительства, реконструкции и модернизации ВЛЭП) является метод анализа иерархий (МАИ) [11].

Американский экономист Т. Саати предложил МАИ (analytic hierarchy process) в 1966 г. [12].

В качестве основных характеристик метода можно выделить:

- практически неограниченную область использования;
- практически неограниченную размерность поставленной задачи;
- прозрачность используемых процедур метода;
- шаблонность верификационных процедур;
- достоверность полученного результата.

Данные характеристики позволяют объяснить высокую востребованность метода. МАИ активно используется и предлагается к использованию не только в экономике, но и в энергетике. Примерами могут являться обоснованные предложения применения МАИ для экспертной диагностики технического состояния современного трансформаторного оборудования [13], выбора наиболее подходящего по заданным условиям места размещения ветряных электростанций [14], организации молниезащиты в распределительных сетях [15], определения приоритета устранения повреждений линий электропередачи после происшествий [16], планирования обслуживания линий электропередачи [17].

Таким образом, МАИ направлен на поиск варианта, который наилучшим образом поз-

воляет решить проблему с выполнением соответствующих требований и условий.

Суть реализации МАИ заключается в попарном сравнении альтернативных (возможных) вариантов для каждого отдельного из имеющихся критериев с использованием сравнительной шкалы, так называемой шкалы сравнительной важности.

Адаптация алгоритма метода применительно к выбору марки провода будет выглядеть следующим образом:

1. Определение основной цели выбора марки провода и выбор ограничительных условий: осуществляется для рассматриваемой проблемы.

2. Определение основных критериев отбора: особенности метода позволяют задаться как одним критерием выбора (например, значение длительно допустимого тока), так и несколькими; ограничений по количеству критериев нет. Но здесь нужно понимать, что чем больше взято критериев к рассмотрению, тем больше становится размерность задачи. К тому же, необходимо учитывать, что критерии могут быть как равнозначными, так и нет.

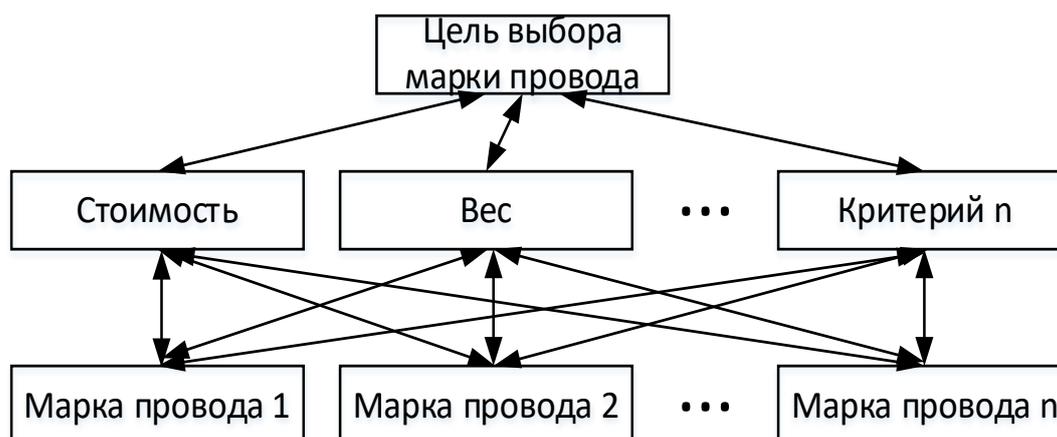
3. Подготовка исходной информации о ВЛЭП: формируются данные, необходимые для оценки ограничений и сравнения по выделенным критериям в явном виде или в необходимом для их расчета количестве.

4. Определение по утвержденным нормативным документам сечения сталеалюминового провода традиционной конструкции: реализуется после получения информации о токовой нагрузке линии и климатогеографическом расположении ВЛЭП, носит предварительный характер.

5. Формирование альтернативных (взаимоисключающих) вариантов марок проводов, отвечающих условиям сопоставимости: экспертным путем формируется перечень альтернативных марок проводов, применение которых возможно в заданных условиях.

6. Построение иерархии от поставленной цели через критерии к альтернативным вариантам марок провода.

Классическое построение иерархии в соответствии с МАИ в общем виде показано на рисунке.



Построение иерархии выбора марки провода  
 Building a wire type selection hierarchy

7. Формирование матрицы попарных сравнений критериев и альтернативных вариантов марок провода по критериям.

В общем виде матрица сравнений  $M$  имеет вид:

$$M = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1j} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i1} & a_{i1} & \dots & a_{ij} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $a_{ij}$  – элемент матрицы.

Очевидно, что диагональные элементы матрицы сравнений равны 1.

В некоторых случаях матрицы сравнений удобно представлять в виде таблиц. В даль-

нейшем по тексту работы сравнение показано в табличном виде.

Попарное сравнение осуществляется по качественной шкале с присвоением баллов, указанных в табл. 1.

8. Анализ полученных матриц включает в себя нахождение суммы элементов каждого столбца, осуществление нормировки матрицы, расчет среднего значения для каждой строки – веса критериев.

Формула суммы элементов по столбцу имеет следующий вид:

$$S_j = a_{1j} + a_{2j} + \dots + a_{nj}, \quad (2)$$

где  $j$  – номер столбца.

Таблица 1. Качественная шкала оценки  
 Table 1. Qualitative rating scale

Балл	Определение
9	Принципиально лучше (очень сильное превосходство)
8	Промежуточный балл при наличии промежуточного мнения между 9 и 7
7	Характеристика данной марки провода значительно лучше (значительное превосходство)
6	Промежуточный балл при наличии промежуточного мнения между 7 и 5
5	Лучше по критерию (существенное превосходство)
4	Промежуточный балл при наличии промежуточного мнения между 5 и 3
3	Данная марка провода немного лучше следующей марки по критерию (умеренное превосходство)
2	Промежуточный балл при наличии промежуточного мнения между 3 и 1
1	Одинаковая характеристика по критерию
1/3	Данная марка провода немного хуже следующей по критерию
1/5	Хуже по критерию
1/7	Характеристика данной марки провода значительно хуже
1/9	Принципиально хуже
1/2, 1/4, 1/6, 1/8	Используются промежуточные баллы при наличии промежуточного мнения между 1 и 1/3, 1/3 и 1/5, 1/5 и 1/7, 1/7 и 1/9

Нормировка матрицы включает в себя деление всех элементов матрицы на сумму элементов соответствующего столбца:

$$A_{ij} = \frac{a_{ij}}{S_j}. \quad (3)$$

Последующий расчет среднего значения по каждой строке позволит получить весовой столбец критериев по цели.

9. Расчет весов альтернативных вариантов по системе иерархии: матрично (по правилу «строка на столбец») перемножаются обобщенные результаты по критериям с весами критериев.

10. Выбор варианта проекта, наиболее полно отвечающего поставленным целям и задачам: по полученным результатам (в долевом или процентном виде) принимается за оптимальный вариант марка провода с наибольшим значением по сравнению с остальными.

Еще раз отметим, что чем больше факторов и альтернативных вариантов при реализации МАИ рассматривается, тем больше будет размерность матриц (таблиц) и количество потраченного времени.

Немаловажным аспектом, который можно отнести к своего рода недостатку метода, является необходимость многократного, достоверного и при этом объективного сравнения, что может вызвать в ряде случаев определенные сложности.

Для упрощения применения МАИ возможно использовать следующее:

1. Логику транзитивности – при заполнении матриц есть возможность ускорения их заполнения в два раза (т.е. если характеристика данной марки провода по критерию лучше характеристики другой марки провода, то марка второго провода хуже первой марки провода по этой же характеристике – выставляются баллы 5 и 1/5, соответственно).

2. Выбор множества Парето при равнозначных критериях – его свойство заключается в том, что любая из альтернативных марок провода, входящих во множество Парето, как минимум по одному критерию лучше любой другой, входящей в это множество. В итоге

при выборе множества Парето все альтернативы попарно сравниваются друг с другом по всем критериям, а если оказывается, что какая-либо альтернатива не лучше другой ни по одному критерию, то ее можно исключить из рассмотрения (неперспективная альтернатива далее не рассматривается).

3. Декомпозиция структуры задачи – сведение задачи к большему числу малоразмерных матриц сравнения. С уменьшением размерности матриц сравнения возможно и уменьшение шкалы с 9-ти до 5-балльной.

4. Использование различных программных средств – реализация МАИ возможна как с использованием стандартных программ различных математических пакетов, так и с использованием специальных уже готовых или самостоятельно разработанных. В [18] представлена информация об 11 зарубежных и отечественных программах, реализующих МАИ.

Для апробации предложенного инструмента рассмотрим два случая классического применения МАИ для выбора марки провода и оценки получаемых результатов без упрощений по пунктам 2–4.

Проекты нового строительства ВЛЭП, их реконструкции и модернизации электросетевыми компаниями зачастую реализуются через инвестиционные программы, по которым источник финансирования жестко ограничен. Поэтому на практике проекты с наименьшими капитальными вложениями могут выглядеть наиболее привлекательно и реализовываться быстрее.

В то же время обоснование доходности инвестиционных проектов очень важно для сетевых компаний и для потребителей, так как размеры тарифов изменяются обратно пропорционально объему передаваемой электроэнергии.

Для каждого исследуемого случая зададимся различными целями:

*Цель 1 (новое строительство)* – выбор марки провода из заданного ряда, которая позволит получить оптимальную длину пролета при наименьших капитальных вложениях в проект.

*Цель 2 (реконструкция)* – выбор марки провода из заданного ряда, которая позволит

получить повышение пропускной способности ВЛ без замены существующих опор при получении максимальной выручки от передачи электроэнергии.

Исходя из поставленных целей, *условиями* отбора марок проводов ВЛЭП являются: в первом случае – стрела провеса, во втором случае – непревышение удельной массы провода (веса).

*Критериями отбора* для первого случая являются длина пролета (критерий 1.1) и стоимость провода (критерий 2), для второго случая – длительно допустимый ток (критерий 2.1) и стоимость (критерий 2).

*Исходные условия для первого случая (пример):* рассматривается ВЛЭП 220 кВ длиной 250 км, расположенной на территории границы Чукотского автономного округа и Магаданской области на опорах типа ПС220-5М с высотой подвеса проводов 20,6 м, наименьшее допустимое расстояние до земли – 6,0 м, габаритная стрела провеса – 13,6 м. Климатические условия: минимальная температура  $-64^{\circ}\text{C}$ , максимальная –  $+33^{\circ}\text{C}$ , ветер – 80 даН/мм<sup>2</sup> (IV зона), при гололеде – 20,0 даН/мм<sup>2</sup>, гололед – 30 мм (V зона). Исходя из токовой нагрузки ВЛ и метода экономической плотности тока, в качестве базового рассматривается провод марки с сечением АС 400/93, который, безусловно, подходит для выполнения первой цели и в случае отсутствия других марок проводов был бы принят в проекте к дальнейшей реализации, но недостаточен для второй цели.

Заданный ряд включает в себя отечественные марки проводов, применение которых возможно для ВЛЭП 220 кВ и, исходя из цели 1, позволяет обеспечить соблюдение габаритных расстояний:

– АС – базовая марка – традиционный сталеалюминевый провод, характеристики которого приняты за контрольные значения и условия.

– АСВТ представляет собой неизолированный сталеалюминевый высокотемпературный провод одинарной свивки с линейным касанием проволок типа ЛК-О и ЛК-Р с пла-

стически обжатыми стальной и алюминиевой частями. Кроме того, что провода этой марки обладают повышенным механическим ресурсом, установлено, что при одинаковом диаметре по сравнению с маркой АС он обеспечивает превышение длительно допустимого тока на 30–35%. Марка позволяет получить увеличение длины пролета до 40%, снижение ветровой нагрузки – на 25–40%. Интенсивность образования гололеда ниже на 10–12% [19].

– АСВП представляет собой высокопрочный сталеалюминевый провод одинарной навивки с линейным касанием проволок типа ЛК-О и ЛК-Р с пластически обжатыми стальной и алюминиевой частями провода, зачастую в специализированной литературе рассматривается совместно с маркой АСВТ.

– АСк2у представляет собой неизолированный компактированный провод, который состоит из стального сердечника (проволами с цинко-алюминевым покрытием) и нескольких концентрических повивов профилированных алюминиевых проволок трапециевидной формы. Исследования проводов данной марки показали, что они обеспечивают увеличенную механическую прочность, снижение действия гололеда на 3–9%, снижение возможного ущерба от недоотпуска электроэнергии, снижение потерь мощности на корону на 40–50% по сравнению с проводами марки АС [20].

– АСТ – термостойкий провод из алюминиевого сплава (Al-Zr) со стальным сердечником. В качестве преимуществ данного провода заявлены снижение времени на плавку гололеда и связанные издержки из-за высокой термической стойкости, повышение надежности ВЛЭП, усиленная механическая и термическая стойкость, возможность передачи больших токов по сравнению с проводом марки АС<sup>5</sup>.

Представим в табл. 2 характеристики проводов рассматриваемых марок, сопоставимых по сечению алюминиевой (токопроводящей) части с базовым проводом, по первым трем строкам для общей информации и

<sup>5</sup>Инновационные конструкции неизолированных проводов: каталог проводниковой продукции Ункомтех. М., 2021. 39 с.

информацию по критериям и контролю условий. Данные по характеристикам взяты из стандарта организации ПАО «ФСК ЕЭС» «Указания по проектированию ВЛ 220 кВ и выше с неизолированными проводами нового поколения»<sup>7</sup>, а по стоимости – из технико-коммерческих предложений производителей на уровне цен 2020 г. Габаритный пролет определен при условии нагрева провода до максимальной температуры 33°C.

Выбранные марки проводов и указанные сечения соответствуют условиям отбора: стрелы провеса всех проводов не превышают предельного значения, а вес 1 км провода указанных марок не превышает значения для провода АС400/93. Следовательно, все провода могут быть взяты к дальнейшему рассмотрению.

Учитывая, что некоторые варианты по отдельным характеристикам обладают схожими или одинаковыми значениями, то сложность выбора, не используя никакого инструмента и метода, существенно возрастает.

Сравнение марок по обозначенным критериям первого случая приведено в табл. 3–4.

При сравнении удобно сразу определить с минимальными и максимальными значениями по критериям. Соответственно, марка провода с наилучшим значением будет иметь принципиальные преимущества по сравнению с маркой с наихудшим значением по критерию, что позволяет легко и быстро

поставить значения 9 и 1/9 в таблице или матрице. По диагонали проставляются единицы.

Во втором случае провод АС400/93 не позволяет обеспечить требуемую пропускную способность, следовательно, не берется в рассмотрение. С учетом того, что АСВП403/61 по длительно допустимому току немного уступает базовой марке, то к дальнейшему анализу может не приниматься. Исключая неподходящие варианты, удается снизить размерность решаемой задачи. Можно также использовать значения качественной шкалы сравнения до 5. Результаты представлены в табл. 5.

Результаты нормировки матриц по вышеуказанным критериям и нахождение средних значений представлены в табл. 6–8.

После нормировки по критерию 1.1 (табл. 6) отчетливо видно, что наибольшим расчетным средним значением по критерию обладает провод марки АСк2у, которому соответствует максимальное, в данном случае наилучшее значение характеристики (411 м).

После нормировки по критерию 2 (табл. 7) отчетливо видно, что наибольшее расчетное среднее значение по критерию принадлежит проводу марки АСВП, которому соответствует минимальное значение характеристики (наилучшее).

Сведем рассчитанные столбцы средних значений в единую табл. 9.

**Таблица 2.** Характеристики проводов рассматриваемых марок  
**Table 2.** Characteristics of wire types under consideration

Марка провода	АС 400/93	АСВТ 389/59	АСВП 403/61	АСк2у 400/93	АСТ 400/93
Диаметр, мм	29,1	24,75	25,2	26,3	29,1
Сечение провода, мм <sup>2</sup>	499,05	388,6	403,4	493	499,2
Эл. сопротивление постоянному току при 20°C, Ом/км	0,0711	0,075	0,072	0,0707	0,0732
Длительно допустимый ток, А	830	1353	826	1178	2037
Вес, кг/км	1851	1591	1651	1840	1851
Стоимость, руб/км	495 905	475 000	441 000	533 600	555 300
Длина пролета, м	408	383	389	411	400
Стрела провеса, м	12,9	12,8	12,8	12,9	13,3

**Таблица 3.** Сравнение марок проводов по критерию 1.1  
**Table 3.** Wire type comparison according to criterion 1.1

Критерий длины пролета	АС 400/93	АСВТ 389/59	АСВП 403/61	АСк2у 400/93	АСТ 400/93
АС 400/93	1	8	7	1/2	4
АСВТ 389/59	1/8	1	1/3	1/9	1/6
АСВП 403/61	1/7	3	1	1/8	1/5
АСк2у 400/93	2	9	8	1	5
АСТ 400/93	4	6	5	1/5	1
Сумма	7,268	27,000	21,333	1,936	10,367

**Таблица 4.** Сравнение марок проводов по критерию 2  
**Table 4.** Wire type comparison according to criterion 2

Критерий стоимости	АС 400/93	АСВТ 389/59	АСВП 403/61	АСк2у400/93	АСТ400/93
АС 400/93	1	1/3	1/5 (0,200)	5	6
АСВТ 389/59	3	1	1/3 (0,333)	6	7
АСВП 403/61	5	3	1	8	9
АСк2у 400/93	1/5 (0,200)	1/6 (0,167)	1/8 (0,125)	1	3
АСТ 400/93	1/6 (0,167)	1/7 (0,143)	1/9 (0,111)	1/3 (0,333)	1
Сумма	9,367	4,643	1,769	20,333	26,000

**Таблица 5.** Сравнение марок проводов по критерию 2.1  
**Table 5.** Wire type comparison according to criterion 2.1

Критерий по длительно допустимому току	АСВТ 389/59	АСк2у 400/93	АСТ 400/93
АСВТ 389/59 1353	1	3	1/4
АСк2у 400/93 1178	1/3	1	1/5
АСТ 400/93 2037	4	5	1
Сумма	5,333	9,000	1,450

**Таблица 6.** Нормировка по критерию 1.1  
**Table 6.** Normalizing by criterion 1.1

Нормирование, длина пролета	АС 400/93	АСВТ 389/59	АСВП 403/61	АСк2у 400/93	АСТ 400/93	Среднее значение
АС 400/93	0,138	0,296	0,328	0,258	0,386	<b>0,281</b>
АСВТ 389/59	0,017	0,037	0,016	0,057	0,016	<b>0,029</b>
АСВП 403/61	0,020	0,111	0,047	0,065	0,019	<b>0,052</b>
АСк2у 400/93	0,275	0,333	0,375	0,516	0,482	<b>0,396</b>
АСТ 400/93	0,550	0,222	0,234	0,103	0,096	<b>0,241</b>

**Таблица 7.** Нормировка по критерию 2  
**Table 7.** Normalizing by criterion 2

Нормирование, критерий стоимости	АС 400/93	АСВТ 389/59	АСВП 403/61	АСк2у 400/93	АСТ 400/93	Среднее значение
АС 400/93	0,107	0,072	0,113	0,246	0,231	<b>0,154</b>
АСВТ 389/59	0,320	0,215	0,188	0,295	0,269	<b>0,258</b>
АСВП 403/61	0,534	0,646	0,565	0,393	0,346	<b>0,497</b>
АСк2у 400/93	0,021	0,036	0,071	0,049	0,115	<b>0,058</b>
АСТ 400/93	0,018	0,031	0,063	0,016	0,038	<b>0,033</b>

**Таблица 8.** Нормировка по критерию 2.1  
**Table 8.** Normalizing by criterion 2.1

Критерий по длительно допустимому току	АСВТ 389/59	АСк2у 400/93	АСТ 400/93	Среднее значение
АСВТ 389/59	0,188	0,333	0,172	0,231
АСк2у 400/93	0,062	0,111	0,138	0,104
АСТ 400/93	0,750	0,556	0,690	0,665

**Таблица 9.** Обобщенная таблица сравнения по критериям  
**Table 9.** Generalized criteria-based comparison table

Случай критерий	Первый		Второй	
	критерий 1.1	критерий 2	критерий 2.1	критерий 2
АС 400/93	0,281	0,154	–	–
АСВТ 389/59	0,029	0,258	0,231	0,258
АСВП 403/61	0,052	0,497	–	–
АСк2у 400/93	0,396	0,058	0,104	0,058
АСТ 400/93	0,241	0,033	0,665	0,033

Поскольку не всегда приходится сталкиваться с равнозначными критериями, то они также нуждаются в оценке. Для проведения исследования и учитывая его цель, примем, что в первом случае имеем дело с равнозначными критериями (вес каждого такого критерия 0,5), тогда как во втором случае наиболее важен критерий 2.1 (вес такого критерия 0,833, в то время как вес критерия 2 составит 0,167).

Умножая полученную матрицу на столбец по правилу «строка на столбец» (матрично), получаем веса альтернатив с точки зрения достижения цели.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результат применения метода, выраженный в долевым и процентном соответствии установленным критериям по первому случаю, представлен в табл. 10.

Результаты при наиболее важном критерии 2.1 представлены в табл. 11.

Для второго случая если принять критерии равнозначными, то итоговый результат будет выглядеть так, как показано в табл. 12.

По приведенным расчетам определены варианты реализации проектов, наиболее полно отвечающие поставленным целям и задачам:

– для первого случая – марка АСВП обеспечивает оптимальную длину пролета при минимальных капитальных вложениях в проект;

– для второго случая – марка АСТ 400/93 обеспечивает максимальную пропускную способность.

Таким образом, для первой цели выбран не вариант АС400/93, встречающийся наиболее часто и который можно выбрать по существующим методам и нормативной документации, и не вариант АСВТ389/59 с наименьшей характеристикой по длине пролета, а вариант АСВП403/61. Для выполнения же второй цели, учитывая существенно превосходящее значение по критерию длительно допустимого тока, выбран самый дорогостоящий вариант АСТ400/93, который позволяет получать максимальную выручку по передаче электроэнергии и обходиться без дополнительных технических решений для поставленной цели.

В качестве примера показана корректность выбора для первой поставленной цели, которую можно оценить по значению капитальных вложений. В табл. 13 показаны результаты верификационных расчетов. При этом стоимость провода рассчитана с использованием коэффициента инфляции, так как стоимость 1 км провода в табл. 2 приведена на 2020 г.

**Таблица 10.** Результаты реализации метода анализа иерархий для 1 случая  
**Table 10.** Results of hierarchy analysis method implementation for the case 1

Марка	АС 400/93	АСВТ 389/59	АСВП 403/61	АСк2у 400/93	АСТ 400/93
Итоговый результат в долях	0,218	0,144	0,275	0,227	0,137
Итоговый результат в %	21,8	14,4	<b>27,5</b>	22,7	13,7

**Таблица 11.** Результаты реализации метода анализа иерархий для 2 случая  
**Table 11.** Results of hierarchy analysis method implementation for the case 2

Марка	АСВТ 389/59	АСк2у 400/93	АСТ 400/93
Итоговый результат в долях	0,236	0,096	0,559
Итоговый результат в %	23,6	9,6	55,9

**Таблица 12.** Результаты реализации метода анализа иерархий для 2 случая после переоценки критериев  
**Table 12.** Results of hierarchy analysis method implementation for the case 2 after criteria re-evaluation

Марка	АСВТ 389/59	АСк2у 400/93	АСТ 400/93
Итоговый результат в долях	0,244	0,081	0,349
Итоговый результат в %	24,4	8,1	34,9

**Таблица 13.** Верификационные расчеты  
**Table 13.** Verification calculations

Марка	АС 400/93	АСВТ 389/59	АСВП 403/61	АСк2у 400/93	АСТ 400/93
Стоимость провода, руб.	412 005 560,5	394 637 362,5	366 389 635,5	443 323 150,8	461 351 847,2
Длина пролета промежуточной опоры, м	279	262	275	282	274
Количество промежуточных опор, шт.	896	954	909	886	912
Стоимость промежуточной опоры, руб.	1 003 560 руб. <sup>8</sup>				
Стоимость фундаментов под одну опору, руб.	240 000 руб. <sup>9</sup>				
Оценка капитальных вложений при новом строительстве (провод+опоры+ фундаменты), млн руб.	1526,235	1580,994	1496,786	1545,117	1595,479

Капитальные вложения определяются как «ориентировочные» по данным заводов-изготовителей и поставщиков, так как фактические значения определяются по коммерческим предложениям и результатам закупочных процедур в зависимости от поставщика, места доставки, точного количества поставки и комплектации<sup>8,9</sup>.

Верификационные расчеты подтвердили полученные результаты.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

При реализации алгоритма выбора марки провода по МАИ установлено, что:

– целесообразно внедрение метода в отраслевую практику выбора проводов, учиты-

<sup>8</sup>Электропоставка. Федеральный поставщик опорных конструкций ЛЭП, контактных сетей и освещения // Промежуточная опора ПС220-5 [Электронный ресурс]. URL: <https://elektropostavka.ru/store/catalog/oporyi-lep/metallicheskie-oporyi-lep/metallicheskie-reshetchatye-oporyi/11260> (22.01.2023).

<sup>9</sup>Электропоставка. Федеральный поставщик опорных конструкций ЛЭП, контактных сетей и освещения // Фундаменты опор ЛЭП [Электронный ресурс]. URL: <https://elektropostavka.ru/store/catalog/fundamentyi-opor-lep> (22.01.2023).

вая его прикладной потенциал в электроэнергетике, многокритериальность и отсутствие ограничений на размерность решаемой задачи;

– изменение весов критериев может приводить к получению различных результатов выбора, следовательно, в результате получается «оптимальный» вариант, который наилучшим образом отвечает именно поставленным целям и задачам;

– полученные результаты выбора легко интерпретируются;

– метод работает для провода любого сечения каждой выбранной конструкции.

Важно отметить, что реализация метода направлена не на одновременный выбор и марки провода и его сечения. МАИ при выборе марки позволяет выработать рекомендации для применения того или иного альтер-

нативного варианта в конкретных условиях и конкретной заданной цели. Для выбора сечения провода необходимо проводить дополнительные технико-экономические расчеты. При получении результатов по МАИ, отличающихся не более чем на 5%, в дальнейшем рассмотрение могут быть взяты несколько марок проводов, попавшие в этот интервал. В любом случае использование предлагаемого метода позволяет существенно сократить количество альтернативных вариантов и получить наиболее оптимальный из рассматриваемых.

В результате исследования впервые предложен универсальный метод выбора марки проводов любой конструкции ВЛЭП свыше 1 кВ, позволяющий получать экономические и технические эффекты.

#### Список источников

1. Варыгина А.О., Савина Н.В. Оценка целесообразности применения на ВЛ проводников нового поколения // Современные технологии: актуальные вопросы, достижения и инновации: сб. ст. X Междунар. науч.-практ. конф. (г. Пенза, 27 октября 2017 г.). Пенза: Наука и Просвещение, 2017. С. 50–55.
2. Пехтелева В.Р., Осминкин Е.Д., Шевченко Н.Ю. Провода нового поколения российского производства // Инновации в науке и практике: матер. XIII Междунар. науч.-практ. конф. (г. Барнаул, 26 декабря 2018 г.). Уфа: Дендра, 2018. Ч. 1. С. 225–230.
3. Тимашова Л.В., Никифоров Е.П., Назаров И.А., Мерзляков А.С., Ермошина М.С., Качановская Л.И. [и др.]. Повышение надёжности и снижение эксплуатационных затрат ВЛ // Энергия единой сети. 2014. № 5. С. 6–14.
4. Васюра Ю.Ф., Глазырин М.А., Плешкова Т.А. Условие экономической целесообразности сооружения линий электропередачи с применением проводов с улучшенными характеристиками // Аллея науки. 2017. Т. 2. № 15. С. 647–650.
5. Reddy S.B., Mitra G. Investigations on high temperature Low Sag (HTLS) conductors // IEEE Transactions on Power Delivery. 2020. Vol. 35. Iss. 4. P. 1716–1724. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2019.2950992>.
6. Hadzimiratovic S., Fickert L. Impact of gradually replacing old transmission lines with advanced composite conductors // IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe. 2018. <https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2018.8571614>.
7. Lew J. Aluminum-calcium composite conductors: the future of america's power grid // IEEE MIT Undergraduate Research Technology Conference. 2020. <https://doi.org/10.1109/URTC51696.2020.9668908>.
8. Долгопол Т.Л., Мишин Д.С. Повышение надёжности воздушных линий электропередачи // Энергетика и энергосбережение: теория и практика: сб. матер. IV Всерос. науч.-практ. конф. (г. Кемерово, 19–21 декабря 2018 г.). Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2018. С. 220.1–220.5.
9. Ленский С.В., Ли В.Н. Исследование явления гололедообразования на проводах ЛЭП и способов борьбы с ним // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2018. Т. 1. С. 185–189.
10. Нефедов А.С. Сравнительный анализ метода ELECTRE III и метода анализа иерархий при решении многокритериальных задач // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 2. С. 9–15.
11. Наумов А.Е., Щенятская М.А. Практические аспекты использования метода анализа иерархий для политикритериального сравнительного анализа портфельных альтернатив // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 1. С. 223–227. <https://doi.org/10.12737/24127>.
12. Saaty T.L. The analytic hierarchy process. New York: McGraw-Hill International, 1980. 150 p.
13. Manusov V.Z., Orlov D.V., Frolova V.V. Diagnostics of technical state of modern transformer equipment using the analytic hierarchy process // IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe. 2018. <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2018.8493904>.
14. Elmahmoudi F., Abra O.E.K., Raihani A., Serrar O., Bahatti L. GIS based fuzzy analytic hierarchy process for wind energy sites selection in Tafaya Morocco // IEEE International Conference of Moroccan Geomatics. 2020.

<https://doi.org/10.1109/Morgeo49228.2020.9121921>.

15. Hai-bo Su, Min-chuan Liao, Lu Qu, Han-sheng Cai, Yu Zhang, Rui-fa Feng. Application of comprehensive evaluation for lightning protection scheme in distribution line on analytic hierarchy process // 6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (Chongqing, 8–11 April 2021). Chongqing: IEEE, 2021. P. 152–157. <https://doi.org/10.1109/ACPEE51499.2021.9436987>.
16. Yu Hong, Ma Yi, Wang Longfei, Zhai Yongsai, Du Zhijie. A method for evaluating the rescue priority level of power line post-disaster based on AHP // IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (Takamatsu, 6–9 August 2017). Takamatsu: IEEE, 2017. P. 35–39. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2017.8015784>.
17. Lin Zhiling, Gao Liqun, Zhang Dapeng, Ren Ping, Li Yang. Application of analytic hierarchy process in power lines maintenance // 6th World Congress on Intelligent Control and Automation (Dalian, 21–23 June 2006). Dalian: IEEE, 2006. P. 7596–7599. <https://doi.org/10.1109/WCICA.2006.1713443>.
18. Латыпова В.А. Сравнительный анализ и выбор программных средств, реализующих метод анализа иерархий // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2018. Т. 6. № 4. С. 322–347. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2018.23.4.024>.
19. Курьянов В.Н., Швец Е.С., Тимашова Л.В., Фокин В.А. Применение отечественных инновационных высокотемпературных проводов АСВТ для ВЛ 110 кВ и их эффективность // Энергия единой сети. 2017. № 5. С. 12–18.
20. Васюра Ю.Ф., Глазырин М.А., Плешкова Т.А., Черепанова Г.А. Оценка экономической целесообразности строительства высоковольтных линий электропередачи с применением проводов нового поколения // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2014. № 3. С. 71–74.

### References

1. Varygina A.O., Savina N.V. Assessing application feasibility of a new conductor generation on overhead lines. *Sovremennye tekhnologii: aktual'nye voprosy, dostizheniya i innovacii: sbornik statej X Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Modern technologies: topical issues, achievements and innovations: collected articles of 10<sup>th</sup> International scientific and practical conference*. 27 October 2017. Penza: Nauka i Prosveshchenie, 2017. S. 50–55.
2. Pekhteleva V.R., Osminkin E.D., Shevchenko N.Yu. New generation of wires produced in Russia. *Innovacii v nauke i praktike: materialy XIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Innovations in science and practice: materials of 13<sup>th</sup> International scientific and practical conference*. 26 December 2018, Barnaul. Ufa: Dendra; 2018, part 1, p. 225-230. (In Russ.).
3. Timashova L.V., Nikiforov E.P., Nazarov I.A., Merzlyakov A.S., Ermoshina M.S., Kachanovskaya L.I., et al. *New conductor types application for overhead transmission lines. Energiya edinoj seti*. 2014;5:6-14. (In Russ.).
4. Vasyura Yu.F., Glazyrin M.A., Pleshkova T.A. Economic feasibility of power line construction using wires with improved characteristics *Alleya nauki*. 2017;2(15):647-650. (In Russ.).
5. Reddy S.B., Mitra G. Investigations on high temperature Low Sag (HTLS) conductors. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2020;35(4):1716-1724. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2019.2950992>.
6. Hadzimiratovic S., Fickert L. Impact of gradually replacing old transmission lines with advanced composite conductors. In: *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe*. 2018. <https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2018.8571614>.
7. Lew J. Aluminum-calcium composite conductors: the future of America's power grid. In: *IEEE MIT Undergraduate Research Technology Conference*. 2020. <https://doi.org/10.1109/URTC51696.2020.9668908>.
8. Dolgopol T.L., Mishin D.S. Improving reliability of overhead transmission lines. In: *Energetika i energosberezhenie: teoriya i praktika: sbornik materialov IV Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Energy and Energy Saving: Theory and Practice: collected materials of 4<sup>th</sup> All-Russian scientific and practical conference*. 19–21 December 2018, Kemerovo. Kemerovo: Kuzbasskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet imeni T.F. Gorbacheva; 2018, p. 220.1-220.5.
9. Lensky S.V., Lee V.N. Study of the phenomenon of icing generation on the wires of power lines and ways of dealing with it. *Nauchno-tekhnicheskoe i ekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke*. 2018;1:185-189.
10. Nefedov A.S. Comparative analysis of the ELECTRE III method and the hierarchy analysis for solving multicriteria problems. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki*. 2018;2:9-15. (In Russ.).
11. Naumov A.E., Shchenyatskaya M.A. Practical issues of using the analytic hierarchy process in multi-criteria analysis of portfolio alternatives. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. Shuhova = Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov*. 2017;1:223-227. (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/24127>.
12. Saaty T.L. *The analytic hierarchy process*. New York: McGraw-Hill International; 1980, 150 p.
13. Manusov V.Z., Orlov D.V., Frolova V.V. Diagnostics of technical state of modern transformer equipment using the analytic hierarchy process. In: *IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe*. 2018. <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2018.8493904>.
14. Elmahmoudi F., Abra O.E.K., Raihani A., Serrar O., Bahatti L. GIS based fuzzy analytic hierarchy process for wind energy sites selection in Tarfaya Morocco. In: *IEEE International Conference of Moroccan Geomatics*. 2020. <https://doi.org/10.1109/Morgeo49228.2020.9121921>.
15. Hai-bo Su, Min-chuan Liao, Lu Qu, Han-sheng Cai, Yu Zhang, Rui-fa Feng. Application of comprehensive

evaluation for lightning protection scheme in distribution line on analytic hierarchy process. In: *6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering*. 8–11 April 2021, Chongqing. Chongqing: IEEE; 2021, p. 152-157. <https://doi.org/10.1109/ACPEE51499.2021.9436987>.

16. Yu Hong, Ma Yi, Wang Longfei, Zhai Yongsai, Du Zhijie. A method for evaluating the rescue priority level of power line post-disaster based on AHP. In: *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. 6–9 August 2017, Takamatsu. Takamatsu: IEEE; 2017, p. 35-39. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2017.8015784>.

17. Lin Zhiling, Gao Liqun, Zhang Dapeng, Ren Ping, Li Yang. Application of analytic hierarchy process in power lines maintenance. In: *6th World Congress on Intelligent Control and Automation*. 21–23 June 2006, Dalian. Dalian: IEEE; 2006, p. 7596-7599. <https://doi.org/10.1109/WCICA.2006.1713443>.

18. Latypova V.A. A comparative analysis and a choice of tools implementing analytic hierarchy process. *Modelirovanie, optimizaciya i informacionnye tekhnologii*. 2018;6(4):322-347. (In Russ.). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2018.23.4.024>.

19. Kur'yanov V.N., Shvec E.S., Timashova L.V., Fokin V.A. Application of innovative domestic high-temperature ASVT wires for 110 kV overhead lines and their efficiency. *Energiya edinoj seti*. 2017;5:12-18. (In Russ.).

20. Vasyura Yu.F., Glazyrin M.A., Pleshkova T.A., Cherepanova G.A. Evaluating economic feasibility of high-voltage power line construction using new generation of wires. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Elektromekhanika*. 2014;3:71-74. (In Russ.).

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

#### Савина Наталья Викторовна,

д.т.н., профессор,  
заведующая кафедрой энергетики,  
Амурский государственный университет,  
675028, г. Благовещенск, Игнатьевское шоссе, 21,  
Россия  
nataly-savina@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-3497-8819>

#### Варыгина Александра Олеговна,

аспирант,  
Амурский государственный университет,  
675028, г. Благовещенск, Игнатьевское шоссе, 21,  
Россия  
alleks\_13@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-3500-7723>

### 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 09.03.2023; принята к публикации 12.04.2023.

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

#### Natalia V. Savina,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Head of the Department of Power Engineering,  
Amur State University,  
21, Ignatyevskoye Shosse, Blagoveshchensk, 675028,  
Russia,  
nataly-savina@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-3497-8819>

#### Aleksandra O. Varygina,

Postgraduate Student,  
Amur State University,  
21, Ignatyevskoye Shosse, Blagoveshchensk, 675028,  
Russia,  
alleks\_13@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-3500-7723>

### 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 31.01.2022; approved after reviewing 09.03.2023; accepted for publication 12.04.2023.



Обзорная статья

УДК 621.311

<https://elibrary.ru/msowuy><https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-354-369>

## Обзор международного опыта в прогнозировании генерации возобновляемых источников энергии с помощью методов машинного обучения

Н.Н. Сергеев<sup>1✉</sup>, П.В. Матренин<sup>2</sup><sup>1,2</sup>Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

**Резюме.** Цель – проведение аналитического обзора и систематизация современных подходов к прогнозированию генерации электроэнергии на базе возобновляемых источников энергии в мировой практике, а также анализ актуальных проблем и перспективных решений в данном направлении. Классификация методов прогнозирования генерации электроэнергии возобновляемыми источниками выполнена на основе анализа литературных источников, посвященных разработке моделей прогнозирования, которые включают в себя физические модели, использование статистических методов и методов на базе машинного обучения. Проведен анализ использования наиболее распространенных методов (физических, статистических и методов машинного обучения) прогнозирования генерации электроэнергии возобновляемыми источниками, выделены преимущества и недостатки данных методов. Установлено, что в большинстве случаев – в особенности в задачах краткосрочного прогнозирования генерации – методы прогнозирования на базе машинного обучения показывают более высокие результаты по сравнению с физическими и статистическими методами. По результатам анализа актуальных проблем в области систем сбора метаданных установлено, что основными препятствиями для широкого применения алгоритмов машинного обучения на практике являются неполнота и неопределенность исходных данных, а также высокая вычислительная сложность таких алгоритмов. Показано, что с целью повышения эффективности моделей машинного обучения в задаче прогнозирования генерации возобновляемых источников энергии можно применять различные методы предварительной обработки данных, такие как нормализация, определение аномалий и восстановление пропущенных значений, аугментация и кластеризация, корреляционный анализ. Принято решение о необходимости разработки методов предварительной обработки данных, направленных на оптимизацию и общее повышение эффективности моделей машинного обучения для прогнозирования генерации возобновляемых источников энергии. Ведение исследований в данном направлении при учете всех перечисленных проблем имеет высокую значимость для реализации программ по интеграции возобновляемых источников энергии в электроэнергетическую систему и развития в области безуглеродной энергетики.

**Ключевые слова:** возобновляемые источники энергии, прогнозирование, машинное обучение, нейронные сети, регрессионные модели, анализ данных

**Финансирование:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-79-00181).

**Для цитирования:** Сергеев Н.Н., Матренин П.В. Обзор международного опыта в прогнозировании генерации возобновляемых источников энергии с помощью методов машинного обучения // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 2. С. 354-369. EDN: MSOWUY, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-354-369>.

## A review of international experience in forecasting renewable energy generation using machine learning methods

Nikita N. Sergeev<sup>1✉</sup>, Pavel V. Matrenin<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

**Abstract.** In this work, we conduct an analytical review of contemporary international approaches to forecasting the volume of electricity generated by renewable energy sources, as well as to investigate current problems and prospective solutions in this field. The existing forecasting methods were classified following an analysis of published literature on the development of forecasting models, including those based on physical, statistical and machine learning principles. The application practice of these methods was investigated to determine the advantages and disadvantages of each method. In the majority of cases, particularly when carrying out short-term forecasting of renewable electricity generation, machine learning methods outperform physical and statistical methods. An analysis of the current problems in the field of weather data collection systems allowed the major obstacles to a wide application of machine learning algorithms to be determined, which comprise incompleteness and uncertainty of input data, as well as the high computational complexity of such algorithms. An increased efficiency of machine learning models in the task of forecasting renewable energy generation can be achieved using data preprocessing methods, such as normalization, anomaly detection, missing value recovery, augmentation, clustering and correlation analysis. The need to develop data preprocessing methods aimed at optimizing and improving the overall efficiency of machine learning models for forecasting renewable energy generation was justified. Research in this direction, while taking into account the above problems, is highly relevant for the implementation of programs for the integration of renewable energy sources into power systems and the development of carbon-free energy.

**Keywords:** renewable energy sources, forecasting, machine learning, neural networks, regression models, data analysis

**Funding:** The research was funded by the grant of the Russian Science Foundation (project No. 22-79-00181).

**For citation:** Sergeev N.N., Matrenin P.V. A review of international experience in forecasting renewable energy generation using machine learning methods. *iPolytech Journal*. 2023;27(2):354-369. (In Russ.). EDN: MSOWUY, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-354-369>.

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы наблюдается тенденция к росту доли возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в составе современных электроэнергетических систем (ЭЭС). Так, на конец 2021 г. глобальная установленная мощность ВИЭ достигла отметки в 3 ТВт с рекордным приростом мощности в 295 ГВт за этот год, а доля ВИЭ в энергобалансе составила 28,7%; вводимые генерирующие мощности ВИЭ сосредоточены в основном в секторе гидроэнергетики (40%), солнечной энергетики (28%) и ветроэнергетики (27%)<sup>3</sup>. К 2030 г. в Европейском Союзе предполагается дальнейший рост доли вырабатываемой ВИЭ мощности вплоть до 60%<sup>4</sup>.

Развитие ВИЭ в России происходит через заключение договоров о предоставлении мощности (ДПМ) ВИЭ, гарантирующих инвесторам возврат инвестиций за счет специальных надбавок к цене на мощность для покупателей оптового рынка электроэнергии и мощности. Программы ДПМ ВИЭ 1.0 и 2.0 направлены на развитие именно ветроэнергетики и солнечной энергетики: по итогам реализации этих программ до конца 2024 г. должны быть введены в эксплуатацию солнечные и ветровые электростанции суммарной установленной мощностью 5,28 ГВт (доля ВИЭ в ЭЭС России при этом будет составлять 2% от суммарной установленной мощности), а к 2035 г. – еще 6,7 ГВт [1].

<sup>3</sup>Renewable Energy Statistics 2022 // IRENA. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Renewable-Energy-Statistics-2022> (22.02.2023).

<sup>4</sup>Renewable Electricity // IEA [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iea.org/reports/renewable-electricity> (22.02.2023).

Несмотря на очевидную привлекательность возобновляемой энергетики в виде теоретической неисчерпаемости и высокой экологичности [2–4], необходимо в то же время принимать во внимание сложности, возникающие при интеграции ВИЭ в состав ЭЭС. Основными проблемами в данном случае являются сильная зависимость от погоды, стохастичный характер выработки и, как следствие, неустойчивое и ненадежное электроснабжение [5]. В связи с этим особенно большое значение приобретает решение широкого ряда задач проектирования и оперативно-диспетчерского управления ЭЭС с высокой долей ВИЭ. В этот ряд задач входит долгосрочное, среднесрочное, краткосрочное и оперативное планирования электроэнергетических режимов, а также сбор, обработка и применение метеорологических данных для прогнозирования генерации ВИЭ.

Планирование электроэнергетических режимов энергосистем производится на период от каждого получаса внутри суток до нескольких лет вперед. При планировании электроэнергетического режима ЭЭС на любой период выполняется прогнозирование балансов мощности энергосистемы, что может быть затруднено при наличии значительной доли ВИЭ в составе генерирующего оборудования энергосистемы, поскольку необходимо учитывать зависимость выработки ВИЭ от метеорологических условий. В зависимости от временного горизонта выделяют долгосрочное, среднесрочное, краткосрочное и оперативное прогнозирования [6, 8, 9]. На рисунке приведена классификация видов прогнозирования по временному горизонту и

соответствующие им области применения.

Методы прогнозирования генерации электроэнергии от ВИЭ в общем случае можно разделить на физические модели [10, 11, 13], статистические [12] и модели с применением машинного обучения, в том числе нейронные сети (адаптивные модели) [11, 14–16]. Все виды моделей имеют свои сильные и слабые стороны и находят применение в различных ситуациях. Настоящая работа включает обзор всех вышеупомянутых методов, однако большее внимание уделено моделям на базе методов машинного обучения как наиболее перспективным инструментам в вопросе интеграции ВИЭ в ЭЭС.

Важным моментом при разработке любых моделей прогнозирования являются сбор, обработка и применение необходимых исходных данных. При прогнозировании генерации электроэнергии на основе ВИЭ в качестве исходных данных используются как метеорологические данные (температура, скорость и направление ветра, солнечная радиация, облачность и др.), так и ретроспективные данные фактической выработки электроэнергии конкретными электростанциями на базе ВИЭ. Основными источниками метеоданных являются, как правило, географическая информационная система (ГИС) и специальные средства измерения [17, 18]. Объединение систем сбора метеоданных и систем прогнозирования выработки электроэнергии ВИЭ также представляет собой отдельную задачу, решение которой необходимо для функционирования ЭЭС с высокой долей ВИЭ.



**Классификация видов прогнозирования и их области применения**  
*Classification of forecasting types and their application areas*

## ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГЕНЕРАЦИИ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Для прогнозирования генерации электроэнергии на основе ВИЭ применяются различные подходы: физические модели, статистические методы и методы машинного обучения. Эффективность каждого метода может изменяться от случая к случаю и существенно зависит от временного горизонта прогнозирования, выбранных метрик качества и объема доступных данных и вычислительных ресурсов.

**Физические модели** строятся, как правило, на основе методов численного прогнозирования погоды. Численные прогнозы погоды основываются на данных о состоянии рельефа земной поверхности, океанов и нижних слоев атмосферы, собираемых метеорологическими организациями по всему миру. Современные методики объединения и обработки данных позволяют посредством численного прогнозирования погоды строить симуляции атмосферных процессов в режиме реального времени [19].

С помощью данных численного прогнозирования погоды можно выводить прогноз климатических условий на длительный период – более чем на 15 дней вперед. В работах [20, 21] предложены методики краткосрочного прогнозирования выработки электроэнергии ветряных и солнечных электростанций с применением численного прогнозирования погодных условий в пределах нескольких суток.

Несмотря на то, что такие модели способны строить прогноз выработки электроэнергии ВИЭ с высокой точностью, их высокая вычислительная сложность и необходимость доступа (часто дорогостоящего) к данным метеорологических организаций затрудняет их применение на практике.

**Статистические подходы** используют данные предшествующих наблюдений, с помощью которых выводится зависимость между входными переменными и прогнозируемыми величинами. Они более эффективны для краткосрочного прогнозирования и обладают, как правило, сравнительно не-

большим количеством параметров, благодаря чему требуют значительно меньше вычислительных ресурсов по сравнению с физическими моделями и методами на основе машинного обучения [9]. Наиболее часто из этой категории применяются итерационные методы, авторегрессионные модели и модели экспоненциального сглаживания.

*Инерционный метод* часто используется для оперативного прогнозирования мощности, вырабатываемой СЭС или ВЭС, на время упреждения от 15 до 30 мин. Этот подход основывается на предположении, что погодные условия (солнечная радиация, скорость ветра) в определенный день будут такими же, как и условия в предшествующий день. Данная модель описывается уравнением:

$$P(t + k|t) = \frac{1}{T} \sum_{i=0}^{n-1} P(t - i\Delta t), \quad (1)$$

где  $k$  – время упреждения, ч;  $P(t + k|t)$  – прогноз мощности на время  $t + k$ , построенный в момент времени  $t$ , Вт;  $T$  – длина прогнозного интервала, ч;  $n$  – количество предшествующих измерений;  $P(t - i\Delta t)$  – действительная мощность в момент времени  $t$  и предыдущих  $i$ -х временных шагов в пределах  $T$ , Вт;  $\Delta t$  – длина шага по времени, ч.

Основными преимуществами данной модели являются ее очень низкая вычислительная сложность и удовлетворительная точность на близких временных горизонтах [22]. Однако ее применение ограничивается тем, что чем больше удалено время начала прогноза от текущего момента времени, тем сильнее снижается ее точность.

На практике часто используются методы, объединяющие простые модели временных рядов – *авторегрессии* AR (от англ. autoregressive) и *скользящего среднего* MA (от англ. moving average). *Модель авторегрессии – скользящего среднего* ARMA – одна из наиболее популярных моделей прогнозирования временных рядов благодаря своей простоте и способности представлять различные типы временных рядов с помощью подбора различных порядков. Модель ARMA( $p, q$ ), где  $p$  и  $q$  – целые числа, задающие порядки составляющих моделей AR( $p$ ) и

MA( $q$ ), описывается следующим выражением:

$$X_t = c + \varepsilon_t + \sum_{i=1}^p \varphi_i X_{t-i} + \sum_{j=1}^q \theta_j \varepsilon_{t-j}, \quad (2)$$

где  $X_t$  – прогнозируемое значение в момент времени  $t$ ;  $c$  – константа;  $\varepsilon_t$  – белый шум (независимая переменная, последовательность случайных величин с нулевым средним и постоянной дисперсией);  $\varphi_i$  и  $\theta_j$  – коэффициенты моделей AR( $p$ ) и MA( $q$ ), соответственно.

ARMA-модель демонстрирует высокую эффективность в прогнозировании стационарных временных рядов с наличием явной линейной зависимости, что может встречаться в задачах прогнозирования выработки ВИЭ [22, 24]. В работе [22] представлена ARMA-модель для прогнозирования генерации электроэнергии ветроустановками, а также показано, что точность модели достаточно высока при оперативном прогнозировании и снижается по мере увеличения временного горизонта. В работе [24] показано, что ARMA-модель для прогнозирования почасовой выработки электроэнергии солнечными батареями дает на 15% лучший результат в рассматриваемой задаче по сравнению с моделью, построенной по инерционному методу.

Основным ограничением применения ARMA-моделей является требование стационарности рассматриваемого временного ряда, т.е. его числовые характеристики должны оставаться неизменными во времени. Для работы с нестационарными временными рядами применяется модель ARIMA – интегрированная ARMA (модель Бокса – Дженкинса). При использовании такого подхода нестационарный временной ряд приводится к стационарному путем его дифференцирования, т.е. вместо исходного временного ряда необходимо рассматривать его приращение за один или несколько периодов. Формально модель ARIMA для нестационарного временного ряда представляется в виде

$$(1 - \sum_{i=1}^p \varphi_i L^i)(1 - L)^d X_t = (1 + \sum_{j=1}^q \theta_j L^j) \varepsilon_t, \quad (3)$$

где  $L$  – лаговый оператор, определяемый как

$L(X_t) = X_{t-1}$ ;  $d$  – порядок интегрированности временного ряда, при  $d = 0$  модель ARIMA( $p, d, q$ ) сводится к обычной модели ARMA( $p, q$ ).

Модель ARIMA является наиболее распространенной модификацией авторегрессии со скользящим средним и в некоторых случаях может иметь точность прогнозирования, достаточно близкую к точности нейронных сетей, как показано в работе [25], где рассмотрена задача оперативного прогнозирования скорости ветра.

Модель ARMA( $p, q$ ) может быть дополнена учетом экзогенных факторов и преобразована в модель ARMAX( $p, q, b$ ), где  $b$  – порядок временного ряда экзогенной переменной. Такая модель может быть представлена как

$$X_t = c + \varepsilon_t + \sum_{i=1}^p \varphi_i X_{t-i} + \sum_{j=1}^q \theta_j \varepsilon_{t-j} + \sum_{k=1}^b \eta_k \beta_{k-1}, \quad (4)$$

где  $\eta_k$  – коэффициенты ряда экзогенной переменной  $\beta_k$ .

В задаче прогнозирования генерации электроэнергии ВИЭ в роли экзогенных факторов могут выступать различные метеорологические условия: скорость и направление ветра [27], солнечная радиация [28].

Модель экспоненциального сглаживания относится к адаптивным методам прогнозирования, особенность которых заключается в способности подстраиваться под динамические изменения рассматриваемого процесса, придавая большее значение наиболее близким к текущему моменту времени наблюдениям. В общем случае это выполняется за счет присвоения различных весов предшествующим значениям временного ряда: чем дальше точка от текущего наблюдения, тем меньший вес ей присваивается. Простейший вид экспоненциального сглаживания описывается выражением:

$$\hat{X}_{t+1} = \alpha X_t + (1 - \alpha) \hat{X}_t = \hat{X}_t + \alpha(X_t - \hat{X}_t), \quad (5)$$

где  $X_t$  – наблюдение в момент времени  $t$ ;  $\hat{X}_t$  – прогнозное значение предсказываемой величины на момент  $t$ ;  $\alpha$  – параметр сглаживания,  $0 < \alpha < 1$ .

Для учета трендовых и сезонных состав-

ляющих в модель вводятся соответствующие дополнительные параметры. В работе [29] используется трехпараметрическое экспоненциальное сглаживание (метод Хольта – Винтера) для оперативного прогнозирования солнечного излучения с временным горизонтом до 20 мин, который показал более высокую точность по сравнению с другими статистическими методами. В [30] разработан алгоритм выравнивания колебаний мощности ветроустановки на базе гибридной системы накопления энергии и краткосрочного прогнозирования с помощью модели нелинейного экспоненциального сглаживания.

Данный метод является достаточно робастным и часто может давать более высокий результат по сравнению с более сложными статистическими моделями (ARIMA, ARMAX и др.), которые в некоторых случаях могут оказаться слишком чувствительными и неустойчивыми.

**Модели машинного обучения**, или **адаптивные модели**, нашли свое применение в задачах прогнозирования потребления и генерации электроэнергии сравнительно недавно, но уже активно рассматриваются в научно-прикладных исследованиях и являются перспективным решением в вопросе управления энергосистемами с высокой долей ВИЭ [14]. Обучение в контексте данных моделей заключается в итерационном подборе параметров для аппроксимации зависимостей, описывающих какой-либо изменяющийся во времени процесс. Такой подход позволяет адаптивным моделям извлекать сложные нелинейные зависимости на длительных интервалах, за счет чего они, как правило, по сравнению с моделями на основе статистических подходов показывают более высокий результат при прогнозировании временных рядов на достаточно сильно удаленные от текущего момента промежутки времени. На данный момент существует большое разнообразие моделей на основе машинного обучения, в том числе нейронные сети и метод опорных векторов, которые будут рассмотрены в дальнейшем.

**Искусственные нейронные сети** (ИНС) приобрели широкое распространение в решении задач как краткосрочного прогнози-

рования генерации ВИЭ, так и средне- и долгосрочного. Правильный выбор архитектуры ИНС сильно зависит от условий конкретной задачи. Многослойные ИНС теоретически являются универсальными аппроксиматорами и обладают способностью восстанавливать любые нелинейные зависимости со сколь угодно высокой точностью. Однако для получения хорошей обобщающей способности модели – высокой точности на новых данных – необходимо ответственно подходить к выбору архитектуры и гиперпараметров ИНС.

Стандартной архитектурой ИНС является архитектура *прямого распространения* (от англ. Feedforward neural network). Такие ИНС в общем случае могут быть представлены в виде совокупности связанных между собой одного входного, нескольких скрытых и одного выходного слоев, состоящих из нейронов, каждый из которых является совокупностью вектора входных значений, вектора весов и функции активации.

При обучении ИНС на ее вход подается вектор входных значений  $[x_1, x_2, \dots, x_n]$  и соответствующая каждому входному параметру целевая переменная  $y$  либо вектор целевых переменных  $[y_1, y_2, \dots, y_m]$ . Выходное значение  $j$ -го нейрона  $Z_j$  определяется выражением:

$$Z_j = g\left(\sum_{i=1}^N w_{ij}x_i + b_j\right), \quad (6)$$

где  $g(\cdot)$  – нелинейная функция активации;  $N$  – количество нейронов в предыдущем слое;  $w_{ij}$  – весовые коэффициенты, связывающие нейроны текущего слоя с нейронами предыдущего слоя;  $x_i$  – входное значение ИНС либо выходное значение нейрона предыдущего слоя;  $b_j$  – свободный коэффициент слоя.

В работе [31] рассмотрено несколько различных методов обучения многослойного перцептрона для долгосрочного прогнозирования средней ежемесячной скорости ветра на основе данных по атмосферному давлению, температуре и влажности. В результате был сделан вывод, что с помощью нейронной сети можно достичь приемлемой точности прогнозирования даже в условиях ограниченного набора исходных данных: средняя

точность лучшей модели с интервалом в один год составила 95,2%.

В [32] предлагается модель ИНС для прогнозирования мощности ветроустановки с усовершенствованным алгоритмом обратного распространения ошибки, в котором вместо стандартной квадратичной функции потерь используется критерий максимальной коррентропии. Это позволило увеличить корреляцию между прогнозируемой и действительной мощностями, а главное – повысить точность прогнозирования.

В работе [33] приводится сравнение ИНС прямого распространения для почасового прогнозирования выработки солнечной электроэнергии на месяц вперед со статистическими моделями: множественной линейной регрессией и инерционной моделью. На вход модели подается 12 независимых переменных, характеризующих погодные условия в области: уровень солнечной радиации, атмосферное давление, облачность, количество осадков и др. Показано, что в рассмотренной задаче ИНС по точности прогнозирования превосходит другие модели.

Даже у простейших ИНС результат во многом зависит от правильного выбора гиперпараметров. В [34] предложен алгоритм подбора гиперпараметров модели прогнозирования скорости ветра на основе многослойного персептрона. Гиперпараметрами являются количество нейронов в скрытом слое, шаг и способ обучения, количество циклов обучения и функции активации. Для обучения модели используются только ретроспективные данные скорости ветра. Результаты показывают, что при оптимальном выборе гиперпараметров возможно значительно повысить точность прогнозирования даже при отсутствии других метеорологических данных, таких как направление ветра, температура, влажность и давление.

*Сверточные нейронные сети* (СНС) чаще всего применяются в обработке двух- и трехмерных массивов – изображений и распознавании образов, в связи с чем при их использовании особенно выражено проявляется необходимость в объемных наборах исходных данных и вычислительных ресурсах [14]. Модели прогнозирования, основанные

на СНС, используют сверточные слои для извлечения информации из входных данных, а задача регрессии – прогнозирование временного ряда – выполняется с помощью последнего полносвязного слоя, схожего с теми, которые используются в ИНС прямого распространения.

Способность СНС извлекать информацию из изображений также может применяться для прогнозирования погодных условий и генерации электроэнергии ВИЭ. Так, в [35] представлена система оперативного прогнозирования уровня солнечной радиации на 1 ч вперед, главной особенностью которой является использование в качестве входных данных только изображений неба, без каких-либо численных измерений и дополнительной информации. Разработанная модель по показателям превзошла другие модели машинного обучения: нормализованная среднеквадратическая ошибка составила 8,85%.

Другим направлением применения СНС является прогнозирование скорости ветра на основе пространственно-временной корреляции, позволяющей в любой момент времени моделировать поведение воздушных потоков на определенной территории в зависимости от влияния неровностей земной поверхности и геострофического ветра [36]. В специализированном источнике [36] авторы предлагают модель прогнозирования скорости ветра в пределах ветропарка, состоящего из 100 ветроустановок, расположенных в виде сетки 10x10. Скорости ветра у каждой ветроустановки представлены в виде такой же сетки, где каждая ячейка соответствует определенной ветроустановке; чем глубже цвет, тем выше скорость ветра. Такое представление данных позволило эффективно применить СНС в данной задаче. Прогнозирование скорости ветра выполнялось на временные горизонты от 5 до 60 мин, средняя ошибка прогнозирования предложенной модели изменялась, соответственно, от 4,4 до 9,3%, что является лучшим результатом среди сравниваемых моделей.

Самой распространенной современной моделью прогнозирования генерации электроэнергии ВИЭ являются *рекуррентные нейронные сети* (РНС), не считая гибридные

модели [37]. Популярность РНС в задаче прогнозирования объясняется тем, что их идея заключается в обработке последовательных данных, каждый элемент которых записан через определенный шаг по времени. Модель РНС имеет простую структуру, в которой выход рассматриваемого слоя суммируется со следующим вектором входных сигналов и снова подается на вход этого же слоя, который является, в сущности, единственным скрытым слоем всей сети. Кроме стандартной РНС, часто используются ее более сложные усовершенствованные варианты: с блоками долгой краткосрочной памяти LSTM (от англ. Long Short-Term Memory) и с управляемыми рекуррентными блоками GRU (от англ. Gated Recurrent Unit), способными моделировать временные ряды, в которых имеются неопределенные временные границы между наблюдениями, и отслеживать связи между событиями, достаточно сильно удаленными друг от друга во времени.

Благодаря тому, что РНС способны запоминать связи между элементами последовательных данных на длительных интервалах времени, они достаточно эффективно проявляют себя при построении почасовых прогнозов с достаточно большими (по сравнению со статистическими моделями) временными горизонтами – на 24 и более часов вперед. В работе [38] приведена модель нелинейной РНС с учетом внешних факторов для прогнозирования уровня солнечной радиации на сутки вперед. В качестве внешних факторов используются численные измерения климатических условий: температуры, скорости ветра и влажности.

В [39] описывается модель прогнозирования вырабатываемой ветропарком мощности с временными горизонтами от 1 до 24 ч вперед на базе РНС с блоками LSTM. Предложенная модель в качестве входных сигналов использует исторические данные генерации мощности и метеоданные, полученные с помощью численного прогноза погоды: температура, атмосферное давление, скорость и направление ветра на различных высотах. Результаты показали, что точность модели зависит от выбранного временного горизонта: при прогнозировании на 1 ч вперед сред-

няя ошибка прогноза составляет 3,01%, а при прогнозировании на 24 ч вперед – 7,65%.

В работе [40] авторы сравнивают оба ранее упомянутых варианта архитектуры РНС для оперативного прогнозирования скорости ветра: на базе блоков LSTM и GRU. В рассмотренной задаче модель на основе GRU имеет более высокую точность по сравнению с моделью LSTM, демонстрируя при этом меньшие требования к вычислительным ресурсам, меньшую длительность обучения и высокую устойчивость к шуму в исходных данных.

*Метод опорных векторов SVM* (от англ. Support Vector Machine) также имеет широкое распространение в задачах прогнозирования генерации ВИЭ [41]. Основная идея этого подхода заключается в нелинейном отображении входных данных в многомерное пространство для поиска такой гиперплоскости, лучше всего разделяющей исходные данные. В общем случае метод SVM характеризуется высокой устойчивостью, возможностью моделировать сложные нелинейные зависимости и хорошей обобщающей способностью.

В работе [42] авторами предлагается методика подбора оптимальных параметров SVM для краткосрочного прогнозирования мощности ветропарка на следующие 48 ч. Рассмотрено несколько вариантов SVM, ошибка лучшей модели составила 8,64%, при этом ошибка других сравниваемых моделей была значительно выше: например, для ИНС прямого распространения ошибка при тех же условиях составила 17,58%.

В [43] описан алгоритм извлечения информации из спутниковых изображений – вектора циркуляции атмосферы – для прогнозирования облачности и уровня солнечной радиации в рассматриваемом регионе, что, в свою очередь, используется для прогнозирования выработки солнечной электростанции. Основной моделью прогнозирования является SVM, для сравнения также рассмотрены ИНС и инерционная модель. В данном случае средняя ошибка прогноза SVM составила 7,73%, что является лучшим результатом среди сопоставляемых моделей.

Общая сравнительная характеристика рассмотренных методов приведена в таблице.

Сравнительная характеристика методов прогнозирования  
Comparative characteristics of forecasting methods

Класс методов прогнозирования	Преимущества	Недостатки
Физические методы	1) высокая эффективность для долгосрочного прогнозирования; 2) предоставляют подробную картину состояния атмосферы	1) неприменимы для краткосрочного прогнозирования из-за высокой вычислительной сложности; 2) высокая стоимость доступа к данным
Статистические методы	1) простота выбора и построения моделей; 2) низкие требования к вычислительным ресурсам; 3) подходят для прогнозов с малым временным горизонтом и для прогнозирования средних значений на длительных интервалах	1) резкое снижение точности при увеличении горизонта прогнозирования; 2) низкая эффективность при прогнозировании временных рядов со сложными нелинейными зависимостями
Методы машинного обучения	1) гибкость, модели могут быть настроены под любую задачу; 2) способны восстанавливать резко нелинейные зависимости; 3) широкий выбор способов оптимизации моделей	1) значительные требования к качеству и объему исходных данных; 2) высокая вычислительная сложность; 3) сложный процесс подбора архитектуры и гиперпараметров моделей

### **АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ В ОБЛАСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГЕНЕРАЦИИ МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ**

Как уже было отмечено, нейронные сети и другие модели на основе машинного обучения приобретают все большее распространение в решении прикладных задач прогнозирования, оптимизации и управления ЭЭС с высокой долей ВИЭ. Однако в силу своих особенностей разработка подобных моделей может сталкиваться с рядом проблем, которые способны препятствовать реализации моделей на практике и требуют отдельного внимания. Далее будут рассмотрены наиболее значимые из таких проблем.

**Обеспечение нужного объема данных.** Высокая точность прогнозирования при использовании методов машинного обучения достижима только при условии, что для обучения моделей доступны большие объемы качественных данных [44]. При этом нужны как текущие данные генерации ВИЭ и данные за прошлые периоды, так и данные широкого ряда метеорологических условий, используемых для построения прогнозов. Метеорологические данные собираются с помощью датчиков и спутниковых систем; оперативное и краткосрочное прогнозирование, как правило, должно выполняться автоматически в режиме реального времени, необходимо организовывать связь между системами сбора

метеоданных и системами прогнозирования. Здесь основная проблема чаще всего заключается в удаленности метеорологических вышек от электрических станций на базе ВИЭ [45]. Кроме того, все данные должны обрабатываться и приводиться к определенному виду для их успешного применения в моделях машинного обучения, и разработка методов обработки данных также требует времени и ресурсов.

**Неопределенность в данных.** Объединение систем сбора метеоданных и систем прогнозирования генерации электроэнергии на основе ВИЭ может быть замедлено из-за ряда технических проблем и ограничений. Воздействие помех или некачественное соединение ведет к искажению и потере данных при их передаче, что, в свою очередь, может привести к снижению точности прогноза и нарушению работы всей системы в целом [14]. Другими источниками неопределенности могут являться следующие: ошибки измерения погодных условий; присутствие физическим процессам изменчивость и стохастичность, влияющие на состояние прогнозируемой величины; погрешность, вызванная выбором параметров самой модели и данных для обучения [46].

**Высокая вычислительная сложность новых методов прогнозирования.** Современным интеллектуальным системам на основе машинного обучения не присуще свойство

эффективного использования вычислительных ресурсов, особенно при использовании большого объема данных высокой размерности [47]. Основной причиной высоких вычислительных затрат являются лишние функциональные возможности и обработка повторяющихся избыточных данных. В связи с этим внедрение новых моделей на базе машинного обучения в существующие системы может быть не оправдано экономически, несмотря на их высокие результаты в лабораторных условиях.

Для преодоления ранее упомянутых проблем многие авторы предлагают различные подходы к обработке данных, оценке неопределенности и оптимизации предлагаемых моделей прогнозирования. В этом разделе приведены наиболее распространенные в исследованиях методики, позволяющие повышать потенциал и эффективность моделей машинного обучения при решении задач прогнозирования генерации электроэнергии на основе ВИЭ.

*Предварительная обработка данных.* Предварительная обработка данных является необходимым шагом при построении моделей на базе машинного обучения, поскольку это позволяет подготовить данные к анализу и привести к виду, соответствующему требованиям решаемой задачи. Методы предварительной обработки данных чрезвычайно разнообразны и включают в себя:

- нормализацию данных;
- определение аномалий и восстановление пропущенных значений;
- аугментацию и кластеризацию данных;
- корреляционный анализ для отбора наиболее важных данных и др. [37].

Нормализация данных – основная операция при работе с численными данными, значения которых изменяются в больших диапазонах и отличаются между собой на порядки. Работа с такими необработанными, «сырыми» данными может нарушать устойчивость модели, замедлять процесс обучения и приводить к непредсказуемым результатам. Нормализация позволяет привести все числовые значения в данных к одному диапазону, например, от 0 до 1 [48].

В наборах используемых данных часто

встречаются пропущенные и лишние информационного смысла значения, появившиеся в результате неправильной работы программного обеспечения, сбоя или износа средств измерений [49]. Пропущенные значения могут заменяться значениями за прошлые ближайшие моменты времени, средними значениями за весь рассматриваемый временной промежуток или с применением методов интерполяции [50, 51]. Определение и устранение значений, не имеющих смысла, также необходимо для построения адекватной модели: ночные часы при прогнозировании выработки солнечной электростанции или период планово-предупредительного ремонта ветроустановок.

Аугментация и кластеризация данных также дают возможность существенно повысить эффективность разрабатываемых систем прогнозирования. Аугментация – это процесс искусственного увеличения объема данных при помощи модификации и комбинации имеющихся данных: геометрические преобразования, легкое зашумление, корректировка цвета и яркости. Такой прием часто используется в случаях, когда рассматриваемыми исходными данными являются наборы изображений, например, изображений неба для краткосрочного прогнозирования генерации электроэнергии солнечными батареями [52]. Кластеризация (группировка) данных используется в основном для разделения набора данных по дням и сезонам, схожих по погодным характеристикам. Это позволяет построить вместо одной модели для всех режимов несколько разных моделей для каждого кластера. Дни со схожими погодными характеристиками, как правило, имеют схожие профили мощности ВИЭ. Что можно использовать для построения разных моделей прогнозирования, каждая из которых настроена под работу в одной из групп погодных условий, и при соответствующем корректном использовании будет выдавать более точные результаты, чем одна общая модель [53].

Корреляционный анализ является одним из способов отбора наиболее значимых входных данных для обучения моделей. Использование избыточных данных часто ведет

как к лишнему усложнению модели прогнозирования, так и к снижению ее точности. В [54] представлен расчет коэффициента корреляции Пирсона между выработкой солнечной электростанции и различными метеорологическими факторами. Это позволило выделить наиболее значимые данные для прогноза выработки электроэнергии – уровень солнечной радиации, температуру и влажность, и на основе этих данных была построена модель прогнозирования.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Интеграция ВИЭ в современные ЭЭС требует преодоления ряда проблем, связанных с решением задач по снижению влияния изменчивых и стохастических природных процессов, от которых напрямую зависит выработка электроэнергии на базе ВИЭ и устойчивость ЭЭС. Подобные задачи должны решаться как в условиях оперативно-диспетчерского управления, так и в рамках проектирования ЭЭС с высокой долей ВИЭ.

Для повышения надежности электроснабжения и эффективного управления энергосистемой необходимо точное прогнозирование генерации электроэнергии на основе ВИЭ. Методы прогнозирования чрезвычайно разнообразны и в зависимости от специфики решаемой задачи могут применяться в раз-

личных областях. В современных исследованиях большое внимание уделено разработке систем прогнозирования на основе методов машинного обучения, показывающих высокие результаты для всех видов прогнозирования и особенно для краткосрочного прогнозирования генерации, необходимого для обеспечения стабильного функционирования электроэнергетического рынка.

Однако следует принимать во внимание сложности, возникающие при использовании моделей на базе машинного обучения в практических условиях, заключающихся преимущественно в высоких требованиях таких моделей к вычислительным ресурсам и в поиске необходимого объема качественных данных для обучения. Преодоление перечисленных проблем может быть возможно за счет разработки методов предварительной обработки данных, направленных на оптимизацию и общее повышение эффективности моделей машинного обучения.

Таким образом, учет перечисленных обстоятельств совместно с исследованиями и разработками в указанных направлениях помогут в успешной реализации проектов по интеграции ВИЭ в ЭЭС для развития направления безуглеродной энергетики и реализации программ ДПМ ВИЭ.

## **Список источников**

1. Илюшин П.В. Интеграция электростанций на основе возобновляемых источников энергии в Единую энергетическую систему России: обзор проблемных вопросов и подходов к их решению // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. 2022. № 4. С. 98–107. <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2022-4-98-107>.
2. Kolosok S., Bilan Yu., Vasylieva T., Wojciechowski A., Morawski M. A scoping review of renewable energy, sustainability and the environment // *Energies*. 2021. Vol. 14. Iss. 15. P. 4490. <https://doi.org/10.3390/en14154490>.
3. Qazi A., Hussain F., Rahim N. A., Hardaker G., Alghazzawi D., Shaban K., et al. Towards sustainable energy: a systematic review of renewable energy sources, technologies, and public opinions // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 63837–63851. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2906402>.
4. Sinsel S.R., Riemke R.L., Hoffmann V.H. Challenges and solution technologies for the integration of variable renewable energy sources—a review // *Renewable Energy*. 2020. Vol. 145. P. 2271–2285. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.147>.
5. Yang Yuqing, Bremner Stephen, Menictas Chris, Kay Merlinde. Battery energy storage system size determination in renewable energy systems: a review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 91. P. 109–125. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.047>.
6. Wan Can, Zhao Jian, Song Yonghua, Xu Zhao, Lin Jin, Hu Zechun. Photovoltaic and solar power forecasting for smart grid energy management // *CSEE Journal of Power and Energy Systems*. 2015. Vol. 1. Iss. 4. P. 38–46. <https://doi.org/10.17775/CSEEPES.2015.00046>.
7. Santhosh M., Venkaiah C., Kumar D.M.V. Current advances and approaches in wind speed and wind power forecasting for improved renewable energy integration: a review // *Engineering Reports*. 2020. Vol. 2. Iss. 6. P. e12178. <https://doi.org/10.1002/eng2.12178>.
8. Azad H.B., Mekhilef S., Ganapathy V.G. Long-term wind speed forecasting and general pattern recognition using neural networks // *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2014. Vol. 5. Iss. 2. P. 546–553.

<https://doi.org/10.1109/TSTE.2014.2300150>.

9. Ahmed R., Sreeram V., Mishra Y., Arif M.D. A review and evaluation of the state-of-the-art in PV solar power forecasting: techniques and optimization // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020. Vol. 124. P. 109792. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109792>.
10. Mehmood F., Ghani M.U., Asim M.N., Shahzadi R., Mehmood A., Mahmood W. MPF-Net: a computational multi-regional solar power forecasting framework // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 151. P. 111559. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111559>.
11. Wang Xiaochen, Guo Peng, Huang Xiaobin. A review of wind power forecasting models // *Energy Procedia*. 2011. Vol. 12. P. 770–778. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.10.103>.
12. Varanasi J., Tripathi M.M. A comparative study of wind power forecasting techniques – A review article // 3rd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (New Delhi, 16–18 March 2016). New Delhi: IEEE, 2016. P. 3649–3655.
13. Sweeney C., Bessa R.J., Browell J., Pinson P. The future of forecasting for renewable energy // *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*. 2020. Vol. 9. Iss. 2. P. e365. <https://doi.org/10.1002/wene.365>.
14. Aslam S., Herodotou H., Mohsin S.M. Javaid N. Ashraf N., Aslam S. A survey on deep learning methods for power load and renewable energy forecasting in smart microgrids // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 144. P. 110992. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110992>.
15. Hanifi S., Liu Xiaolei, Lin Zi, Lotfian S. A critical review of wind power forecasting methods—past, present and future // *Energies*. 2020. Vol. 13. Iss. 15. P. 3764. <https://doi.org/10.3390/en13153764>.
16. Voyant C., Notton G., Kalogirou S., Nivet M.-L., Paoli C., Motte F., et al. Machine learning methods for solar radiation forecasting: a review // *Renewable Energy*. 2017. Vol. 105. P. 569–582. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.095>.
17. Zhou Kaile, Fu Chao, Yang Shanlin. Big data driven smart energy management: from big data to big insights // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 56. P. 215–225. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.050>.
18. Yeom Jong-Min, Deo R.C., Adamowski J.F., Chae Taebyeong, Kim Dong-Su, Han Kyung-Soo, et al. Exploring solar and wind energy resources in North Korea with COMS MI geostationary satellite data coupled with numerical weather prediction reanalysis variables // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020. Vol. 119. P. 109570. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109570>.
19. Schultz M.G., Betancourt C., Gong B., Kleinert F., Langguth M., Leufen L.H. et al. Can deep learning beat numerical weather prediction? // *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2021. Vol. 379. Iss. 2194. P. 20200097. <https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0097>.
20. Andrade J.R., Bessa R.J. Improving renewable energy forecasting with a grid of numerical weather predictions // *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2017. Vol. 8. Iss. 4. P. 1571–1580. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2017.2694340>.
21. Aguiar L.M., Pereira B., Lauret P., Díaz F., David M. Combining solar irradiance measurements, satellite-derived data and a numerical weather prediction model to improve intra-day solar forecasting // *Renewable Energy*. 2016. Vol. 97. P. 599–610. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.06.018>.
22. Dutta S., Li Yanling, Venkataraman A., Costa L.M., Jiang Tianxiang, Plana R. et al. Load and renewable energy forecasting for a microgrid using persistence technique // *Energy Procedia*. 2017. Vol. 143. P. 617–622. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.736>.
23. Wang Jingmin, Zhou Qingwei, Zhang Xueting. Wind power forecasting based on time series ARMA model // *Earth and Environmental Science: IOP Conference series*. 2018. Vol. 199. Iss. 2. P. 022015. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/199/2/022015>.
24. Singh B., Pozo D. A guide to solar power forecasting using ARMA models // *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe ISGT-Europe*. 2019. <https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2019.8905430>.
25. Cadenas E., Rivera W., Campos-Amezcuea R., Heard C. Wind speed prediction using a univariate ARIMA model and a multivariate NARX model // *Energies*. 2016. Vol. 9. Iss. 2. P. 109. <https://doi.org/10.3390/en9020109>.
26. Grigonytė E., Butkevičiūtė E. Short-term wind speed forecasting using ARIMA model // *Energetika*. 2016. Vol. 62. Iss. 1-2. P. 3313. <https://doi.org/10.6001/energetika.v62i1-2.3313>.
27. Robles-Rodriguez C.E., Dochain D. Decomposed Threshold ARMAX Models for short-to medium-term wind power forecasting // *IFAC-PapersOnLine*. 2018. Vol. 51. Iss. 13. P. 49–54. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.07.253>.
28. Li Yanting, Su Yan, Shu Lianjie. An ARMAX model for forecasting the power output of a grid connected photovoltaic system // *Renewable Energy*. 2014. Vol. 66. P. 78–89. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.11.067>.
29. Dev S., AlSkaif T., Hossari M., Godina R., Louwen A., Sark W. Solar irradiance forecasting using triple exponential smoothing // *International Conference on Smart Energy Systems and Technologies SEST*. 2018. <https://doi.org/10.1109/SEST.2018.8495816>.
30. Zheng Xidong, Jin Tao. A reliable method of wind power fluctuation smoothing strategy based on multidimensional non-linear exponential smoothing short-term forecasting // *IET Renewable Power Generation*. 2022. Vol. 16. Iss. 16. P. 3573–3586. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12395>.
31. Bulut M., Hakan T., Buایشa M. Comparison of three different learning methods of multilayer Perceptron neural network for wind speed forecasting // *Gazi University Journal of Science*. 2021. Vol. 34. Iss. 2. P. 439–454. <https://doi.org/10.35378/gujs.764533>.

32. Wang Zheng, Wang Bo, Liu Chun, Wang Wei-sheng. Improved BP neural network algorithm to wind power forecast // The Journal of Engineering. 2017. Vol. 2017. Iss. 13. P. 940–943. <https://doi.org/10.1049/joe.2017.0469>.
33. Abuella M., Chowdhury B. Solar power forecasting using artificial neural networks // North American Power Symposium NAPS. 2015. <https://doi.org/10.1109/NAPS.2015.7335176>.
34. Manusov V., Matrenin P., Nazarov M., Beryozkina S., Safaraliev M., Zicmane I., et al. Short-term prediction of the wind speed based on a learning process control algorithm in isolated power systems // Sustainability. 2023. Vol. 15. Iss. 2. P. 1730. <https://doi.org/10.3390/su15021730>.
35. Feng Cong, Zhang Jie. SolarNet: a sky image-based deep convolutional neural network for intra-hour solar forecasting // Solar Energy. 2020. Vol. 204. P. 71–78. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.03.083>.
36. Zhu Qiaomu, Chen Jinfu, Zhu Lin, Duan Xianzhong, Liu Yilu, et al. Wind speed prediction with spatio-temporal correlation: a deep learning approach // Energies. 2018. Vol. 11. Iss. 4. P. 705. <https://doi.org/10.3390/en11040705>.
37. Alkhayat G., Mehmood R. A review and taxonomy of wind and solar energy forecasting methods based on deep learning // Energy and AI. 2021. Vol. 4. P. 100060. <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2021.100060>.
38. Al-Sbou Y.A., Alawasa K.M. Nonlinear autoregressive recurrent neural network model for solar radiation prediction // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Vol. 12. Iss. 14. P. 4518–4527.
39. Cali U., Sharma V. Short-term wind power forecasting using long-short term memory based recurrent neural network model and variable selection // International Journal of Smart Grid and Clean Energy. 2019. Vol. 8. Iss. 2. P. 103–110. <http://doi.org/10.12720/sgce.8.2.103-110>.
40. Kisvari A., Lin Zi, Liu Xiaolei. Wind power forecasting – a data-driven method along with gated recurrent neural network // Renewable Energy. 2021. Vol. 163. P. 1895–1909. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.119>.
41. Zendejboudi A., Baseer M.A., Saidur R. Application of support vector machine models for forecasting solar and wind energy resources: a review // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 199. P. 272–285. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.164>.
42. Li Ling-Ling, Zhao Xue, Tseng Ming-Lang, Tan Raymond R. Short-term wind power forecasting based on support vector machine with improved dragonfly algorithm // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 242. P. 118447. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118447>.
43. Jang Han Seung, Bae Kuk Yeol, Park Hong-Shik, Sung Dan Keun. Solar power prediction based on satellite images and support vector machine // IEEE Transactions on Sustainable Energy. 2016. Vol. 7. Iss. 3. P. 1255–1263. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2016.2535466>.
44. Zhou Kaile, Fu Chao, Yang Shanlin. Big data driven smart energy management: from big data to big insights // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 56. P. 215–225. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.050>.
45. Matrenin P.V., Atabaeva L.S., Sergeev N.N. Limitations and perspectives of short-term renewable energy generation forecasting methods // IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences SIBIRCON. 2022. <https://doi.org/10.1109/SIBIRCON56155.2022.10017051>.
46. Al-Dahidi S., Ayadi O., Alrbai M., Adeeb J. Ensemble approach of optimized artificial neural networks for solar photovoltaic power prediction // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 81741–81758. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2923905>.
47. Al-Jarrah O.Y., Yoo P.D., Muhaidat S., Karagiannidis G.K., Taha K. Efficient machine learning for big data: a review // Big Data Research. 2015. Vol. 2. Iss. 3. P. 87–93. <https://doi.org/10.1016/j.bdr.2015.04.001>.
48. Suresh V., Janik P., Rezmier J., Leonowicz Z. Forecasting solar PV output using convolutional neural networks with a sliding window algorithm // Energies. 2020. Vol. 13. Iss. 3. P. 723. <https://doi.org/10.3390/en13030723>.
49. Ziegler L., Gonzalez E., Rubert T., Smolka U., Melero J.J. Lifetime extension of onshore wind turbines: a review covering Germany, Spain, Denmark, and the UK // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 82. Part 1. P. 1261–1271. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.100>.
50. Kim Taeyoung, Ko Woong, Kim Jinho. Analysis and impact evaluation of missing data imputation in day-ahead PV generation forecasting // Applied Sciences. 2019. Vol. 9. Iss. 1. P. 204. <https://doi.org/10.3390/app9010204>.
51. Yen Chih-Feng, Hsieh He-Yen, Su Kuan-Wu, Yu Min-Chieh, Leu Jenq-Shiou. Solar power prediction via support vector machine and random forest // International Conference Green Energy and Smart Grids: E3S Web of Conferences. 2018. Vol. 69. P. 01004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186901004>.
52. Nie Yuhao, Zamzam A.S., Brandt A. Resampling and data augmentation for short-term PV output prediction based on an imbalanced sky images dataset using convolutional neural networks // Solar Energy. 2021. Vol. 224. P. 341–354. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.05.095>.
53. Wang Zheng, Koprinska I., Rana M. Clustering based methods for solar power forecasting // International Joint Conference on Neural Networks IJCNN (Vancouver, 24–29 July 2016). Vancouver: IEEE, 2016. P. 1487–1494. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2016.7727374>.
54. Chen Hailang, Chang Xianfa. Photovoltaic power prediction of LSTM model based on Pearson feature selection // Energy Reports. 2021. Vol. 7. P. 1047–1054. <https://doi.org/10.1016/j.egypr.2021.09.167>.

## References

1. Ilyushin P.V. Integration of RES-based power plants into the unified energy system of Russia: problematic issues and approaches to solving them. *Vestnik Moskovskogo ehnergeticheskogo institute = Bulletin of Moscow Power Engineering Institute*. 2022;4:98-107. <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2022-4-98-107>.
2. Kolosok S., Bilan Yu., Vasylieva T., Wojciechowski A., Morawski M. A scoping review of renewable energy, sustainability and the environment. *Energies*. 2021;14(15):4490. <https://doi.org/10.3390/en14154490>.
3. Qazi A., Hussain F., Rahim N. A., Hardaker G., Alghazzawi D., Shaban K., et al. Towards sustainable energy: a systematic review of renewable energy sources, technologies, and public opinions. *IEEE Access*. 2019;7:63837-63851. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2906402>.
4. Sinsel S.R., Riemke R.L., Hoffmann V.H. Challenges and solution technologies for the integration of variable renewable energy sources – a review. *Renewable Energy*. 2020;145:2271-2285. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.147>.
5. Yang Yuqing, Bremner Stephen, Menictas Chris, Kay Merlinde. Battery energy storage system size de-termination in renewable energy systems: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018;91:109-125. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.047>.
6. Wan Can, Zhao Jian, Song Yonghua, Xu Zhao, Lin Jin, Hu Zechun. Photovoltaic and solar power forecasting for smart grid energy management. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*. 2015;1(4):38-46. <https://doi.org/10.17775/CSEJEPES.2015.00046>.
7. Santhosh M., Venkaiah C., Kumar D.M.V. Current advances and approaches in wind speed and wind power forecasting for improved renewable energy integration: a review. *Engineering Reports*. 2020;2(6):e12178. <https://doi.org/10.1002/eng2.12178>.
8. Azad H.B., Mekhilef S., Ganapathy V.G. Long-term wind speed forecasting and general pattern recognition using neural networks. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2014;5(2):546-553. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2014.2300150>.
9. Ahmed R., Sreeram V., Mishra Y., Arif M.D. A review and evaluation of the state-of-the-art in PV solar power forecasting: techniques and optimization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020;124:109792. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109792>.
10. Mehmood F., Ghani M.U., Asim M.N., Shahzadi R., Mehmood A., Mahmood W. MPF-Net: a computational multi-regional solar power forecasting framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021;151:111559. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111559>.
11. Wang Xiaochen, Guo Peng, Huang Xiaobin. A review of wind power forecasting models. *Energy Procedia*. 2011;12:770-778. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.10.103>.
12. Varanasi J., Tripathi M.M. A comparative study of wind power forecasting techniques – A review article. In: *3rd International Conference on Computing for Sustainable Global Development*. 16–18 March 2016, New Delhi. New Delhi: IEEE; 2016, p. 3649-3655.
13. Sweeney C., Bessa R.J., Browell J., Pinson P. The future of forecasting for renewable energy. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*. 2020;9(2):e365. <https://doi.org/10.1002/wene.365>.
14. Aslam S., Herodotou H., Mohsin S.M., Javaid N., Ashraf N., Aslam S. A survey on deep learning methods for power load and renewable energy forecasting in smart microgrids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021;144:110992. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110992>.
15. Hanifi S., Liu Xiaolei, Lin Zi, Lotfian S. A critical review of wind power forecasting methods—past, present and future. *Energies*. 2020;13(15):3764. <https://doi.org/10.3390/en13153764>.
16. Voyant C., Notton G., Kalogirou S., Nivet M.-L., Paoli C., Motte F., et al. Machine learning methods for solar radiation forecasting: a review. *Renewable Energy*. 2017;105:569-582. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.095>.
17. Zhou Kaile, Fu Chao, Yang Shanlin. Big data driven smart energy management: from big data to big insights. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016;56:215-225. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.050>.
18. Yeom Jong-Min, Deo R.C., Adamowski J.F., Chae Taebyeong, Kim Dong-Su, Han Kyung-Soo, et al. Exploring solar and wind energy resources in North Korea with COMS MI geostationary satellite data coupled with numerical weather prediction reanalysis variables. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020;119:109570. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109570>.
19. Schultz M.G., Betancourt C., Gong B., Kleinert F., Langguth M., Leufen L.H. et al. Can deep learning beat numerical weather prediction? *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2021;379(2194):20200097. <https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0097>.
20. Andrade J.R., Bessa R.J. Improving renewable energy forecasting with a grid of numerical weather pre-dictions. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2017;8(4):1571-1580. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2017.2694340>.
21. Aguiar L.M., Pereira B., Lauret P., Díaz F., David M. Combining solar irradiance measurements, satellite-derived data and a numerical weather prediction model to improve intra-day solar forecasting. *Renewable Energy*. 2016;97:599-610. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.06.018>.
22. Dutta S., Li Yanling, Venkataraman A., Costa L.M., Jiang Tianxiang, Plana R. et al. Load and renewable energy forecasting for a microgrid using persistence technique. *Energy Procedia*. 2017;143:617-622. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.736>.
23. Wang Jingmin, Zhou Qingwei, Zhang Xueting. Wind power forecasting based on time series ARMA model.

- In: *Earth and Environmental Science: IOP Conference series*. 2018;199(2):022015. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/199/2/022015>.
24. Singh B., Pozo D. A guide to solar power forecasting using ARMA models. In: *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe ISGT-Europe*. 2019. <https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2019.8905430>.
25. Cadenas E., Rivera W., Campos-Amezcuca R., Heard C. Wind speed prediction using a univariate ARIMA model and a multivariate NARX model. *Energies*. 2016;9(2):109. <https://doi.org/10.3390/en9020109>.
26. Grigonytė E., Butkeviciūtė E. Short-term wind speed forecasting using ARIMA model. *Energetika*. 2016;62(1-2):3313. <https://doi.org/10.6001/energetika.v62i1-2.3313>.
27. Robles-Rodriguez C.E., Dochain D. Decomposed Threshold ARMAX Models for short-to medium-term wind power forecasting. *IFAC-PapersOnLine*. 2018;51(13):49-54. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.07.253>.
28. Li Yanting, Su Yan, Shu Lianjie. An ARMAX model for forecasting the power output of a grid connected photovoltaic system. *Renewable Energy*. 2014;66:78-89. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.11.067>.
29. Dev S., AISkaif T., Hossari M., Godina R., Louwen A., Sark W. Solar irradiance forecasting using triple exponential smoothing. In: *International Conference on Smart Energy Systems and Technologies SEST*. 2018. <https://doi.org/10.1109/SEST.2018.8495816>.
30. Zheng Xidong, Jin Tao. A reliable method of wind power fluctuation smoothing strategy based on multi-dimensional non-linear exponential smoothing short-term forecasting. *IET Renewable Power Generation*. 2022;16(16):3573-3586. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12395>.
31. Bulut M., Hakan T., Buaisha M. Comparison of three different learning methods of multilayer Perceptron neural network for wind speed forecasting. *Gazi University Journal of Science*. 2021;34(2):439-454. <https://doi.org/10.35378/gujs.764533>.
32. Wang Zheng, Wang Bo, Liu Chun, Wang Wei-sheng. Improved BP neural network algorithm to wind power forecast. *The Journal of Engineering*. 2017;2017(13):940-943. <https://doi.org/10.1049/joe.2017.0469>.
33. Abuella M., Chowdhury B. Solar power forecasting using artificial neural networks. In: *North American Power Symposium NAPS*. 2015. <https://doi.org/10.1109/NAPS.2015.7335176>.
34. Manusov V., Matrenin P., Nazarov M., Beryozkina S., Safaraliev M., Zicmane I., et al. Short-term prediction of the wind speed based on a learning process control algorithm in isolated power systems. *Sustainability*. 2023;15(2):1730. <https://doi.org/10.3390/su15021730>.
35. Feng Cong, Zhang Jie. SolarNet: a sky image-based deep convolutional neural network for intra-hour solar forecasting. *Solar Energy*. 2020;204:71-78. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.03.083>.
36. Zhu Qiaomu, Chen Jinfu, Zhu Lin, Duan Xianzhong, Liu Yilu, et al. Wind speed prediction with spatio-temporal correlation: a deep learning approach. *Energies*. 2018;11(4):705. <https://doi.org/10.3390/en11040705>.
37. Alkhayat G., Mehmood R. A review and taxonomy of wind and solar energy forecasting methods based on deep learning. *Energy and AI*. 2021;4:100060. <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2021.100060>.
38. Al-Sbou Y.A., Alawasa K.M. Nonlinear autoregressive recurrent neural network model for solar radiation prediction. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017;12(14):4518-4527.
39. Cali U., Sharma V. Short-term wind power forecasting using long-short term memory based recurrent neural network model and variable selection. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*. 2019;8(2):103-110. <http://doi.org/10.12720/sgce.8.2.103-110>.
40. Kisvari A., Lin Zi, Liu Xiaolei. Wind power forecasting – a data-driven method along with gated recurrent neural network. *Renewable Energy*. 2021;163:1895-1909. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.119>.
41. Zendejboudi A., Baseer M.A., Saidur R. Application of support vector machine models for forecasting solar and wind energy resources: a review. *Journal of Cleaner Production*. 2018;199:272-285. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.164>.
42. Li Ling-Ling, Zhao Xue, Tseng Ming-Lang, Tan Raymond R. Short-term wind power forecasting based on support vector machine with improved dragonfly algorithm. *Journal of Cleaner Production*. 2020;242:118447. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118447>.
43. Jang Han Seung, Bae Kuk Yeol, Park Hong-Shik, Sung Dan Keun. Solar power prediction based on sat-ellite images and support vector machine. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2016;7(3):1255-1263. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2016.2535466>.
44. Zhou Kaile, Fu Chao, Yang Shanlin. Big data driven smart energy management: from big data to big insights. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016;56:215-225. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.050>.
45. Matrenin P.V., Atabaeva L.S., Sergeev N.N. Limitations and perspectives of short-term renewable energy generation forecasting methods. In: *IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences SIBIRCON*. 2022. <https://doi.org/10.1109/SIBIRCON56155.2022.10017051>.
46. Al-Dahidi S., Ayadi O., Alrbai M., Adeeb J. Ensemble approach of optimized artificial neural networks for solar photovoltaic power prediction. *IEEE Access*. 2019;7:81741-81758. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2923905>.
47. Al-Jarrah O.Y., Yoo P.D., Muhaidat S., Karagiannidis G.K., Taha K. Efficient machine learning for big data: a review. *Big Data Research*. 2015;2(3):87-93. <https://doi.org/10.1016/j.bdr.2015.04.001>.
48. Suresh V., Janik P., Rezmer J., Leonowicz Z. Forecasting solar PV output using convolutional neural networks with a

sliding window algorithm. *Energies*. 2020;13(3):723. <https://doi.org/10.3390/en13030723>.

49. Ziegler L., Gonzalez E., Rubert T., Smolka U., Melero J.J. Lifetime extension of onshore wind turbines: a review covering Germany, Spain, Denmark, and the UK. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018;82(1):1261-1271. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.100>.

50. Kim Taeyoung, Ko Woong, Kim Jinho. Analysis and impact evaluation of missing data imputation in day-ahead PV generation forecasting. *Applied Sciences*. 2019;9(1):204. <https://doi.org/10.3390/app9010204>.

51. Yen Chih-Feng, Hsieh He-Yen, Su Kuan-Wu, Yu Min-Chieh, Leu Jenq-Shiou. Solar power prediction via support vector machine and random forest. In: *International Conference Green Energy and Smart Grids: E3S Web of Conferences*. 2018;69:01004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186901004>.

52. Nie Yuhao, Zamzam A.S., Brandt A. Resampling and data augmentation for short-term PV output prediction based on an imbalanced sky images dataset using convolutional neural networks. *Solar Energy*. 2021;224:341-354. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.05.095>.

53. Wang Zheng, Koprinska I., Rana M. Clustering based methods for solar power forecasting. In: *International Joint Conference on Neural Networks IJCNN*. 24–29 July 2016, Vancouver. Vancouver: IEEE; 2016, p. 1487-1494. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2016.7727374>.

54. Chen Hailang, Chang Xianfa. Photovoltaic power prediction of LSTM model based on Pearson feature selection. *Energy Reports*. 2021;7:1047-1054. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.09.167>.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

#### Сергеев Никита Николаевич,

лаборант  
межкафедральной Научно-исследовательской  
лаборатории обработки, анализа и представления  
данных в электроэнергетических системах,  
Новосибирский государственный технический  
университет,  
630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20, Россия  
✉ [veegresatikin3102@gmail.com](mailto:veegresatikin3102@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0003-1534-9072>

#### Матренин Павел Викторович,

к.т.н.,  
с.н.с. межкафедральной Научно-исследовательской  
лаборатории обработки, анализа и представления  
данных в электроэнергетических системах,  
Новосибирский государственный технический  
университет,  
630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20, Россия  
[matrenin.2012@corp.nstu.ru](mailto:matrenin.2012@corp.nstu.ru)  
<https://orcid.org/0000-0001-5704-0976>

### 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 31.03.2023; одобрена после рецензирования 03.03.2023; принята к публикации 28.04.2023.

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

#### Nikita N. Sergeev,

Laboratory Assistant of the  
Interdepartmental Research Laboratory  
for Processing, Analysis and Presentation of Data in  
Power Systems,  
Novosibirsk State Technical University,  
20, K. Marks pr., Novosibirsk 630073, Russia  
✉ [veegresatikin3102@gmail.com](mailto:veegresatikin3102@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0003-1534-9072>

#### Pavel V. Matrenin,

Cand. Sci. (Eng.),  
Senior Researcher of the  
Interdepartmental Research Laboratory  
for Processing, Analysis and Presentation of Data in  
Power Systems,  
Novosibirsk State Technical University,  
20, K. Marks pr., Novosibirsk 630073, Russia  
[matrenin.2012@corp.nstu.ru](mailto:matrenin.2012@corp.nstu.ru)  
<https://orcid.org/0000-0001-5704-0976>

### 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 31.03.2023; approved after reviewing 03.03.2023; accepted for publication 28.04.2023.



Научная статья

УДК 621.314.26:621.316.91:621.311.1

<https://elibrary.ru/lthugj><https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-370-379>

## Исследование коммутационных перенапряжений в электрических сетях до 1000 В

К.В. Тихонов<sup>1✉</sup><sup>1</sup>ООО Научно-производственное предприятие «РУТАС», г. Красноярск, Россия<sup>1</sup>Национальный исследовательский технологический университет МИСиС, г. Москва, Россия

**Резюме.** Цель – изучение влияния режимов коммутации от мощности силовых трансформаторов в электрических сетях до 1000 В на кратность коммутационных перенапряжений с разработкой рекомендаций по их снижению. Исследования перенапряжений проводились при коммутации силовых трансформаторов в сетях до 1000 В. Для изучения перенапряжений, возникающих при коммутации силовых трансформаторов, использовались вакуумные контакторы. В ходе исследования применялся инструментальный метод измерения: для фиксации перенапряжений были задействованы активный делитель РДН-1000 и цифровой осциллограф Tektronix TDS2024B. Емкость RC-цепи измерялась с помощью цифрового LC-метра Mastech MY6243. Для ограничения коммутационных перенапряжений в разработанном методе применялись RC-гасители на базе RC-цепей, которые позволяют не только ограничивать амплитуду коммутационного импульса, но и снижать скорость нарастания напряжения коммутационного импульса. Кроме этого, у RC-гасителей отсутствуют зоны замиранья при возникновении высокочастотных коммутационных импульсов. Были выполнены измерения емкости первичной обмотки исследуемых трансформаторов. Анализ кратности перенапряжений показывает, что при увеличении мощности трансформатора кратность коммутационных перенапряжений снижается при его отключении от сети. С увеличением мощности трансформатора в 1,5 раза индуктивность трансформатора снижается, а, следовательно, снижается и волновое сопротивление трансформатора. Исходя из этого, при подключении одной и той же емкости к зажимам трансформатора у более мощных трансформаторов снижение волнового сопротивления будет происходить в большей степени (от 3 до 6 раз), что приведет к более эффективному ограничению перенапряжения. Проведенные экспериментальные исследования показали эффективность использования RC-цепей для ограничения коммутационных перенапряжений.

**Ключевые слова:** трансформаторы, номинальное напряжение до 1000 В, коммутационные перенапряжения, вакуумные контакторы, RC-гасители

**Для цитирования:** Тихонов К.В. Исследование коммутационных перенапряжений в электрических сетях до 1000 В // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 2. С. 370–379. EDN: LTHUGJ, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-370-379>.

### POWER ENGINEERING

Original article

## Study of switching overvoltages in electrical networks up to 1000 V

Kirill V. Tikhonov<sup>1✉</sup><sup>1</sup>Research and Production Enterprise RUTAS LLC, Krasnoyarsk, Russia<sup>1</sup>National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia

**Abstract.** The aim was to study the effect of switching modes on the power of supply transformers in electrical networks up to 1000 V on the multiplicity of switching overvoltages, as well as to develop recommendations for their reduction. The study was carried out during switching of supply transformers in networks up to 1000 V. Vacuum contactors were used to study overvoltages arising during switching of supply transformers. Overvoltages were recorded using an RDN-1000 active divider and a Tektronix TDS2024B digital oscilloscope. The RC circuit capacitance was measured by a Mastech MY6243 digital LC-meter. To limit switching overvoltages, RC quenchers based on RC circuits were used, re-

ducing not only the switching pulse amplitude, but also the rate of the switching pulse voltage rise. In addition, RC quenchers lack fading zones under high-frequency switching pulses. The capacitance of the primary winding of the transformers under study was measured. An increase in the transformer power was found to lead to a decrease in the multiplicity of switching overvoltages, when the transformer is disconnected from the mains. Under a 1.5-fold increase in the power of the transformer, its inductance and wave impedance decreases. As a result, when the same capacitance is connected to the transformer terminals, the wave resistance in more powerful transformers will be reduced to a larger extent (by 3 to 6 times), thus providing a more effective overvoltage limitation. The conducted experimental studies confirmed the effectiveness of RC circuits in limiting switching overvoltages.

**Keywords:** transformers, rated voltage up to 1000 V, switching overvoltages, vacuum contactors, RC dampers

**For citation:** Tikhonov K.V. Study of switching overvoltages in electrical networks up to 1000 V. *iPolytech Journal*. 2023;27(2):370-379. (In Russ.). EDN: LTHUGJ, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-370-379>.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в сетях до 1000 В для коммутации силовых трансформаторов [1–4] нашли широкое применение следующие коммутационные аппараты [5, 6]: магнитные пускатели, автоматические выключатели, вакуумные контакторы. Вакуумные контакторы обладают преимуществом над другими за счет большого коммутационного ресурса, малого хода контактов, отсутствия необходимости в регулировке контактов и т.д. Несмотря на все преимущества, у вакуумных контакторов возможно создание условий для возникновения коммутационных перенапряжений (КП) при коммутации индуктивных нагрузок, в роли которых выступают силовые трансформаторы в электрических сетях до 1000 В [7–9].

## АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ КРАТНОСТИ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ОТ МОЩНОСТИ КОММУТИРУЕМЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Для изучения перенапряжений в сетях до 1000 В, возникающих при коммутации силовых трансформаторов ТМЗ мощностью 630, 400, 250 и 160 кВ·А, использовались вакуумные контакторы ВСА-6А. Для фиксации перенапряжений применялся активный делитель РДН-1000 и цифровой осциллограф Tektronix TDS2024В.

Количество циклов коммутации (включение и отключение каждого трансформатора) составляло 20 раз. Между циклами делался перерыв в течение двух минут. В результате статистической обработки данных и проверки выборок на экстремальность были определены максимальные перенапряжения при включении и отключении каждого из типов изучаемых трансформаторов.

В табл. 1 приведены максимальные зна-

чения, зафиксированные при коммутации вышеуказанных трансформаторов.

Кратность коммутационных перенапряжений ( $K_{\Pi}$ ) оценивалась по формуле:

$$K_{\Pi} = \frac{U_{\phi,max}}{U_H}$$

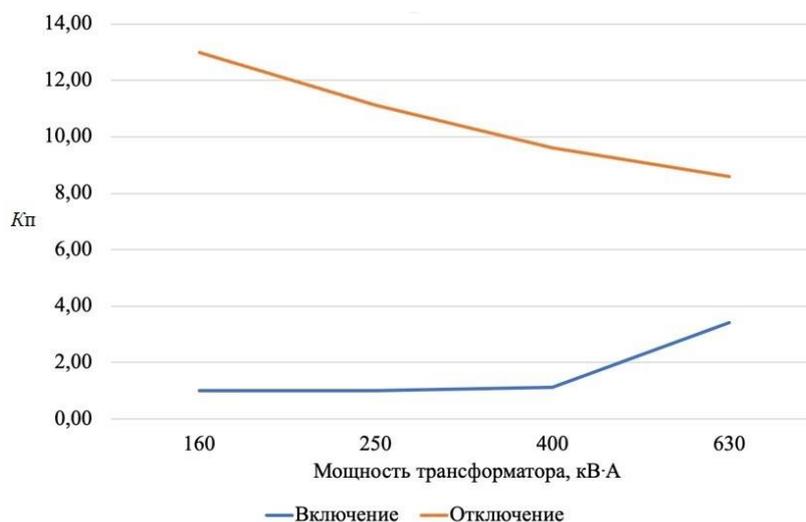
На рис. 1 приведены зависимости изменения кратности коммутационных перенапряжений от мощности трансформатора при его включении и отключении от сети. Анализ данных в табл. 1 и представленных на рис. 1 зависимостей показывает, что при увеличении мощности трансформатора кратность коммутационных перенапряжений снижается при его отключении от сети. Обратная закономерность наблюдается при его подключении к сети. Например, отключение трансформатора мощностью 160 кВ·А напряжением до 1000 В может привести к появлению перенапряжения при его отключении от сети равной 8580 В. Режим коммутации трансформаторов сопровождается высокой кратностью перенапряжений, что вызывает пробой изоляции, наиболее подверженной загрязнению и отключениям данной электроустановки релейными защитами. Электроснабжение потребителей прекращается на длительное время, так как происходит повреждение изоляции трансформатора и коммутационного аппарата. Коммутация трансформатора мощностью 630 кВ·А и напряжением до 1000 В приводит к появлению кратности перенапряжений 8,6 при его отключении и 3,41 при его подключении.

Максимальная кратность перенапряжения равная 13 зафиксирована при отключении, что подтверждает осциллограмма, представленная на рис. 2.

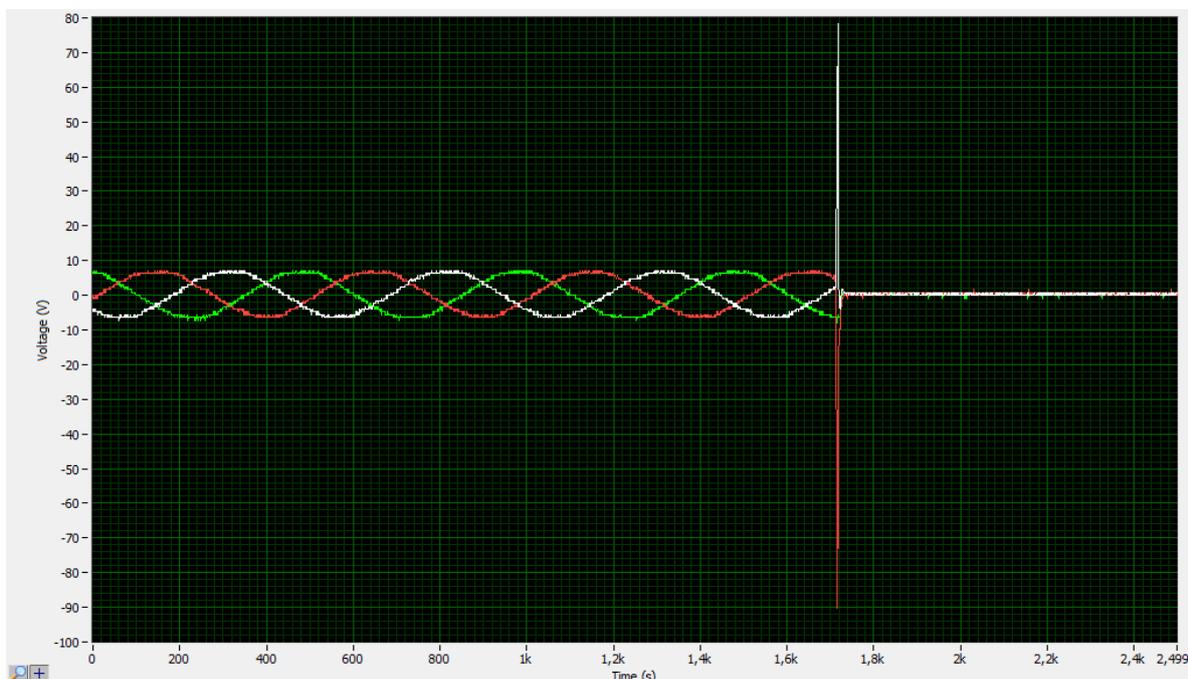
**Таблица 1.** Результаты максимальных зафиксированных кратностей коммутационных перенапряжений при включении и отключении трансформаторов

**Table 1.** Results of the maximum recorded ratios of switching overvoltages when switching on and off transformers

Вид коммутации	Мощность трансформатора, кВ·А			
	630	400	250	160
	Зафиксированная кратность перенапряжений			
Включение	3,41	1,12	1	1
Отключение	8,6	9,6	11,13	13



**Рис. 1.** Зависимости кратности коммутационных перенапряжений при включении и отключении трансформаторов от их мощности  
**Fig. 1.** Switching overvoltage ratio vs transformer power when switching on and off transformers



**Рис. 2.** Осциллограмма при отключении трансформатора ТМЗ 160/0,66  
**Fig. 2.** Oscillogram when switching off TMZ 160/0.66 transformer

Согласно ПУЭ<sup>2</sup> (пункт 1.8.16), испытание изоляции повышенным напряжением для трансформаторов напряжением до 1 кВ должно производиться в течение 1 мин, затем необходимо подавать напряжение равное 4,5 кВ для нормальной изоляции трансформатора и 2,7 кВ – для облегченной изоляции. Если нет специальных требований, то, как правило, в сетях до 1000 В используются трансформаторы с нормальной изоляцией, поэтому в качестве предельного значения повышенного напряжения, которое должна выдерживать изоляция, примем напряжение равное 4,5 кВ, т.е. кратность перенапряжения не должна превышать величину равную 6,8 для сетей до 1000 В. Сопоставляя допустимое значение кратности перенапряжения, можно сделать вывод, что наибольшей опасностью для изоляции трансформатора является процесс отключения трансформатора от сети, так как минимальная кратность перенапряжений достигает значения 8,6, что может привести к пробое изоляции обмоток трансформатора [10–14]. Исходя из этого, разработка эффективных средств защиты от коммутационных перенапряжений для трансформатора напряжением до 1000 В является актуальной.

### **ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА RC-ГАСИТЕЛЕЙ ДЛЯ ОГРАНИЧЕНИЯ АМПЛИТУДЫ И СКОРОСТИ НАРАСТАНИЯ КОММУТАЦИОННОГО ИМПУЛЬСА**

Для ограничения коммутационных перенапряжений в настоящее время используются нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН) – RC-гасители на базе RC-цепей. Опыт эксплуатации указанных устройств защиты от коммутационных перенапряжений показал, что наиболее эффективными являются RC-гасители, устанавливаемые со стороны обмотки выключателя нагрузки (ВН) трансформатора, так как позволяют не только ограничивать амплитуду коммутационного импульса, но и снижать скорость нарастания напряжения коммутационного импульса [15,

16]. Кроме этого, у RC-гасителей отсутствуют зоны замирания при возникновении высокочастотных коммутационных импульсов. При работе ОПН и при частоте коммутационного импульса более 45 кГц наблюдается возникновение зон замирания. ОПН не реагирует в данный промежуток времени на возникновение перенапряжений [17].

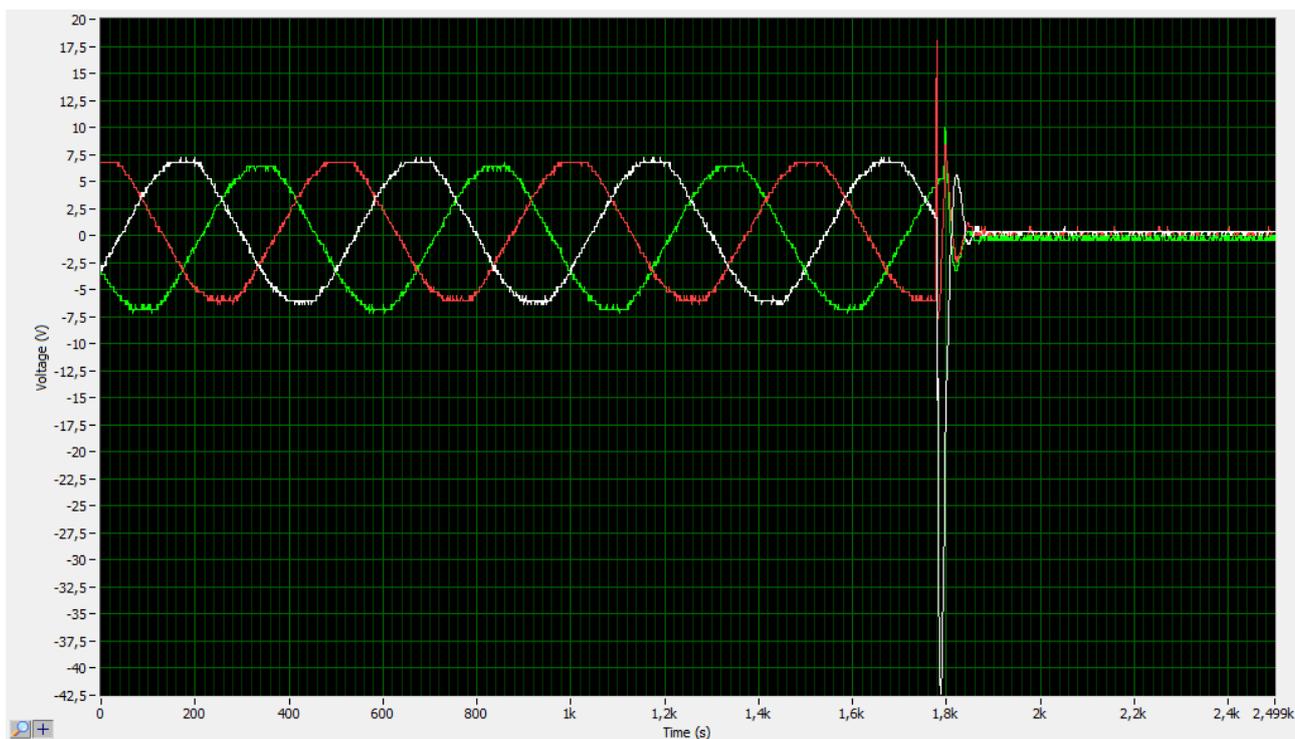
Емкость RC-цепи должна быть в 5 раз больше емкости защищаемого объекта. С помощью цифрового прибора LC-метр Mastech MY6243 были выполнены измерения емкости первичной обмотки исследуемых трансформаторов. В результате измерений для трансформаторов мощностью 630, 400, 250, 160 кВ·А получены следующие значения, мкФ: 0,3; 0,24; 0,19; 0,15, соответственно. Известно, что с увеличением мощности трансформатора индуктивность трансформатора снижается, а, следовательно, уменьшается и волновое сопротивление трансформатора. Исходя из этого, при подключении одной и той же емкости к зажимам трансформатора у более мощных трансформаторов снижение волнового сопротивления будет происходить в большей степени. Следовательно, ограничение перенапряжения будет наиболее эффективно [18–20].

Поэтому можно выбрать универсальные параметры RC-цепей благодаря наибольшим возможным кратностям перенапряжений при коммутации трансформатора. Наибольшие кратности перенапряжений были зафиксированы при коммутации у трансформатора мощностью 160 кВ·А. Учитывая индуктивность и емкость трансформатора, параметры RC-цепей были приняты следующие: сопротивление – 30 Ом, емкость – 0,75 мкФ.

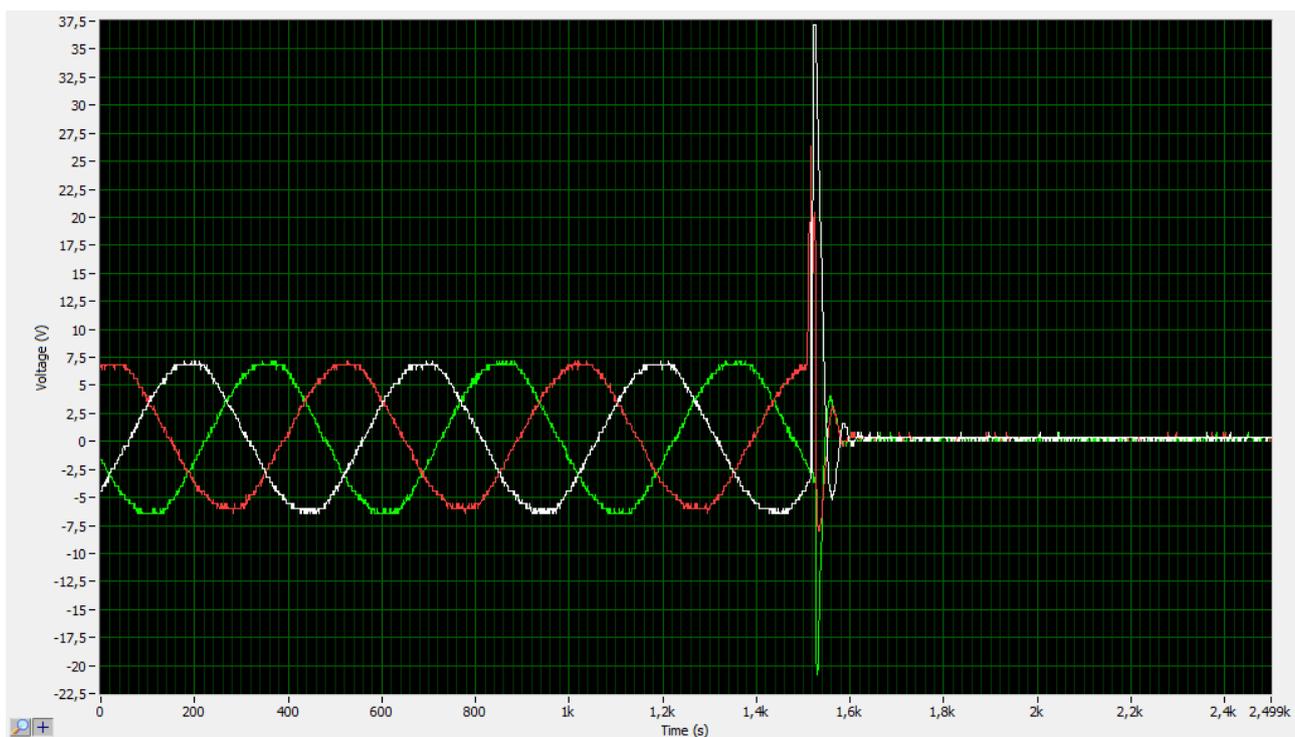
В табл. 2 приведены максимальные зафиксированные кратности перенапряжений при коммутации силовых трансформаторов с использованием RC-цепей для ограничения перенапряжения.

На рис. 3–6 приведены соответствующие осциллограммы максимальных зафиксированных коммутационных перенапряжений.

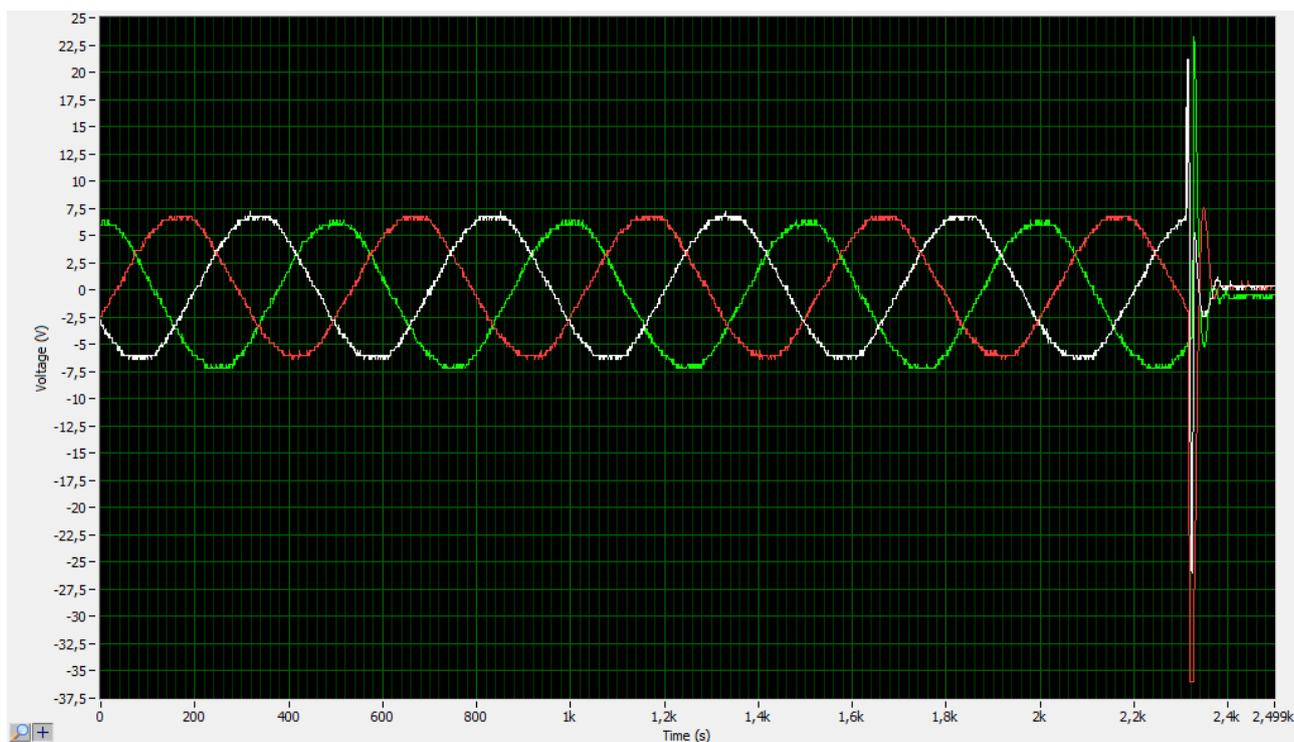
<sup>2</sup>ПУЭ. Правила устройства электроустановок. Изд. 7 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.elec.ru/library/direction/pue.html> (дата обращения: 09.01.2023).



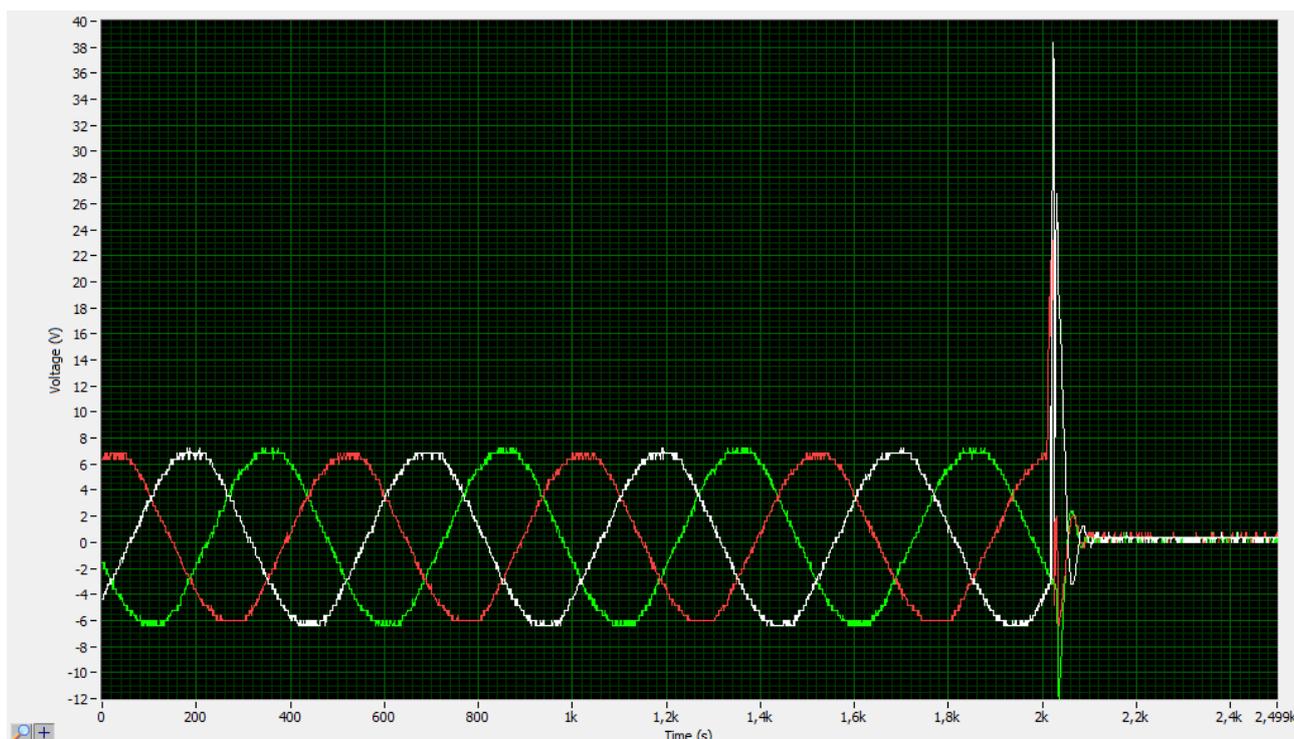
**Рис. 3.** Отключение трансформатора мощностью 160 кВ·А Кп.ф. = 4,97. Схема соединения RC-цепи «звезда»  
**Fig. 3.** Disconnection of the transformer with the capacity of 160 kVA, line to earth voltage = 4.97.  
Star connection of the RC circuit



**Рис. 4.** Отключение трансформатора мощностью 250 кВ·А Кп.ф. = 4,73. Схема соединения RC-цепи «звезда»  
**Fig. 4.** Disconnection of the transformer with the capacity of 250 kVA, line to earth voltage = 4.73.  
Star connection of the RC circuit



**Рис. 5. Отключение трансформатора мощностью 400 кВ·А Кп.ф. = 4,54. Схема соединения RC-цепи «звезда»**  
**Fig. 5. Disconnection of the transformer with the capacity of 400 kVA, line to earth voltage = 4.54.**  
**Star connection of the RC circuit**



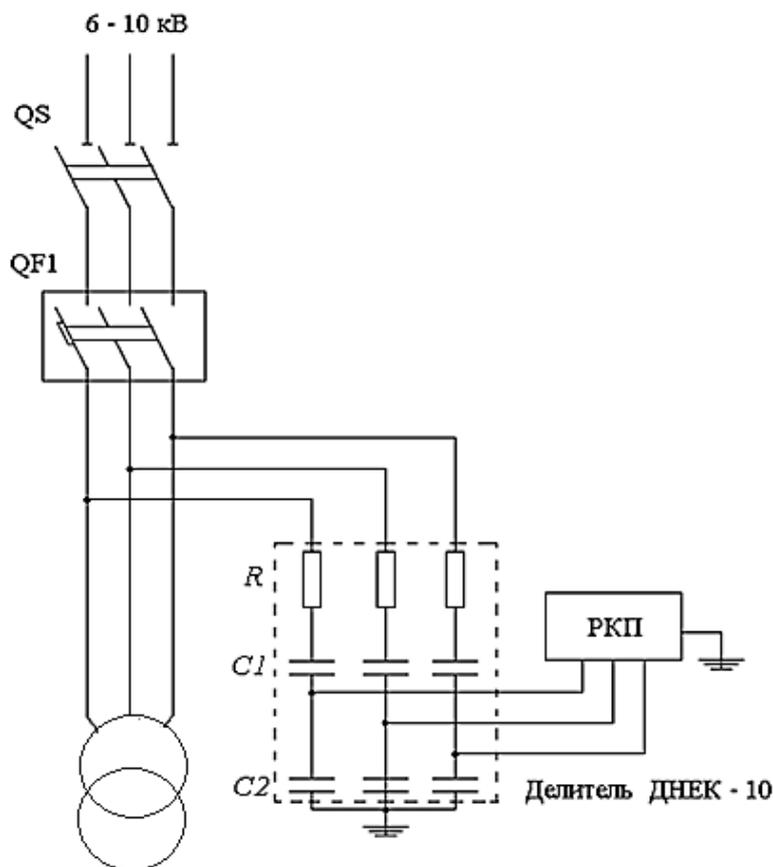
**Рис. 6. Отключение трансформатора мощностью 630 кВ·А Кп.ф. = 4,51.**  
**Схема соединения RC-цепи «звезда с нулем»**  
**Fig. 6. Disconnection of the transformer with the capacity of 630 kVA, line to earth voltage = 4.51.**  
**"Star with zero" connection of the RC circuit**

**Таблица 2.** Результаты исследования коммутационных перенапряжений при коммутации силовых трансформаторов с использованием RC-цепей для ограничения перенапряжений

**Table 2.** Results of studying switching overvoltages under power transformer switching using RC circuits to limit overvoltages

Схема соединения	Мощность трансформатора			
	160 кВ·А	250 кВ·А	400 кВ·А	630 кВ·А
Звезда	Кп.ф.* = 4,97 (рис. 3)	Кп.ф. = 4,73 (рис. 4)	Кп.ф. = 4,54 (рис. 5)	Кп.ф. = 4,51 (рис. 6)

\*Кп.ф. – кратность перенапряжений по отношению к земле (фазное напряжение).



**Рис. 7.** Схема подключения и соединения RC-цепи «звезда с нулем»  
**Fig. 7.** Wiring diagram and "star with zero" connections of the RC circuit

На рис. 7 приведена схема подключения и соединения RC-цепи к ВН трансформатора.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, анализируя табл. 1 и 2, можно сделать вывод о том, что экспериментальные исследования подтверждают эффективность использования RC-цепей с параметрами  $R = 30 \text{ Ом}$ ,  $C = 0,75 \text{ мкФ}$ . Следовательно, для повышения надежности работы трансформаторов напряжением 6, 10 кВ и мощностью 630, 400, 250 и 160 кВ·А при ис-

пользовании вакуумных контакторов эксплуатация данных трансформаторов должна проводиться при использовании RC-цепей, подключенных к первичной обмотке ВН трансформатора [21]. Полученные результаты найдут широкое применение во всех областях промышленности, помогут повысить надежность схем электроснабжения, впервые смогут быть установлены и применены для ограничения КП в сетях до 1000 В, а также обладают научной новизной.

## Список источников

1. Кузьмин С.В. Использование силовых трансформаторов для локализации высших гармоник в системах электроснабжения 0,4–10 кВ // Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города: сб. науч. тр. Всерос. науч.-практ. конф. (г. Красноярск, 2009 г.). Красноярск, 2009. С. 268–270.
2. Бебихов Ю.В., Егоров А.Н., Матул Г.А., Семёнов А.С., Харитонов Я.С. Поиск путей повышения эффективности применения высоковольтного частотно-регулируемого электропривода в условиях горного производства // Естественные и технические науки. 2018. № 8. С. 228–234.
3. Брыкалов С.М., Балыбердин А.С., Трифонов В.Ю., Засухин Р.В. Ключевые направления повышения энергетической эффективности крупных промышленных предприятий // Энергобезопасность и энергосбережение. 2020. № 5. С. 10–18. <https://doi.org/10.18635/20712219-2020-5-10-18>.
4. Shevryev Y.V., Shevryeva N.Y. Improvement of voltage waveform in power supply systems with dynamic rectifier in mineral mining and processing industry // Gornyi Zhurnal. 2019. Iss. 1. P. 66–69. <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.01.14>.
5. Егоров А.Н., Семёнов А.С., Федоров О.В. Практический опыт применения преобразователей частоты Power Flex 7000 в горнодобывающей промышленности // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. 2017. № 4. С. 86–93.
6. Dutta N., Kaliannan P., Subramaniam U. Experimental analysis of PQ parameter estimation of VFD drives // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2020. Vol. 937. Iss. 2. P. 012042. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/937/1/012042>.
7. Клундук Г.А. Влияние преобразователя частоты на энергосбережение насосного агрегата и электромагнитная совместимость оборудования // Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития: сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. (г. Красноярск, 21–23 апреля 2020 г.). Красноярск: Изд-во КрасГАУ, 2020. С. 153–157.
8. Скакунов Д.А. Влияние силовой электроники на качество электрической энергии и методы фильтрации высших гармоник // сб. науч. тр. Всерос. науч.-техн. конф. (г. Новокузнецк, 18–20 мая, 2004 г.). Новокузнецк: СибГИУ, 2004. С. 253–257.
9. Кузьмин Р.С., Завалов А.А., Майнагашев Р.А. Влияние компенсации реактивной мощности на величину перенапряжений при коммутации силовых трансформаторов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 3. С. 197–209. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/3/3115>.
10. Кузьмин С.В., Ножин А.И. Анализ коммутационных перенапряжений в сетях 6...10 кВ угольных разрезов // Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6...35 кВ: тр. II Всерос. науч.-техн. конф. (г. Новосибирск, 15–17 октября 2002 г.). Новосибирск, 2002. С. 183–187.
11. Кузьмин Р.С., Павлов В.В., Майнагашев Р.А., Зыков И.С., Дементьев В.В. Влияние коммутационных перенапряжений на надежность систем электроснабжения 6 кВ шахт и рудников // Горное оборудование и электромеханика. 2011. № 2. С. 31–33.
12. Пантелеев В.И., Кузьмин И.С., Завалов А.А., Тихонов А.В., Умецкая Е.В. Качество электрической энергии в системах электроснабжения горно-перерабатывающих предприятий России // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 3. С. 356–368. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-356-368>.
13. Ashraf N., Abbas G., Abbassi R., Jerbi H. Power quality analysis of the output voltage of AC voltage and frequency controllers realized with various voltage control techniques // Applied Sciences (Switzerland). 2021. Vol. 11. Iss. 2. P. 538. <https://doi.org/10.3390/app11020538>.
14. Sowa P., Macha D. Electromagnetic switching transients in transmission line cooperating with the local subsystem // International Journal of GEOMATE. 2020. Vol. 19. Iss. 72. P. 180–189. <https://doi.org/10.21660/2020.72.5781>.
15. Akagi H. Active Harmonic Filters // Proceedings of the IEEE. 2005. Vol. 93. Iss. 12. P. 2128–2141. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2005.859603>.
16. Кузьмин Р.С., Кузьмин И.С., Меньшиков В.А., Кузьмин С.В., Куликовский В.С. Метод оценки и прогнозирования перенапряжений при дуговых однофазных замыканиях на землю в сетях 6-10 кВ как средство повышения уровня электробезопасности на горных предприятиях // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2020. № 5. С. 116–132. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-5-116-132>.
17. Кузьмин С.В., Майнагашев Р.А., Гаврилова Е.В., Немков С.В. Опыт эксплуатации средств защиты от коммутационных перенапряжений в системах электроснабжения 6 кВ горных предприятий // Горное оборудование и электромеханика. 2011. № 4. С. 53–54.
18. Jyothi R., Sumitgupta, Rao K.U., Jayapal R. IoT application for real-time condition monitoring of voltage source inverter driven induction motor // Innovative Data Communication Technologies and Application. 2021. Vol. 59. P. 97–105. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-9651-3\\_8](https://doi.org/10.1007/978-981-15-9651-3_8).
19. Guo Yaxun, Jiang Xiaofeng, Chen Yun, Zheng Ming, Liu Gang, Li Xiaohua, Tang Wenhui. Reignition overvoltages induced by vacuum circuit breakers and its suppression in offshore wind farms // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2020. Vol. 122. P. 106227. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106227>.
20. Santos D.P., Sartori C.A.F. Impact of mismatch cables impedances on active motor terminal overvoltage mitigation using parallel voltage source inverters // IEEE 3rd Global Electromagnetic Compatibility Conference. 2017. <https://doi.org/10.1109/GEMCCON.2017.8400662>.

21. Кузьмин С.В., Гаврилова Е.В., Барышников Д.В. Влияние процесса дугогашения в высоковольтных выключателях на величину коммутационных перенапряжений, возникающих в сетях 6-10 кВ горнодобывающих предприятий // Горное оборудование и электромеханика. 2009. № 2. С. 41–44.

### References

1. Kuz'min S.V. Use of power transformers for localization of higher harmonics in 0.4 – 10 kV power supply systems. In: *Energoeffektivnost' sistem zhizneobespecheniya goroda: Trudy vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Energy efficiency of city life support systems: Proceedings of All-Russian Scientific and Practical Conference*. 2009, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk; 2009, vol. 1, p. 268-270. (In Russ.).
2. Bebikhov Yu.V., Egorov A.N., Matul G.A., Semenov A.S., Kharitonov Ya.S. Search of ways to improve the efficiency of application of high-voltage frequency-regulated electric drive in conditions of mining production. *Estestvennye i tekhnicheskije nauki = Natural and Technical Sciences*. 2018;8:228-234. (In Russ.).
3. Brykalov S.M., Balyberdin A.S., Trifonov V.Yu., Zasukhin R.V. Key approaches to energy efficiency improvement at large manufacturing companies. *Energobezopasnost'i energosberezhenie = Energy Safety and Energy Economy*. 2020;5:10-18. (In Russ.).
4. Shevyrev Y.V., Shevyreva N.Y. Improvement of voltage waveform in power supply systems with dynamic rectifier in mineral mining and processing industry. *Gornyi Zhurnal*. 2019;1:66-69. <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.01.14>.
5. Egorov A.N., Semenov A.S., Fedorov O.V. The practical experience of the application of the frequency converter power flex 7000 in the mining industry. In: *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni R.E. Alekseeva*. 2017;4:86-93. (In Russ.).
6. Dutta N, Kaliannan P, Subramaniam U. Experimental analysis of PQ parameter estimation of VFD drives. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020;937(2):012042. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/937/1/012042>.
7. Klunduk G.A. Influence of a frequency converter on the power saving of a pump unit and electromagnetic compatibility of equipment. In: *Nauka i obrazovanie. Opyt, problemy, perspektivy razvitiya: sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii = Science and Education. Experience, problems, development prospects: Collected scientific works of the International scientific and practical conference*. 21–23 April 2020, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Agrarian University; 2020, vol. 1, p. 153-157. (In Russ.).
8. Skakunov D.A. Influence of power electronics on electric power quality and higher harmonics filtering methods. In: *Trudy vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii = Proceedings of All-Russian Scientific and Technical Conference*. 18–20 May 2004, Novokuznetsk. Novokuznetsk: Siberian State Industrial University; 2004, vol. 1, p. 253-257. (In Russ.).
9. Kuz'min R.S., Zavalov A.A., Majnagashev R.A. Influence of reactive power compensation on overvoltages value when switching power transformers. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2021;332(3):197-209. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/3/3115>.
10. Kuz'min S.V., Nozhin A.I. Analysis of switching overvoltages in 6...10 kV networks of coal mines. *Ogranichenie perenapryazhenij i rezhimy zazemleniya nejtrali setej 6...35 kV: trudy II Vserossiiskoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii = Overvoltage limitation and grounding modes of 6...35 kV network neutral network: Proceedings of the 2<sup>nd</sup> All-Russian scientific and technical conference*. 15–17 October 2002, Novosibirsk. Novosibirsk; 2002, p. 183-187. (In Russ.).
11. Kuz'min R.S., Pavlov V.V., Majnagashev R.A., Zykov I.S., Dement'ev V.V. Influence of switching overvoltages on 6 kV power supply system reliability in pits and mines. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2011;2:31-33. (In Russ.).
12. Panteleev V.I., Kuzmin I.S., Zavalov A.A., Tikhonov A.V., Umetskaya E.V. Power quality in power supply systems of mining and processing enterprises in Russia. *iPolytech Journal*. 2021;25(3):356-368. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-356-368>.
13. Ashraf N., Abbas G., Abbassi R., Jerbi H. Power quality analysis of the output voltage of AC voltage and frequency controllers realized with various voltage control techniques. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2021;11(2):538. <https://doi.org/10.3390/app11020538>.
14. Sowa P., Macha D. Electromagnetic switching transients in transmission line cooperating with the local subsystem. *International Journal of GEOMATE*. 2020;19(72):180-189. <https://doi.org/10.21660/2020.72.5781>.
15. Akagi H. Active Harmonic Filters. In: *Proceedings of the IEEE*. 2005;93(12):2128-2141. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2005.859603>.
16. Kuzmin R.S., Kuzmin I.S., Menshikov V.A., Kuzmin S.V., Kulikovskii V.S. *Method of assessment and prediction of overvoltage caused by single-phase arc ground short circuits in the 6–10 kV mains as a way of increasing the electrical safety level in mining facilities. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2020;5:116-132. (In Russ.). <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-5-116-132>.
17. Kuzmin S.V., Mainagashev R.A., Gavrilova E.V., Nemkov S.V. The experience of operating the protection means against the commutation overvoltage in the systems of supplying mining companies with 6 kV electric power. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika = Mining equipment and electromechanics*. 2011;4:53-54. (In Russ.).
18. Jyothi R., Sumitgupta, Rao K.U., Jayapal R. IoT application for real-time condition monitoring of voltage source inverter driven induction motor. *Innovative Data Communication Technologies and Application*. 2021;59:97-105.

[https://doi.org/10.1007/978-981-15-9651-3\\_8](https://doi.org/10.1007/978-981-15-9651-3_8).

19. Guo Yaxun, Jiang Xiaofeng, Chen Yun, Zheng Ming, Liu Gang, Li Xiaohua, Tang Wenhui. Reignition overvoltages induced by vacuum circuit breakers and its suppression in offshore wind farms. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020;122:106227. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106227>.

20. Santos D.P., Sartori C.A.F. Impact of mismatch cables impedances on active motor terminal overvoltage mitigation using parallel voltage source inverters. In: *IEEE 3rd Global Electromagnetic Compatibility Conference*. 2017. <https://doi.org/10.1109/GEMCCON.2017.8400662>.

21. Kuzmin S.V., Gavrilova E.V., Baryshnikov D.V. The influence of the arc extinction process in high-voltage switches on the communication overvoltage value appearing in the 6–10 kV circuits of mining enterprises. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika = Mining equipment and electromechanics*. 2009;2:41-44. (In Russ.).

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Тихонов Кирилл Валерьевич**,  
специалист ООО Научно-производственного  
предприятия «РУТАС»,  
660025, г. Красноярск, ул. Вавилова, 72, Россия;  
магистрант,  
Национальный исследовательский технологический  
университет МИСиС,  
119049, г. Москва, Ленинский просп., д. 4, стр. 1,  
Россия  
✉ [tikhonovkv@bk.ru](mailto:tikhonovkv@bk.ru)

#### Вклад автора

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

#### Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.*

#### Информация о статье

Статья поступила в редакцию 16.03.2022; одобрена после рецензирования 02.05.2022; принята к публикации 05.06.2023.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Kirill V. Tikhonov**,  
Specialist of the Research and Production Enterprise  
RUTAS LLC,  
72, Vavilov St., Krasnoyarsk 660025, Russia,  
Master's Degree Student,  
National University of Science and Technology MISIS,  
4/1, Leninsky pr., Moscow 119049, Russia.  
✉ [tikhonovkv@bk.ru](mailto:tikhonovkv@bk.ru)

#### Contribution of the author

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

#### Conflict of interest

The author declares that there is no conflict of interest 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 16.03.2022; approved after reviewing 02.05.2022; accepted for publication 05.06.2023.



Научная статья  
УДК 621.316.727  
<https://elibrary.ru/kzdrdi>  
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-380-391>

## Оценка эффективности применения фазоворотного трансформатора для повышения пропускной способности межсистемной электропередачи

В.П. Шойко<sup>1✉</sup>, А.М. Бутакова<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

**Резюме.** Целью исследований явилась разработка мероприятий, направленных на повышение эффективности функционирования энергосистем, в частности за счет повышения пропускной способности электропередач. Для решения указанной задачи использовалась FACTS-технология на основе фазоворотного трансформатора. Исследование эффективности фазоворотного трансформатора для повышения пропускной способности межсистемной электропередачи проводилось путем определения максимально допустимых перетоков сечения Объединенная энергосистема Урала – Объединенная энергосистема Сибири. В исследуемое сечение входили электропередачи 500 кВ и протяженный транзит 220 кВ Нижневартовская ГРЭС – Томская. Расчеты выполнялись для нормальной и различных послеаварийных схем с использованием программного комплекса RastrWin3. При исследованиях учитывались регулирование отпаек фазоворотного трансформатора и направление перетока мощности в сечении. Показано, что для рассматриваемого сечения применение фазоворотного трансформатора обеспечило работу транзита 220 кВ в замкнутом режиме, что повысило надежность электроснабжения региона, позволило увеличить максимально допустимый переток на 35...71%. Кроме того, выполнены аналогичные расчеты для варианта усиления транзита 220 кВ путем строительства параллельной линии 500 кВ. Согласно проведенным исследованиям установлено, что эффект повышения пропускной способности этого варианта составил 20...35%. Выявлено, что определяющим фактором, ограничивающим максимально допустимые перетоки в сечении при замыкании транзита 220 кВ в обычном и усиленном вариантах, является токовая перегрузка головных участков. По результатам проведенных исследований даны рекомендации по предпочтительному использованию разомкнутого режима транзита. Таким образом, для повышения эффективности функционирования энергосистем предложено повышение пропускной способности электропередач на основе применения фазоворотного трансформатора и определен сегмент Единой национальной энергосистемы России, где их использование технологически целесообразно.

**Ключевые слова:** энергосистема, межсистемная электропередача, фазоворотный трансформатор, пропускная способность, максимально допустимый переток, сечение

**Для цитирования:** Шойко В.П., Бутакова А.М. Оценка эффективности применения фазоворотного трансформатора для повышения пропускной способности межсистемной электропередачи // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 2. С. 380–391. EDN: KZDRDI, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-380-391>.

### POWER ENGINEERING

Original article

## Feasibility of using phase-shifting transformers to increase the throughput of interconnected power transmission systems

Vladimir P. Shoiko<sup>1✉</sup>, Anastasia M. Butakova<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

**Abstract.** This paper discusses measures aimed at improving the efficiency of power systems by increasing the capacity of power transmission lines. To that end, a FACTS technology based on a phase-shifting transformer was used.

© Шойко В.П., Бутакова А.М., 2023

The feasibility of using phase-shifting transformers to increase the throughput capacity of interconnected power transmission systems was investigated by determining the maximum allowable cross-section flows of the United Energy System of the Urals – the United Energy System of Siberia. The studied cross-section included 500 kV transmission lines and the extended 220 kV Nizhnevartovskaya GRES – Tomskaya transit. Calculations were performed for normal and various post-emergency schemes using the RastrWin3 software package. The regulation of phase-shifting transformer branches and the direction of power flow in the section were taken into account. For the considered cross-section, the use of a phase-shifting transformer was shown to provide for the 220 kV transit operation in a closed mode. This improved the reliability of power supply in the region and allowed the maximum allowable overflow to be increased by 35–71%. In addition, similar calculations were carried out for the option of strengthening the 220 kV transit through the construction of a parallel 500 kV line. The effect of increasing the capacity of this option was established to reach 20–35%. The decisive factor limiting the maximum permissible cross-section flows during 220 kV transit short circuit in the normal and reinforced versions was found to be the current overload of the head sections. Recommendations on the preferable use of an open transit mode are formulated. In conclusion, the efficiency of power systems can be improved by increasing the transmission capacity of power lines through the use of phase-shifting transformers. A segment of the Unified National Power Grid of Russia, where such devices are technologically expedient, was identified.

**Keywords:** power grid, intersystem power transmission, phase-shifting transformer, capability, maximum allowed power flow, cross-section

**For citation:** Shoiko V.P., Butakova A.M. Feasibility of using phase-shifting transformers to increase the throughput of interconnected power transmission systems. *iPolytech Journal*. 2023;27(2):380-391. (In Russ.). EDN: KZDRDI, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-380-391>.

## ВВЕДЕНИЕ

Управление фазами режимных параметров существенно повышает эффективность функционирования энергосистем. Основы управления фазами режимных параметров рассмотрены в работах ученых, таких как В.М. Чебан, Ю.Г. Шакарян, Дж. Вербумен и др.<sup>3</sup> [1–3]. Применение фазового управления, в том числе для повышения пропускной способности электропередач, достигается с помощью FACTS-технологий. Основы FACTS-технологий изложены в работах [4, 5]. Одним из технических устройств, реализующих фазовое управление, является фазоповоротный трансформатор (ФПТ). Он широко используется в зарубежных энергокомпаниях [6, 7].

Для России применение ФПТ является инновационной технологией. Впервые она была реализована на Волжской ГЭС<sup>4</sup> [8, 9]. Учитывая полученную высокую эффективность, «Русгидро» на своих объектах и «Системный оператор» с «Федеральной сетевой компанией Единой энергетической системы» в сегментах Единой национальной энергосистемы России планируют внедрение ФПТ, где их применение технологически и экономически целесообразно.

В настоящее время, как у нас, так и за рубежом, ведутся работы по выбору мест установки ФПТ, алгоритмам оптимизации настройки данных трансформаторов, устранению неравномерной загрузки линий, управлению режимом циркуляции потоков мощности [10–15].

Важным направлением применения ФПТ в энергосистемах является повышение пропускной способности электропередач [16–18]. Учитывая вышесказанное, можно считать актуальной задачей определение целесообразных мест установки ФПТ для повышения пропускной способности электропередач.

## ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Передача электроэнергии от мест выработки к центрам потребления в энергосистемах осуществляется по линиям электропередачи. При этом возникают проблемы, связанные с устойчивостью, недопустимым снижением напряжения в отдельных узлах или токовой перегрузкой линий. Такие проблемы имеют место на межсистемном транзите между объединенными энергосистемами (ОЭС) Урала и Сибири (рис. 1).

<sup>3</sup>Чебан В.М., Ландман А.К., Фишов А.Г. Управление режимами электроэнергетических систем в аварийных ситуациях: учеб. пособ. М.: Высшая школа, 1990. 144 с.

<sup>4</sup>В России впервые введен в эксплуатацию фазоповоротный трансформатор [Электронный ресурс]. URL: <http://digitalsubstation.com/blog/2019/05/22/v-rossii-vpervye-vveden-v-ekspluatatsiyu-fazopovorotnyj-transformator/> (04.02.2021).

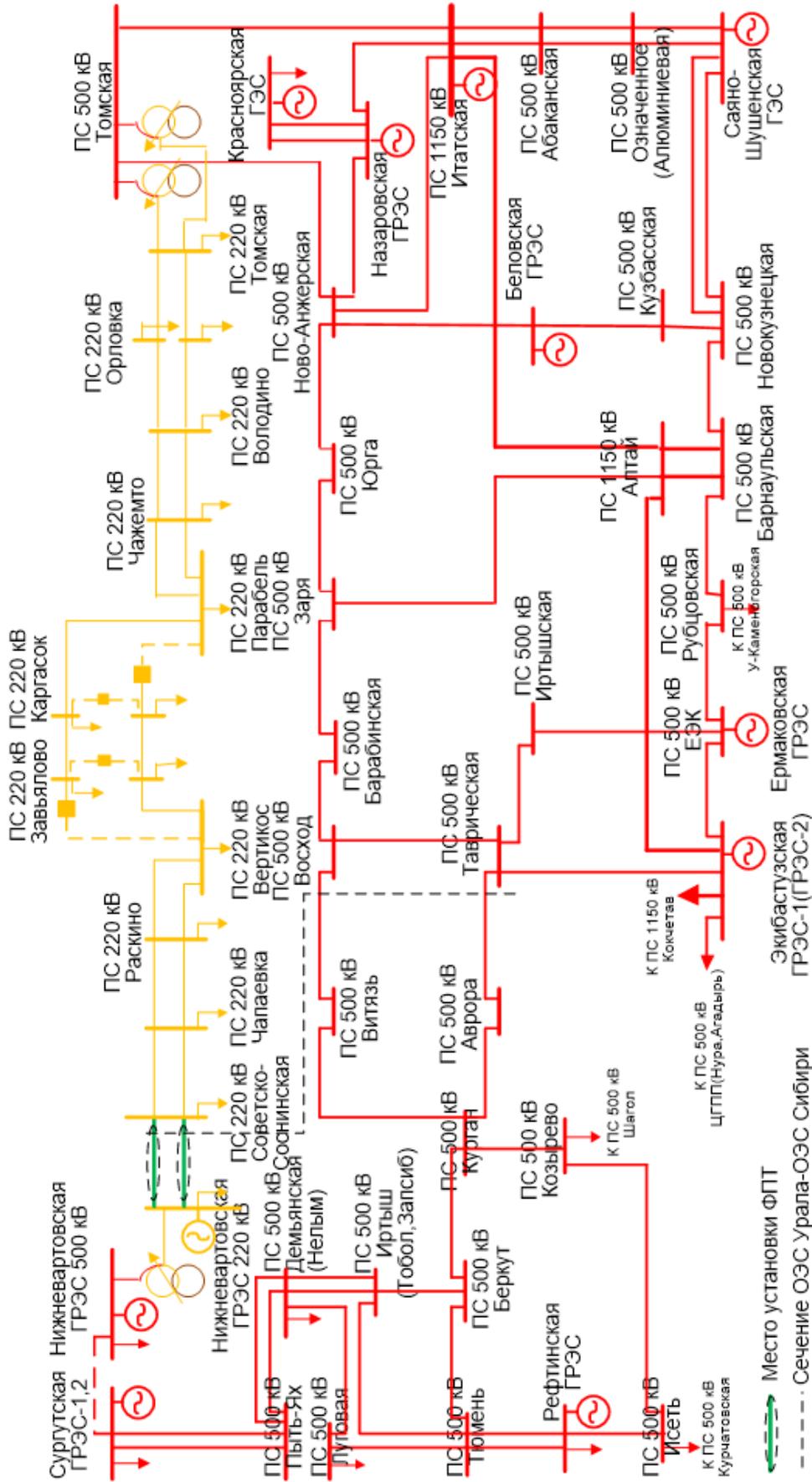


Рис. 1. Фрагмент системообразующей электрической сети Объединенной энергосистемы Урала и Объединенной энергосистемы Сибири  
 Fig. 1. A subnet of the system-forming power grid of the United Energy System of the Urals and Siberia

Учитывая большую протяженность и малую пропускную способность, воздушная линия (ВЛ) 220 кВ Нижневартовская ГРЭС – Томская не может служить в качестве транзитной для параллельной работы ОЭС Сибири и Урала из-за вероятности перегрузки линий 220 кВ на головных участках транзита, как в нормальной схеме, так и при отключении одной из цепей. Это обусловило разомкнутый режим работы транзита 220 кВ, что снижает надежность электроснабжения потребителей.

Точкой разделения электрических потоков этих энергосистем являются подстанции (ПС) 220 кВ Парабель и ПС 220 кВ Вертикос. При этом потребители Томской области севернее этих подстанций получают электроэнергию из Тюменской энергосистемы (ЭС), а южнее – из Томской ЭС. Всего от ВЛ 220 кВ Советско-Соснинская – Томская запитано 11 подстанций. Наиболее крупные потребители запитаны от ПС 220 кВ Советско-Соснинская, ПС 220 кВ Парабель и ПС 220 кВ Томская.

Объектом исследования является межсистемный транзит. В состав контролируемого сечения межсистемного транзита входят двухцепная ВЛ 220 кВ Советско-Соснинская-НВГРЭС220, ВЛ 500 кВ Восход-Витязь, ВЛ 500 кВ Таврическая-Аврора.

В исследуемом базовом режиме транзитный переток активной мощности составил 579 МВт (268 МВт по ВЛ 500 кВ Восход-Витязь и 311 МВт по ВЛ 500 кВ Таврическая-Аврора). Направление перетока осуществляется из Сибири на Урал. Загрузка головных участков ВЛ Советско-Соснинская-НВГРЭС220 разомкнутого транзита 220 кВ составила 112 МВт каждой цепи. Загрузка генераторов и нагрузка узлов этого режима будут отправной точкой при утяжелении режима для определения максимально допустимых перетоков (МДП).

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМЫХ ПЕРЕТОКОВ В СЕЧЕНИИ ОБЪЕДИНЕННОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ УРАЛА – ОБЪЕДИНЕННОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ СИБИРИ ПРИ РАЗОМКНУТОМ ТРАНЗИТЕ 220 КВ

Расчетная схема для проведения исследований была составлена для сети, приведенной на рис. 1. Исследования проводились с использованием программного комплекса RastrWin3. При определении МДП требуется выполнить утяжеление режима. При этом траектория утяжеления может существенно влиять на полученные результаты. В работе рассматривались два варианта направления перетока мощности: в Сибирь (основной) и на Урал. Начальная загрузка генераторов и величины нагрузок в узлах в обоих вариантах была одинакова и соответствовала базовому режиму. При перетоке «в Сибирь» утяжеление выполнялось путем увеличения генерации на электростанциях Урала и снижения генерации на электростанциях Сибири и Казахстана. При перетоке «на Урал» – наоборот. Изменение генерации выполнялось с учетом технологических ограничений. В обоих вариантах на каждом шаге утяжеления учитывался рост нагрузки на подстанциях транзита 220 кВ.

Как показали исследования, в режиме разомкнутого транзита 220 кВ основным фактором, ограничивающим МДП, явилась статическая устойчивость (СУ).

МДП для обеспечения запаса СУ оценивался по известным соотношениям<sup>5</sup> [21]:

– в нормальном режиме (НР)

$$P_M = 0,8 \cdot P_{\text{пр}} - \Delta P_{\text{нк}} + \Delta P_{\text{ПА}}; \quad (1)$$

– в послеаварийном режиме (ПАР)

$$P_M = P_{\text{д/ав}}(P_{\text{п/ав}}) - \Delta P_{\text{нк}} + \Delta P_{\text{ПА}}, \quad (2)$$

где  $P_{\text{п/ав}} = 0,92 \cdot P_{\text{пр}}^{\text{п/ав}}$ .

<sup>5</sup>Методические указания по устойчивости энергосистем [Электронный ресурс]. URL:https://so-ops.ru/fileadmin/files/laws/orders/pr630-030818me.pdf (04.02.2021).

**Таблица 1.** Результаты расчета максимально допустимых перетоков в сечении Объединенной энергосистемы Урала – Объединенной энергосистемы Сибири без применения фазоворотного трансформатора

**Table 1.** Calculation results of maximum allowed power flows in the cross section of the United Energy System of the Urals – the United Power System of Siberia free of a phase shifting transformer

Схема сети	МДП, МВт				Критерий определения МДП	Направление перетока
	3	4	$P_{\Sigma}$	с $\Delta P_{НК}$		
Нормальная схема	419	469	888	791	обеспечение запаса СУ НР	в Сибирь
Нормальная схема (0)	449	498	947	850		в Сибирь
Нормальная схема (P)	466	499	966	869	обеспечение запаса СУ НР	в Сибирь
Нормальная схема (P), (0)	467	528	995	898		в Сибирь
Откл. Восход–Витязь	310	352	662	565	обеспечение запаса СУ ПАР	в Сибирь
Откл. Восход–Витязь (0)	342	394	736	639		в Сибирь
Откл. Восход–Витязь (P)	369	419	788	691	обеспечение запаса СУ ПАР	в Сибирь
Откл. Восход–Витязь (P), (0)	371	426	797	700		в Сибирь
Откл. Таврическая–Аврора	310	352	662	565	обеспечение запаса СУ ПАР	в Сибирь
Откл. Таврическая–Аврора (0)	312	361	673	576		в Сибирь
Откл. Таврическая–Аврора (P)	338	385	723	626	обеспечение запаса СУ ПАР	в Сибирь
Откл. Таврическая–Аврора (P), (0)	371	426	797	700		в Сибирь
Нормальная схема	-542	-671	-1213	-873	обеспечение запаса СУ НР	на Урал
Откл. Восход–Витязь	-421	-491	-912	-815	обеспечение запаса СУ ПАР	на Урал
Откл. Таврическая–Аврора	-385	-447	-832	-735	обеспечение запаса СУ ПАР	на Урал

*Примечания.*

*Линии, входящие в контролируемое сечение:*

- 1 – ВЛ 220 кВ Советско-Соснинская–НВГРЭС220 1 цепь (переток не учитываем в МДП, т.к. нет транзита);
- 2 – ВЛ 220 кВ Советско-Соснинская–НВГРЭС220 2 цепь (переток не учитываем в МДП, т.к. нет транзита);
- 3 – ВЛ 500 кВ Восход–Витязь;
- 4 – ВЛ 500кВ Таврическая–Аврора.

*Условные обозначения в названиях схем сети и критериях определения МДП:* (P) – отключение реакторов в ходе утяжеления на ПС Витязь, Курган, Аврора; (0) – нулевой переток в сечении; СУ НР – статическая устойчивость в нормальном режиме; СУ ПАР – статическая устойчивость в послеаварийном режиме.

В расчетах  $\Delta P_{НК}$  принималась равной 97 МВт. При ее определении учитывалось максимальное собственное потребление ОЭС Сибири и Урала<sup>6</sup> [22]. Здесь и в последующих расчетах действие ПА по повышению МДП не оценивалось.

Результаты расчетов МДП в различных режимах приведены в табл. 1.

Проведенные исследования показали, что нарушение устойчивости происходило из-за снижения напряжения на ПС 500 кВ, примыкающих к сечению (особенно на ПС Витязь, Аврора, Курган). Контроль за уровнями напряжения на этих подстанциях и отключение только одного реактора на указанных подстанциях существенно повышают МДП.

<sup>6</sup>Приказ Минэнерго России от 30.06.2020 № 508 «Об утверждении Схемы и программы развития Единой энергетической системы России на 2020-2026 годы» [Электронный ресурс]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/19166/document-126217.pdf> (07.01.2023).

Кроме того, выявлена зависимость МДП от исходного режима, от которого выполнялось утяжеление. Таким образом, при исходном режиме с нулевым перетоком между ОЭС во всех рассмотренных режимах получены значения МДП большие по величине по отношению к базовому режиму.

Расчеты по определению МДП при перетоке «на Урал» (здесь и далее) носят прикладной характер. Анализ результатов расчета позволяет сделать вывод о том, что полученные значения МДП близки к значениям при перетоке «в Сибирь».

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМЫХ ПЕРЕТОКОВ В СЕЧЕНИИ ОБЪЕДИНЕННОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ УРАЛА – ОБЪЕДИНЕННОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ СИБИРИ ПРИ ЗАМКНУТОМ ТРАНЗИТЕ 220 КВ БЕЗ ФАЗОВОРОТНОГО ТРАНСФОРМАТОРА**

Замыкание транзита 220 кВ способствует повышению надежности электроснабжения потребителей, запитанных от него. Но при этом, как показали исследования, существенно снижается пропускная способность транзита ОЭС Урала – ОЭС Сибири. Выявлено, что основным фактором, ограничивающим МДП, явилась токовая перегрузка головных участков ВЛ транзита 220 кВ. При этом МДП, обеспечивающий длительно-допустимую токовую нагрузку (ДДТН) ВЛ, оценивался по соотношениям [21]:

$$P_M = P(I_{\text{доп}}) - \Delta P_{\text{нк}} \quad (3)$$

или

$$P_M = P_{\text{д/ав}}(I_{\text{п/ав}}^{\text{доп}}) - \Delta P_{\text{нк}} + \Delta P_{\text{па}}. \quad (4)$$

Результаты расчетов МДП в различных режимах приведены в табл. 2.

Также по результатам расчетов следует отметить:

- практически во всех режимах величины МДП ниже, чем при разомкнутом режиме работы транзита 220 кВ;

- при отключении одной из цепей ВЛ НВГРЭС220-Советско-Соснинская и утяже-

лении режима суммарный переток в сечении даже не успел сменить направление, как произошла перегрузка по току оставшейся в работе цепи. Такой режим недопустим из-за существенного снижения пропускной способности транзита. Для обеспечения достаточного уровня пропускной способности сечения следует разомкнуть транзит 220 кВ.

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМЫХ ПЕРЕТОКОВ В СЕЧЕНИИ ОБЪЕДИНЕННОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ УРАЛА – ОБЪЕДИНЕННОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ СИБИРИ ПРИ ЗАМКНУТОМ ТРАНЗИТЕ 220 КВ С ФАЗОВОРОТНЫМ ТРАНСФОРМАТОРОМ**

При исследованиях использовалась модель ФПТ с тиристорным коммутатором, разработанная в Энергетическом научно-исследовательском институте им. Г.М. Кржижановского. Технические характеристики фазоворотного устройства приведены в работах [19, 20].

Устройство реализует сдвиг по фазе в диапазоне от  $-40^\circ$  до  $+40^\circ$  и содержит  $\pm 15$  отпаяк. В зависимости от номера отпайки суммарное сопротивление и значения коэффициентов трансформации ФПТ приведены в [18].

Как следует из предыдущих расчетов, основным фактором, ограничивающим МДП, явилась токовая перегрузка головных участков ВЛ транзита 220 кВ. Поэтому функция ФПТ должна заключаться в сдерживании роста тока головных участков ВЛ транзита 220 кВ. Это подтвердили проведенные расчеты. Также имела место токовая перегрузка головных участков, но за счет регулирования отпаяк ФПТ удалось обеспечить большие величины МДП активной мощности в рассматриваемом сечении. При этом зависимости МДП от номера отпайки ФПТ приведены на рис. 2.

При перетоке «в Сибирь» и отключении 1-й цепи Советско-Соснинская–НВГРЭС220 величина МДП мала. Поэтому для обеспечения достаточного уровня пропускной способности сечения следует разомкнуть транзит 220 кВ.

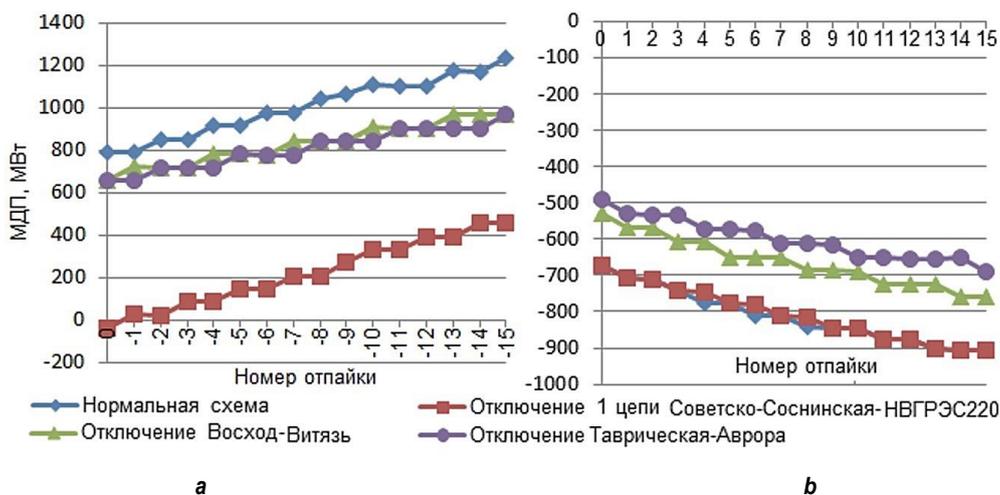
**Таблица 2.** Результаты расчета максимально допустимых перетоков в сечении Объединенной энергосистемы Урала – Объединенной энергосистемы Сибири без применения фазоворотного трансформатора  
**Table 2.** Calculation results of maximum allowed power flows in the cross section of the United Energy System of the Urals – the United Energy System of Siberia free of a phase shifting transformer

Схема сети	МДП, МВт						Критерий определения МДП	Направление перетока
	1	2	3	4	$P_{\Sigma}$	$c \Delta P_{\text{нк}}$		
Нормальная схема	232	232	164	191	819	723	ДДТН цепей Советско-Соснинская-НВГРЭС220	в Сибирь
Отключение Советско-Соснинская-НВГРЭС220 (1 цепь)	122	122	-86	-99	59	-38	ДДТН 2-й цепи Советско-Соснинская-НВГРЭС220	
Отключение Восход-Витязь	223	223	143	167	756	659	ДДТН цепей Советско-Соснинская-НВГРЭС220	
Отключение Таврическая-Аврора	223	223	143	167	756	659	ДДТН цепей Советско-Соснинская-НВГРЭС220	
Нормальная схема	44	44	-395	-461	-768	-671	ДДТН цепей Томская-Орловка	на Урал
Отключение Советско-Соснинская-НВГРЭС220 (1 цепь)	44	44	-395	-461	-768	-671	ДДТН цепей Томская-Орловка	
Отключение Восход-Витязь	48	48	-333	-388	-625	-528	ДДТН цепей Томская-Орловка	
Отключение Таврическая-Аврора	50	50	-318	-370	-588	-491	ДДТН цепей Томская-Орловка	

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМЫХ ПЕРЕТОКОВ В СЕЧЕНИИ ОБЪЕДИНЕННОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ УРАЛА – ОБЪЕДИНЕННОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ СИБИРИ ПРИ УСИЛЕННОМ ТРАНЗИТЕ

Учитывая перспективный рост нагрузки Томского и в целом Сибирского региона, встает задача по передаче больших мощно-

стей по межсистемным и внутрисистемным линиям для обеспечения растущего спроса на электроэнергию. Решение данной задачи возможно путем увеличения пропускной способности электропередач. С целью увеличения пропускной способности северного транзита можно предложить строительство линии 500 кВ с отбором мощности на ПС Парабель (рис. 3).



**Рис. 2.** Эффективность фазоворотного трансформатора в нормальной и послеаварийных схемах: а – максимально допустимые перетоки сечения Объединенной энергосистемы Урала – Объединенной энергосистемы Сибири при изменении отпаяк фазоворотного трансформатора (переток в Сибирь); б – максимально допустимые перетоки сечения Объединенной энергосистемы Урала – Объединенной энергосистемы Сибири при изменении отпаяк фазоворотного трансформатора (переток на Урал)  
**Fig. 2.** Efficiency of the phase shifting transformer in normal and post-emergency circuits: а – maximum allowed power flows in the cross-section of the United Energy System of the Urals – the United Energy System of Siberia when changing phase shifting transformer taps (flow to Siberia); б – maximum allowed power flows in the cross-section of the United Energy System of the Urals – the United Energy System of Siberia when changing phase shifting transformer taps (flow to the Urals)

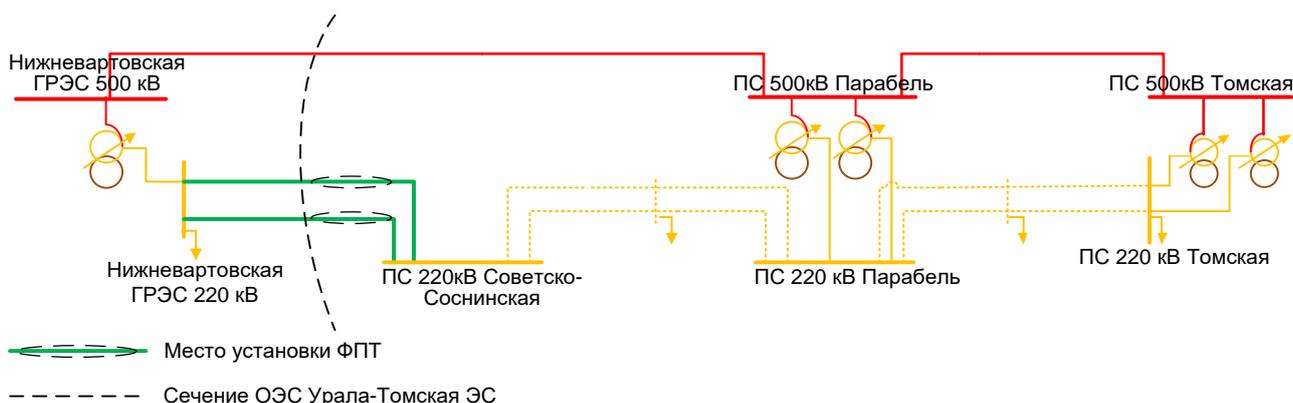


Рис. 3. Вариант усиления транзита энергосистемы ОЭС Урала–Томская  
Fig. 3. An option of transit amplification of the Ural – Tomsk United Energy System

В работе выполнена оценка пропускной способности усиленного транзита. Пропускная способность оценивалась путем расчета МДП без применения и с применением ФПТ. При исследованиях учитывалось направление перетока «в Сибирь». Результаты расчетов МДП без применения ФПТ приведены в табл. 3.

При замыкании транзита 220 кВ наблюдается существенное недоиспользование пропускной способности ВЛ 500 кВ сечения ОЭС Сибири – ОЭС Урала. При отключении 1 цепи Советско-Соснинская-НВГРЭС220 величина МДП мала. Поэтому для обеспечения достаточного уровня пропускной способности сечения следует разомкнуть транзит 220 кВ.

Таблица 3. Результаты расчета максимально допустимых перетоков в сечении Объединенной энергосистемы Урала – Объединенной энергосистемы Сибири без применения фазоворотного трансформатора  
Table 3. Calculation results of maximum allowed power flows in the cross section of the United Energy System of the Urals – the United Energy System of Siberia free of a phase shifting transformer

Режим транзита	Схема сети	МДП, МВт							Критерий определения МДП
		1	2	3	4	5	$P_{\Sigma}$	с $\Delta P_{нк}$	
Разомкнут	Нормальная схема	–	–	630	715	1170	2515	1915	обеспечение запаса СУ НР
	Откл. Советско-Соснинская-НВГРЭС220 (1 цепь)	–	–	630	715	1170	2515	1915	обеспечение запаса СУ НР
	Откл. Восход-Витязь	–	–	434	502	908	1844	1747	обеспечение запаса СУ ПАР
	Откл. Таврическая-Аврора	–	–	413	479	871	1763	1666	обеспечение запаса СУ ПАР
	Откл. НВГРЭС500-Парабель	–	–	282	330	617	1229	1132	обеспечение запаса СУ ПАР
Замкнут	Нормальная схема	236	236	395	460	741	2068	1971	ДДТН цепей Советско-Соснинская-НВГРЭС220
	Откл. Советско-Соснинская-НВГРЭС220 (1 цепь)	128	128	68	82	204	610	513	ДДТН 2 цепь Советско-Соснинская-НВГРЭС220
	Откл. Восход-Витязь	217	217	342	399	653	1828	1731	ДДТН цепей Советско-Соснинская-НВГРЭС220
	Откл. Таврическая-Аврора	211	211	324	379	624	1749	1652	ДДТН цепей Советско-Соснинская-НВГРЭС220
	Откл. НВГРЭС500-Парабель	150	150	134	160	314	908	811	ДДТН цепей Советско-Соснинская-НВГРЭС220

Примечание: 5 – ВЛ 500 кВ НВГРЭС500 – Парабель.

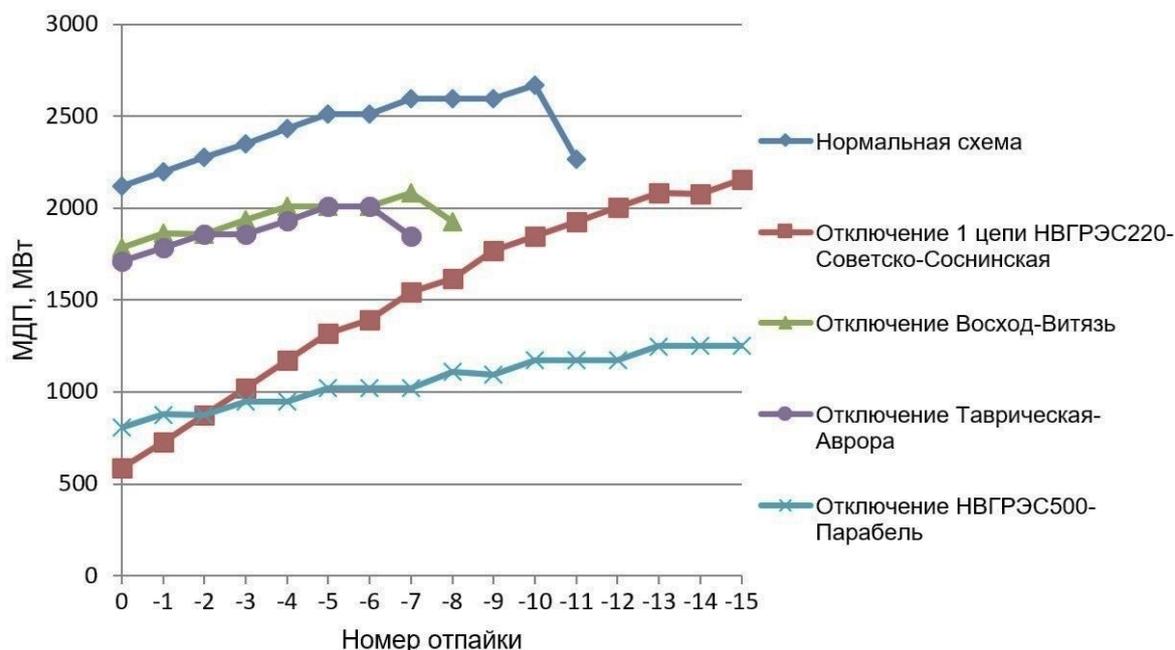


Рис. 4. Эффективность фазоворотного трансформатора в нормальной и послеаварийных схемах усиленного транзита

Fig. 4. Efficiency of the phase shifting transformer in normal and post-emergency circuits of enhanced transit

Таблица 4. Сводная таблица основных результатов по оценке эффективности фазоворотного трансформатора для повышения пропускной способности межсистемной электропередачи

Table 4. Summary table of key evaluation results of phase shifting transformer efficiency to increase the capability of intersystem power transmission

Режим транзита 220 кВ	Схема	Максимально допустимый переток					Примечание
		без ФПТ	с ФПТ		повышение МДП %	повышение МДП по отношению к разомкнутому режиму %	
			МВт	МВт			
Замкнут	Нормальная	723	1236	-15	71	44	переток в Сибирь
	Откл. Советско-Соснинская-НВГРЭС220 (1 цепь)	-38	445	-15	-	-	переток в Сибирь, транзит разомкнуть
	Откл. Восход-Витязь	659	967	-15	47	40	переток в Сибирь, транзит разомкнуть
	Откл. Таврическая-Аврора	659	967	-15	47	54	переток в Сибирь
	Нормальная	-671	-907	15	35	4	переток на Урал
	Откл. Советско-Соснинская-НВГРЭС220 (1 цепь)	-671	-907	15	35	4	переток на Урал
	Откл. Восход-Витязь	-528	-758	15	44	-7	переток на Урал
	Откл. Таврическая-Аврора	-491	-690	15	41	-6	переток на Урал
Замкнут, усилен	Нормальная	1971	2669	-10	35	39	переток в Сибирь
	Откл. Советско-Соснинская-НВГРЭС220 (1 цепь)	513	2157	-15	-	13	переток в Сибирь, транзит разомкнуть
	Откл. Восход-Витязь	1731	2085	-7	20	19	переток в Сибирь
	Откл. Таврическая-Аврора	1652	2008	-6	22	21	переток в Сибирь
	Откл. Парабель-НВГРЭС500	811	1253	-15	-	11	переток в Сибирь, транзит разомкнуть

Для загрузки ВЛ 500 кВ был применен ФПТ. Путем регулирования отпаек ФПТ удалось обеспечить перераспределение потоков мощности, разгружая транзит 220 кВ и загружая транзитные ВЛ 500 кВ. Результаты исследований МДП сечения ОЭС Урала – ОЭС Сибири при изменении отпаек ФПТ приведены на рис. 4.

В рассмотренных режимах основной причиной ограничения МДП была токовая перегрузка цепей НВГРЭС220–Советско-Соснинская. Только при крайних из рассчитанных отпаек ФПТ для нормальной и послеаварийных схем, связанных с отключением ВЛ 500 кВ Восход–Витязь и Таврическая–Аврора, ограничивающим фактором МДП стала статическая устойчивость.

По результатам проведенных исследований была составлена сводная таблица по оценке эффективности ФПТ для повышения пропускной способности межсистемной электропередачи (табл. 4). Анализ приведенных результатов исследования позволил сделать выводы, которые приведены в заключении.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенные исследования выявили одно из мест целесообразной установки ФПТ

для повышения пропускной способности электропередачи – транзит 220 кВ Нижневартовская ГРЭС – Томская. Применение ФПТ обеспечило принципиальную возможность работы транзита 220 кВ в замкнутом режиме, что повысило надежность электропитания региона. При этом повышение пропускной способности для рассматриваемого сечения составило 35...71%.

2. Предложен вариант усиления транзита 220 кВ путем строительства параллельной линии 500 кВ. Для этого варианта выполнены аналогичные расчеты по определению МДП для нормальной и послеаварийных схем. Эффект повышения пропускной способности этого варианта составил 20...35%.

3. Показана эффективность применения ФПТ для повышения пропускной способности сечения ОЭС Урала – ОЭС Сибири по отношению к разомкнутому режиму работы транзита 220 кВ. Даны рекомендации по предпочтительному использованию разомкнутого режима транзита.

4. Выявлено, что определяющим фактором, ограничивающим МДП в сечении ОЭС Урала – ОЭС Сибири при замыкании транзита 220 кВ в обычном и усиленном варианте является токовая перегрузка головных участков.

## Список источников

1. Бушуев В.В., Калужный А.Х., Кречмер Л.В., Шушуев А.А. Применение фазоповоротных устройств для упрощения потокораспределения в энергосистемах // Электричество. 1990. № 11. С. 6–11.
2. Кочкин В.И., Шакарян Ю.Г. Режимы работы управляемых линий электропередачи // Электричество. 1997. № 9. С. 3–8.
3. Verboomen J., Hertem D., Schavemaker P.H., Kling W.L., Belmans R. Phase shifting transformers: principles and applications // International Conference on Future Power Systems. 2005. <https://doi.org/10.1109/FPS.2005.204302>.
4. Hingorani N.G., Gyugui L. Understanding facts: concepts and technology of flexible ac transmission systems // The Institute of Electrical and Electronics Engineers. Wiley-IEEE Press, 2004. 464 p.
5. Мисриханов М.Ш., Ситников В.Ф., Хвоцинская З.Г. Разработка рекомендаций по применению устройств FACTS на межсистемных связях ОЭС Урала, Средней Волги и Центра // Вестник ИГЭУ. 2005. № 6. С. 32–36.
6. Добрусин Л.А. Проблемы энергоэффективности и энергосбережения в России. Информационно-аналитический обзор. Часть III. Тенденции применения фазоповоротных трансформаторов в электроэнергетике // Силовая электроника. 2012. № 4. С. 60–66.
7. Брилинский А.С., Крицкий В.А., Смирнова Л.С. Особенности применения фазоповоротных комплексов в электроэнергетических системах // Известия НТЦ Единой Энергетической системы. 2018. № 1. С. 6–10.
8. Крицкий В.А., Евдокунин Г.А., Брилинский А.С., Смирнова Л.С. Применение фазоповоротного трансформатора в схеме выдачи мощности Волжской ГЭС // Электрические станции. 2018. № 12. С. 26–30.
9. Брилинский А.С., Евдокунин Г.А., Крицкий В.А., Матвиенков Ю.В., Сидельников А.П., Смирнова Л.С. Фазоповоротный трансформатор в схеме выдачи мощности крупной гидроэлектростанции // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2019. № 1. С. 6–14.
10. Акимов Д.А., Коровкин Н.В., Одинцов М.В., Фролов О.В. Методика выбора мест установки и параметров фазоповоротных трансформаторов в электрических сетях // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2016. № 1. С. 6–19.
11. Wolfram M., Marten A-K., Westermann D. A comparative study of evolutionary algorithms for phase shifting transformer

- setting optimization // IEEE International Energy Conference. 2016. <https://doi.org/10.1109/ENERGYCON.2016.7514056>.
12. Rezvanfar R, Ghasemi H, Mosayebian M.E, Ghomi M, Silva F.M.F., Bak C.L. Optimal placement of phase shifting transformers based on MADM method: the considering system performance indices // CIGRE Symposium Aalborg (Aalborg, 4–7 June 2019). Aalborg, 2019. Session 4 (C1). P. 068.
13. Thatarad S., Kiatiyuth K. Load alleviation in transmission system by using phase shifting transformer // International Electrical Engineering Congress (Krabi, 7–9 March 2018). Krabi: IEEE, 2018. P. 60–70. <https://doi.org/10.1109/IEECON.2018.8712121>.
14. Morrell T.J., Eggebraaten J.G. Applications for phase-shifting transformers in rural power systems // IEEE Rural Electric Power Conference (Bloomington, 28 April – 1 May 2019). Bloomington: IEEE, 2019. P. 70–74. <https://doi.org/10.1109/REPC.2019.00020>.
15. Рахманов Н.Р., Ильясов О.В., Гулиев Г.Б. Применение регулирования фазового угла напряжения в энергосистеме с неравномерно загруженной питающей сетью // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: вып. 71. Надежность энергоснабжения потребителей в условиях их цифровизации: в 3-х т. / отв. ред. Н.И. Воропай. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2020. Т. 2. С. 350–360.
16. Li Feng, Yu Mengze, Li Zuohong, Yuan Jiaxin, Mei Jiajun, Yang Xinyi, et al. Engineering Application Evaluation of Phase Shifting Transformer in Guangdong Power Grid // Conference Proceedings of 2021 International Joint Conference on Energy, Electrical and Power Engineering. Lecture Notes in Electrical Engineering. Singapore: Springer, 2022. Vol. 916. P. 111–117. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-3171-0\\_10](https://doi.org/10.1007/978-981-19-3171-0_10).
17. Воденников Д.А. Применение фазоповоротного устройства для увеличения пропускной способности электрической сети // Вестник МЭИ. 2020. № 3. С. 75–80. <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2020-3-75-80>.
18. Шойко В.П., Духанина К.В. Оценка эффективности применения фазоповоротного трансформатора для повышения пропускной способности электропередачи с учетом режима прилегающей сети // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 3. С. 369–379. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-369-379>.
19. Стельмаков В.Н., Жмуров В.П., Тарасов А.Н., Гринштейн Б.И., Тузлукова Е.В. Фазоповоротные устройства с тиристорным управлением // Энергетик. 2010. № 8. С. 20–23.
20. Ремизевич Т., Рашитов П. Особенности управления полупроводниковым ФПУ со средней точкой // Силовая Электроника. 2011. № 1. С. 78–82.

## References

1. Bushuev V.V., Kalyuzhny A.Kh., Krechmer L.V., Shushuev A.A. The use of phase-shifting devices to simplify flow distribution in power systems. *Elektrichestvo*. 1990;11:6-11. (In Russ.).
2. Kochkin V.I., Shakaryan Yu.G. Operating condition of controlled power transmission lines. *Elektrichestvo*. 1997;9:3-8. (In Russ.).
3. Verboomen J., Hertem D., Schavemaker P.H., Kling W.L., Belmans R. Phase shifting transformers: principles and applications. In: *International Conference on Future Power Systems*. 2005. <https://doi.org/10.1109/FPS.2005.204302>.
4. Hingorani N.G., Gyugui L. Understanding facts: concepts and technology of flexible AC transmission systems. In: *The Institute of Electrical and Electronics Engineers*. Wiley-IEEE Press; 2004, 464 p.
5. Misrikhanov M.Sh., Sitnikov V.F., Khvoshchinskaya Z.G. Developing recommendations for the use of FACTS devices on intersystem interconnections of the Ural, Middle Volga and Central UPS. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta = Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*. 2005;6:32-36. (In Russ.).
6. Dobrusin L.A. Problems of energy efficiency and energy saving in Russia. Information and analytical review. Part III. Application trends of phase-shifting transformers in electric power industry. *Silovaya elektronika*. 2012;4:60-66. (In Russ.).
7. Brilinskii A.S., Kritskii V.A., Smirnova L.S. Application features of phase-shifting complexes in electric power systems. *Izvestiya NTC Edinoj energeticheskoy sistemi = STC of Unified Power System Proceedings*. 2018;1:6-10. (In Russ.).
8. Kritskii V.A., Evdokunin G.A., Brilinskii A.S., Smirnova L.S. Using phase-shifting transformer in the power evacuation system of Volzhskaya HPP. *Elektricheskie stantsii = Power Technology and Engineering*. 2018;12:26-30. (In Russ.).
9. Brilinskiy A.S., Evdokunin G.A., Kritskiy V.A., Matvienkov Yu. V., Sidelnikov A.P., Smirnova L.S. Phase-shifting transformer for power distribution scheme of large hydroelectric power plant. *Izvestiya Nauchno-tekhnicheskogo centra Edinoj energeticheskoy sistemy*. 2019;1:6-14. (In Russ.).
10. Akimov D.A., Korovkin N.V., Odintsov M.V., Frolov O.V. The method of choosing the placement and parameters of phase-shifting transformers. *Izvestiya Nauchno-tekhnicheskogo centra Edinoj energeticheskoy sistemy*. 2016;1:6-19. (In Russ.).
11. Wolfram M., Marten A-K., Westermann D. A comparative study of evolutionary algorithms for phase shifting transformer setting optimization. In: *IEEE International Energy Conference*. 2016. <https://doi.org/10.1109/ENERGYCON.2016.7514056>.
12. Rezvanfar R, Ghasemi H, Mosayebian M.E, Ghomi M, Silva F.M.F., Bak C.L. Optimal placement of phase shifting transformers based on MADM method: the considering system performance indices. In: *CIGRE Symposium Aalborg*. 4–7th June 2019, Aalborg. Aalborg, 2019;4(C1):068.
13. Thatarad S., Kiatiyuth K. Load alleviation in transmission system by using phase shifting transformer. In: *International Electrical Engineering Congress*. 7–9 March 2018, Krabi. Krabi: IEEE; 2018, p. 60-70. <https://doi.org/10.1109/IEECON.2018.8712121>.
14. Morrell T.J., Eggebraaten J.G. Applications for phase-shifting transformers in rural power systems. In: *IEEE Rural Electric Power Conference*. 28 April – 1 May 2019, Bloomington. Bloomington: IEEE; 2019, p. 70-74. <https://doi.org/10.1109/REPC.2019.00020>.

15. Rakhmanov N.R., Il'yasov O.V., Guliev G.B. Application of voltage phase angle control in a power system with an unevenly loaded power supply network. In: Voropaj N.I. (eds.). *Methodical issues of studying large energy system reliability: no. 71. Reliability of energy supply to consumers in terms of their digitalization*. Irkutsk: Melentiev Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2020, vol. 2, p. 350-360. (In Russ.).
16. Li Feng, Yu Mengze, Li Zuohong, Yuan Jiaxin, Mei Jiajun, Yang Xinyi, et al. Engineering application evaluation of phase shifting transformer in Guangdong power grid. In: *Conference Proceedings of 2021 International Joint Conference on Energy, Electrical and Power Engineering. Lecture Notes in Electrical Engineering*. Singapore: Springer; 2022, vol. 916, p. 111-117. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-3171-0\\_10](https://doi.org/10.1007/978-981-19-3171-0_10).
17. Vodennikov D.A. Application of a phase-shifting device to increase the electrical network throughput rate. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta = Bulletin of MPEI*. 2020;3:75-80. <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2020-3-75-80>. (In Russ.). <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2020-3-75-80>.
18. Shoiko V.P., Dukhanina K.V. Use of a phase shifting transformer for increasing the power transmission capability, taking into account the mode of the adjacent network. *iPolytech Journal*. 2021;25(3):369-379. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-369-379>.
19. Stelmakov V.N., Zhmurov V.P., Tarasov A.N., Grinshtein B.I., Tuzlukova E.V. Phase shifting devices with a thyristor control. *Energetik*. 2010;8:20-23. (In Russ.).
20. Remizevich T., Rashitov P. Control features of a semiconductor phase shifting devices with a midpoint. *Silovaya Elektronika = Power Electronics*. 2011;1:78-82. (In Russ.).

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

##### Шойко Владимир Петрович,

к.т.н., доцент,  
доцент кафедры «Автоматизированные  
электроэнергетические системы»,  
Новосибирский государственный технический  
университет,  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Россия  
✉ shoiko@ngs.ru  
<https://orcid.org/0009-0003-6709-6043>

##### Бутакова Анастасия Михайловна,

магистрант,  
Новосибирский государственный технический  
университет,  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Россия  
anastasia.butakova98@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 09.02.2023; одобрена  
после рецензирования 24.03.2023; принята к публи-  
кации 02.05.2023.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

##### Vladimir P. Shoiko,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of  
Automated Electric Power Systems,  
Novosibirsk State Technical University,  
20, K. Marks pr., Novosibirsk 630073, Russia  
✉ shoiko@ngs.ru  
<https://orcid.org/0009-0003-6709-6043>

##### Anastasia M. Butakova,

Master's Degree Student,  
Novosibirsk State Technical University,  
20, K. Marks pr., Novosibirsk 630073, Russia  
anastasia.butakova98@mail.ru

##### Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

##### Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

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

##### Information about the article

The article was submitted 09.02.2023; approved after  
reviewing 24.03.2023; accepted for publication  
02.05.2023.



Обзорная статья

УДК 669-1/66.046.4/66.067:069/66.061/66.08/66099

<https://elibrary.ru/iloypl><https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-392-421>

## Методы удаления хлорид-ионов при производстве цинка из пыли электродуговой плавки

Д.И. Блудова<sup>1✉</sup>, С.В. Мамяченков<sup>2</sup>, О.С. Анисимова<sup>3</sup>

<sup>1-3</sup>Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
г. Екатеринбург, Россия

**Резюме.** Цель – провести обзор литературных источников с целью поиска технологии, применимой на практике для производства катодного цинка из сложного по химическому составу техногенного хлорсодержащего сырья, в частности, из пыли электродуговой плавки. На основе литературного обзора опубликованных данных исследований российских и зарубежных ученых проведен поиск методов очистки технологических растворов с высокой концентрацией хлорид-ионов, полученных в результате гидрометаллургической обработки техногенных пылей электродуговой плавки. Показано, что большинство способов очистки имеют существенные ограничения, основные из которых: строгие требования к кислотности обрабатываемого раствора, недостаточная эффективность процесса обработки, вторичное загрязнение среды освобождаемыми хлорид-ионами и высокая стоимость реагентов или оборудования. По результатам анализа опубликованных данных описаны как способы снижения содержания хлора в исходной пыли, поступающей на переработку, так и методы дехлорирования технологических растворов, основанные на принципах осаждения, ионного обмена, сорбции и окисления. Дополнительно обобщены опубликованные данные и проанализированы экспериментальные результаты по удалению хлора из технологических стоков и растворов различной природы. В результате проведенного анализа литературных источников проведено сравнение применяющихся на промышленных предприятиях и недавно изученных лабораторных методов дехлорирования растворов с точки зрения доступности их для внедрения, экономической эффективности и степени удаления хлорид-ионов. Как результат, недостатки существующих процессов переработки техногенного хлорсодержащего сырья электродуговой плавки может решить разработка крупномасштабных, устойчивых и недорогих гибридных технологий, базирующихся на принципах экстракции, ионного обмена и осаждения.

**Ключевые слова:** пыль электродуговой плавки, цинк, хлорид-ион, метод очистки, дехлорирование, электролит

**Для цитирования:** Блудова Д.И., Мамяченков С.В., Анисимова О.С. Методы удаления хлорид-ионов при производстве цинка из пыли электродуговой плавки // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 2. С. 392–421. EDN: ILOYPL, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-392-421>.

### METALLURGY

Review article

## Methods for removing chloride ions to manufacture zinc from arc melting dust

Dana I. Bludova<sup>1✉</sup>, Sergey V. Mamyachenkov<sup>2</sup>, Olga S. Anisimova<sup>3</sup>

<sup>1-3</sup>Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

**Abstract.** In this work, we review literature sources to identify an industrial-scale technology for manufacturing cathode zinc from technogenic chlorine-containing raw materials of a complex chemical composition, in particular, from arc melting dust. The conducted review of Russian and foreign publications was used to search for a method of purifying

© Блудова Д.И., Мамяченков С.В., Анисимова О.С., 2023

process solutions with a high concentration of chloride ions produced by hydrometallurgical processing of technogenic arc melting dusts. It was found that the existing purification methods are associated with substantial limitations, including strict requirements for the acidity of the treated solution, low efficiency of treatment, secondary contamination of the medium by released chloride ions, and the high cost of reagents or equipment. Approaches to reducing the chlorine content in the initial dust and dechlorination of process solutions based on principles of sedimentation, ion exchange, sorption, and oxidation are described. In addition, we analyzed information published on chlorine removal from process effluents and solutions of various nature. Industrially-implemented and recently-reported laboratory methods of solution dechlorination were compared in terms of their feasibility, economic efficiency, and extent of chloride ion removal. It was concluded that the disadvantages of existing methods for processing technogenic chlorine-containing raw materials of arc melting can be eliminated by developing large, stable, and cheap hydride technologies based on principles of extraction, ion exchange, and sedimentation.

**Keywords:** electric arc furnace dust, zinc, chloride ion, purification method, dechlorination, electrolyte

**For citation:** Bludova D.I., Mamyachenkov S.V., Anisimova O.S. Methods for removing chloride ions to manufacture zinc from arc melting dust. *iPolytech Journal*. 2023;27(2):392-421. (In Russ.). EDN: ILOYPL, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-392-421>.

## ВВЕДЕНИЕ

Пыли сталеплавильного производства, а именно пыли электродуговой плавки (ЭДП), являются важным сырьем для цветной металлургии, наибольший интерес представляет содержание в них цинка. Состав пылей различается в зависимости от параметров процесса и состава исходного сырья. Диапазон содержания цинка в пылях ЭДП достаточно широк, колеблется от 2 до 25%, в некоторых случаях содержание цинка достигает 40% [1].

Согласно данным, полученным от компаний-производителей цинка [2, 3], большое количество цинксодержащих отходов, и в частности пыли, нельзя утилизировать из-за большого количества хлоридов, содержащихся в этих материалах. Установлено, что пыль электросталеплавильного производства на 90% состоит из оксидов, остальные 10% представлены ферритами, сульфатами, сульфидами, хлоридами. Последние в пыли ЭДП включают хлориды натрия (NaCl) и калия (KCl), а также хлориды цинка и свинца [4].

Такие вторичные материалы, как пыли ЭДП, отличаются высоким содержанием галогенидов из-за присутствующих в сырье плавки хлор- и фторорганических соединений (в виде полимерных изделий, лома с лакокрасочными покрытиями и др.). Наличие хлорида потенциально вызывает выбросы диоксинов/фуранов [5] вследствие образования опасных Cl-соединений, таких как полихлорированные дибензо-диоксины, полихлорированные дибензофураны и гекса-

хлорбензол (ГХБ) [6]. При нагреве пыли цинк реагирует с солями, дополнительно образуя хлорид  $ZnCl_2$ , который имеет высокое давление пара и улетучивается при низкой температуре [7]. Хлор в пыли относится к загрязнителям воздуха, поскольку система газоочистки улавливает только 70% отходящего в ЭДП газа, а остальное в виде выбросов переходит в атмосферу [8].

После переработки пыли ЭДП вельц-процессом в обогащенном цинком продукте легко возгоняемые галогениды концентрируются. Содержание хлоридов в возгонах после вельцевания пыли составляет до 10% [9].

Для переработки таких продуктов в промышленности чаще применяются пирометаллургические технологии. Однако конечным продуктом в этом случае является загрязненный оксид цинка, имеющий меньшую ценность в сравнении с металлическим цинком. Кроме того, данная пыль ЭДП с высоким содержанием хлоридов при последующей термической обработке вызывает проблемы на предприятиях по переработке вторичного сырья: пониженное содержание ценного оксида цинка, которому требуется дальнейшее дехлорирование; угроза выбросов диоксинов; высокотемпературная коррозия воздухопроводов систем контроля качества воздуха и трудность фильтрации хлоридов металлов в процессе промывки сырого оксида цинка.

Наименее изученными, но при этом более перспективными, экологичными и гибкими, то есть позволяющими легко варьировать параметры и перерабатывать сырье с изменя-

ющимся составом, являются гидрометаллургические процессы. В настоящее время до 90% металлического цинка в мире производится электрохимическим методом. Для успешного протекания процесса в цинковом производстве необходимо подбирать растворитель, максимально селективный по цинку, тогда полученные растворы будут пригодны для электрохимической переработки.

Одним из самых распространенных растворителей, используемых как в первичной, так и вторичной гидрометаллургии, является серная кислота. Сернокислотное выщелачивание изучено, достаточно разработано и позволяет получать электролит, пригодный для дальнейшего получения катодного цинка. Однако вовлечение в переработку техногенного цинкосодержащего сырья вызывает накопление нежелательных примесей в цинковых электролитах [10].

Гидрометаллургические процессы изначально сильно зависят от химического состава пылей ЭДП. Если цинк в них находится в виде  $ZnO$ , то ожидаемы высокие показатели извлечения цинка. В том случае, когда основным компонентом пыли ЭДП является феррит цинка, возможность достижения большой степени перехода цинка в раствор является проблематичной даже при высоких концентрациях кислоты и температуре.

Известны способы переработки пыли в растворах щелочей [11] с использованием в качестве реагента  $NaOH$ . Этот способ является селективным по отношению к цинку и в дальнейшем позволяет получать металлический цинк. В статье [12] описаны способы переработки пылей черной металлургии. Щелочная технология (Sebedeu Process) включает гидрометаллургическую (щелочное выщелачивание + цементация) и электрохимическую (щелочной электролиз) стадии. Недостатки щелочного выщелачивания не позволяют обеспечить его широкое внедрение: слабая адаптация к изменению содержания примесей в пыли ЭДП, особенно кремния и галогенидов. Поэтому требуется предварительная обработка пылей ЭДП без извлечения цинка в возгоны, с разрушением ферритов и удалением галогенидов.

В последнее время большой интерес вы-

зывает выщелачивание растворами аммиачных солей, таких как  $NH_4Cl$ ,  $(NH_4)_2SO_4$ ,  $(NH_4)_2CO_3$ . Авторам известна технология Anaconoz, в которой выщелачивание происходит в растворах карбоната аммония и далее из раствора проводят электроэкстракцию цинка. Наиболее известна технология EZINEX, где выщелачивание ведут аммонийно-хлоридными растворами с электролизом как последней стадией – с получением компактного цинка. Аммиачные растворы являются селективными по цинку, менее агрессивными и более экологичными.

Трудность создания «универсальной» технологии переработки пыли ЭДП вызвана неоднородностью ее химического и минералогического состава. Каждая технология должна быть адаптирована к составу конкретной пыли [13].

В целом существуют две основные проблемы гидрометаллургических технологий при переработке пылей ЭДП:

- 1) присутствие цинка в форме труднорастворимого соединения – феррита цинка;
- 2) наличие в растворах ионов галогенидов, в частности ионов хлора, которые затрудняют дальнейшую переработку.

Феррит цинка может быть разрушен при использовании комбинации высоких концентраций кислоты и температуры, либо при проведении предварительной обработки материала – прокалики. При прокаливании цинк переходит в растворимую оксидную фазу, что позволяет провести выщелачивание практически любым пригодным для электроэкстракции растворителем. Однако когда в качестве одного из сырьевых материалов для производства металлического цинка используются пыли, некоторые примеси, в частности галогениды, ограничивают его использование на стадии выщелачивания в промышленном электролитическом процессе. Наносимый хлорид-ионами вред – проблема, известная всем цинковым заводам.

## **ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Значительное содержание ценных компонентов, особенно цинка, комплексный состав и наличие галогенидных примесей в пыли ЭДП делает ее ценным, и в то же время

сложным для переработки сырьем. Учитывая тот факт, что высокие концентрации хлоридов в цинковых электролитах приводят к значительному ускорению износа электродов, снижению выходного тока и коррозии оборудования, максимально допустимый предел хлорида в процессе производства цинка составляет менее 150 мг/дм<sup>3</sup>. Компании-производители цинка постоянно ведут поиски метода, который может снизить высокое содержание хлора в растворах до допустимой концентрации. Исследователями на различных хлорсодержащих материалах проверяются десятки теорий. Настоящий обзор проведен с целью поиска технологии, практически применимой для производства катодного цинка из пыли ЭДП как сложного вторичного хлорсодержащего сырья.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проблема хлорид-ионов при электролитическом производстве цинка в основном вызвана двумя явлениями: во-первых, присутствием хлора в продуктивном растворе, который приводит к коррозии свинцового анода в электролизерах по реакции (1); во-вторых, частичное растворение свинца и переход его в раствор заканчиваются восстановлением и осаждением цинка на катоде, что также пагубно сказывается на качестве производимого цинкового листа:



Ионы хлора могут проникать в структуру двойного электрического слоя на катоде, изменяя его и влияя на формирование кристаллической структуры цинкового осадка. Стандартный потенциал разряда хлорид-иона равен 1,359 В, а потенциал анода при электролитическом осаждении цинка – около 2 В, поэтому хлорид-ион разряжается с образованием молекулярного хлора, который растворяется в цинковом электролите и снижает выход цинка по току цинка<sup>4</sup> [14]. Многолетняя практика электроосаждения цинка в завод-

ских условиях позволила установить максимально допустимое содержание примеси хлорида в сульфатном электролите 150–250 мг/дм<sup>3</sup>:

При значительном содержании хлорида в растворе, он выделяется в атмосферу цеха в газообразном виде, что нарушает экологические нормы безопасности на рабочем месте.

Уровень примесей, а также качество металлургического цинка определяют цену цинкового слитка на рынке. Наиболее важным фактором, приводящим к снижению содержания цинка в товарном продукте, является содержание свинца, вызванное присутствием хлорид-анионов в растворе.

## ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ДЕХЛОРИРОВАНИЕ ПЫЛИ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ПЛАВКИ

**Промывка.** Процесс промывки водой зачастую применяют в качестве предварительного этапа перед переработкой цинкосодержащих отходов для удаления водорастворимых хлоридов.

Среди ранних исследований этой темы стоит отметить [15], проводившие дехлорирование цинковых дроссов. Цинк, присутствующий в дроссах, состоит в основном из оксидов, оксихлоридов, хлоридов и металлических форм. Средний анализ дросса показал среднее содержание, %: Zn – 79–83; Cl – 1,0–2,5; Pb – 0,02–0,07; Cd – 0,002–0,007. Было обнаружено, что можно удалить около 80% хлора из дроссов, уменьшив содержание хлора в них с 1,4% приблизительно до 0,2–0,3%, стандартной промывкой дистиллированной водой при 95°C в течение часа и при подходящем соотношении твердой и жидкой фаз 1:2–1:10. Использование карбоната натрия для удаления хлора в испытанных условиях не давало никаких преимуществ. При промывке его стехиометрическим количеством карбоната натрия при 60°C в течение получаса и при соотношении твердой и жидкой фаз в пределах 1:2–1:10 содержание хлора снижается до того же уровня.

В дальнейшем ученые неоднократно при-

<sup>4</sup>Кляйн С.Э., Козлов П.А., Набойченко С.С. Извлечение цинка из рудного сырья: учеб. пособ. Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2009. 492 с.

меняли промывку для удаления растворимых хлоридов к другим видам отходов. Например, в исследованиях [16] предварительно обрабатывали цинксодержащую золу уноса водой и дополнительно усовершенствовали процесс, добавив дитиокарбаминовый хелат в раствор для предотвращения выщелачивания тяжелых металлов. Результаты показали снижение содержания хлоридов до 1,28%, а полученный химический состав золы уноса соответствовал золе уноса класса С.

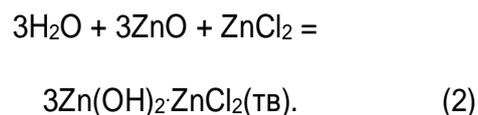
Промывку в том или ином виде как часть комбинированной обработки часто применяют для снижения содержания хлоридов в пыли ЭДП. Так, авторы [17] перед выщелачиванием пыли карбонатом аммония, чтобы избежать загрязнения хлорид-ионами конечного продукта, использовали воду с 30%-м содержанием твердого вещества, продолжительность контакта составляла 1 ч, температура – 20°C. Упомянулось, что в случаях использования HNO<sub>3</sub> в качестве выщелачивающего агента пыль ЭДП сначала обрабатывают водой для удаления хлоридов, а затем подвергают выщелачиванию раствором азотной кислоты, где железо осаждается из раствора. Цинк извлекают в итоге ступенчатой обработки добавлением комплексообразователей [18].

Добавка соды на стадии промывки не увеличивает степень дехлорирования, как и замена соды известью, что применяется для снижения операционных расходов.

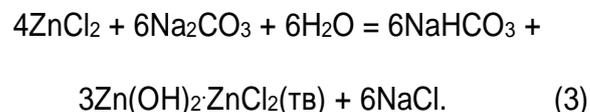
На Челябинском цинковом заводе (ЧЦЗ) исследовали промывку вельц-возгонов от хлора [19]. Определили, что степень дехлорирования от равновесного значения рН пульпы и температуры, поскольку растворимость хлорида цинка при 10°C составляет 272 г/100 г воды и при 80°C – 541 г/100 г воды. При оптимальных условиях Ж:Т = 6:1, температуре 70–80°C, рН = 6,7–6,8 и продолжительности процесса 30–60 мин полнота дехлорирования составила 70%, а остаточное содержание хлора в материале – 0,05–0,06%.

В этом интервале рН и температуры возможно протекание гидролиза цинка, при котором осаждаются основные соли типа 3Zn(OH)<sub>2</sub>ZnSO<sub>4</sub> и 3Zn(OH)<sub>2</sub>ZnCl<sub>2</sub>.

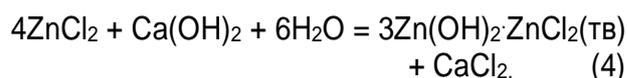
При водной промывке:



При водно-содовой промывке:



При водно-известковой промывке:



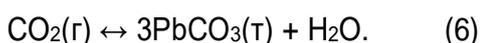
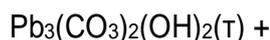
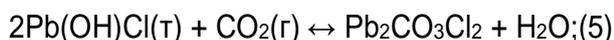
Указанный механизм подтвердили результаты экспериментов: при увеличении температуры от 80 до 90°C содержание сульфатов в фильтрате снизилось на 25%, а хлоридов – на 10,5%.

При хранении пыль может вступать в реакцию с влагой и углекислым газом в атмосфере. Этот естественный процесс выветривания преобразует выщелачиваемый хлорид в нерастворимую минеральную фазу. В публикации [20] описано, что коллектив авторов анализировал процесс выветривания для понимания фазового превращения в системе Pb–Cl–H<sub>2</sub>O–CO<sub>2</sub>.

Промывка дистиллированной водой в качестве растворителя при соотношении жидкой к твердой фазе 10:1 в течение 40 мин показала, что общий уровень хлоридов в пыли был снижен с 70200 мг/кг до 17 500 мг/кг, что соответствует эффективности удаления 75%. На удаление растворимых хлоридов значительное влияние оказывала температура процесса: эксперименты при 80°C приводят к быстрому высвобождению хлоридов в отличие от выщелачивания при температуре окружающей среды. Общая эффективность удаления хлоридов составила 88%.

Нерастворимые в воде матрицы были представлены гидроксилгалогенидом свинца (PbOHCl) и карбонатом хлорида свинца (Pb<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>Cl<sub>2</sub>), их наличие делает гидрометаллургическую обработку более сложной и неэффективной. Под действием различных

природных процессов выветривания и условий окружающей среды первоначальный состав пыли ЭДП преобразуется в новые минеральные межфазные слои. Авторы выяснили, что достаточно однодневного выветривания, чтобы полностью проявилась фаза  $Pb(OH)Cl$ . Было высказано предположение, что к его образованию приводит гидролиз хлорида свинца и оксида свинца влагой согласно реакциям:



Таким образом, если в пыли ЭДП присутствует достаточное количество углекислого газа и влаги, они способны резко изменить химизм образования соединений свинца. При этом могут присутствовать фазы карбоната хлорида свинца ( $Pb_2CO_3Cl_2$ ) и гидроцеруссита ( $Pb_3(CO_3)_2(OH)_2$ ). Данный результат был подтвержден минералогическим анализом. После 4-х сут выветривания новообразованные фазы достигали уровня равновесия.

Промывка водой подходит для удаления всех видов хлоридов металлов, таких как хлориды калия, натрия, свинца и цинка, из свежей пыли ЭДП. Однако когда начинается процесс выветривания пыли, удаление хлорида гидроксида цинка, хлорида гидроксида свинца и карбонатов хлорида свинца значительно затрудняется. При переработке отходов рекомендуется наладить логистическую схему таким образом, чтобы вводить свежую пыль ЭДП непосредственно в процесс промывки.

**Обжиг.** В процессе обжига до 70% хлорида из цинксодержащего сырья попадает в отходящий газ в виде соединений, имеющих низкие температуры кипения, а остальная часть на стадиях последующей обработки переходит в цинковый раствор.

В случае, когда анализ минеральных фаз показывает присутствие в пыли нерастворимых хлоридов, не поддающихся промывке, можно использовать обжиг с диоксидом углерода при  $600^\circ C$  с последующей промывкой

водой, чтобы избежать образования нерастворимых соединений свинца и цинка, а также повысить степень дехлорирования пыли ЭДП.

Хлориды легко возгоняются и обычно поддаются удалению из дисперсного материала термической обработкой. Однако обжиг при температуре выше  $600^\circ C$  приводит к потере большого количества рециркулируемого металла и снижает коммерческую ценность товарного оксида цинка.

В работе [20] также определяли оптимальные параметры тепловой обработки пыли для ее дехлорирования обжигом на воздухе и при сульфатирующем/карбонизирующем обжиге при температурах 200, 300, 400 и  $600^\circ C$ . Выяснили, что содержание хлоридов в обожженной пыли снижалось с повышением температуры. Для удаления хлоридов наименее эффективным оказался метод обжига на воздухе. Сульфатирующий обжиг при  $600^\circ C$  позволил достичь наивысшей эффективности дехлорирования. В этом случае общий уровень хлоридов в обожженной пыли был снижен с 70200 мг/кг до 12100 мг/кг, что соответствует эффективности удаления 83%. В тех же условиях карбонизирующий обжиг снизил общее содержание хлоридов в пыли ЭДП с 70200 мг/кг до 13230 мг/кг, то есть показал эффективность удаления 81%.

Однако при внедрении процесса стоит иметь в виду, что предварительный обжиг большого количества пыли ставит вопрос утилизации вторичных возгонов, содержащих более 5% хлорида.

## МЕТОДЫ ДЕХЛОРИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАСТВОРА

В гидрометаллургических технологиях, где раствор является не просто средством транспортировки ценных компонентов, но и основной составляющей химического процесса и одним из продуктов, особенно важно поддерживать необходимые характеристики электролита [21].

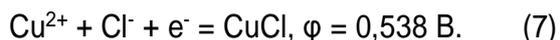
Состав технологического раствора зависит от типа производственного процесса. Сульфатный электролит требует специальной обработки в основном из-за сочетания

высокой концентрации анионов в нем. При верно подобранных технологиях очистки раствор можно повторно использовать в течение нескольких циклов.

Очистка является необходимой процедурой, поскольку кислотное выщелачивание раствора, содержащего хлор, способствует накоплению хлорид-ионов в растворе, и их концентрация постепенно увеличивается [22].

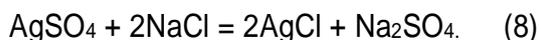
В цинковых электролитах разной кислотности степень удаления ( $\eta\text{Cl}^-$ ) почти стабильна. Согласно известному факту, что  $\text{HCl}$  является очень сильной кислотой ( $\text{pK}_a -6,3$ ), во всех электролитах хлориды существуют в виде диссоциированных ионов  $\text{Cl}^-$ , поэтому очистка цинкового электролита перед электроэкстракцией подразумевает удаление хлорид-ионов.

**Осаждение.** В настоящее время в металлургической промышленности наиболее широко используемым методом удаления  $\text{Cl}^-$  из кислых сточных вод является его осаждение в виде малорастворимого хлорида меди ( $\text{CuCl}$ ), основанное на реакции:



Однако этот метод показывает низкую эффективность удаления  $\text{Cl}^-$  (60–70%), из-за чего остаточная концентрация  $\text{Cl}^-$  ( $> 400 \text{ мг/дм}^3$ ) не удовлетворяет требованиям рециркуляции очищенной кислоты [23–25]. Также к его недостаткам можно отнести продолжительность осаждения  $\text{CuCl}$  (5–6 ч), высокое значение остаточного содержания  $\text{Cu(II)}$ , выше  $2500 \text{ мг/дм}^3$  и использование операций сгущения и фильтрации, что делает эти процессы непроизводительными.

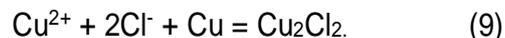
Из методов осаждения наиболее эффективной является очистка от хлора сульфатом серебра в слабокислом растворе согласно реакции взаимодействия:



Получившийся хлорид серебра отфильтровывают, восстанавливают цинковой пылью до металла и нагревают с концентрированной серной кислотой для регенерации

сульфата серебра. Как осаждение солями серебра [26], так и метод  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  [27, 28] обладают высокой эффективностью дехлорирования, но низкой экономией из-за сложности рециркуляции дорогостоящих осадков  $\text{AgCl}$  и  $\text{BiOCl}$ .

На российских цинковых заводах в целях экономии серебра растворы дехлорируют цементационной медью [29]:



Предварительно в хлорсодержащий раствор закачивают отработанный цинковый электролит до достижения концентрации в растворе серной кислоты более  $15\text{--}20 \text{ г/дм}^3$ . Затем вводят раствор медный купорос и медный кек. Отношение массы хлора в растворе к массе меди в загруженном медном кеке и меди в растворе медного купороса составляет  $1:(5\text{--}6):(0,6\text{--}0,8)$ . Операцию проводят при температуре  $50\text{--}60^\circ\text{C}$  в течение 45–60 мин, после очистки концентрация меди в растворе составляет  $2\text{--}3 \text{ г/дм}^3$ , хлорида –  $100\text{--}200 \text{ мг/дм}^3$ .

Осаждение хлорида меди [30, 31] широко используется в промышленном производстве благодаря его высокой эффективности и относительно низкой стоимости из-за доступности медного шлама, выгружаемого из цинкового электролита на стадии очистки. Однако необходимость добавления порошка цинка и  $\text{CuSO}_4$ , а также строгого контроля кислотности и температуры процесса ограничивают применение данного метода.

**Ионный обмен.** Удаление хлоридов из технологических растворов часто осуществляется по механизму ионного обмена с известняком [32, 33]. Этот процесс включает ионный обмен между  $\text{OH}^-$  на поверхности адсорбента и удаленными анионами. Для технологических процессов и очистки сточных вод нередко используется природная известь или известковое молоко [34]. Однако их растворимость слишком мала, чтобы обеспечить достаточное количество ионов кальция до нужной степени дехлорирования.

Ионный обмен [35–37] характеризуется высокими потерями цинка, а также образованием большого количества хлорсодержащих

кислых сточных вод, которые трудно поддаются обработке

**Ионнообменные смолы.** Ионный обмен – еще один потенциальный вариант для селективного удаления определенного вида анионов из раствора, содержащего другие виды анионов. Когда через ионообменную смолу в раствор вводится другой анион,  $\text{Cl}^-$  обменивается с ним и впоследствии удаляется ею. Ионный обмен считается привлекательной технологией для удаления хлорид-, нитрат- и сульфат-ионов ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  и  $\text{SO}_4^{2-}$ ) из водных растворов, поскольку процесс очистки происходит независимо от pH раствора, а сами ионообменные смолы можно регенерировать, что обеспечивает длительный эффективный срок их службы.

В раннем исследовании<sup>5</sup> [38] использование анионообменных смол позволило авторам удалить хлорид-ион из цинкового электролита до концентрации  $\leq 150$  мг/дм<sup>3</sup>. К недостаткам этого метода можно отнести длительность сорбции (1–2 ч) и, что наиболее важно, получение разбавленных (по хлориду) элюатов (1–2 г/дм<sup>3</sup>).

К сожалению, в сульфатных электролитах ионный обмен периодически малоэффективен, поскольку смола имеет гораздо более высокую склонность к ионам с зарядом  $2^-$ , чем к иону  $\text{Cl}^-$  [39].

В публикации [40] авторы привели результаты по изучению удаления анионных частиц с помощью наиболее часто используемых изотерм однокомпонентной адсорбции, т.е. изотерм Ленгмюра, Фрейндлиха и Дубинина-Радушкевича. При этом применяли макропористую смолу с сильным анионитом Amberlite® IRN 9766 (Rohm & Haas, Франция). Структура макропористых смол характеризуется большими порами (диаметр ~ 150 нм для IRN 9766), разделенными сильно сетчатыми участками. Это дает смоле некоторые важные преимущества при ее применении для очистки промышленных водных растворов. Несмотря на то, что общая ионообменная способность макропористых смол

обычно ниже, чем у смол гелевого типа, их структура обеспечивает высокую механическую стойкость и обеспечивает быструю кинетику реакции. Таким образом, они могут использоваться при высоких скоростях потока в колоннах промышленного масштаба без потери эффективности.

Модель Ленгмюра является полуэмпирической и выводится из предположения явления монослойной адсорбции на однородной поверхности. Изотерма Фрейндлиха, в отличие от нее, является эмпирической моделью, не предполагающей максимальной адсорбционной способности сорбента. Помимо трудностей в интерпретации параметров Фрейндлиха модель подвергается критике за отсутствие термодинамической основы и несоответствие закону Генри при низких концентрациях. Несмотря на это, ее способность соответствовать широкому набору экспериментальных данных по-прежнему делает эту модель популярной при изучении явлений адсорбции и ионного обмена. В отличие от моделей Ленгмюра и Фрейндлиха, изотермы Дубинина (модели Дубинина-Радушкевича (D-R) и Дубинина-Астахова (D-A)) рассматривают адсорбцию как процесс с заполнением микропор и зависящий от температуры. Рассчитанные в публикации по модели D-R значения параметра неоднородности  $nD$  показали, что однородность пористой структуры смолы IRN 9766 находится в типичном диапазоне для цеолитов и выше, чем у углеродных материалов, а также что  $nD$  не зависит ни от ионной формы смолы, ни от растворенного вещества, участвующего в ионном обмене.

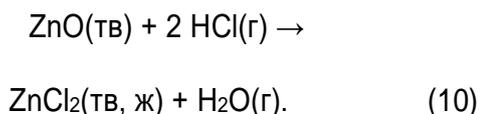
Исходя из результатов исследования, где видно превосходство моделей Дубинина по соответствию экспериментальным данным, наилучшим представлением сорбционных процессов является заполнение объема микропор материала. Кроме того, была доказана высокая способность удалять все проверенные анионные частицы макропористой смолы IRN 9766. Причем для систем  $\text{OH}^-/\text{Cl}^-$ ,

<sup>5</sup>А. с. № 552987, В 01 D 15/04. Способ очистки растворов сульфатов металлов от хлора / В.Б. Пименов, В.Н. Старцев, Ю.И. Павлов, Г.В. Малахов, А.С. Куленов, Г.Л. Пашков, В.В. Яцук, А.Д. Коротин (РФ). № 1969513/26. Заявл. 20.11.73; опублик. 05.04.77. Бюл. № 13.

$\text{OH}^-/\text{NO}_3^-$  и  $\text{OH}^-/\text{SO}_4^{2-}$  энергии адсорбции превышали остальные системы, а экспериментальным данным, полученным для ионообменных систем  $\text{OH}^-/\text{Cl}^-$  и  $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ , лучше всего соответствовала изотерма DA.

**Дехлорирование раствора.** Удаление хлоридов из пыли ЭДП может затруднить явление когерентности нерастворимых в воде веществ. Агглютинирующие вещества, такие как хлорид гидроксида цинка ( $\text{ZnCl}_2 \cdot 4\text{Zn}(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), могут прилипнуть к частицам феррита в пыли, затрудняя ее переработку. Авторы [41] изучали соединения галогенов в пыли ЭДП и парах оксида цинка до и после выщелачивания. Установлено, что в результате реакции  $\text{ZnO}$  с хлорсодержащей солью оксиды металлов, такие как  $\text{ZnO}$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , изолируются от частиц цинка, что способствует извлечению цинка.

В высокотемпературных реакциях хлориды металлов превращаются в газообразные частицы и действуют как сильные катализаторы в синтезе *de novo*. Так, при нагреве пыли в процессе вельцевания либо при обжиге  $\text{ZnO}$  реагирует с  $\text{HCl}$  и образует согласно реакции  $\text{ZnCl}_2$ , который действует как кислота Льюиса:



Исследователи в работе [42] изучали удаление хлоридов из зольного остатка, образующегося из твердых отходов, а также такие параметры, как pH, тип раствора, размер частиц, образование пузырьков и температуру. Результаты, полученные в данной работе Р. Ито с соавторами показали, что эффективным оказалось выщелачивание одним из методов: сильной кислотой или барботированием  $\text{CO}_2$ . Кроме того, скорость удаления хлора также увеличивается за счет применения разбавленной серной кислоты при повышенных температурах.

**Промывка.** Для повышения потенциала рециклинга промышленных отходов, в частности пыли и золы уноса, растет интерес к методам удаления хлорида и сульфата обработкой вторичного сырья различными рас-

творами [43–45]. Как говорилось выше, вода – наиболее популярный раствор для обработки, поскольку она может смыть почти все хлориды в составе пыли, кроме нерастворимых [45].

Для обработки нерастворимых хлоридов растворы следует довести до кислых; поскольку исследования показали, что растворы с повышенной кислотностью могут растворять нерастворимые хлориды, сульфаты и тяжелые металлы лучше, чем вода [41, 46].

Напротив, в исследованиях авторов нескольких работ [42, 43, 45, 46] внимание концентрировалось на использовании либо воды, либо основных растворов для предварительной обработки и удаления хлорида из пыли золы. Однако для этих экспериментов потребовалась дополнительная термообработка, чтобы ускорить прокаливание и исключить выщелачивание тяжелых металлов [43].

В работе [47] для удаления  $\text{Cl}^-$  и  $\text{SO}_4^{2-}$  золу уноса и угольную пыль обрабатывали деионизированной водой, 0,01 М  $\text{HNO}_3$ , 0,1 М  $\text{HNO}_3$ , 0,1 М  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  и 0,25 М  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Добавление кислых растворов не меняет pH обработанного материала, поскольку присутствие  $\text{CaCO}_3$  в пыли действует как буфер. Авторы выяснили, что все применяемые растворы могут удалять  $\text{Cl}^-$  с равной эффективностью. Обнаружено, что содержание растворимых солей, таких как  $\text{NaCl}$  и  $\text{KCl}$ , в пыли значительно уменьшается (<50%). В частности, после обработки деионизированной водой содержание хлоридов в золе снижается с 29,3 до 2,17% масс.

В исследовании [48] изучалось удаление хлоридов из цинксодержащих материалов – промышленных почв и цинковых шлаков, с помощью гидроксида натрия, метабисульфита натрия, сульфата меди(II) и насыщенной кислородом воды. При температуре окружающей среды, росте pH до уровня 4,2 и соотношении  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5 / \text{CuSO}_4 = 1,2$  наилучшая эффективность удаления хлоридов этим методом составляет 57,14% для раствора  $\text{NaCl}$ . При замене гидроксида натрия технической известковой водой желаемых результатов не было достигнуто. Следовательно, этот метод не применим для растворов с разными типа-

ми ионов металлов, но является химическим методом удаления хлорида из раствора NaCl.

**Адсорбция.** Очистка водных растворов от хлоридов адсорбцией не всегда была успешной, несмотря на значительный выбор материалов, опробованных в качестве адсорбентов [49–51]. Известно, что химические соединения, структурно похожие на кальцит, обладают высокими адсорбционными свойствами по отношению к сульфатным и хлоридным ионам. При этом ряд твердых отходов похож по составу на известняк и обладает явно высокой способностью адсорбировать анионы из сточных вод, но при этом получили наименьшее внимание исследователей [52].

В работе [53] опробовался новый подход к удалению ионов сульфата и хлорида из щелочной технологической воды. В качестве адсорбентов использовались известняковые продукты и промышленные твердые отходы, содержащие кальций (12–37%). Удаление анионов проводилось периодическим методом при температуре окружающей среды в течение 480 ч с 40 г/дм<sup>3</sup> каждого адсорбента. Эксперимент проводили в три этапа с использованием свежего адсорбента на каждой стадии, и процесс в целом занял 60 дней. Обработка реального технологического раствора с концентрацией хлорид-иона 2,5 г/дм<sup>3</sup> продемонстрировала удаление хлоридов на 52, 45, 80 и 82%, соответственно.

Такого типа адсорбенты можно использовать в промышленных масштабах, когда продолжительность процесса не критична: обработка требует минимального количества энергии и проста из-за использования отходов.

Применяющиеся в настоящее время адсорбенты для дехлорирования в основном включают активированный уголь и Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Хотя активированный уголь может эффективно адсорбировать Cl<sup>-</sup>, его рабочие характеристики не подходят для промышленного применения и, кроме того, восстановление регенерированной жидкости в подобном процессе затруднено.

Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> можно использовать в качестве адсорбента для удаления Cl<sup>-</sup> из цинкового элек-

тролита, однако было обнаружено, что эффективная адсорбция происходит только в диапазоне pH от 2 до 5, при pH <2 осадок BiOCl начинает растворяться, а при pH >5, эффективность адсорбции Cl<sup>-</sup> падает. Кроме того, при десорбции раствора хлорид натрия отделялся концентрированием при выпаривании, что потребляло много тепловой энергии.

В кислых растворах могут образовываться оксихлориды сурьмы. Чтобы удалить хлорид-ионы из кислых сточных вод, в исследовании [54] в качестве адсорбентов Cl<sup>-</sup> использовались оксиды сурьмы (Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O, Sb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>·H<sub>2</sub>O, Sb<sub>2</sub>O<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O). Регенерацию загруженного адсорбента проводили раствором на основе NaOH и/или Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. При этом не только эффективно адсорбировался Cl<sup>-</sup> из хлоридсодержащих сточных вод, но также легко и без нагрева отделялся NaCl в регенерированном растворе.

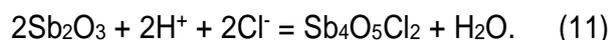
Адсорбенты добавляли в хлоридсодержащие сточные воды в соответствии с мольным соотношением 1,0–4,5 Sb/Cl при перемешивании в течение 0,5–2,5 ч при 20–50°C. Реальные сточные воды содержат 5–15 г/дм<sup>3</sup> Cl<sup>-</sup> и 0,1–1,5 моль/дм<sup>3</sup> H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Эффективность адсорбции Cl<sup>-</sup> при 20–30°C составляла более 92%, но при подъеме температуры от 30°C до 50°C она начала снижаться, поскольку растворимость оксихлоридов сурьмы увеличивается с повышением температуры.

Также для экспериментов использовались растворы с концентрацией 14,98 г/дм<sup>3</sup> Cl<sup>-</sup> и 0,51 моль/дм<sup>3</sup> H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. В диапазоне мольного отношения Sb/Cl от 1 до 3 эффективность адсорбции Cl<sup>-</sup> увеличивается с 39,33% до 91,90%, при дальнейшем увеличении концентрации сурьмы эффективность адсорбции Cl<sup>-</sup> практически не изменяется.

Таким образом, было установлено, что эффективность адсорбции Cl<sup>-</sup> растет с 83,11% до 91,91% при увеличении продолжительности перемешивания с 0,5 до 2 ч, при дальнейшем перемешивании она остается практически постоянной. А с увеличением концентрации H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> с 0,02 моль/дм<sup>3</sup> до 0,53 моль/дм<sup>3</sup> эффективность адсорбции Cl<sup>-</sup> увеличивается с 7,37 до 91,91%, при дальнейшем увеличении концентрации кислоты эф-

эффективность адсорбции  $\text{Cl}^-$  возрастает незначительно.

В процессе  $\text{Sb}_2\text{O}_3$  превращается в  $\text{Sb}_4\text{O}_5\text{Cl}_2$  по реакции:



При адсорбции  $\text{Cl}^-$  концентрация  $\text{Sb}$  в адсорбированном растворе растет с 21,22 мг/дм<sup>3</sup> до 281,75 мг/дм<sup>3</sup> с увеличением концентрации  $\text{H}_2\text{SO}_4$  с 0,02 моль/дм<sup>3</sup> до 1,25 моль/дм<sup>3</sup>. Допускаем, что растворимость  $\text{Sb}_4\text{O}_5\text{Cl}_2$  увеличивается пропорционально росту кислотности. Сурьма, остающаяся в адсорбированном растворе, делает его экологически небезопасным, к тому же это вызывает излишние расходы на реагенты.

Остаточный  $\text{Sb}$  в растворе удаляли добавлением адсорбента, переводя соединение сурьмы в осадок. Данный адсорбент получали прокаливанием  $\text{Sb}_2\text{O}_5 \cdot \text{H}_2\text{O}$  на воздухе при 400°C в течение 2 ч, после прокаливания  $\text{Sb}_2\text{O}_5$  превратился в  $\text{Sb}_6\text{O}_{13}$ , который можно рассматривать как смесь  $\text{Sb}_2\text{O}_3$  и  $\text{Sb}_2\text{O}_5$  или соединение  $\text{Sb}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{Sb}_2\text{O}_5$ . Осаждение  $\text{Sb(III)}$  происходит относительно быстро, тогда как осаждение  $\text{Sb(IV)}$  идет очень медленно, и перемешивание в этом случае должно продолжаться не менее 17 ч.

$\text{Sb}_4\text{O}_5\text{Cl}_2$  можно превратить в  $\text{Sb}_2\text{O}_3$  в щелочной среде, поэтому в экспериментах использовали раствор, содержащий  $\text{NaOH}$  и/или  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , для регенерации загруженного адсорбента по реакции:



В целом эффективность адсорбции  $\text{Cl}^-$  составляет более 97% при добавлении  $\text{Sb}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  в соответствии с мольным соотношением  $\text{Sb/Cl}$  равным 3 в раствор, содержащий 1,25 моль/дм<sup>3</sup>  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , при комнатной температуре и при перемешивании в течение 2 ч. Концентрации  $\text{Cl}^-$  и  $\text{Sb}$  в адсорбированном растворе составляют 0,38 г/дм<sup>3</sup> и 281,75 мг/дм<sup>3</sup>, соответственно.  $\text{NaCl}$  в регенерированном растворе можно кристаллизовать без нагрева обычным добавлением  $\text{NaOH}$ .

В [55] авторами описана конкуренция

между сульфатами и хлоридами при адсорбции на алюминии. Было обнаружено, что хлориды адсорбируются лучше, чем сульфаты, предположительно из-за мелкого размера ионов хлора, что связано с их высокой удельной поверхностью. Это позволяет сделать вывод, что комбинация больших пор адсорбента и небольших ионов хлора позволяет практически полностью удалить хлорид [56].

Цеолиты – это микропористые алюмосиликаты с трехмерной структурой, содержащие множество каналов и пор. Из-за их более низкой цены, доступности, разнообразия и способности молекулярного просеивания цеолиты находились в центре внимания исследований по удалению катионных и анионных ионов. Однако при удалении анионов из раствора их адсорбционная способность оказалась ограничена. А положительные ионы в каналах и порах сети легко заменяются другими катионами. Поэтому для модификации цеолита с целью увеличения адсорбционной способности применяли поливалентные металлы (например,  $\text{La}$ ,  $\text{Al}$ ,  $\text{Zr}$  и т.д.). Активированный оксид алюминия обладает хорошими адсорбционными характеристиками для удаления хлорида в широком диапазоне pH, большая удельная площадь поверхности открывает больше активных центров. Кроме этого, активированный  $\text{Al}_2\text{O}_3$  имеет высокую эффективность адсорбции.

Гидроксид алюминия является основным гидроксидом, который имеет низкую стоимость и может использоваться в крупномасштабном производстве. В последние годы исследователи потратили много усилий на улучшение его структуры. Уникальная структура слоистых двойных гидроксидов и то, что они не образуют химического осадка в процессе адсорбции, дают им значительное преимущество перед другими сорбентами. Например, авторы [57] исследовали удаление хлорид-иона с помощью слоистых двойных гидроксидов (СДГ), содержащих нитрат, для обмена анионами. В частности, особенно эффективно было применение  $\text{NO}_3$ -СДГ с молярным соотношением  $\text{Zn/Al} = 2$ .

Для удаления  $\text{Cl}^-$  из сточных вод в [58–61] использовали оксид магния-алюминия (оксид

Mg-Al). Удаление хлорид-иона изучали также прокаленным СДГ MgAl–CO<sub>3</sub>. В [37] и СДГ ZnAl–NO<sub>3</sub> [57]. Но следует отметить, что дозировка этих реагентов при удалении хлорид-ионов часто высока из-за существенного размера частиц и не всегда подходящей морфологии. Более того, только некоторые из образующихся осадков, подобно Mg<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>(OH)<sub>2</sub>(Cl)<sub>x</sub> и Ca<sub>2</sub>Al(OH)<sub>6</sub>Cl, могут быть использованы повторно после удаления Cl<sup>-</sup>.

Как показала апробация, удаление анионов из высокощелочных растворов дорого и довольно сложно. Что касается влияния среды, авторы в [62] исследовали удаление хлоридов из растворов с различными катионами с помощью оксида магния и алюминия. Авторы также обсудили удаление хлорида из HCl, AlCl<sub>3</sub>, CaCl<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub>Cl и NaCl и пришли к выводу, что увеличение количества MgAlO увеличивает удаление Cl<sup>-</sup> из раствора.

Как известно, в промышленных электролитах присутствует гораздо больше Mn<sup>2+</sup> (в 10–20 раз больше, чем Cl<sup>-</sup>) [63, 64], которые потребляют неприемлемое количество окислителей и делают процесс нерентабельным.

Адсорбент биомассы получают из дешевых и легкодоступных природных материалов, которые содержат многофункциональные группы. Например, авторы работы [51] для очистки сточных вод использовали биомассу и пришли к выводу, что можно удалить 30–34% хлорида [51, 65, 66]. В качестве биоадсорбентов опробованы такие материалы, как костный уголь (обычный и активированный), сельскохозяйственные, пищевые отходы и угли из них. Угольные сорбенты показали отличную адсорбционную способность и стабильность.

Гетит-процесс, основанный на удалении железа без каких-либо дополнительных процессов, отличается от других методов, а удаление железа является необходимой ступенью в гидрометаллургии цинка. Благодаря этой особенности метод осаждения железа популярен, поскольку может значительно упростить процесс гидрометаллургической переработки цинка, а также одновременно

удалить фтор и хлор за счет соосаждения F<sup>-</sup> и Cl<sup>-</sup>.

В статье [67] авторами проведен анализ влияния основных факторов, таких как температура реакции, скорость добавления щелачивающей жидкости, значение pH и концентрации железа, а также F<sup>-</sup> и Cl<sup>-</sup> в растворе. Экспериментальные результаты после обработки электролита, содержащего 120 г/дм<sup>3</sup> цинка и 405 мг/дм<sup>3</sup> хлорид-иона, демонстрируют, что гетит-процесс может эффективно удалять фторид- и хлорид-ионы при дополнительном использовании известкового молока в качестве нейтрализующего реагента для образования CaF<sub>2</sub>. Степень удаления F<sup>-</sup> и Cl<sup>-</sup> составила до 80 и 38,6%, соответственно. Скорость удаления хлорид-ионов относительно мала при высоком pH, низкий pH благоприятен для протонирования гидроксильной группы на поверхности гетита, что вызывает более положительные заряды на поверхности, способствуя адсорбции анионов. Таким образом, степень дехлорирования максимальна при значении pH около 2,7.

Чтобы получить высокую эффективность удаления железа и низкое содержание цинка в шлаке, значение pH следует поддерживать на уровне 3,0. Кроме того, адсорбционная способность гетита по хлору ограничена; поскольку кристаллы гетита имеют относительно небольшую удельную поверхность.

Поэтому для эффективного снижения концентрации хлорид-иона в цинковом электролите следует рассмотреть иной метод очистки. Экономически привлекательно выборочно удалять Cl<sup>-</sup> непосредственно из отработанных растворов, особенно с помощью подхода, не требующего дополнительных химикатов и примесей.

**Электрохимические методы.** Другие исследователи для дехлорирования сточных вод применяли ионообменные и электрохимические методы<sup>6</sup> [2, 68–71]. Например, в работе [2] авторами приведены результаты изучения удаления хлорид-ионов из смоделированного цинкового электролита электрохимическим методом, который основан на

<sup>6</sup>Mustafa S.F. Removal of chloride from wastewater by advanced softening process using electrochemically generated aluminum hydroxide: dissertation, 2014. 69 p.

образовании нерастворимого в кислоте осадка  $\text{CuCl}$  в ячейке. Однако при оптимальных условиях процесса содержание хлорид-ионов можно снизить только в диапазоне с  $300 \text{ мг/дм}^3$  до  $136 \text{ мг/дм}^3$ . Результаты показывают, что степень дехлорирования сильно зависит от потенциала анода, мощности ультразвукового перемешивания и продолжительности реакции. Эта степень также уменьшается с повышением температуры и достигает 54,5% при анодном потенциале 0,6 В и перемешивании под действием ультразвука 50 Вт в течение 3 ч [72]. Этот метод имеет ряд недостатков, среди которых низкая производительность.

**Диффузионный диализ.** Также были разработаны мембранные процессы, такие как электродиализ (ЭД) [73], либо с моновалентными селективными ионообменными мембранами (от англ. Ion Exchange Membranes IEM) [74], либо с обычными IEM с помощью мембран нанофильтрации (НФ) [75, 76]. С практической точки зрения непрерывный диализ намного привлекательнее, чем диализ с периодическим режимом работы, из-за простоты настройки системы и рабочих процедур.

Однако по мере увеличения концентрации солевого раствора производительность этих процессов резко снижается и практически неэффективна в высококонцентрированных по сульфат-иону цинковых электролитах ( $\sim 320 \text{ г/дм}^3$  для  $\text{SO}_4^{2-}$ ) [77, 78]. Плотность поверхностного заряда двухвалентного иона с зарядом  $2^-$  выше, чем у одновалентного иона  $\text{Cl}^-$ , что приводит к большему радиусу гидратации, а затем к более низкой проницаемости мембран в сульфатном растворе.

Для очистки смешанных растворов  $\text{ZnCl}_2 + \text{ZnSO}_4$  от хлоридов с использованием мембран среди электрохимических методов удаления хлоридов представляет интерес метод электродиализа [79]. Исследовали электродиалитическое превращение хлорида цинка в сульфат цинка для решения проблемы хлорид-иона в гидрометаллургии цинка. В итоге они разработали одностадийный процесс электродиализа, который можно использовать для получения сульфатных цинковых растворов, в которых исходную кон-

центрацию хлоридов можно снизить до  $0,09 \text{ г/дм}^3$ . Коммерческая реализация этого метода затруднена из-за сложной конструкции оборудования и относительно высокой стоимости мембран.

Был предложен подход к селективному удалению галогенидов из отработанного цинкового электролита с помощью диффузионного диализа (от англ. Diffusion Dialysis DD) [80] с применением анионообменной мембраны (стандарт TWDDA). В отличие от обычного процесса DD, в котором кислота всегда регенерируется для повторного использования, вместо этого разбавленная  $\text{H}_2\text{SO}_4$  обрабатывалась как элюент для удаления отходов. При этом в отходящем потоке наблюдалось неожиданное обогащение галогенидными примесями. Однако, хотя очевидна селективность ( $\sim 2,7$  для  $\text{Cl}^-$  и  $\sim 1,5$  для общего  $\text{F}^-$  по сравнению с общим  $\text{SO}_4^{2-}$  при оптимальной интенсивности потока), потеря  $\text{SO}_4^{2-}$  по сравнению с удаленным  $\text{Cl}^-$  остается существенной. В настоящее время по-прежнему чрезвычайно сложно добиться селективности по проницаемости между ионами с одинаковым знаком заряда. Чтобы достичь этого, предпринимаются огромные усилия, в основном сосредоточенные на разработке новых мембран, устанавливаемых на выходе сырьевого потока.

Фактически всегда существует компромисс между степенью удаления примесных ионов и селективностью их разделения. Невозможно одновременно добиться высокой степени удаления и высокой селективности. Положительным моментом является то, что в большинстве практических ситуаций очистки от примесей (как селективное дехлорирование из сульфатного электролита в гидрометаллургии [80]) обязательно нужно удалить только часть примесей, далее остается поддерживать остаточную концентрацию в допустимых рабочих пределах. Все электрохимические методы дехлорирования сульфатных электролитов показали недостаточную эффективность для последующей электроэкстракции цинка.

**Экстракция.** Наилучшие результаты по удалению хлоридов из сульфатных растворов были получены при использовании мето-

дов экстракции. В основном изучалась экстракция галогенидов третичными органическими аминами ( $R_3N$ ). В качестве экстрагентов использовали триалкиламин фракции C7 – C9 [81] или аламин 336 [82]. Во всех случаях экстракция была удовлетворительной, и отгонка хлоридов происходила при использовании щелочных реагентов NaOH [81] или  $NH_4OH$  [82].

К недостаткам использования аминов можно отнести высокую степень извлечения серной кислоты, которая превращает экстрагент в сульфатную ( $R_3NH$ ) $_2$ SO $_4$  или бисульфатную ( $R_3NH$ )HSO $_4$  формы. Кроме того, увеличение концентрации серной кислоты в растворе привело к снижению экстракции хлорида, что было связано с протекающей конкурентной реакцией между бисульфатом и хлоридом для экстрагента.

Хорошие результаты по очистке цинковых растворов от хлорид-иона получены при использовании в качестве экстрагента оксида триалкилфосфина [83]. Помимо того, что было проведено эффективное удаление хлоридов, экстракция не зависела от pH в широком диапазоне концентраций H $_2$ SO $_4$ , а степень извлечения самой кислоты была низкой (<16%), что обеспечивает выгодное различие для систем TRPO по сравнению с третичными аминными системами [82]. Однако попытка отделить хлорид (и, следовательно, хлорид цинка) щелочными растворами (NaOH, Na $_2$ CO $_3$ ) оказалась безуспешной из-за образования осадков карбоната или гидроксида цинка. В то же время происходило образование практически неразрушимых эмульсий, что полностью нарушало технологический процесс [83].

Кроме органических аминов, для удаления хлоридов можно использовать нейтральные фосфорорганические экстрагенты, в частности трибутилфосфат [84]. Существенным недостатком этого метода является необходимость введения большого количества серной кислоты (200–500 г/дм $^3$ ) в цинковый раствор перед экстракцией, что практически невозможно в существующих процессах производства цинка.

В работе [85] найден новый метод извлечения хлоридов из сульфатных цинковых

растворов смесями TRPO и CYANEX 272. Было доказано, что:

1. Эффективное удаление хлоридов (в форме ZnCl $_2$ ) происходит в широком диапазоне концентраций серной кислоты, степень извлечения самой кислоты невысока и не превышает 12,1%.

2. Введение фосфорорганических кислот D2EHPA или CYANEX 272 в органическую фазу, содержащую TRPO, приводит к некоторому снижению экстракции хлоридов, что связано с образованием H-комплексов между TRPO и HR. В смесях, содержащих CYANEX 272, удаление хлоридов всегда выше, чем в присутствии D2EHPA; при этом смесь TRPO + CYANEX 272 + TBP в керосине является оптимальной системой экстракции.

3. Для доведения pH до конечного значения 6,0–7,0 достаточно стехиометрического количества гидроксида натрия. Таким образом, происходит разделение хлорид-ионов и цинка; хлорид почти полностью переходит в водную фазу, а цинк остается в органической фазе в виде диалкилфосфината цинка.

4. Удаление цинка из органической фазы легко осуществляется растворами серной кислоты, требуется стехиометрическое количество серной кислоты с концентрацией 50–100 г/дм $^3$  в 2 этапа. Раствор экстрагента возвращают в цикл экстракции.

**Облучение ультрафиолетом.** Помимо этого, был разработан улучшенный метод удаления хлора из сильноокислых сточных вод с помощью ультрафиолета (УФ) [86].

При облучении УФ-излучением было удалено 95% исходного Cl $^-$ , а остаточная концентрация хлорид-иона снизилась до менее 50 мг/дм $^3$ . Механизм удаления Cl $^-$  приписывают фотокатализу CuCl под УФ-облучением. Но ввиду высокой стоимости порошка Cu этот метод имеет широкое применение только в отраслях промышленности, производящих медные полупродукты.

Известно, что соединения Bi(V) обладают чрезвычайно высокой окислительной способностью. В кислых условиях электродный потенциал BiO $_3^-$ /Bi $^{3+}$  составляет 1,59 В, что выше 1,36 В для Cl $_2$ /Cl $^-$  и указывает на возможность окисления Cl $^-$  с образованием Cl $_2$  с использованием NaBiO $_3$  в сильноокислых сточ-

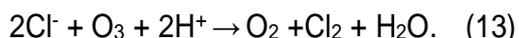
ных водах и  $\text{Bi}^{3+}$ , восстановленный из сточных вод в концентрат  $\text{NaOH}/\text{NaCl}$ .

В исследованиях [87] было предложено удалить  $\text{Cl}^-$  из сильноокислых сточных вод с использованием  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  при УФ-облучении. В этих условиях из  $\text{Cl}^-$  могут образоваться радикалы  $\text{Cl}^\cdot$ , а затем они объединяются с образованием газообразного  $\text{Cl}_2$  и реагируют с  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  с образованием осадков  $\text{BiOCl}$ , соответственно. В обоих вышеупомянутых методах  $\text{h}^+$ , образующаяся в фотокаталитической реакции под УФ-облучением, играет основную роль в окислении  $\text{Cl}^-$ .

**Окисление.** Широко исследована реакция между хлорид-ионами и озоном в водных растворах [88–91]. Долгое время, изучая кинетику взаимодействия между озоном и  $\text{Cl}^-$  в кислых растворах, Леванов и др. [92–95] обнаружили, что ионы водорода и некоторые ионы переходных металлов могут значительно ускорить реакцию.

При гидрометаллургическом производстве цинка сульфатный цинковый электролит обычно содержит ионы  $\text{Zn(II)}$  – 40–80 г/дм<sup>3</sup>,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  – 120–200 г/дм<sup>3</sup>,  $\text{Cl}^-$  – 30–1000 мг/дм<sup>3</sup> и  $\text{Mn(II)}$  – 2–5 г/дм<sup>3</sup>. Неизвестно, возможна ли реакция озона с хлорид-ионом при его низкой концентрации, поэтому в работе [72] определяли влияние каждого из этих компонентов на дехлорирование варьированием параметров взаимодействия. В данном исследовании уточнялось влияние различных факторов процесса, включая поток газа  $\text{O}_2$ , температуру и продолжительность реакции, концентрацию  $\text{H}_2\text{SO}_4$  и  $\text{ZnSO}_4$ , а также наличие  $\text{Mn(II)}$  на дехлорирование из смоделированного сульфатного цинкового электролита при начальной концентрации хлорида 300 мг/дм<sup>3</sup>.

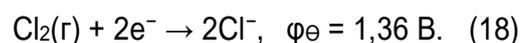
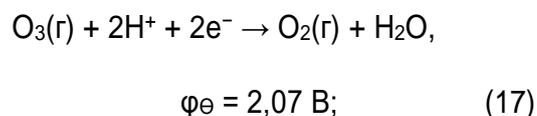
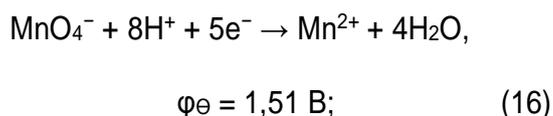
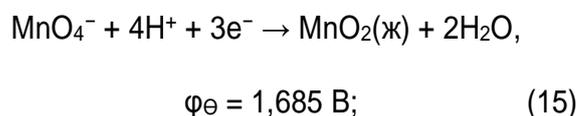
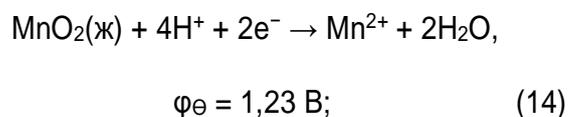
Общую реакцию можно представить следующим образом:



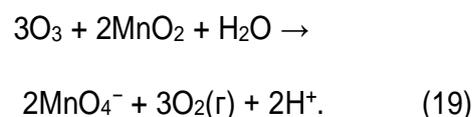
Взаимодействие озона с  $\text{Cl}^-$  в моделированном цинковом электролите представляет собой многофазную реакцию газ–жидкость.

С увеличением концентрации серной кислоты остаточный хлорид быстро снижался. Это связано с тем, что  $\text{H}^+$  участвует в реакции озона с хлоридом и концентрация свободных ионов  $\text{H}^+$  возрастает, что ускоряет реакцию. Напротив, с увеличением концентрации  $\text{ZnSO}_4$  возрастает кинематическая вязкость, что замедляет скорость массопереноса реакционноспособных ионов. Кроме того, добавление сульфата цинка увеличивает концентрацию  $\text{SO}_4^{2-}$  в электролитах, что препятствует вторичной ионизации  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .

На основе стандартного электродного потенциала реакций полуэлементов  $\phi$ , В (реакции 14–18), и отчетов о реакциях между озоном, хлоридом и ионами марганца [92,96–97], был предложен механизм реакции дехлорирования в присутствии  $\text{Mn(II)}$ :

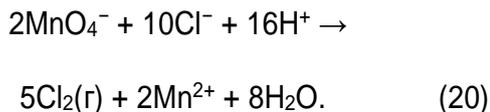


По реакции озона с ионами хлора в кислых растворах происходит координационный катализ и катализ с переносом заряда. Лимитирующей стадией будет реакция:

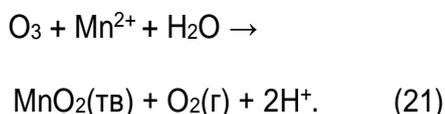


\*под  $\text{h}^+$  понимается вакансия («дырка»), образующаяся после миграции электрона ( $\text{e}^-$ ) в зону проводимости в результате протекания окислительно-восстановительных реакций.

Упрощенная реакция в кислом растворе записывается как



Стадия ускорения:



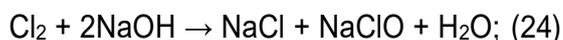
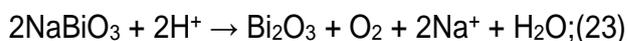
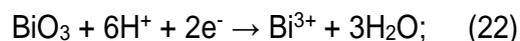
Для катализа с переносом заряда ион металла сначала окисляется озоном. Если окислительно-восстановительный потенциал пары ионов металла выше, чем  $\text{Cl}_2/\text{Cl}^-$ , реакция иона металла с ионами хлора будет возможна и она обычно быстрее, чем реакция озона с ионами хлора, поскольку первая реакция является гомогенной, а вторая – гетерогенной.

В исследовании выяснили, что для дехлорирования благоприятны увеличение продолжительности барботирования и высокая температура реакции, и получили следующие оптимальные условия дехлорирования при окислении озоном в отсутствие  $\text{Mn}(\text{II})$ : скорость потока кислорода – 0,4 л/мин, концентрация  $\text{H}_2\text{SO}_4$  – 160 г/дм<sup>3</sup>, концентрация ионов  $\text{Zn}(\text{II})$  – 40 г/дм<sup>3</sup>, температура реакции – 70°C, продолжительность реакции – 120 мин. В этих условиях концентрация  $\text{Cl}^-$  в сульфатном цинковом электролите снижалась с 300 до 5 мг/дм<sup>3</sup>.

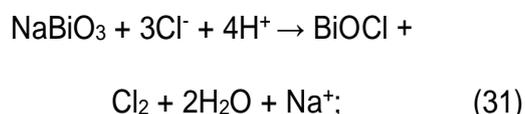
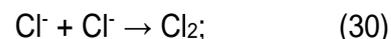
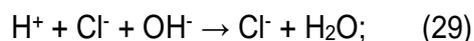
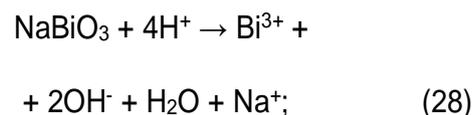
К улучшению дехлорирования приводит повышение содержания ионов водорода, как и ионов марганца в электролите. Окисление хлорид-ионов озоном сопровождалось одновременным окислением ионов  $\text{Mn}(\text{II})$  и его оксида  $\text{MnO}_2$ , причем продолжительность реакции последнего была меньше 9 мин. В цинковой гидрометаллургии сульфатный цинковый электролит обычно содержит приблизительно 3 г/дм<sup>3</sup>  $\text{Mn}(\text{II})$ , который вводится при удалении двухвалентного железа с использованием пиролюзита. Остаточная концентрация хлорида в отсутствие  $\text{Mn}(\text{II})$  составляла всего 85 мг/дм<sup>3</sup> за 40 мин, в то время как при добавлении ионов  $\text{Mn}(\text{II})$  это значе-

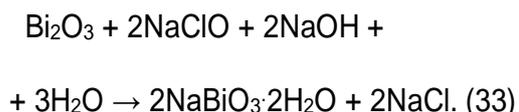
ние быстро снижалось до 10 мг/дм<sup>3</sup>. Было замечено, что в присутствии ионов  $\text{Mn}(\text{II})$ , как только раствор был барботирован газообразным озоном, электролит становился пурпурным и на начальной стадии образовывался черный осадок, полностью исчезавший через 120 мин.

**Окисление с осаждением.** Вэнью Доу с соавторами [98] провели анализ факторов, влияющих на удаление  $\text{Cl}^-$  с помощью  $\text{NaBiO}_3$ . Выяснили, что при стехиометрической дозировке  $\text{NaBiO}_3$  к хлорид-ионам 1:3 и температуре 30°C из сильноокислых сточных вод, содержащих 2300 мг/дм<sup>3</sup>  $\text{Cl}^-$  и 40 г/дм<sup>3</sup>  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , через 60 мин обработки эффективность удаления  $\text{Cl}^-$  достигла 98,1%, при этом конечная концентрация хлорид-иона составила 43,7 мг/дм<sup>3</sup>:



В результате реакции, приведенной в уравнении (26), единственным твердым продуктом очистки был  $\text{BiOCl}$ , что доказал спектр рентгенофазового анализа.





Конечным соединением при дехлорировании будет  $\text{BiOCl}$ , имеющий низкую константу растворимости  $1,8 \times 10^{-31}$ .

Преимуществом данного метода очистки является то, что на дехлорирование явно не повлияло наличие сосуществующих ионов. Очевидно, что основные ионы металлов, содержащиеся в реальных сточных водах и электролитах, это  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  и  $\text{Cu}^{2+}$ . Эти ионы металлов не окисляются  $\text{NaBiO}_3$  и не осаждаются  $\text{Bi}^{3+}$ . Кроме того, хотя существует возможность окисления фторид-иона  $\text{NaBiO}_3$ , довольно низкая концентрация  $\text{F}^-$  практически не влияет на удаление  $\text{Cl}^-$ .

Хлорид-ион удаляли двумя способами:

1.  $\text{Cl}^-$  окисляли с образованием газообразного  $\text{Cl}_2$ .

2.  $\text{Bi}^{3+}$ , продукт восстановления  $\text{BiO}^-$ , реагировал с  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{Cl}^-$  с образованием осадков  $\text{BiOCl}$ .

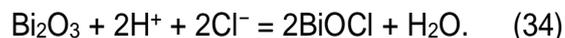
Почти весь  $\text{BiOCl}$  можно преобразовать в регенерированный  $\text{NaBiO}_3$  после обработки с использованием абсорбирующего раствора  $\text{NaOH}$  для  $\text{Cl}_2$ . Достигнутая эффективность дехлорирования при использовании регенерированного  $\text{NaBiO}_3$  составила 97,8%.

Остаточная концентрация  $\text{Bi}^{3+}$  в сточных водах после удаления  $\text{Cl}^-$  составила 117,5 мг/дм<sup>3</sup>. Чтобы избежать потерь реагента и вторичного загрязнения, для удаления остаточного  $\text{Bi}^{3+}$  в виде осадков  $\text{Bi}_2\text{S}_3$  в сточные воды вводили  $\text{H}_2\text{S}$ ; таким образом, через 40 мин обработки концентрация  $\text{Bi}^{3+}$  была снижена до 1,21 мг/дм<sup>3</sup>.

**Окисление с полупроводниковыми кристаллами.** Квантовые точки (КТ) представляют собой полупроводниковые нанокристаллы с размером диаметра в диапазоне 2–10 нм. Из-за крайне малого размера КТ удельная площадь их поверхности очень велика. Также внимание ученых привлекают двумерные (2D) материалы с одно- и многослойной атомной структурой, которая может обеспечить превосходную реакционную ак-

тивность. Если дехлорирующий агент будет присутствовать в форме квантовых точек или 2D-материалов, их расход значительно снизится, продолжительность удаления  $\text{Cl}^-$  сократится, в то время как эффективность удаления возрастет.

Исследователи выяснили, что этот эффект достигается с помощью оксидов на основе  $\text{Bi(III)}$  [99], и тогда реакцию удаления  $\text{Cl}^-$  можно выразить как

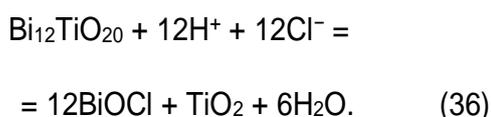
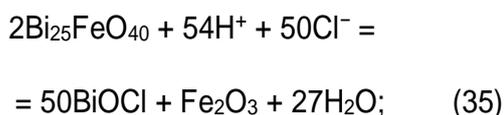


Авторы [100] проверили эту теорию. Первоначально они синтезировали реагент  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ , состоящий из квантовых точек  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  и 2D-хлопьев.

Дехлорирование концентрированного раствора исследовали при различных значениях pH, равных 1, 3, 5 и 7. Неразбавленный раствор после выщелачивания содержал  $\text{Cl}^-$  с начальной концентрацией 2491 мг/дм<sup>3</sup>. К нему добавляли  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  в молярном соотношении  $\text{Bi}^{3+}:\text{Cl}^-=1:1$ . Степень удаления хлорид-иона после перемешивания в течение 8 ч составила 59,3, 9,1, 10,7 и 5,8%, соответственно.

В оптимальных условиях при pH = 1 была получена максимальная степень удаления  $\text{Cl}^-$  – 61,8%, кроме того, образовывался осадок остаточного  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ , покрытого  $\text{BiOCl}$ . Диаграммы рентгенофазового анализа показали, что после удаления  $\text{Cl}^-$  поверхность становится более шероховатой, и на ней образуется множество наностержней  $\text{BiOCl}$ . Исследователи в работе [101] предположили, что  $\text{Bi}^{3+}$  сначала растворялись из  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  с помощью  $\text{H}^+$  с образованием  $\text{BiO}^+$ , который затем реагировал с  $\text{Cl}^-$  с образованием  $\text{BiOCl}$ .

Для дальнейшего повышения дехлорирования синтезировали магнетитовый композит  $\text{Bi-Ti}$ , содержащий кристаллические фазы  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$  и  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ .  $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$  образуется в результате реакции между  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  и избытком  $\text{Fe}$ ,  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$  – в результате реакции между  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  и  $\text{TiO}_2$ . Соотношение фаз  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  и  $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}/\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$  было равно 41,1 и 58,9% масс. Реакции удаления хлорид-ионов магнетитовым композитом  $\text{Bi-Ti}$  могут происходить следующим образом:



В тех же оптимальных условиях, что и для  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ , была достигнута степень удаления 66,1%.  $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$  и  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$  имеют форму тонких пластинок. Изменение морфологии композита после удаления  $\text{Cl}^-$  подобно изменению  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ , однако эффективность дехлорирования отличалась. Возможно, причина в том, что кристаллические фазы композитов менее стабильны, чем  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ .

При увеличении молярного соотношения  $\text{Bi}^{3+}:\text{Cl}^-$  до 2:1 степень удаления  $\text{Cl}^-$  достигла 91,6%. Это свидетельствует о многообещающей перспективе применения новых материалов для удаления хлорид-ионов из растворов.

#### **Окисление с участием полистирола.**

В настоящее время для разложения органических загрязнителей широко используется усовершенствованное окисление на основе полистирола, но по удалению неорганических загрязнителей было проведено недостаточно исследований [102–105].

В работе [106] предложен эффективный метод удаления  $\text{Cl}^-$  из сильноокислых сточных вод заводов по производству металлических цинка, меди и никеля с использованием полистирола.

Дозировка полистирола была установлена при молярном отношении полистирола к  $\text{Cl}^-$  в интервале от 1,0/2,0 до 1,2/2,0. Активированный полистирол может удалить более 96% исходного хлорид-иона из реальных сточных вод производства цветных металлов и снизить остаточный  $\text{Cl}^-$  до уровня ниже 158 мг/дм<sup>3</sup>, что удовлетворяет требованию концентрации хлорид-иона при переработке. Кроме того, был уточнен механизм реакции между  $\text{Cl}^-$  и полистиролом, характерный для сильноокислых сточных вод. Действие высококонцентрированного  $\text{H}^+$  проходит через всю реакцию между  $\text{Cl}^-$  и полистиролом. Он играет каталитическую роль в термической акти-

вации полистирола и прекращает реакцию между хлорид-ионом и свободными радикалами на стадии обратного гидролиза  $\text{Cl}_2$ , что в конечном итоге ускоряет выход  $\text{Cl}_2$ . Доли участия радикалов  $\cdot\text{OH}^-$  и  $\cdot\text{SO}_4^{2-}$  в дехлорировании определили как 67,4 и 32,6%, соответственно. Выявленный механизм удаления  $\text{Cl}^-$  в сильноокислых условиях может помочь в разработке эффективных способов дехлорирования сточных вод и растворов в других отраслях промышленности.

Данные способы позволяют удалить только часть  $\text{Cl}^-$  из электролита за один цикл. Для избавления от всего хлорид-иона (примерно >95%) понадобится многоступенчатая обработка, что с точки зрения затрат не всегда экономически оправданно.

Некоторые методы, опробованные для дехлорирования, довольно необычны – например, метод улетучивания водорода [107].

В целом показатели этих экзотических для цинкового производства процессов слишком низкие для реализации в промышленности. Несмотря на большое количество экспериментальных разработок, согласно публикациям, подавляющее число методик не нашло реализации в промышленном масштабе.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Пыли электродуговой плавки считаются токсичными отходами из-за высокого содержания оксидов тяжелых металлов, таких как оксиды цинка и свинца, а также железа в комбинации с хлорсодержащими солями. Проблема накопления твердых техногенных отходов с повышенным содержанием галогенидов, потенциально ценных в качестве вторичных источников цветных металлов (цинка, свинца, марганца и др.), побудила многих исследователей к поиску способов безопасной переработки пыли ЭДП, где будет достигнуто высокое извлечение цинка и в то же время снижено негативное влияние хлорид-иона на процесс.

Выбор подходящего электролита – одна из серьезных проблем, с которой сегодня сталкивается цинковая промышленность. Разнообразные исследования концентриро-

вались как на поиске методов очистки технологических растворов, так и на подборе усовершенствованного электролита для производства металлического цинка. Однако на практике у большинства способов очистки есть существенные ограничения, такие как строгие требования к кислотности обрабатываемого раствора, недостаточная эффективность, вторичное загрязнение среды и высокая стоимость реагентов или используемого оборудования.

Методы осаждения и коагуляции обладают относительно невысокой эффективностью удаления хлорид-ионов, которые не всегда подходят для промышленного дехлорирования растворов с высокими требованиями к чистоте электролита. Тем не менее при реализации на практике методы осаждения и адсорбции продемонстрировали простоту в эксплуатации, кроме того, они имеют доступную стоимость.

Методы ионного обмена и мембранного разделения являются несложными, но дорогостоящими, они требуют более квалифицированного обсуживающего персонала. Мембраны в процессе удаления хлоридов не взаимодействуют с ионами и не требуют использования токсичных химикатов, а также могут эффективно работать в широком диапазоне pH. Однако обработка с использованием мембранной технологии не подходит для растворов с высокой концентрацией солей и полностью растворенными твердыми частицами, а также с легким загрязнением мембраны. При дехлорировании ионообменным способом наличие в электролите сульфат-ионов приводит к ионной конкуренции, которая быстро влияет на ионообменную адсорбционную колонку и снижает эффективность удаления примесей.

Одним из перспективных методов очистки от хлорида считается адсорбция с использованием композитных материалов на основе алюминия или углерода. Адсорбция имеет преимущества ввиду невысокой стоимости материалов, контролируемых рабочих условий, возможности регенерации применяющихся адсорбентов. Доказано, что некоторые адсорбенты обладают хорошей адсорбционной способностью и эффективностью. Одна-

ко при практическом применении следует учитывать влияние стоимости приготовления адсорбентов, сложности их приготовления, большого количества присутствующих в электролитах веществ и конкурентоспособных ионов, температуры, pH, возможности повторного использования адсорбентов, стабильности осадков и других факторов.

В процессе гидрометаллургического получения цинка концентрации фторид- и хлорид-ионов в сульфатном цинковом растворе можно эффективно снизить, контролируя условия удаления железа в гетит-процессе. Поскольку удаление железа является необходимым в гидрометаллургии цинка, подобное удаление  $F^-$  и  $Cl^-$  может не только упростить технологическую цепочку, но также не требует дополнительных инвестиций. Таким образом, среди методов осаждения именно гетит-процесс имеет существенные экономические преимущества, а также эффективную способность удалять  $F^-$  и  $Cl^-$ .

Что касается электрохимических и окислительных методов, следует учитывать их экономическую целесообразность, которая в основном не оправдана из-за высоких затрат.

Следовательно, для очистки реальных промышленных электролитов необходимы передовые технологии. Разработка крупномасштабных, устойчивых и недорогих гибридных технологий может решить недостатки существующих процессов. Например, сочетание адсорбционной и электрохимической технологии, а также сочетание адсорбционной технологии и мембранного разделения и т.д.

Современная цинковая промышленность нуждается в оптимальном способе переработки пыли ЭДП. Поскольку для гидрометаллургических технологий критически важным является химический состав сырья, каждое отдельное производство требует апробации выбранной методики в зависимости от пыли конкретного вида, с детальной экспериментальной проработкой процесса в различных условиях и использованием инструментальных методов анализа. Необходимость выбора подходящей технологии имеет огромное значение как с экологической, так и с экономической точек зрения.

## Список источников

1. Перескока В.В., Камкина Л.В., Пройдак Ю.С., Стовпченко А.П., Квичанская М.И. Восстановительно-тепловая обработка пыли электрофильтров дуговой сталеплавильной печи // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2010. № 21. С. 13–16.
2. Wu Xuelian, Liu Zhongqing, Liu Xu. Chloride ion removal from Zinc sulfate aqueous solution by electrochemical method // Hydrometallurgy. 2013. Vol. 134-135. P. 62–65. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2013.01.017>.
3. Chen Wei-Sheng, Shen Yun-Hwei, Tsai Min-Shing, Chang Fang-Chih. Removal of chloride from electric arc furnace dust // Journal of Hazardous Materials. 2011. Vol. 190. Iss. 1-3. P. 639–644. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.03.096>.
4. Стовпченко А.П., Камкина Л.В., Пройдак Ю.С., Деревянченко И.В., Кучеренко О.Л., Бондаренко М.Ю. Теоретические и экспериментальные исследования состава и восстановимости пыли дуговых сталеплавильных печей // Электрометаллургия. 2009. № 8. С. 29–36.
5. Wei Yu-Ling, Lin Chang-Yuan, Wang H. Paul. Detoxification of hazardous dust with marine sediment // Marine pollution bulletin. 2014. Vol. 85. Iss. 2. P. 810–815. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.01.016>.
6. Tsubouchi N., Hashimoto H., Ohtaka N., Ohtsuka Ya. Chemical characterization of dust particles recovered from bag filters of electric arc furnaces for steelmaking: some factors influencing the formation of hexachlorobenzene // Journal of Hazardous Materials. 2010. Vol. 183. Iss. 1-3. P. 116–124. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.06.122>.
7. Lee Gye-Seung, Song Young Jun. Recycling EAF dust by heat treatment with PVC // Minerals Engineering. 2007. Vol. 20. Iss. 8. P. 739–746. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2007.03.001>.
8. Doronin I.E., Svyazhin A.G. Properties of steelmaking dust and the mechanism of its formation // Metallurgist. 2012. Vol. 55. Iss. 11-12. P. 879–886. <https://doi.org/10.1007/s11015-012-9517-8>.
9. Lin Xiaolong, Peng Zhiwei, Yan Jiaying, Li Zhizhong, Hwang Jiann-Yang, Zhang Yuanbo, Li Guanghui, Jiang Tao. Pyrometallurgical recycling of electric arc furnace dust // Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 149. P. 1079–1100. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.128>.
10. Панышин А.М., Леонтьев Л.И., Козлов П.А., Дюбанов В.Г., Затонский А.В., Ивакин Д.А. Технология переработки пыли электродуговых печей ОАО «Северсталь» в вельцкомплексе ОАО «ЧЦЗ» // Экология и промышленность России. 2012. № 11. С. 4–6. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2012-11-4-6>.
11. Пат. № 2617086, Российская Федерация, С22В. Способ селективного извлечения оксида железа и оксида цинка из шламов и пылей газоочисток металлургических агрегатов / Г.А. Фарнасов, В.И. Ковалев, И.Ф. Курунов, А.М. Бижанов, И.Н. Вершинин; заявители и патентообладатели Г.А. Фарнасов, А.М. Бижанов. Заявл. 11.03.2016; опубл. 19.04.2017. Бюл. № 10.
12. Yakornov S.A., Panshin A.M., Kozlov P.A., Ivakin D.A. Modern state of leaching technologies for ferrous metal dusts and their pyrometallurgical processing products (acid, ammonium and alkaline technologies) // Цветные металлы. 2017. № 5. С. 37–43. <https://doi.org/10.17580/tsm.2017.05.05>.
13. Kukurugya F., Havlik T., Kekki A., Forsén O. Characterization of dusts from three types of stainless steel production equipment // Metall. 2013. Vol. 67. Iss. 4. P. 154–159.
14. Qu Fulai, Zhang Jinkai, Liu Guirong, Zhao Shunbo. Experimental study on chloride ion diffusion in concrete affected by exposure conditions // Materials. 2022. Vol. 15. Iss. 8. P. 2917. <https://doi.org/10.3390/ma15082917>.
15. Gu`resin N., Topkaya Y.A. Dechlorination of a zinc dross // Hydrometallurgy. 1998. Vol. 49. Iss. 1-2. P. 179–187. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(98\)00012-7](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(98)00012-7).
16. Gao Xingbao, Wang Wei, Ye Tunmin, Wang Feng, Lan Yuxin. Utilization of washed MSWI fly ash as partial cement substitute with the addition of dithiocarbamic chelate // Journal of Environmental Management. 2008. Vol. 88. Iss. 2. P. 293–299. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.02.008>.
17. Ruiz O., Clemente C., Alonso M., Alguacil F.J. Recycling of an electric arc furnace flue dust to obtain high grade ZnO // Journal of Hazardous Materials. 2007. Vol. 141. Iss. 1. P. 33–36. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.06.079>.
18. Patent no. 5912402A, United States of America. Metallurgical dust recycle process / W.F. Drinkard, Jr.H.J. Woerner. Filed 30.10.1995; publ. 15.06.1999.
19. Панышин А.М., Шакирзянов Р.М., Избрехт П.А., Затонский А.В. Основные направления совершенствования производства цинка на ОАО «Челябинский цинковый завод» // Цветные металлы. 2015. № 5. С. 19–21. <https://doi.org/10.17580/tsm.2015.05.03>.
20. Li Chung-Lee, Tsai Min-Shing. A crystal phase study of zinc hydroxide chloride in electric-arc-furnace dust // Journal of Materials Science. 1993. Vol. 28. Iss. 17. P. 4562–4570. <https://doi.org/10.1007/BF00414243>.
21. Kemp D., Bond C.J., Franks D.M., Cote C. Mining, water and human rights: making the connection // Journal of Cleaner Production. 2010. Vol. 18. Iss. 15. P. 1553–1562. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.06.008>.
22. Machado J.G.M.S., Brehm F.A., Moraes C.A.M., Santos C.A., Vilela A.C.F., Cunha J.B.M. Characterization study of electric arc furnace dust phases // Materials Research. 2006. Vol. 136. Iss. 3. P. 953–960. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392006000100009>.
23. Найманбаев М.А., Лохова Н.Г., Балтабекова Ж.А., Баркытова Б.Н. О возможности переработки цинксодержащих пылей ЗСМК и Северстали с рудой месторождения Шаймерден // Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований: тр. III Конгр. с междунар.

участием и Конференции молодых ученых V Форума «Уральский рынок лома, промышленных и коммунальных отходов» (г. Екатеринбург, 5–9 июня 2017 г.). Екатеринбург: УрО РАН, 2017. С. 178–182.

24. Cruells M., Roca A., Núnéz C. Electric arc furnace flue dusts: characterization and leaching with sulphuric acid // Hydrometallurgy. 1992. Vol. 31. Iss. 3. P. 213–231. [https://doi.org/10.1016/0304-386X\(92\)90119-K](https://doi.org/10.1016/0304-386X(92)90119-K)
25. Снурников А.П. Гидрометаллургия цинка. М.: Металлургия, 1981. 384 p.
26. Wang Yurong, Zhou Yang, Wang Wenchang, Chen Zhidong. Sustained deposition of silver on copper surface from choline chloride aqueous solution // Journal of the Electrochemical Society. 2013. Vol. 160. Iss. 3. P. D119-D123. <https://doi.org/10.1149/2.012304jes>.
27. Jian Wen. Study on the choice of dechlorination in the production of electric zinc of Jinshi metallurgy chemical plant // Hunan Nonferrous Metall. 2008. Vol. 24. P. 34–36.
28. Yan Huan, Chai Li-yuan, Peng Bing, Li Mi, Peng Ning, Hou Dong-ke. A novel method to recover zinc and iron from zinc leaching residue // Minerals Engineering. 2014. Vol. 55. P. 103–110. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.09.015>.
29. Козлов П.А., Затонский А.В., Панышин А.М. Исследования и разработка технологии по удалению примесей из вельц-оксида, полученной после переработки пылей электродуговых печей (ЭДП) // Металлургия-интехэко-2011: матер. IV Междунар. конф. (г. Москва, 29–30 марта 2011 г.). М., 2012. С. 126–131.
30. Havlik T., Turzakova M., Stopić S., Friedrich B. Atmospheric leaching of EAF dust with diluted sulphuric acid // Hydrometallurgy. 2005. Vol. 77. Iss. 1. P. 41–50. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2004.10.008>.
31. Fleischanderl A., Gennari U., Ilie A. ZEWA - metallurgical process for treatment of residues from steel industry and other industrial sectors to generate valuable products // Ironmaking & Steelmaking. 2004. Iss. 6. P. 444–449. <https://doi.org/10.1179/irs.2004.31.6.444>.
32. Silva R., Rubio J. Treatment of acid mine drainage (AMD) from coal mines in south Brazil // International journal of coal preparation and utilization. 2009. Vol. 29. Iss. 4. P. 192–202. <https://doi.org/10.1080/19392690903066045>.
33. Zhao Hua-Zhang, Liu Chuan, Xu Yi, Ni Jin-Ren. High-concentration polyaluminum chloride: Preparation and effects of the Al concentration on the distribution and transformation of Al species // Chemical Engineering Journal. 2009. Vol. 155. Iss. 1-2. P. 528–533. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.08.007>.
34. Sdiri A., Higashi T., Jamoussi F., Bouaziz S. Effect of impurities on the removal of heavy metals by natural limestones in aqueous systems // Journal of Environmental Management. 2012. Vol. 93. Iss. 1. P. 245–253. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.08.002>.
35. Kameda T., Yoshioka T., Mitsunashi T., Uchida M., Okuwaki A. The simultaneous removal of calcium and chloride ions from calcium chloride solution using magnesium–aluminum oxide // Water Resources. 2003. Vol. 37. 16. P. 4045–4050. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00311-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00311-7).
36. Liang C, Maruyama T, Ohmukai Yo., Sotani T, Matsuyama H. Characterization of random and multiblock copolymers of highly sulfonated poly(arylene ether sulfone) for a proton-exchange membrane // Journal of Applied Polymer Science. 2009. Vol. 114. Iss. 3. P. 1793–1802. <https://doi.org/10.1002/app.30658>.
37. Lv Liang, He Jing, Wei Min, Evans D.G., Duan Xue. Uptake of chloride ion from aqueous solution by calcined layered double hydroxides: equilibrium and kinetic studies // Water Research. 2006. Vol. 40. Iss. 4. P. 735–743. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.11.043>.
38. Клеоновский М.В., Шешуков О.Ю., Михеенков М.А., Лозовая Е.Ю. Термодинамическое моделирование восстановления цинка из шламов черной металлургии // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 3. С. 170–178. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-3-170-178>.
39. Dardel F., Arden T.V. Ion exchangers // Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley-VCH, 2003. [https://doi.org/10.1002/14356007.a14\\_393](https://doi.org/10.1002/14356007.a14_393).
40. Dron J., Dodi A. Comparison of adsorption equilibrium models for the study of Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> removal from aqueous solutions by an anion exchange resin // Journal of Hazardous Materials. 2011. Vol. 190. Iss. 1-3. P. 300–307. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.03.049>.
41. Wei Liu-Ying, Ye Guozhu, White J. Association of halogens in electric arc furnace dust and zinc oxide fume before and after leaching // REWAS'99: Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and Clean Technology (San Sebastian, 1999). San Sebastian: Malmö University, 1999. Vol. 2. P. 1503–1510.
42. Ito R., Fujita T., Sadaki J., Matsumoto Y., Ahn J.-W. Removal of chloride in bottom ash from the industrial and municipal solid waste incinerators // International Journal of the Society of Materials Engineering for Resources. 2006. Vol. 13. Iss. 2. P. 70–74. <https://doi.org/10.5188/ijmsr.13.70>.
43. Aubert J.E., Husson B., Saramone N. Utilization of municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash in blended cement: Part 2. Mechanical strength of mortars and environmental impact // Journal of Hazardous Materials. 2007. Vol. 146. Iss. 1-2. P. 12–19. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.11.044>.
44. Saikia N., Mertens G., Balen K.V., Elsen J., Gerven T.V., Vandecasteele C. Pre-treatment of municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash for utilisation in cement mortar // Construction and Building Materials. 2015. Vol. 96. P. 76–85. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.185>.
45. Joseph A.M., Snellings R., Heede P.V.D., Matthys S., Belie N.D. The use of municipal solid waste incineration ash in various building materials: a Belgian point of view // Materials (Basel). 2018. Vol. 11. Iss. 1. P. 141. <https://doi.org/10.3390/ma11010141>.

46. Toro M.A., Calmano W., Ecke H. Wet extraction of heavy metals and chloride from MSWI and straw combustion fly ashes // *Waste Management*. 2009. Vol. 29. Iss. 9. P. 2494–2499. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.04.013>.
47. Dontriros S., Likitlersuang S., Janjaroen D. Mechanisms of chloride and sulfate removal from municipal-solid-waste-incineration fly ash (MSWI FA): Effect of acid-base solutions // *Waste Management*. 2020. Vol. 101. P. 44–53. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.09.033>.
48. Rahmani A., Moradkhani D., Karami E., Rahmani A., Mousavinezhad S.K. Chloride removal from industrial soils and zinc slag in zinc production factories by sodium metabisulfite and copper(II) sulfate // *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2019. Vol. 72. Iss. 3. P. 645–650. <https://doi.org/10.1007/s12666-018-1514-6>.
49. Shanmugasundaram M., Sudalaimani K. A study on natural adsorbents for the removal of chloride ion in water // *International Journal of English Research and Technology*. 2012. Vol. 1. Iss. 5. <https://doi.org/10.17577/IJERTV1IS5306>.
50. Kumar L., Singh S.K. Column study for chloride removal from waste water by a low cost adsorbent (bio adsorbent) // *International Journal of English Research Science Innovative Technology*. 2017. Vol. 6. P. 31–41.
51. Apte S.S., Apte S.S., Kore V.S., Kore S.V. Chloride removal from wastewater by biosorption with the plant biomass // *Universal Journal of Environmental. Research Technology*. 2011. Vol. 1. Iss. 4. P. 416–422.
52. Rahman M.A., Ahsan Sh., Kaneco S., Katsumata H., Suzuki T., Ohta K. Wastewater treatment with multilayer media of waste and natural indigenous materials // *Journal of Environmental Management*. 2005. Vol. 74. Iss. 2. P. 107–110. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.08.012>.
53. Iakovleva E., Mäkilä E., Salonen J., Sitarz M., Sillanpää M. Industrial products and wastes as adsorbents for sulphate and chloride removal from synthetic alkaline solution and mine process water // *Chemical Engineering Journal*. 2015. Vol. 259. P. 364–371. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.07.091>.
54. Wang Xuewen, Du Yanping, Yang Haoxiang, Tian Shenghui, Ge Qi, Huang Sheng, Wang Mingyu. Removal of chloride ions from acidic solution with antimony oxides // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2021. Vol. 93. P. 170–175. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2020.09.020>.
55. Kolics A., Polkinghorne J.C., Wieckowski A. Adsorption of sulphate and chloride ions on aluminum // *Electrochimica Acta*. 1998. Vol. 43. Iss. 18. P. 2605–2618. [https://doi.org/10.1016/S0013-4686\(97\)10188-8](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(97)10188-8).
56. Dabrowski A. Adsorption – from theory to practice // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2001. Vol. 93. Iss. 1–3. P. 135–224. [https://doi.org/10.1016/S0001-8686\(00\)00082-8](https://doi.org/10.1016/S0001-8686(00)00082-8).
57. Lv Liang, Sun Peide, Gu Zhengyu, Du Hangeng, Pang Xiangjun, Tao Xiaohong, et al. Removal of chloride ion from aqueous solution by ZnAl-NO<sub>3</sub> layered double hydroxides as anion-exchanger // *Journal of Hazardous Materials*. 2009. Vol. 161. Iss. 2–3. P. 1444–1449. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.04.114>.
58. Lv Liang. Adsorption behaviour of calcined layered double hydroxides towards removal of fluoride from aqueous solution // *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*. 2005. Vol. 55. Iss. 6. P. 413–418. <https://doi.org/10.2166/aqua.2006.026>.
59. Zhang Duchao, Zhang Xinwang, Yang Tianzu, Rao Shuai, Hu Wei, Liu Weifeng, et al. Selective leaching of zinc from blast furnace dust with mono-ligand and mixed-ligand complex leaching systems. *Hydrometallurgy*. 2017. Vol. 169. P. 219–228. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.02.003>.
60. Kameda T., Miyano Y., Yoshioka T., Uchida M., Okuwaki A. New treatment methods for waste water containing chloride ion using magnesium-aluminum oxide // *Chemistry Letters*. 2000. Iss. 10. P. 1136–1137. <https://doi.org/10.1246/cl.2000.1136>.
61. Kameda T., Oba J., Yoshioka T. Simultaneous removal of Cl<sup>-</sup> and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> from seawater using Mg-Al oxide: kinetics and equilibrium studies // *Applied Water Science*. 2017. Vol. 7. Iss. 1. P. 129–136. <https://doi.org/10.1007/s13201-014-0224-4>.
62. Kameda T., Yoshioka T., Hoshi T., Uchida M., Okuwaki A. The removal of chloride from solutions with various cations using magnesium-aluminum oxide // *Separation and Purification Technology*. 2005. Vol. 42. Iss. 1. P. 25–29. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2004.05.010>.
63. Patent no. 4379037, United States of America. Removal of manganese and chloride ions from aqueous acidic zinc sulphate solutions / G.L. Bolton, V.B. Sefton, N. Zubryckyj. Filed 08.06.1981; publ. 05.04.2000.
64. Patent no. 103060561, China. A method of removing chloride from zinc sulfate solution / Y. Luo. Filed 15.01.2013; publ. 22.10.2014.
65. Selwyn L.S., Argyropoulos V. Removal of chloride and iron ions from archaeological wrought iron with sodium hydroxide and ethylenediamine solutions // *Studies in Conservation*. 2005. Vol. 50. Iss. 2. P. 81–100. <https://doi.org/10.1179/sic.2005.50.2.81>.
66. Krom M.D., Ben David A., Ingall E.D., Benning L.G., Clerici S., Bottrell S., et al. Bacterially mediated removal of phosphorus and cycling of nitrate and sulfate in the waste stream of a “zero-discharge” recirculating mariculture system // *Water Research*. 2014. Vol. 56. P. 109–121. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.02.049>.
67. Hu Yihang, Wang Haibei, Wang Yufang, Wang Honggang. Simultaneous removal of fluorine and chlorine from zinc sulfate solution in iron precipitation process // *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2018. Vol. 4. P. 95–102. <https://doi.org/10.1007/s40831-017-0154-0>.
68. Dabrowski A., Hubicki Z., Podkoscielny P., Robens E. Selective removal of the heavy metal ions from waters and industrial wastewaters by ion-exchange method // *Chemosphere*. 2004. Vol. 56. Iss. 2. P. 91–106.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.03.006>.

69. Zhu Bintuan, Clifford D.A., Chellama S. Comparison of electrocoagulation and chemical coagulation pretreatment for enhanced virus removal using microfiltration membranes // *Water Research*. 2005. Vol. 39. Iss. 13. P. 3098–3108. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.05.020>.

70. Yeo J.-H., Choi J.-H. Enhancement of nitrate removal from a solution of mixed nitrate, chloride and sulfate ions using a nitrate-selective carbon electrode // *Desalination*. 2013. Vol. 320. P. 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.04.013>.

71. Paz-Garcia J.M., Johannesson B., Ottosen L.M., Ribeiro A.B., Rodrigues-Maroto J.M. Simulation-based analysis of the differences in the removal rate of chlorides, nitrates and sulfates by electrokinetic desalination treatments // *Electrochimica Acta*. 2013. Vol. 89. P. 436–444. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.11.087>.

72. Liu Weizao, Zhang Renyuan, Liu Zhongqing, Li Chun. Removal of chloride from simulated zinc sulfate electrolyte by ozone oxidation // *Hydrometallurgy*. 2016. Vol. 160. P. 147–151. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.12.006>.

73. Gärtner R.S., Wilhelm F.G., Witkamp G.J., Wessling M. Regeneration of mixed solvent by electrodialysis: selective removal of chloride and sulfate // *Journal of Membrane Science*. 2005. Vol. 250. Iss. 1-2. P. 113–133. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2004.10.022>

74. Patent no. 4715939, United States of America. Method for removal of monovalent ions from ZnSO<sub>4</sub> electrolyte by electrodialysis / D.L. Ball, D.A.D. Boateng. Filed 02.04.1987; publ. 21.04.2007.

75. Patent no. 103572051, China. Dechlorination method of zinc sulfate solution / J. Wu. Filed 15.11.2013; publ. 12.02.2014.

76. Malaisamy R., Talla-Nwafo A., Jones K.L. Polyelectrolyte modification of nanofiltration membrane for selective removal of monovalent anions // *Separation and Purification Technology*. 2011. Vol. 77. Iss. 3. P. 367–374. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.01.005>.

77. Sata T., Sata T. Ion exchange membranes: preparation, characterization, modification and application. EngineeringPro collection. Tokuyama: Royal Society of Chemistry, 2004. 314 p.

78. Mohammad A.W., Teow Y.H., Ang W.L., Chung Y.T., Oatley-Radcliffe D.L., Hilal N. Nanofiltration membranes review: recent advances and future prospects // *Desalination*. 2015. Vol. 356. P. 226–254. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.10.043>.

79. Chmielarz A., Gnot W. Conversion of zinc chloride to zinc sulphate by electrodialysis – a new concept for solving the chloride ion problem in zinc hydrometallurgy // *Hydrometallurgy*. 2001. Vol. 61. Iss. 1. P. 21–43. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(01\)00153-0](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(01)00153-0).

80. Xiao Hui-Fang, Chen Qing, Cheng Huan, Li Xiu-Min, Qin Wen-Meng, Chen Bao-Sheng, et al. Selective removal of halides from spent zinc sulfate electrolyte by diffusion dialysis // *Journal of Membrane Science*. 2017. Vol. 537. P. 111–118. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.05.009>.

81. Nemchinova N.V., Chernykh V.E., Tyutrin A.A., Patrushov A. E. Extraction of zinc and iron from electrosmelting dust // *Steel in Translation*. 2016. Vol. 46. Iss. 5. P. 368–372. <https://doi.org/10.3103/S0967091216050090>.

82. Kuhn J.M., Mason C.R.S., Harlamovs J.R., Bell M.W., Buchalter E.M. Piloting of the halogon™ process with mixer-settlers and Bateman pulsed columns // *Hydrometallurgy 2003 – Fifth International Conference in Honor of Professor Ian Ritchie (Vancouver, 24–27 August 2003)*. Vancouver, 2003. Vol. 1. P. 777–786.

83. Mason C.R.S., Grinbaum B., Harlamovs J.R., Dreisinger G.B. Solvent extraction of halides from metallurgical solutions. In: *Hydrometallurgy 2003: Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Symposium Honoring Professor Ian M. Ritchie (Vancouver, 24–27 August 2003)*. Vancouver, 2003. Vol. 1. P. 765–776.

84. Daiga V.R., Home D.A. Production of crude zinc oxide from steel mill waste oxides using a rotary health furnace // *Recycling of Metals and Engineered Materials* / eds. D.L. Stewart, J.C. Daley, R.L. Stephens. Warrendale: TMS, 2000. P. 361–368. <https://doi.org/10.1002/9781118788073.ch31>.

85. Fleitikh I.Y., Grigorieva N.A., Nikiforova L.K., Logutenko O.A. Purification of zinc sulfate solutions from chloride using extraction with mixtures of a trialkyl phosphine oxide and organophosphorus acids // *Hydrometallurgy*. 2017. Vol. 169. P. 585–588. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.04.004>.

86. Peng Xianjia, Dou Wenyue, Kong Linghao, Hu Xingyun, Wang Xianliang. Removal of chloride ions from strongly acidic wastewater using Cu(0)/Cu(II): efficiency enhancement by UV irradiation and the mechanism for chloride ions removal // *Journal of Environmental Science and Technology*. 2019. 53. P. 383–389. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05787>.

87. Dou Wenyue, Hu Xingyun, Kong Linghao, Peng Xianjia. UV-improved removal of chloride ions from strongly acidic wastewater using Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: efficiency enhancement and mechanisms // *Journal of Environmental Science and Technology*. 2019. Vol. 53. Iss. 17. P. 10371–10378. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03296>.

88. Haag W.R., Hoigné J. Ozonation of water containing chlorine or chloramines. Reaction products and kinetics // *Water Resource*. 1983. Vol. 17. Iss. 10. P. 1397–1402. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(83\)90270-1](https://doi.org/10.1016/0043-1354(83)90270-1).

89. Hoigné J., Bader H., Haag W.R., Staehelin J. Rate constants of reactions of ozone with organic and inorganic compounds in water—III. Inorganic compounds and radicals // *Water Resource*. 1985. Vol. 19. Iss. 8. P. 993–1004. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(85\)90368-9](https://doi.org/10.1016/0043-1354(85)90368-9).

90. Razumovskii S.D., Konstantinova M.L., Grinevich T.V., Korovina G.V., Zaitsev V.Y. Mechanism and kinetics of the reaction of ozone with sodium chloride in aqueous solutions // *Kinetics and Catalysis*. 2010. Vol. 51. Iss. 4. P. 492–496.

<https://doi.org/10.1134/S0023158410040051>.

91. Razumovskii S., Korovina G., Grinevich T. Mechanism of the first step of ozone decomposition in aqueous solutions of sodium chloride in view of new data on the composition of reaction products // *Doklad Physical Chemistry*. Cham: Springer, 2010. Vol. 434. Iss. 2. P. 163–165. <https://doi.org/10.1134/S0012501610100027>.
92. Levanov A.V., Kuskov I.V., Koiaidarova K.B., Zosimov A.V., Antipenko E.E., Lunin V.V. Catalysis of the reaction of ozone with chloride ions by metal ions in an acidic medium // *Kinetics and Catalysis*. 2005. Vol. 46. Iss. 1. P. 138–143. <https://doi.org/10.1007/s10975-005-0021-z>.
93. Levanov A.V., Kuskov I.V., Koiaidarova K.B., Antipenko E.E., Lunin V.V. Interaction between ozone and the chloride ion in sulfuric acid solutions up to 6-M concentration // *Kinetics and Catalysis*. 2006. Vol. 47. Iss. 5. P. 682–685. <https://doi.org/10.1134/S0023158406050053>.
94. Levanov A.V., Kuskov I.V., Antipenko E.E., Lunin V.V. The oxidation of chlorine ions under the joint action of ozone and permanganate ions // *Russian Journal of Physical Chemistry*. 2006. Vol. 80. Iss. 4. P. 557–561. <https://doi.org/10.1134/S0036024406040121>.
95. Levanov A.V., Kuskov I.V., Antipenko E.E., Lunin V.V. Stoichiometry and products of ozone reaction with chloride ion in an acidic medium // *Russian Journal of Physical Chemistry*. 2012. Vol. 86. Iss. 5. P. 757–762. <https://doi.org/10.1134/S0036024412050202>.
96. Jacobsen F., Holcman J., Sehested K. Oxidation of manganese (II) by ozone and reduction of manganese (III) by hydrogen peroxide in acidic solution // *Journal of Chemical Kinetics*. 1998. Vol. 30. Iss. 3. P. 207–214. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4601\(1998\)30:3<207::AID-KIN6>3.0.CO;2-W](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4601(1998)30:3<207::AID-KIN6>3.0.CO;2-W).
97. Reisz E., Leitzke A., Jarocki A., Irmscher R., von Sonntag C. Permanganate formation in the reactions of ozone with Mn(II), a mechanistic study // *Journal of Water Supply Resources Technology AQUA*. 2008. Vol. 57. Iss. 6. P. 451–464. <https://doi.org/10.2166/aqua.2008.091>.
98. Dou Wenyue, Hu Xingyun, Kong Linghao, Peng Xianjia, Wang Xianliang. Removal of Cl(–) from strongly acidic wastewater using NaBiO<sub>3</sub>: A process of simultaneous oxidation and precipitation // *Desalination*. 2020. Vol. 491. P. 114566. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114566>.
99. Hu Jiajia, Xu Guangqing, Wang Jinwen, Lv Jun, Zhang Xinyi, Xie Ting, et al. Photocatalytic property of a Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticle modified BiOCl composite with a nanolayered hierarchical structure synthesized by in situ reactions // *Dalton Transactions*. 2015. Iss. 12. P. 5386–5395.
100. Huang Shouqiang, Li Liang, Zhu Nanwen, Lou Ziyang, Liu Weiqiao, Cheng Jiehong, et al. Removal and recovery of chloride ions in concentrated leachate by Bi(III) containing oxides quantum dots/two-dimensional flakes // *Journal of Hazardous Materials*. 2020. Vol. 382. P. 121041. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121041>.
101. Shan Lian-wei, Wang Gui-lin, Liu Li-zhu, Wu Ze. Band alignment and enhanced photocatalytic activation for α-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/BiOCl (001) core-shell heterojunction // *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*. 2015. Vol. 406. P. 145–151. <https://doi.org/10.1016/j.molcata.2015.05.024>.
102. Ike I.A., Linden K.G., Orbell J.D., Duke M. Critical review of the science and sustainability of persulphate advanced oxidation processes // *Chemical Engineering Journal*. 2018. Vol. 338. P. 651–669. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.01.034>.
103. Lutze H.V., Kerlin N., Schmidt T.C. Sulfate radical-based water treatment in presence of chloride: Formation of chlorate, inter-conversion of sulfate radicals into hydroxyl radicals and influence of bicarbonate // *Water Resources*. 2015. Vol. 72. P. 349–360. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.10.006>.
104. Waclawek S., Lutze H.V., Grübel K., Padil V.V.T., C'erník M., Dionysiou D.D. Chemistry of persulfates in water and wastewater treatment: a review // *Chemical Engineering Journal*. 2017. Vol. 330. P. 44–62. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.07.132>.
105. Wang Jianlong, Wang Shizong. Activation of persulfate (PS) and peroxymonosulfate (PMS) and application for the degradation of emerging contaminants // *Chemical Engineering Journal*. 2018. Vol. 334. P. 1502–1517. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.11.059>.
106. Hu Xingyun, Zhu Feng, Kong Linghao, Peng Xianjia. Sulfate radical-based removal of chloride ion from strongly acidic wastewater: kinetics and mechanism // *Journal of Hazardous Materials*. 2021. Vol. 410. P. 124540. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124540>.
107. Patent no. 4698139, United States of America. Hydrometallurgical method for treating valuable metal raw materials containing chloride and fluorides / S.P. Fugleberg, J.I. Pojarvi. Filed 06.10.1987; publ. 12.10.2004.

## References

1. Pereskoka V.V., Kamkina L.V., Projdak Y.S., Stovpchenko A.P., Kvichanska M.I. Reducing and thermal treatment of electric filter dust of electric arc furnace. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tehnicheskie nauki = Reporter of the Priazovskiy State Technical University. Section: Technical Sciences*. 2010;21:13-16. (In Russ.).
2. Wu Xuelian, Liu Zhongqing, Liu Xu. Chloride ion removal from zinc sulfate aqueous solution by electrochemical method. *Hydrometallurgy*. 2013;134-135:62-65. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2013.01.017>.
3. Chen Wei-Sheng, Shen Yun-Hwei, Tsai Min-Shing, Chang Fang-Chih. Removal of chloride from electric arc furnace

- dust. *Journal of Hazardous Materials*. 2011;190(1-3):639-644. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.03.096>.
4. Stovpchenko A.P., Kamkina L.V., Projdak Yu.S., Derevyanchenko I.V., Kucherenko O.L., Bondarenko M.Yu. Theoretical and experimental studies of composition and reducibility of arc steel-smelting furnace dust. *Elektrometallurgiya = Electrical Metallurgy*. 2009;8:29-36. (In Russ.).
  5. Wei Yu-Ling, Lin Chang-Yuan, Wang H. Paul Detoxification of hazardous dust with marine sediment. *Marine pollution bulletin*. 2014;85(2):810-815. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.01.016>.
  6. Tsubouchi N., Hashimoto H., Ohtaka N., Ohtsuka Ya. Chemical characterization of dust particles recovered from bag filters of electric arc furnaces for steelmaking: some factors influencing the formation of hexachlorobenzene. *Journal of Hazardous Materials*. 2010;183(1-3):116-124. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.06.122>.
  7. Lee Gye-Seung, Song Young Jun. Recycling EAF dust by heat treatment with PVC. *Minerals Engineering*. 2007;20(8):739-746. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2007.03.001>.
  8. Doronin I.E., Svyazhin A.G. Properties of steelmaking dust and the mechanism of its formation. *Metallurgist*. 2012;55(11-12):879-886. <https://doi.org/10.1007/s11015-012-9517-8>.
  9. Lin Xiaolong, Peng Zhiwei, Yan Jiaying, Li Zhizhong, Hwang Jiann-Yang, Zhang Yuanbo, Li Guanghui, Jiang Tao. Pyrometallurgical recycling of electric arc furnace dust. *Journal of Cleaner Production*. 2017;149:1079-1100. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.128>.
  10. Panshin A.M., Leontyev L.I., Kozlov P.A., Dyubanov V.G., Zatonksy A.V., Ivakin D.A. Reprocessing technology of electric arc furnace dust Join Stock Company "Severstal" in Waelz treating of complex Join Stock Company "Chelyabinsk Zink Plant". *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and Industry of Russia*. 2012;(11):4-6. (In Russ.). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2012-11-4-6> (In Russ.).
  11. Farnasov G.A., Kovalev V.I., Kurunov I.F., Bizhanov A.M., Vershinin I.N. *The method of iron oxide and zinc oxide selective extraction from slimes and dusts of metallurgical unit gas purifiers*. Patent RF, no. 2617086; 2017. (In Russ.).
  12. Yakornov S.A., Panshin A.M., Kozlov P.A., Ivakin D.A. Modern state of leaching technologies for ferrous metal dusts and their pyrometallurgical processing products (acid, ammonium and alkaline technologies). *Tsvetnye Metally*. 2017;5:37-43. <https://doi.org/10.17580/tsm.2017.05.05>.
  13. Kukurugya F., Havlik T., Kekki A., Forsén O. Characterization of dusts from three types of stainless steel production equipment. *Metall*. 2013;67(4):154-159.
  14. Qu Fulai, Zhang Jinkai, Liu Guirong, Zhao Shunbo. Experimental study on chloride ion diffusion in concrete affected by exposure conditions. *Materials*. 2022;15(8):2917. <https://doi.org/10.3390/ma15082917>.
  15. Guřresin N., Topkaya Y.A. Dechlorination of a zinc dross. *Hydrometallurgy*. 1998;49(1-2):179-187. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(98\)00012-7](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(98)00012-7).
  16. Gao Xingbao, Wang Wei, Ye Tunmin, Wang Feng, Lan Yuxin. Utilization of washed MSWI fly ash as partial cement substitute with the addition of dithiocarbamic chelate. *Journal of Environmental Management*. 2008;88(2):293-299. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.02.008>.
  17. Ruiz O., Clemente C., Alonso M., Alguacil F.J. Recycling of an electric arc furnace flue dust to obtain high grade ZnO. *Journal of Hazardous Materials*. 2007;141(1):33-36. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.06.079>.
  18. Drinkard W.F., Woerner Jr.H.J. *Metallurgical dust recycle process*. Patent US, no. 5912402A; 1999.
  19. Pan'shin A.M., Shakirzyanov R.M., Izbrekht P.A., Zatonksij A.V. Main directions to improve zinc production at JSC "Chelyabinsk zinc plant". *Tsvetnye Metally*. 2015;5:19-21. <https://doi.org/10.17580/tsm.2015.05.03>. (In Russ.).
  20. Li Chung-Lee, Tsai Min-Shing. A crystal phase study of zinc hydroxide chloride in electric-arc-furnace dust. *Journal of Materials Science*. 1993;28(17):4562-4570. <https://doi.org/10.1007/BF00414243>.
  21. Kemp D., Bond C.J., Franks D.M., Cote C. Mining, water and human rights: making the connection. *Journal of Cleaner Production*. 2010;18(15):1553-1562. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.06.008>.
  22. Machado J.G.M.S., Brehm F.A., Moraes C.A.M., Santos C.A., Vilela A.C.F., Cunha J.B.M. Characterization study of electric arc furnace dust phases. *Materials Research*. 2006;136(3):953-960. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392006000100009>.
  23. Najmanbaev M.A., Lohova N.G., Baltabekova Zh.A., Barkytova B.N. On processing possibility of zinc containing dust from the West Siberian Metallurgical Plant and Severstal with the ore from the Shaimerden deposit. In: *Fundamental'nye issledovaniya i prikladnye razrabotki processov pererabotki i utilizacii tekhnogennykh obrazovaniy: trudy III Kongressa s mezhdunarodnym uchastiem i Konferencii molodykh uchenykh V Forum "Ural'skij rynek loma, promyshlennykh i kommunal'nykh othodov" = Fundamental research and applied development of processing and disposal of technogenic formations: Proceedings of the 3d Congress with international participation and the Conference of young scientists of the 5th Forum "Ural market of scrap, industrial and municipal waste"*. 5–9 June 2017, Ekaterinburg. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 2017, p. 178-182. (In Russ.).
  24. Cruells M., Roca A., Núnēz C. Electric arc furnace flue dusts: characterization and leaching with sulphuric acid. *Hydrometallurgy*. 1992;31(3):213-231.
  25. Snurnikov A.P. *Zinc hydrometallurgy*. Moscow: Metallurgiya; 1981, 384 p. (In Russ.).
  26. Wang Yurong, Zhou Yang, Wang Wenchang, Chen Zhidong. Sustained deposition of silver on copper surface from choline chloride aqueous solution. *Journal of the Electrochemical Society*. 2013;160(3):D119-D123. <https://doi.org/10.1149/2.012304jes>.

27. Jian Wen. Study on the choice of dechlorination in the production of electric zinc of Jinshi metallurgy chemical plant. *Hunan Nonferrous Metall.* 2008;24:34-36.
28. Yan Huan, Chai Li-yuan, Peng Bing, Li Mi, Peng Ning, Hou Dong-ke. A novel method to recover zinc and iron from zinc leaching residue. *Minerals Engineering.* 2014;55:103-110. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.09.015>.
29. Kozlov P.A., Zatoniskij A.V., Pan'shin A.M. Research and development of technology for impurity removal from the Waelz oxide obtained after electric arc furnace dust treatment. In: *Metallurgiya-intekheko-2011: materialy IV Mezhdunarodnoj konferencii = Metallurgiya-intecheco-2011: materials of the 4<sup>th</sup> International conference.* 29–30 March 2011, Moscow. Moscow; 2012, p. 126-131. (In Russ.).
30. Havlik T., Turzakova M., Stopić S., Friedrich B. Atmospheric leaching of EAF dust with diluted sulphuric acid. *Hydro-metallurgy.* 2005;77(1):41-50. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2004.10.008>.
31. Fleischanderl A., Gennari U., Ilie A. ZEWA – metallurgical process for treatment of residues from steel industry and other industrial sectors to generate valuable products. *Ironmaking & Steelmaking.* 2004;6:444-449. <https://doi.org/10.1179/irs.2004.31.6.444>.
32. Silva R., Rubio J. Treatment of acid mine drainage (AMD) from coal mines in south Brazil. *International journal of coal preparation and utilization.* 2009;29(4):192-202. <https://doi.org/10.1080/19392690903066045>.
33. Zhao Hua-Zhang, Liu Chuan, Xu Yi, Ni Jin-Ren. High-concentration polyaluminum chloride: Preparation and effects of the Al concentration on the distribution and transformation of Al species. *Chemical Engineering Journal.* 2009;155(1-2):528-533. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.08.007>.
34. Sdiri A., Higashi T., Jamoussi F., Bouaziz S. Effect of impurities on the removal of heavy metals by natural limestones in aqueous systems. *Journal of Environmental Management.* 2012;93(1):245-253. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.08.002>.
35. Kameda T., Yoshioka T., Mitsunashi T., Uchida M., Okuwaki A. The simultaneous removal of calcium and chloride ions from calcium chloride solution using magnesium–aluminum oxide. *Water Resources.* 2003;37(16):4045-4050. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00311-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00311-7).
36. Liang C, Maruyama T, Ohmukai Yo., Sotani T, Matsuyama H. Characterization of random and multiblock copolymers of highly sulfonated poly(arylene ether sulfone) for a proton-exchange membrane. *Journal of Applied Polymer Science.* 2009;114(3):1793-1802. <https://doi.org/10.1002/app.30658>.
37. Lv Liang, He Jing, Wei Min, Evans D.G., Duan Xue. Uptake of chloride ion from aqueous solution by calcined layered double hydroxides: equilibrium and kinetic studies. *Water Research.* 2006;40(4):735-743. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.11.043>.
38. Kleonovskii M.V., Sheshukov O.Yu., Mikheenkov M.A., Lozovaya E.Yu. Thermodynamic modeling of zinc recovery from ferrous metallurgy sludge. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 2022;65(3):170-178. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-3-170-178>.
39. Dardel F., Arden T.V. Ion exchangers. In: *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry.* Wiley-VCH; 2003. [https://doi.org/10.1002/14356007.a14\\_393](https://doi.org/10.1002/14356007.a14_393).
40. Dron J., Dodi A. Comparison of adsorption equilibrium models for the study of Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> removal from aqueous solutions by an anion exchange resin. *Resin. Journal of Hazardous Materials.* 2011;190(1-3):300-307. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.03.049>.
41. Wei Liu-Ying, Ye Guozhu, White J. Association of halogens in electric arc furnace dust and zinc oxide fume before and after leaching. In: *REWAS'99: Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and Clean Technology.* 1999, San Sebastian. San Sebastian: Malmö University; 1999, vol. 2, p. 1503-1510.
42. Ito R., Fujita T., Sadaki J., Matsumoto Y., Ahn J.-W. Removal of chloride in bottom ash from the industrial and municipal solid waste incinerators. *International Journal of the Society of Materials Engineering for Resources.* 2006;13(2):70-74. <https://doi.org/10.5188/ijmsr.13.70>.
43. Aubert J.E., Husson B., Saramone N. Utilization of municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash in blended cement: Part 2. Mechanical strength of mortars and environmental impact. *Journal of Hazardous Materials.* 2007;146(1-2):12-19. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.11.044>.
44. Saikia N., Mertens G., Balen K.V., Elsen J., Gerven T.V., Vandecasteele C. Pre-treatment of municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash for utilisation in cement mortar. *Construction and Building Materials.* 2015;96:76-85. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.185>.
45. Joseph A.M., Snellings R., Heede P.V.D., Matthys S., Belie N.D. The use of municipal solid waste incineration ash in various building materials: a Belgian point of view. *Materials (Basel).* 2018;11(1):141. <https://doi.org/10.3390/ma11010141>.
46. Toro M.A., Calmano W., Ecke H. Wet extraction of heavy metals and chloride from MSWI and straw combustion fly ashes. *Waste Management.* 2009;29(9):2494-2499. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.04.013>.
47. Dontriros S., Likitlersuang S., Janjaroen D. Mechanisms of chloride and sulfate removal from municipal-solid-waste-incineration fly ash (MSWI FA): Effect of acid-base solutions. *Waste Management.* 2020;101:44-53. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.09.033>.
48. Rahmani A., Moradkhani D. Karami E. Rahmani A., Mousavinezhad S.K. Chloride removal from industrial soils and zinc slag in zinc production factories by sodium metabisulfite and copper(ii) sulfate. *Transactions of the Indian Institute of Metals.* 2019;72(3):645-650. <https://doi.org/10.1007/s12666-018-1514-6>.

49. Shanmugasundaram M., Sudalaimani K. A study on natural adsorbents for the removal of chloride ion in water. *International Journal of English Research and Technology*. 2012;1(5). <https://doi.org/10.17577/IJERTV11S5306>.
50. Kumar L., Singh S.K. Column study for chloride removal from waste water by a low cost adsorbent (bio adsorbent). *International Journal of English Research Science Innovative Technology*. 2017;6:31-41.
51. Apte S.S., Apte S.S., Kore V.S., Kore S.V. Chloride removal from wastewater by biosorption with the plant biomass. *Universal Journal of Environmental. Research Technology*. 2011;1(4):416-422.
52. Rahman M.A., Ahsan Sh., Kaneco S., Katsumata H., Suzuki T., Ohta K. Wastewater treatment with multilayer media of waste and natural indigenous materials. *Journal of Environmental Management*. 2005;74(2):107-110. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.08.012>.
53. Iakovleva E., Mäkilä E., Salonen J., Sitarz M., Sillanpää M. Industrial products and wastes as adsorbents for sulphate and chloride removal from synthetic alkaline solution and mine process water. *Chemical Engineering Journal*. 2015;259:364-371. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.07.091>.
54. Wang Xuewen, Du Yanping, Yang Haoxiang, Tian Shenghui, Ge Qi, Huang Sheng, Wang Mingyu. Removal of chloride ions from acidic solution with antimony oxides. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2021;93:170-175. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2020.09.020>.
55. Kolics A., Polkinghorne J.C., Wieckowski A. Adsorption of sulphate and chloride ions on aluminum. *Electrochimica Acta*. 1998;43(18):2605-2618. [https://doi.org/10.1016/S0013-4686\(97\)10188-8](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(97)10188-8).
56. Dabrowski A. Adsorption – from theory to practice. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2001;93(1-3):135-224. [https://doi.org/10.1016/S0001-8686\(00\)00082-8](https://doi.org/10.1016/S0001-8686(00)00082-8).
57. Lv Liang, Sun Peide, Gu Zhengyu, Du Hangeng, Pang Xiangjun, Tao Xiaohong, Xu Rufeng, Xu Lili, et al. Removal of chloride ion from aqueous solution by ZnAl-NO<sub>3</sub> layered double hydroxides as anion-exchanger. *Journal of Hazardous Materials*. 2009;161(2-3):1444-1449. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.04.114>.
58. Lv Liang. Adsorption behaviour of calcined layered double hydroxides towards removal of fluoride from aqueous solution. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*. 2005;55(6):413-418. <https://doi.org/10.2166/aqua.2006.026>.
59. Zhang Duchao, Zhang Xinwang, Yang Tianzu, Rao Shuai, Hu Wei, Liu Weifeng, et al. Selective leaching of zinc from blast furnace dust with mono-ligand and mixed-ligand complex leaching systems. *Hydrometallurgy*. 2017;169:219-228. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.02.003>.
60. Kameda T., Miyano Y., Yoshioka T., Uchida M., Okuwaki A. New treatment methods for waste water containing chloride ion using magnesium-aluminum oxide. *Chemistry Letters*. 2000;10:1136-1137. <https://doi.org/10.1246/cl.2000.1136>.
61. Kameda T., Oba J., Yoshioka T. Simultaneous removal of Cl<sup>-</sup> and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> from seawater using Mg-Al oxide: kinetics and equilibrium studies. *Applied Water Science*. 2017;7(1):129-136. <https://doi.org/10.1007/s13201-014-0224-4>.
62. Kameda T., Yoshioka T., Hoshi T., Uchida M., Okuwaki A. The removal of chloride from solutions with various cations using magnesium-aluminum oxide. *Separation and Purification Technology*. 2005;42(1):25-29. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2004.05.010>.
63. Bolton G.L., Sefton V.B., Zubryckij N. *Removal of manganese and chloride ions from aqueous acidic zinc sulphate solutions*. Patent US, no. 4379037; 2000.
64. Luo Y. *A method of removing chloride from zinc sulfate solution*. Patent China, no. 103060561; 2014.
65. Selwyn L.S., Argyropoulos V. Removal of chloride and iron ions from archaeological wrought iron with sodium hydroxide and ethylenediamine solutions. *Studies in Conservation*. 2005;50(2):81-100. <https://doi.org/10.1179/sic.2005.50.2.81>.
66. Krom M.D., Ben David A., Ingall E.D., Benning L.G., Clerici S., Bottrell S., et al. Bacterially mediated removal of phosphorus and cycling of nitrate and sulfate in the waste stream of a "zero-discharge" recirculating mariculture system. *Water Research*. 2014;56:109-121. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.02.049>.
67. Hu Yihang, Wang Haibei, Wang Yufang, Wang Honggang. Simultaneous removal of fluorine and chlorine from zinc sulfate solution in iron precipitation process. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2018;4:95-102. <https://doi.org/10.1007/s40831-017-0154-0>.
68. Dabrowski A., Hubicki Z., Podkosielný P., Robens E. Selective removal of the heavy metal ions from waters and industrial wastewaters by ion-exchange method. *Chemosphere*. 2004;56(2):91-106. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.03.006>.
69. Zhu Bintuan, Clifford D.A., Chellama S. Comparison of electrocoagulation and chemical coagulation pretreatment for enhanced virus removal using microfiltration membranes. *Water Research*. 2005;39(13):3098-3108. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.05.020>.
70. Yeo J.-H., Choi J.-H. Enhancement of nitrate removal from a solution of mixed nitrate, chloride and sulfate ions using a nitrate-selective carbon electrode. *Desalination*. 2013;320:10-16. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.04.013>.
71. Paz-Garcia J.M., Johannesson B., Ottosen L.M., Ribeiro A.B., Rodrigues-Maroto J.M. Simulation-based analysis of the differences in the removal rate of chlorides, nitrates and sulfates by electrokinetic desalination treatments. *Electrochimica Acta*. 2013;89:436-444. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.11.087>.
72. Liu Weizao, Zhang Renyuan, Liu Zhongqing, Li Chun. Removal of chloride from simulated zinc sulfate electrolyte by ozone oxidation. *Hydrometallurgy*. 2016;160:147-151. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.12.006>.
73. Gärtner R.S., Wilhelm F.G., Witkamp G.J., Wessling M. Regeneration of mixed solvent by electrodialysis: selective removal of chloride and sulfate. *Journal of Membrane Science*. 2005;250(1-2):113-133. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2004.10.022>.
74. Ball D.L., Boateng D.A.D. *Method for removal of monovalent ions from ZnSO<sub>4</sub> electrolyte by electrodialysis*. Patent

US, no. 4715939; 1987.

75. Wu J. *Dechlorination method of zinc sulfate solution*. Patent China, no. 103572051A; 2014.

76. Malaisamy R., Talla-Nwafo A., Jones K.L. Polyelectrolyte modification of nanofiltration membrane for selective removal of monovalent anions. *Separation and Purification Technology*. 2011;77(3):367-374. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.01.005>.

77. Sata T., Sata T. Ion exchange membranes: preparation, characterization, modification and application. EngineeringPro collection. Tokuyama: Royal Society of Chemistry; 2004, 314 p.

78. Mohammad A.W., Teow Y.H., Ang W.L., Chung Y.T., Oatley-Radcliffe D.L., Hilal N. Nanofiltration membranes review: recent advances and future prospects. *Desalination*. 2015;356:226-254. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.10.043>.

79. Chmielarz A., Gnot W. Conversion of zinc chloride to zinc sulphate by electro dialysis – a new concept for solving the chloride ion problem in zinc hydrometallurgy. *Hydrometallurgy*. 2001;61(1):21-43. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(01\)00153-0](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(01)00153-0).

80. Xiao Hui-Fang, Chen Qing, Cheng Huan, Li Xiu-Min, Qin Wen-Meng, Chen Bao-Sheng, et al. Selective removal of halides from spent zinc sulfate electrolyte by diffusion dialysis // *Journal of Membrane Science*. 2017;537:111-118. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.05.009>.

81. Nemchinova N.V., Chernykh V.E., Tyutrin A.A., Patrushov A.E. Extraction of zinc and iron from electrosmelting dust. *Steel in Translation*. 2016;46(5):368-372. <https://doi.org/10.3103/S0967091216050090>.

82. Kuhn J.M., Mason C.R.S., Harlamovs J.R., Bell M.W., Buchalter E.M. Piloting of the halogontm process with mixer-settlers and Bateman pulsed columns. In: *Hydrometallurgy 2003 – Fifth International Conference in Honor of Professor Ian Ritchie*. 24–27 August 2003, Vancouver. Vancouver; 2003, vol. 1, p. 777-786.

83. Mason C.R.S., Grinbaum B., Harlamovs J.R., Dreisinger G.B. Solvent extraction of halides from metallurgical solutions. In: *Hydrometallurgy 2003 – Fifth International Conference in Honor of Professor Ian Ritchie*. 24–27 August 2003, Vancouver. Vancouver; 2003, vol. 1, p. 765–776.

84. Daiga V.R., Home D.A. Production of crude zinc oxide from steel mill waste oxides using a rotary health furnace. In: Stewart D.L., Daley J.C., Stephens R.L. (eds.). *Recycling of Metals and Engineered Materials*. Warrendale: TMS; 2000, p. 361-368. <https://doi.org/10.1002/9781118788073.ch31>.

85. Fleitikh I.Y., Grigorieva N.A., Nikiforova L.K., Logutenko O.A. Purification of zinc sulfate solutions from chloride using extraction with mixtures of a trialkyl phosphine oxide and organophosphorus acids. *Hydrometallurgy*. 2017;169:585-588. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.04.004>.

86. Peng Xianjia, Dou Wenyue, Kong Linghao, Hu Xingyun, Wang Xianliang. Removal of chloride ions from strongly acidic wastewater using Cu(0)/Cu(II): efficiency enhancement by UV irradiation and the mechanism for chloride ions removal. *Journal of Environmental Science and Technology*. 2019;53:383-389. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05787>.

87. Dou Wenyue, Hu Xingyun, Kong Linghao, Peng Xianjia. UV-improved removal of chloride ions from strongly acidic wastewater using Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: efficiency enhancement and mechanisms. *Journal of Environmental Science and Technology*. 2019;53(17):10371-10378. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03296>.

88. Haag W.R., Hoigné J. Ozonation of water containing chlorine or chloramines. Reaction products and kinetics. *Water Resource*. 1983;17(10):1397-1402. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(83\)90270-1](https://doi.org/10.1016/0043-1354(83)90270-1).

89. Hoigné J., Bader H., Haag W.R., Staehelin J. Rate constants of reactions of ozone with organic and inorganic compounds in water—III. Inorganic compounds and radicals. *Water Resource*. 1985;19(8):993-1004. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(85\)90368-9](https://doi.org/10.1016/0043-1354(85)90368-9).

90. Razumovskii S.D., Konstantinova M.L., Grinevich T.V., Korovina G.V., Zaitsev V.Y. Mechanism and kinetics of the reaction of ozone with sodium chloride in aqueous solutions. *Kinetics and Catalysis*. 2010;51(4):492-496. <https://doi.org/10.1134/S0023158410040051>.

91. Razumovskii S., Korovina G., Grinevich T. Mechanism of the first step of ozone decomposition in aqueous solutions of sodium chloride in view of new data on the composition of reaction products. In: *Doklad Physical Chemistry*. Cham: Springer; 2010, vol. 434, iss. 2, p. 163-165. <https://doi.org/10.1134/S0012501610100027>.

92. Levanov A.V., Kuskov I.V., Koiaidarova K.B., Zosimov A.V., Antipenko E.E., Lunin V.V. Catalysis of the reaction of ozone with chloride ions by metal ions in an acidic medium. *Kinetics and Catalysis*. 2005;46(1):138-143. <https://doi.org/10.1007/s10975-005-0021-z>.

93. Levanov A.V., Kuskov I.V., Koiaidarova K.B., Antipenko E.E., Lunin V.V. Interaction between ozone and the chloride ion in sulfuric acid solutions up to 6-M concentration. *Kinetics and Catalysis*. 2006;47(5):682-685. <https://doi.org/10.1134/S0023158406050053>.

94. Levanov A.V., Kuskov I.V., Antipenko E.E., Lunin V.V. The oxidation of chlorine ions under the joint action of ozone and permanganate ions. *Russian Journal of Physical Chemistry*. 2006;80(4):557-561. <https://doi.org/10.1134/S0036024406040121>.

95. Levanov A.V., Kuskov I.V., Antipenko E.E., Lunin V.V. Stoichiometry and products of ozone reaction with chloride ion in an acidic medium. *Russian Journal of Physical Chemistry*. 2012;86(5):757-762. <https://doi.org/10.1134/S0036024412050202>.

96. Jacobsen F., Holcman J., Sehested K. Oxidation of manganese (II) by ozone and reduction of manganese (III) by hydrogen peroxide in acidic solution. *Journal of Chemical Kinetics*. 1998;30(3):207-214. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4601\(1998\)30:3<207::AID-KIN6>3.0.CO;2-W](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4601(1998)30:3<207::AID-KIN6>3.0.CO;2-W).

97. Reisz E., Leitzke A., Jarocki A., Irmscher R., von Sonntag C. Permanganate formation in the reactions of ozone with Mn(II), a mechanistic study. *Journal of Water Supply Resources Technology AQUA*. 2008;57(6):451-464.

<https://doi.org/10.2166/aqua.2008.091>.

98. Dou Wenyue, Hu Xingyun, Kong Linghao, Peng Xianjia, Wang Xianliang. Removal of Cl(-) from strongly acidic wastewater using NaBiO<sub>3</sub>: A process of simultaneous oxidation and precipitation. *Desalination*. 2020;491:114566. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114566>.

99. Hu Jiajia, Xu Guangqing, Wang Jinwen, Lv Jun, Zhang Xinyi, Xie Ting, et al. Photocatalytic property of a Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticle modified BiOCl composite with a nanolayered hierarchical structure synthesized by in situ reactions. *Dalton Transactions*. 2015;12:5386-5395.

100. Huang Shouqiang, Li Liang, Zhu Nanwen, Lou Ziyang, Liu Weiqiao, Cheng Jiehong, et al. Removal and recovery of chloride ions in concentrated leachate by Bi(III) containing oxides quantum dots/two-dimensional flakes. *Journal of Hazardous Materials*. 2020;382:121041. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121041>

101. Shan Lian-wei, Wang Gui-lin, Liu Li-zhu, Wu Ze. Band alignment and enhanced photocatalytic activation for α-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/BiOCl (001) core-shell heterojunction. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*. 2015;406:145-151. <https://doi.org/10.1016/j.molcata.2015.05.024>.

102. Ike I.A., Linden K.G., Orbell J.D., Duke M. Critical review of the science and sustainability of persulphate advanced oxidation processes. *Chemical Engineering Journal*. 2018;338:651-669. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.01.034>.

103. Lutze H.V., Kerlin N., Schmidt T.C. Sulfate radical-based water treatment in presence of chloride: Formation of chlorate, inter-conversion of sulfate radicals into hydroxyl radicals and influence of bicarbonate. *Water Resources*. 2015;72:349-360. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.10.006>.

104. Waclawek S., Lutze H.V., Grübel K., Padil V.V.T., Černík M., Dionysiou D.D. Chemistry of persulfates in water and wastewater treatment: a review. *Chemical Engineering Journal*. 2017;330:44-62. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.07.132>.

105. Wang Jianlong, Wang Shizong. Activation of persulfate (PS) and peroxymonosulfate (PMS) and application for the degradation of emerging contaminants. *Chemical Engineering Journal*. 2018;334:1502-1517. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.11.059>.

106. Hu Xingyun, Zhu Feng, Kong Linghao, Peng Xianjia. Sulfate radical-based removal of chloride ion from strongly acidic wastewater: kinetics and mechanism. *Journal of Hazardous Materials*. 2021;410:124540. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124540>.

107. Fugleberg S.P., Pojarvi J.I. *Hydrometallurgical method for treating valuable metal raw materials containing chloride and fluorides*. Patent US, no. 2004.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

##### **Блудова Дана Иршековна,**

ассистент кафедры  
металлургии цветных металлов,  
Уральский федеральный университет имени первого  
Президента России Б.Н. Ельцина,  
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия  
✉ e-mail: dana.bludova@urfu.ru

##### **Мамяченков Сергей Владимирович,**

д.т.н., с.н.с.,  
заведующий кафедрой металлургии  
цветных металлов,  
Уральский федеральный университет имени первого  
Президента России Б.Н. Ельцина,  
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия  
e-mail: svmamyachenkov@yandex.ru

##### **Анисимова Ольга Сергеевна,**

к.х.н., доцент,  
доцент кафедры металлургии цветных металлов,  
Уральский федеральный университет имени первого  
Президента России Б.Н. Ельцина,  
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия  
e-mail: osanis@mail.ru

#### **Вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

##### **Dana I. Bludova,**

Assistant Professor of the Department of Non-Ferrous  
Metals Metallurgy,  
Ural Federal University named after the First President  
of Russia B.N. Yeltsin,  
19, Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia  
✉ e-mail: dana.bludova@urfu.ru

##### **Sergey V. Mamyachenkov,**

Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher,  
Head of the Department  
of Non-Ferrous Metals Metallurgy,  
Ural Federal University named after the First President  
of Russia B.N. Yeltsin,  
19, Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia  
e-mail: svmamyachenkov@yandex.ru

##### **Olga S. Anisimova,**

Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Non-Ferrous  
Metals Metallurgy,  
Ural Federal University named after the First President  
of Russia B.N. Yeltsin,  
19, Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia  
e-mail: osanis@mail.ru

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

The authors contributed equally to this article.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

**Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 09.11.2022; одобрена после рецензирования 15.02.2023; принята к публикации 23.03.2023.

**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 09.11.2022; approved after reviewing 15.02.2023; accepted for publication 23.03.2023.

## METALLURGY



Original article

<https://elibrary.ru/ebfeum><https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-422-435>

## Study of the basic laws of dissolution of gold and copper in solutions with an ultra-low concentration of sodium cyanide

Anastasiya O. Vasilkova<sup>1✉</sup>, Olga D. Khmel'nitskaya<sup>2</sup>, Grigoriy I. Voiloshnikov<sup>3</sup><sup>1,2,3</sup>Irkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and Diamonds, Irkutsk, Russia

**Abstract.** The work sets out to study the basic physicochemical dissolution patterns of gold, copper, and natural copper-containing minerals (chalcopyrite, bornite and azurite) in solutions with an ultra-low concentration of sodium cyanide (from  $0.102 \cdot 10^{-3}$  to  $4.08 \cdot 10^{-3}$  mol/L). The influence of various factors on the rate of dissolution of Au and Cu in solutions with ultra-low NaCN concentrations was studied by the rotating disk method; for natural copper minerals, the powder diffraction method was used. The concentration of gold and copper in solutions was determined by atomic absorption analysis. The chemical composition of the studied copper minerals was determined using the X-ray phase method, while the specific surface of the minerals was detected using a laser granulometer. The process of gold dissolution is shown to proceed in both diffusion and kinetic regions. In the diffusion region, the rate constant was  $0.334 \cdot 10^{-6} \text{ L} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2} \cdot \text{rad}^{-1/2}$ ; in the kinetic region –  $0.919 \cdot 10^{-6} \text{ L} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2}$ . The calculated value of the apparent activation energy for the diffusion region was 22.5 kJ/mol; for the kinetic region – 40.1 kJ/mol. The addition of glycine to a solution with an ultra-low concentration of sodium cyanide is shown to increase the specific dissolution rate of gold by 1.2 times: from  $0.692 \cdot 10^{-9}$  to  $0.82 \cdot 10^{-9}$  mol/cm<sup>2</sup>·s. The process of copper dissolution is shown to take place in the diffusion region. The rate constant was  $0.496 \cdot 10^{-6} \text{ L} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2} \cdot \text{rad}^{-1/2}$  at an activation energy of 17.0 kJ/mol. With a fractional supply of sodium cyanide, the dissolution rate of copper minerals is reduced by 10–30% compared to a single load. The calculated apparent activation energy values for chalcopyrite, bornite, and azurite were 22.03, 24.2, and 24.1 kJ/mol, respectively. Thus, the use of ultra-low concentrations of NaCN in the process of cyanidation of gold and copper has a positive effect, which can be used in the processing of gold-copper raw materials to significantly reduce the consumption of sodium cyanide.

**Keywords:** gold, copper, sodium cyanide, dissolution kinetics, rate constant, activation energy

**For citation:** Vasilkova A.O., Khmel'nitskaya O.D., Voiloshnikov G.I. Study of the basic laws of dissolution of gold and copper in solutions with an ultra-low concentration of sodium cyanide. *iPolytech Journal*. 2023;27(2):422-435. EDN: EBFUEM, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-422-435>.

## МЕТАЛЛУРГИЯ

Научная статья  
УДК 532.7:66.06

## Изучение основных закономерностей растворения золота и меди в растворах с ультранизкой концентрацией цианида натрия

А.О. Василькова<sup>1✉</sup>, О.Д. Хмельницкая<sup>2</sup>, Г.И. Войлошников<sup>3</sup><sup>1,2,3</sup>АО «Иргиредмет», г. Иркутск, Россия

**Резюме.** Цель – изучение основных физико-химических закономерностей растворения золота, меди и природных медьсодержащих минералов (халькопирит, борнит и азурит) в растворах с ультранизкой концентрацией цианида натрия (от  $0,102 \cdot 10^{-3}$  до  $4,08 \cdot 10^{-3}$  моль/л). Влияние различных факторов на скорость растворения Au и Cu в растворах с ультранизкой концентрацией NaCN изучали методом вращающегося диска, природных медных минералов – методом порошков. Концентрацию золота и меди в растворах определяли атомно-абсорбционным методом анализа. Химический состав исследуемых медных минералов – рентгенофазовым методом, удельную поверхность минералов выявляли с помощью лазерного гранулометра. Установлено, что процесс растворения

золота протекает в двух областях – в диффузионной и кинетической. Константа скорости в диффузионной области составила  $0,334 \cdot 10^{-6} \text{ л} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1/2} \cdot \text{рад}^{-1/2}$ , в кинетической –  $0,919 \cdot 10^{-6} \text{ л} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1/2}$ . Рассчитанное значение кажущейся энергии активации для диффузионной области составило 22,5 кДж/моль, кинетической – 40,1 кДж/моль. Показано, что добавление глицина в раствор с ультранизкой концентрацией цианида натрия способствует повышению удельной скорости растворения золота в 1,2 раза: с  $0,692 \cdot 10^{-9}$  до  $0,82 \cdot 10^{-9}$  моль/см<sup>2</sup>·с. Установлено, что процесс растворения меди протекает в диффузионной области. Константа скорости составила  $0,496 \cdot 10^{-6} \text{ л} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1/2} \cdot \text{рад}^{-1/2}$ , энергия активации – 17,0 кДж/моль. Показано, что при дробной подаче цианида натрия скорость растворения медных минералов снижается на 10–30% в сравнении с разовой загрузкой. Рассчитанные значения кажущейся энергии активации составили для халькопирита, борнита и азурита, соответственно, кДж/моль: 22,03, 24,2 и 24,1. Таким образом, применение ультранизких концентраций NaCN в процессе цианирования золота и меди дает положительный эффект, что может быть использовано при переработке золотомедного сырья, и, как следствие, позволит существенно снизить расход цианистого натрия.

**Ключевые слова:** золото, медь, цианид натрия, кинетика растворения, константа скорости, энергия активации

**Для цитирования:** Василькова А.О., Хмельницкая О.Д., Войлошников Г.И. Изучение основных закономерностей растворения золота и меди в растворах с ультранизкой концентрацией цианида натрия // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 2. С. 422–435. (In Eng.). EDN: EBFEUM, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-422-435>.

## INTRODUCTION

Currently, the search for rational ways to extract valuable components from man-made raw materials, which include such items as roasted pyrite and enrichment tailings obtained during the processing of [1] polymetallic ores, has become rather urgent.

Among the various methods for extracting valuable components from man-made raw materials, cyanidation represents one of the most effective approaches. However, the formation of copper cyanide complexes as a result of leaching during gold extraction results in a high consumption of sodium cyanide and correspondingly increased operating costs [1–9].

The works of Australian researchers [10–12] describe a method for extracting precious metals from gold-copper ores using a mixture of sodium cyanide and glycine as leaching agents, which offers a number of advantages compared with other amino acids due to its stability and biodegradability, resulting in increased environmental friendliness [2]. The addition of glycine (2–10 g/dm<sup>3</sup>) to cyanide (0.8–1.2 g/dm<sup>3</sup>) during leaching is shown to increase the extraction of precious metals by 1.5–1.8 times.

Test experiments carried out to investigate the leaching of noble metals from man-made raw materials using solutions having an ultra-low concentration of sodium cyanide with the aim of

reducing the consumption of sodium cyanide in the cyanidation process ( $< 1.02 \cdot 10^{-3} \text{ mol/dm}^3$ ) have demonstrated satisfactory results [13]. However, there is no information in the literature about the basic dissolution behaviours of gold and copper in solutions with low concentrations of sodium cyanide (less than  $4.08 \cdot 10^{-3} \text{ mol/dm}^3$ ).

In this regard, it seems appropriate to study the basic patterns of dissolution of gold and copper in solutions having an ultra-low concentration of sodium cyanide ( $0.102 \cdot 10^{-3} - 4.08 \cdot 10^{-3} \text{ mol/dm}^3$ ) using the rotating disk method, which was successfully applied by Professor I.A. Karkovsky to study the dissolution kinetics of precious metals using various reagents. This method, which provides good reproducibility of experimental results, can be used to identify factors that determine the reaction rate, on the basis of which certain practical conclusions can be drawn<sup>4</sup> [14, 15].

## EXPERIMENTAL PROCEDURE

For the experiments, gold and copper disks with a fineness of 999.9 were used. Prior to the start of each experiment, each disk was carefully sanded, polished, washed with water and wiped with ethyl alcohol. These operations were carried out in order to prevent the disk surface from changing during the experiment, which could affect the reproducibility of the results.

<sup>4</sup> Kholmanskikh Yu.V. *Dissolution kinetics of noble metals and their alloys in cyanide solutions: PhD thesis in Engineering Sciences*. Sverdlovsk; 1961. / Холманских Ю.В. Кинетика растворения благородных металлов и их сплавов в цианистых растворах: дис. ... канд. техн. наук: Свердловск, 1961.

At the beginning and end of each experiment, the pH and concentration of dissolved oxygen in the solution were measured according to the potentiometric method. The oxidiser of gold was atmospheric oxygen, whose concentration in the solution was in the range of 8.3–7.9 mg/dm<sup>3</sup> and practically did not change throughout all the experiments.

The amount of dissolved metal, determined by sampling and analysing solution samples, was calculated by the formula [14]:

$$Q = \frac{C_{Me} \cdot V}{A_{Me} \cdot 1000 \cdot S}, \quad (1)$$

where  $C_{Me}$  – concentration of the metal in solution (mol/L);  $V$  – volume of the solution (L);  $A_{Me}$  – atomic mass of metal;  $S$  – disk surface area (cm<sup>2</sup>);  $Q$  – amount of dissolved metal (mol/cm<sup>2</sup>).

The amount of metal in the samples selected for analysis and the change in the total volume of the solution were taken into account. The concentration of metal in solutions was determined by atomic absorption analysis.

The dissolution rate was calculated according to the formula [14]:

$$v = \frac{Q}{\tau}, \quad (2)$$

where  $v$  – rate of metal dissolution (mol/cm<sup>2</sup>·s);  $S$  – disk surface area (cm<sup>2</sup>);  $\tau$  – duration of dissolution (s).

To eliminate errors, the experimental data were processed using the least squares method, allowing the average value of the rate to be obtained from several data points. The error in determining the gold dissolution rate was 4% with a probability of 96%.

## **STUDY OF THE GOLD DISSOLUTION RATE IN SOLUTIONS WITH AN ULTRA-LOW CONCENTRATION OF SODIUM CYANIDE**

***Dependence of the gold dissolution rate on the disk rotation frequency.*** To determine the nature of the gold dissolution process at ultra-low concentrations of sodium cyanide, the dependence of the gold dissolution rate on the disk rotation frequency ( $n$ ) in the range from 4.19 to 41.87 rad/s was studied. The selection of the specified range of mixing speeds was car-

ried out taking into account that the value of the Reynolds number ( $Re$ ) should be within  $10^1 \div 10^4$  (when  $Re < 10^1$  – edge effects; when  $Re > 10^4$  – turbulent mode) [15–20]. The Reynolds number was calculated using the formula:

$$Re = \frac{\omega \cdot R^2}{\nu}, \quad (3)$$

where  $\omega$  is the angular velocity of rotation of the disk (rad/s);  $\nu$  – kinematic viscosity of the liquid (cm<sup>2</sup>/s);  $R$  is the radius of the disk (cm).

For a disk having a radius of 1.5 cm in the selected rotation frequency interval, the value of the Reynolds number was in the range from 942.75 to 9420.75. Within this range, conditions of the laminar flow regime of the disk surface area are observed.

The experiments were carried out under the following constant conditions: temperature – 25°C; pH – 11.0; NaCN concentration –  $0.612 \cdot 10^{-3}$  mol/dm<sup>3</sup>. The resulting graph of the dependence of the rate of dissolution of gold on the number of revolutions of the disk is shown in Fig. 1.

Graphical data show that, with an increase in the speed of rotation of the disk, the rate of dissolution of gold increases only up to a certain limit – 15.7 rad/s (150 rpm). At the same time, the dissolution rate increases from  $3.22 \cdot 10^{-10}$  to  $5.43 \cdot 10^{-10}$  mol/cm<sup>2</sup>·s and further does not depend on the mixing intensity, since the dissolution process passes from the diffusion region to the kinetic [15]. That is, when the disk rotation speed is up to 15.7 rad/s, the limiting stage of this process is the supply of reagents to the disk surface or the removal of the resulting reaction products. Further, the rate of dissolution of gold no longer depends on the intensity of mixing, but is determined by the rate of the chemical reaction.

Thus, when studying the influence of various factors on the rate of dissolution of gold, it is necessary to pay special attention to the intensity of mixing of the solution (the number of revolutions of the disk). Therefore, the influence of various factors on the rate of gold dissolution was studied in two areas: in diffusion – at 4.19 rad/s; and kinetic – at 31.4 rad/s.

***Dependence of the gold dissolution rate on the concentration of sodium cyanide.*** Fur-

ther studies into the effect of sodium cyanide concentration on the rate of gold dissolution in the diffusion and kinetic regions were undertaken.

The experiments were carried out at a concentration of NaCN from  $0.102 \cdot 10^{-3}$  to  $4.08 \cdot 10^{-3}$  mol/dm<sup>3</sup> (from 5 to 200 mg/dm<sup>3</sup>); pH – 11.0; number of disk revolutions – 4.19 rad/s for diffusion mode and 31.4 rad/s for kinetic; temperature – 25°C. The results of the experiments are shown in Fig. 2.

Fig. 2 shows that the rate of gold dissolution in the diffusion region increases from  $0.66 \cdot 10^{-10}$  to  $8.85 \cdot 10^{-10}$  mol/cm<sup>2</sup>·s with an increase in the concentration of sodium cyanide from  $0.102 \cdot 10^{-3}$  to  $4.08 \cdot 10^{-3}$  mol/dm<sup>3</sup>. However, after  $0.41 \cdot 10^{-3}$

mol/dm<sup>3</sup>, the rate growth slows down; this may be due to the formation of a film on the disk surface, whose thickness depends on the cyanide concentration, mixing intensity, temperature and duration of dissolution [15–17].

In the kinetic region, in the range of sodium cyanide concentrations from  $0.10 \cdot 10^{-3}$  to  $2.04 \cdot 10^{-3}$  mol/dm<sup>3</sup>, a linear relationship is observed between the gold dissolution rate and the concentration of the complexing agent. The dissolution rate of the noble metal increases from  $0.94 \cdot 10^{-10}$  to  $16.5 \cdot 10^{-10}$  mol/cm<sup>2</sup>·s.

The process of gold dissolution takes place in the pre-limit region, in which the dissolution rate is proportional to the sodium cyanide concentration.

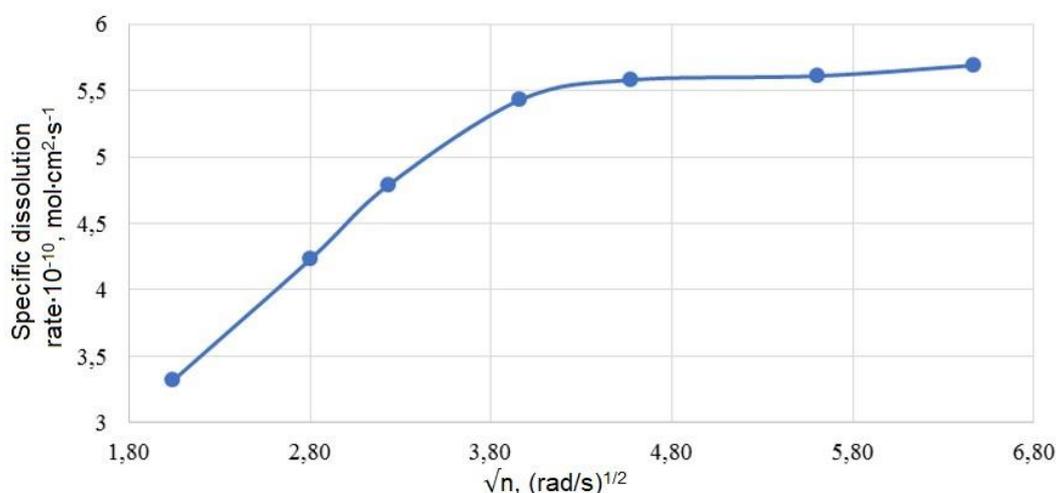


Fig. 1. Gold dissolution rate vs disc angular rotation rate

Рис. 1. Зависимость скорости растворения золота от угловой скорости вращения диска

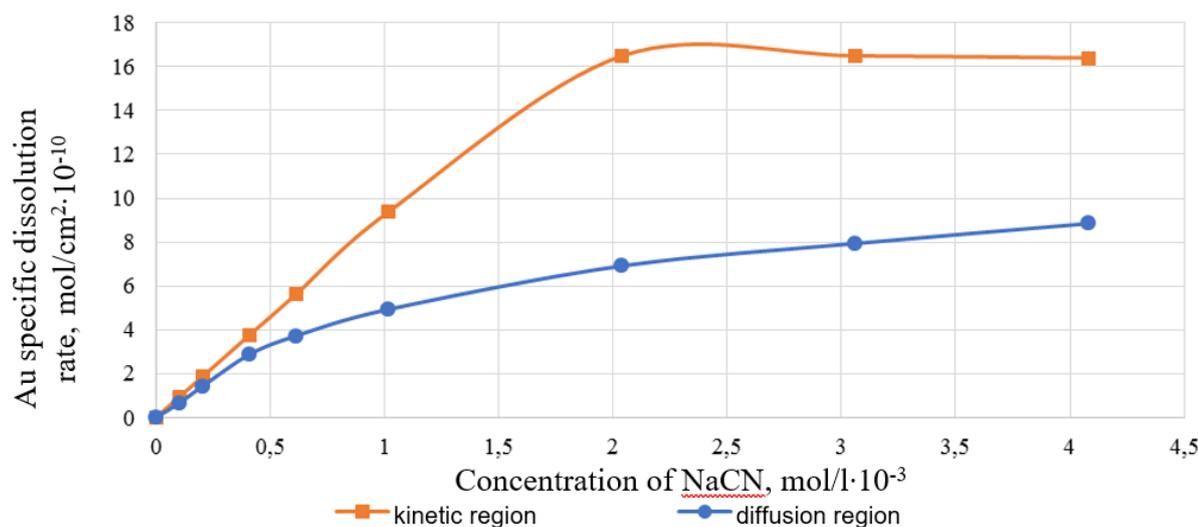


Fig. 2. Gold dissolution rate vs sodium cyanide concentration

Рис. 2. Зависимость скорости растворения золота от концентрации цианида натрия

The dissolution rate constant of gold in the diffusion region is calculated by the formula:

$$K = \frac{v}{C \cdot \sqrt{n}} \quad (4)$$

where  $K$  – reaction rate constant ( $L \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1/2} \cdot rad^{-1/2}$ );  $v$  – dissolution rate of gold ( $mole \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$ );  $C$  – concentration of sodium cyanide ( $mol/L$ );  $n$  – number of revolutions of the disk ( $rad/s$ ), comprising  $0.334 \cdot 10^{-6} dm^3 \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1/2} \cdot rad^{1/2}$ .

The dissolution rate constant of gold in the kinetic region is calculated by the formula:

$$K = \frac{v}{C} \quad (5)$$

where  $K$  – reaction rate constant ( $L \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1/2}$ );  $v$  – dissolution rate of gold ( $mole \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$ );  $C$  – concentration of sodium cyanide ( $mol/L$ ); comprising  $0.919 \cdot 10^{-6} dm^3 \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1/2}$ .

The theoretical velocity constant was calculated from the flow equation:

$$j = \frac{10^{-3} \cdot D^{2/3} \cdot S \cdot C \cdot \omega^{1/2} \cdot t}{0.89 \sqrt[3]{\nu \cdot v^{1/6}}}, \quad (6)$$

where  $D$  – diffusion coefficient of sodium cyanide ( $cm^2/s$ );  $\omega$  – angular velocity ( $rad/s$ );  $\nu$  – viscosity of the solution ( $cm^2/s$ );  $S$  – disk surface area ( $cm^2$ );  $C$  – concentration of the solvent ( $mol/L$ ).

The theoretical velocity constant value was  $0.428 \cdot 10^{-6} dm^3 \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1/2} \cdot rad^{-1/2}$ , which is 78% of

the calculated experimental value ( $0.334 \cdot 10^{-6} dm^3 \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1/2} \cdot rad^{-1/2}$ ). According to the literature data, this is explained by the formation of a film on the surface of the dissolving metal, most likely gold hydroxide, which should be considered as an additional intradiffusion resistance [16, 18].

**Dependence of the gold dissolution rate on temperature.** The effect of temperature on the rate of dissolution of gold in cyanide solution was studied in the range of 288–308 K. Two series of experiments were conducted. One was carried out in diffusion mode with a disk speed of 4.19 rad/s, while the other was carried out at a speed of 31.4 rad/s. NaCN concentration –  $0.612 \cdot 10^{-3} mol/dm$ , pH – 11.0.

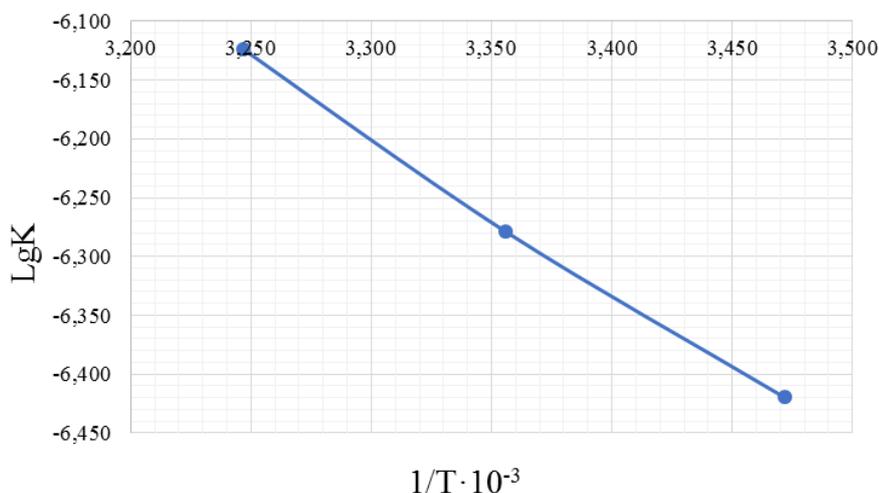
Based on the obtained experimental data, a graph was plotted in  $LgK-1/T$  coordinates in the diffusion (Fig. 3) and kinetic regions (Fig. 4).

The activation energy of the process [16] is determined from the tangent of the slope angle of the curve in accordance with the Arrhenius equation:

$$E_a = 2.303R|tg\alpha|, \quad (7)$$

where  $R$  – gas constant ( $R = 8.314 J/(mol \cdot K)$ ).

The activation energy in the diffusion mode was 22.5 kJ/mol; in kinetic mode – 40.1 kJ/mol. The increased value of the activation energy in diffusion mode confirms the fact of the formation of a film on the surface of the disk.



**Fig. 3. Gold dissolution rate vs temperature in the diffusion mode**

**Рис. 3. Зависимость скорости растворения золота от температуры в диффузионном режиме**

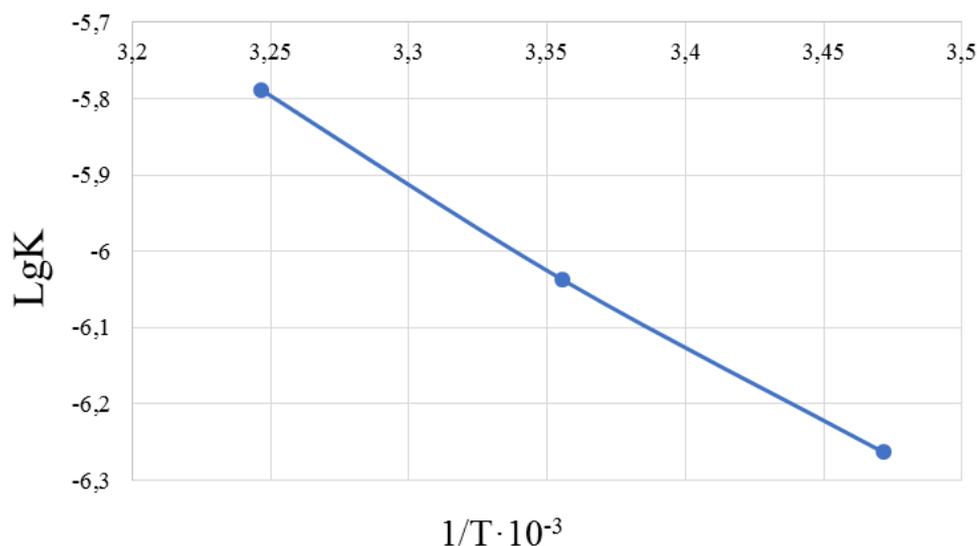


Fig. 4. Gold dissolution rate vs temperature in the kinetic mode

Рис. 4. Зависимость скорости растворения золота от температуры в кинетическом режиме

The obtained results indicate that the process of gold dissolution in a cyanide solution at an ultra-low NaCN concentration proceeds in the diffusion and kinetic regions; this is confirmed by the results of experiments on the dependence of the gold dissolution rate on the intensity of mixing.

**Effect of glycine addition on the rate of gold dissolution.** To determine the effect of the addition of glycine to a solution with an ultra-low concentration of sodium cyanide on the rate of

dissolution of gold, an experiment was conducted under the following conditions: pH = 11.0; angular velocity of rotation of the disk – 4.19 rad/s;  $t = 25^\circ\text{C}$ ; concentration of sodium cyanide –  $2.04 \cdot 10^{-3} \text{ mol/dm}^3$ ; glycine concentration –  $0.27 \cdot 10^{-3} \text{ mol/dm}^3$ . The results are shown in Fig. 5.

As follows from the data presented in Fig. 5, the addition of glycine to sodium cyanide increases the specific dissolution rate of gold from  $0.692 \cdot 10^{-9}$  to  $0.82 \cdot 10^{-9} \text{ mol/cm}^2\text{s}$  (i.e., by 1.2 times).

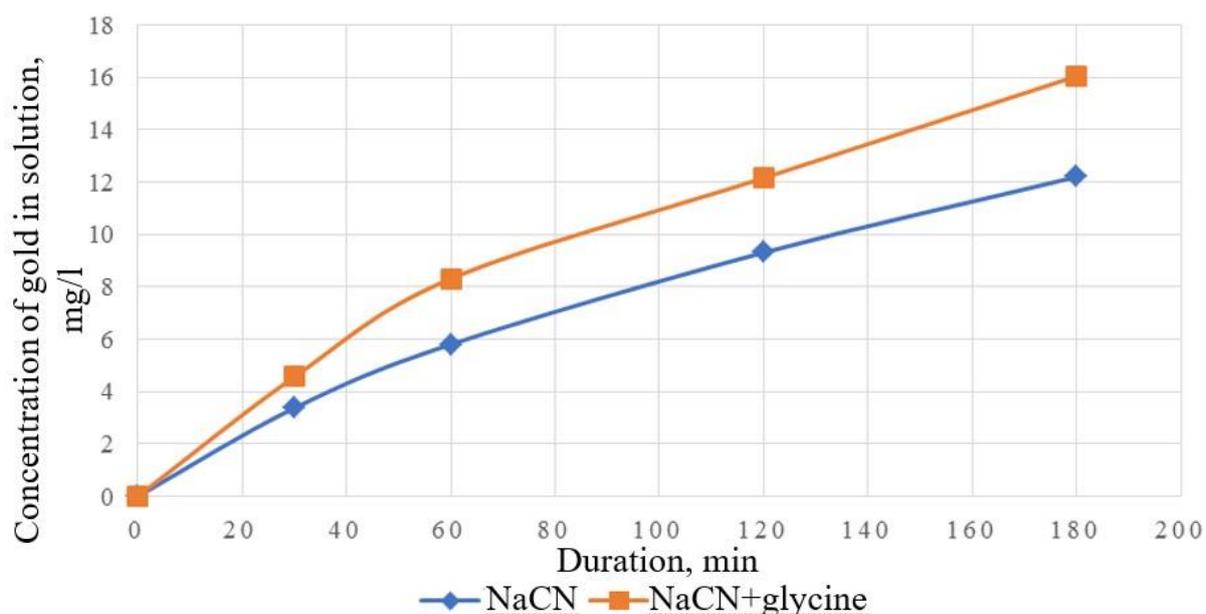


Fig. 5. Kinetics of gold dissolution by ultra-low NaCN concentration solutions in glycine presence

Рис. 5. Кинетика растворения золота растворами с ультранизкой концентрацией NaCN в присутствии глицина

## STUDY OF THE COPPER DISSOLUTION RATE IN SOLUTIONS WITH AN ULTRA-LOW CONCENTRATION OF SODIUM CYANIDE

The high consumption of sodium cyanide during gold leaching is explained by the additional presence of non-ferrous metals in technogenic raw materials, primarily copper. Therefore, to evaluate the behaviour of copper [21] at ultra-low concentrations of sodium cyanide, experiments were conducted to study the rate of its dissolution using the rotating disk method.

### Dependence of the rate of dissolution of copper on the speed of rotation of the disk.

The dependence of the copper dissolution rate on the disk rotation frequency was initially studied in the range from 4.19 to 52.33 rad/s. With a disk radius of 0.62 cm, the selected rotation frequency interval corresponds to a Reynolds number value varying from 163.4 to 5632.6 [16].

The experiments were carried out under the following constant conditions: temperature – 25°C; pH – 11.0; NaCN concentration –  $0.612 \cdot 10^{-3}$  mol/dm. The resulting graph of the dependence of the rate of dissolution of copper on the number of revolutions of the disk is shown in Fig. 6.

From the presented data, it can be seen that the rate of dissolution of copper increases in proportion to the square root of the number of revolutions from  $6.2 \cdot 10^{-10}$  to  $38.0 \cdot 10^{-10}$  mol·cm<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> in the range of disk rotation speeds from 4.19 to 146.53 rad/s (from 40 to 1400 rpm).

Thus, in the studied interval of the disk rotation frequency, the process of copper dissolution proceeds in the diffusion region.

### Dependence of the copper dissolution rate on the concentration of sodium cyanide.

Experiments to determine the dependence of the dissolution rate of copper on the concentration of sodium cyanide (Fig. 7) were carried out using the following parameters: angular velocity – 4.19 rad/s; pH – 11.0; t – 25°C; sodium cyanide concentration – from  $0.612 \cdot 10^{-3}$  to  $3.061 \cdot 10^{-3}$  mol/dm<sup>3</sup> (from 30 to 150 mg/dm<sup>3</sup>).

From the presented graph, the dissolution rate of copper can be seen to increase to  $22.7 \cdot 10^{-10}$  mol/cm<sup>2</sup>·s; moreover, this dependence is linear to the concentration of NaCN –  $2.04 \cdot 10^{-3}$  mol/dm<sup>3</sup> (up to 100 mg/dm) – that is, the reaction has a cyanide first order. Further, the dissolution process has slowed down due to the formation of a film on the surface of the copper disk, consisting of copper cyanide (CuCN) [18].

The calculated value of the copper dissolution rate constant was  $0.496 \cdot 10^{-6}$  dm<sup>3</sup>·cm<sup>-2</sup>·s<sup>-1/2</sup>·rad<sup>-1/2</sup>.

An assumption about the density of the product shell can be made according to the value of the Pilling–Bedworth criterion – the ratio of the molar volumes of the reaction product and the starting substance:

$$K_{\text{П-Б}} = v \frac{\frac{M_{\text{prod}}}{d_{\text{prod}}}}{\frac{M_{\text{start}}}{d_{\text{start}}}} \quad (8)$$

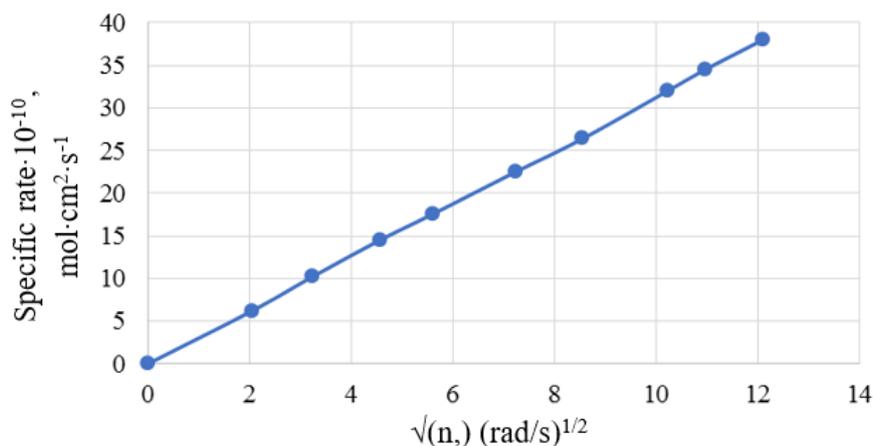
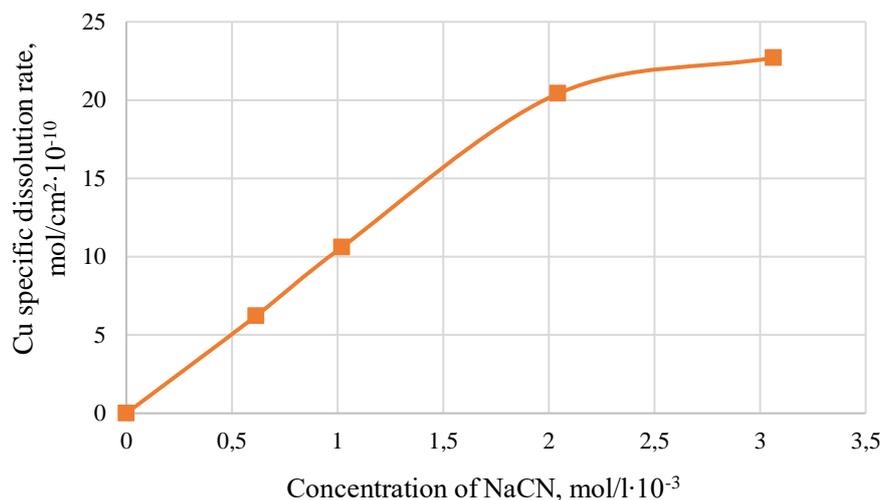


Fig. 6. Copper dissolution rate vs disc angular rotation rate

Рис. 6. Зависимость скорости растворения меди от угловой скорости вращения диска



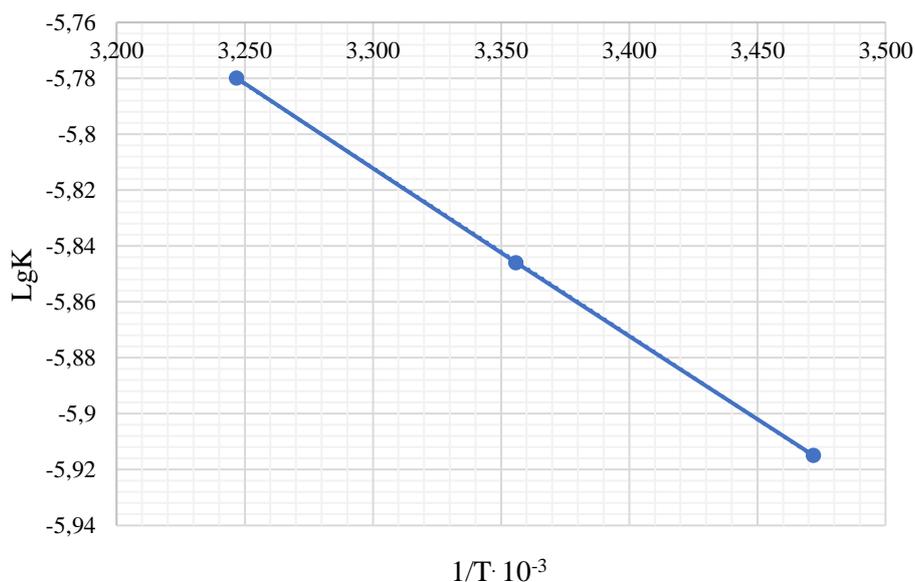
**Fig. 7. Copper dissolution rate vs NaCN concentration**

**Рис. 7. Зависимость скорости растворения меди от концентрации NaCN**

where  $\nu$  – number of moles of solid product formed from 1 mole of the initial substance;  $M_{prod}$  and  $M_{start}$  – molecular weights of the product and the initial substance, respectively;  $d_{prod}$  and  $d_{start}$  are the densities of the product and the initial substance.

The ratio of molar volumes of copper and copper cyanide was 4.3, indicating the formation of a dense film<sup>5</sup>.

**Dependence of copper dissolution rate on temperature.** The effect of temperature on the copper dissolution rate was studied in a temperature range from 288 to 308 K, a disk rotation speed of 4.19 rad/s, and a sodium cyanide concentration of  $0.612 \cdot 10^{-3}$  mol/dm<sup>3</sup>. Based on the obtained experimental data, a graph was plotted in the LgK-1/T coordinates (Fig. 8).



**Fig. 8. Copper dissolution rate vs temperature**

**Рис. 8. Зависимость скорости растворения меди от температуры**

<sup>5</sup> Zelikman A.N., Vol'dman G.M., Belyavskaya L.V. *Theory of hydrometallurgical processes*. Moscow: Metallurgiya; 1975, 504 p. / Зеликман А.Н., Вольдман Г.М., Белявская Л.В. *Теория гидрометаллургических процессов*. М.: Metallurgiya, 1975. 504 с.

The activation energy of the process was 17.0 kJ/mol, which confirms the process occurring in the diffusion region.

Table 1 presents the main kinetic characteristics of the dissolution of gold and copper obtained as a result of experiments in comparison with the data obtained by I.A. Kakovsky and Yu.B. Kholmanskikh, who studied the process of dissolution of these metals in cyanide solutions with a sodium cyanide concentration of 200 mg/dm<sup>3</sup> (4.08·10<sup>-3</sup> mol/dm<sup>3</sup>) [9].

Based on the comparison of the obtained characteristics of the process of dissolution of gold and copper, it can be concluded that the process of cyanidation of gold and copper is effective at ultra-low solvent concentrations. The faster rate of the process taking place in the kinetic region at ultra-low concentrations of sodium cyanide is possibly due to the absence of diffusion complications (films).

## RESULTS OF EXPERIMENTS ON THE DISSOLUTION OF COPPER MINERALS IN SOLUTIONS WITH A LOW CONCENTRATION OF SODIUM CYANIDE

Due to the fact that the presence of copper in man-made raw materials takes the form of natural minerals [22], experiments were conducted to assess the dissolution rate of such natural minerals as bornite (Cu<sub>5</sub>FeS<sub>4</sub>), chalcocopyrite (CuFeS<sub>2</sub>) and azurite (2CuCO<sub>3</sub>·Cu(OH)<sub>2</sub>) in solutions with a low concentration of sodium cyanide. The results of X-ray phase analysis of minerals are presented in Table 2.

According to Table 2, the copper content in chalcocopyrite is 31.1%; in bornite – 35.5%; in azurite – 21.6%. The content of iron and sulfur in chalcocopyrite is 13.3% and 10.88%, respectively; in bornite – 28.6% and 30.6%; in azurite – 6.25% and 0.088%.

The experiments were carried out on test sample powders having a particle size of minus 0.1 plus 0.074 mm with mechanical stirring under the following conditions: weighed weight – 250 mg; solution volume – 200 cm<sup>3</sup>; temperature – 25°C; duration – 1 h; NaOH concentration – 0.002 mol/dm<sup>3</sup> (pH 11.0); NaCN concentration 0.41·10<sup>-3</sup> – 2.04·10<sup>-3</sup> mol/dm<sup>3</sup>.

Following the end of each test, the concentration of copper in the solution was determined by atomic absorption analysis; the specific surface area of the mineral was determined using a Malvern Mastersizer 3000 laser granulometer.

Fig. 9 shows the dependence of the specific dissolution rate of natural copper minerals on the concentration of sodium cyanide.

From the data presented, it can be seen that the specific dissolution rate of copper sulfide minerals, such as chalcocopyrite and bornite, increases to a certain limit (for chalcocopyrite 8.84·10<sup>-8</sup> mol/cm<sup>2</sup>·s; for bornite – 10.48·10<sup>-8</sup> mol/cm<sup>2</sup>·s); the fact that no further increase in the concentration of sodium cyanide (>1.02·10<sup>-3</sup> mol/dm<sup>3</sup>) leads to a significant increase in the dissolution rate is explained by the formation of a film of simple copper cyanide on the surface of minerals.

**Table 1.** Main kinetic characteristics of metal dissolution in cyanide solutions

**Таблица 1.** Основные кинетические характеристики растворения металлов в цианистых растворах

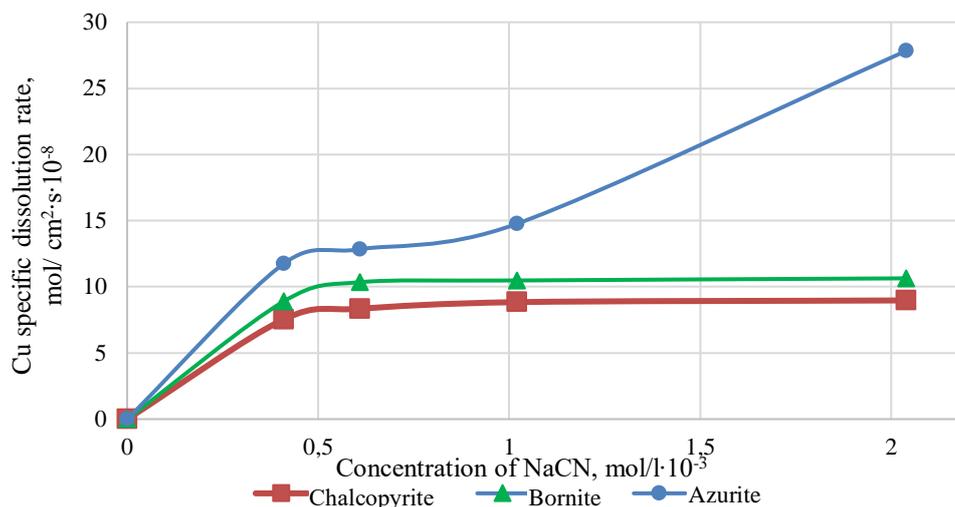
Source of information	Diffusion regime				Kinetic regime	
	Gold		Copper		Gold	
	Rate constant dm <sup>3</sup> ·cm <sup>-2</sup> ·s <sup>-1/2</sup> ·rad <sup>-1/2</sup>	Activation energy, kJ/mol	Rate constant dm <sup>3</sup> ·cm <sup>-2</sup> ·s <sup>-1/2</sup> ·rad <sup>-1/2</sup>	Activation energy, kJ/mol	Rate constant dm <sup>3</sup> ·cm <sup>-2</sup> ·s <sup>-1/2</sup> ·rad <sup>-1/2</sup>	Activation energy, kJ/mol
This paper	0.334·10 <sup>-6</sup>	22.5	0.496·10 <sup>-6</sup>	17.0	0.919·10 <sup>-6</sup>	40.1
[14]	0.332·10 <sup>-6</sup>	14.56	0.414·10 <sup>-6</sup>	13.4	0.51·10 <sup>-6</sup>	59.1
[15]	0.332·10 <sup>-6</sup>	14.6	0.410·10 <sup>-6</sup>	13.2	0.55·10 <sup>-6</sup>	59.0

**Table 2.** Chemical composition of natural copper minerals

**Таблица 2.** Химический состав природных минералов меди

Mineral	Element content, %							
	Cu	Fe	S	Al	SiO <sub>2</sub>	C <sub>общ</sub>	Ca	Na
Chalcocopyrite	31.1	13.3	10.85	n/d*	n/d*	n/d*	n/d*	n/d*
Bornite	35.5	28.6	30.6	n/d*	n/d*	n/d*	n/d*	n/d*
Azurite	21.6	6.25	0.088	4.19	32.6	0.88	0.414	0.40

\*n/d – not determined.



**Fig. 9. Copper natural mineral dissolution rate vs sodium cyanide concentration**

**Рис. 9. Зависимость степени растворения природных минералов меди от концентрации цианида натрия**

The specific dissolution rate of the oxidised copper mineral (azurite) increases to  $27.84 \cdot 10^{-8}$  mol/cm<sup>2</sup>·s with an increase in the concentration of sodium cyanide to  $2.04 \cdot 10^{-3}$  mol/dm<sup>3</sup>; however, in the range of concentrations from  $0.41 \cdot 10^{-3}$  mol/dm<sup>3</sup> to  $1.02 \cdot 10^{-3}$  mol/dm<sup>3</sup>, this increase is less pronounced.

A patent describing a method of extracting gold from a copper-containing mineral raw material by cyanidation under stirring is based on the fractional supply of a diluted solution of sodium cyanide in the process [20]. The authors note that the positive effect in this case is achieved due to a slowdown in chemical reactions of non-targeted consumption of sodium cyanide.

For this reason, it seemed appropriate to study the effect of the method of feeding sodium cyanide into the cyanidation process on the dissolution rate of copper.

Test conditions were as follows: weighed amount – 250 mg; solution volume – 200 cm<sup>3</sup>; temperature – 25°C; duration – 1 h; NaOH concentration – 0.002 mol/dm<sup>3</sup> (pH 11.0); NaCN concentration  $0.41 \cdot 10^{-3}$  –  $0.61 \cdot 10^{-3}$  mol/dm<sup>3</sup> (20–30 mg/dm<sup>3</sup>).

In the first case, NaCN was loaded at 100% of the target concentration at the beginning of the experiment (single load); in the second case, 50% (at a concentration of 20 mg/dm<sup>3</sup>) and 33.3% at a concentration (30 mg/dm<sup>3</sup>) every 20 minutes from the beginning of the experiment. The results of the experiments are presented in Figs. 10–12.

The obtained data confirm that the method of feeding sodium cyanide into the cyanidation process influences the specific dissolution rate of copper. With a fractional supply of NaCN, the dissolution rate of copper minerals is reduced by 10–30% as compared to a single load.

The calculated activation energy values were 22.03 kJ/mol, 24.2 kJ/mol, and 24.1 kJ/mol for chalcopyrite, bornite and azurite, respectively, which corresponds to the conditions of the process in the intra-diffusion region. The high activation energy values confirm the formation of a film of copper cyanide on the surface of minerals.

## CONCLUSION

The basic patterns of dissolution of gold and copper in solutions with an ultra-low concentration of sodium cyanide were studied using the rotating disk method. The obtained results demonstrated the effectiveness of ultra-low concentrations of sodium cyanide: the dissolution rate constant of gold in the diffusion region was  $0.334 \cdot 10^{-6}$  dm<sup>3</sup>·cm<sup>-2</sup>·c<sup>-1/2</sup>·rad<sup>-1/2</sup>; in the kinetic region –  $0.919 \cdot 10^{-6}$  dm<sup>3</sup>·cm<sup>-2</sup>·c<sup>-1/2</sup>. The copper dissolution rate constant in the diffusion region was  $0.414 \cdot 10^{-6}$  dm<sup>3</sup>·cm<sup>-2</sup>·c<sup>-1/2</sup>·rad<sup>-1/2</sup>. The presence of glycine in a solution with an ultra-low concentration of sodium cyanide allowed the specific dissolution rate of gold to be increased from  $0.692 \cdot 10^{-9}$  to  $0.82 \cdot 10^{-9}$  mol/cm<sup>2</sup>·s (i.e., by 1.2 times).

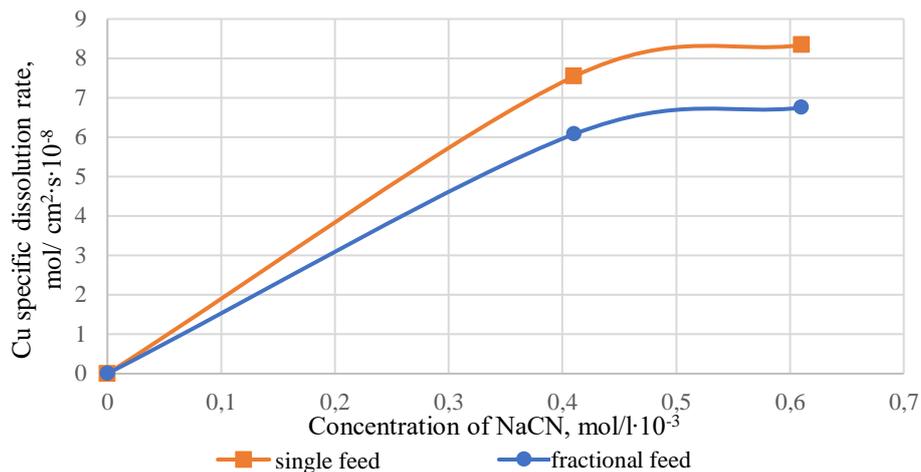


Fig. 10. Chalcopyrite specific dissolution rate vs NaCN addition method  
 Рис. 10. Зависимость удельной скорости растворения халькопирита от способа подачи NaCN

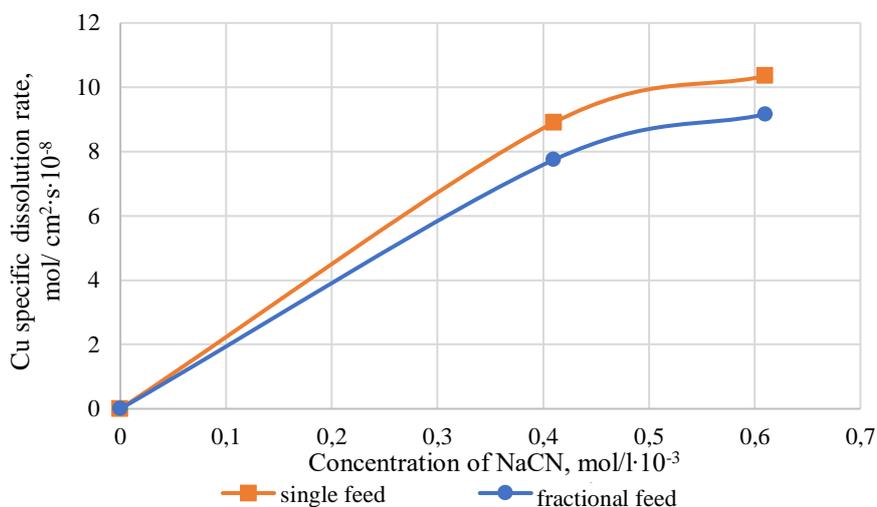


Fig. 11. Bornite specific dissolution rate vs NaCN addition method  
 Рис. 11. Зависимость удельной скорости растворения борнита от способа подачи NaCN

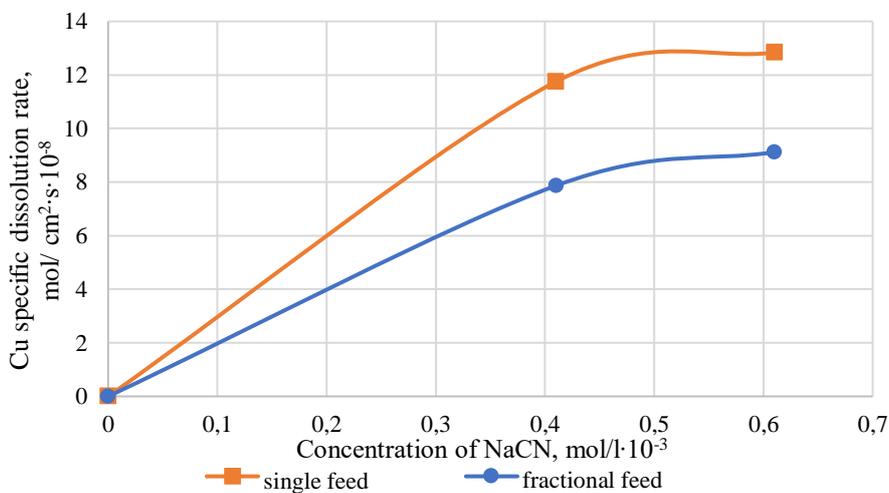


Fig. 12. Azurite specific dissolution rate vs NaCN addition method  
 Рис. 12. Зависимость удельной скорости растворения азурита от способа подачи NaCN

The influence of various factors on the dissolution rate of natural copper minerals in solutions with an ultra-low concentration of sodium cyanide using the powder method was also studied. It is noted that a fractional supply of sodium cy-

anide in the cyanidation process reduces the dissolution rate of copper by 10–30% as compared to a single loading, which is a positive effect when cyanidating gold-copper raw materials.

### References

1. Volynkina E.P. Analysis of industrial waste state and processing problems in Russia. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta*. 2017;3:43-47. (In Russ.).
2. Chanturiya V.A., Makarov V.N., Makarov D. *Ecological and technological challenges in processing of technogenic sulphide-bearing raw materials*. Apatity: Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences; 2005, 218 p. (In Russ.).
3. Gorlova O.E., Shadrinova I.V., Zhilina V.A. Development of deep and comprehensive processing processes of technogenic mineral raw materials in a view of sustainable development strategy. In: *XXIX IMPC 2018: Congress Proceeding*. 17–21 September 2018, Moscow. Moscow; 2018, p. 3279-3287.
4. Bragina V.I., Konnova N.I. On integrated processing gold-bearing ores. In: *Sovremennyye tekhnologii osvoyeniya mineral'nykh resursov: trudy IX Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii = Modern development technologies of mineral resources: Proceedings of the 9th International Scientific and Technical Conference*. 16 September 2011, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk; 2011, p. 43-46. (In Russ.).
5. Fomenko A.I. *Processing technologies of technogenic raw materials*. Moscow: Infa-Inzheneriya; 2018, 137 p. (In Russ.).
6. Kurganov K.P. Gravitational technology for the assessment and complex development of technogenic formations. *Vestnik Rossiiskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Inzhenernye issledovaniya = RUDN Journal of Engineering Research*. 2016;1:49-56. (In Russ.).
7. Dementiev V, Khmel'nitskaya O, Mullov V, Komlev M, Lanchakova O. The development plant testing of valuable metals recovery technology from pyrite cinders. In: *26th International mineral processing congress, IMPC 2012: Innovative processing for sustainable growth – conference proceedings*. 24–28 September 2012, New Deli. New Deli; 2012, p. 2412-2420.
8. Galtseva O., Bordunov S., Zhiganov A., Plotnikova I. Technology of gold-containing technogenic raw materials processing using the electric explosion method. *Materials Science Forum*. 2019;942:30-39. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.942.30>.
9. Medina D., Anderson C.G. A review of the cyanidation treatment of copper-gold ores and concentrates. *Metals*. 2020;10(7):897. <https://doi.org/10.3390/met10070897>.
10. Oraby E.A., Eksteen J.J., Tanda B.C. Gold and copper leaching from gold-copper ores and concentrates using a synergistic lixiviant mixture of glycine and cyanide. *Hedrometallurgy*. 2017;169:341-345. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.02.019>.
11. Oraby E.A., Eksteen J.J. The leaching of gold, silver and their alloys in alkaline glycine-peroxide solution and their adsorption on carbon. *Hydrometallurgy*. 2015;152:199-203. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.12.015>.
12. Eksteen J.J., Oraby E.A. *A process for copper and/or precious metal recovery*. Patent US, no. 2016/0194734;2016.
13. Vasilkova A.O., Byvaltsev A.V., Khmel'nitskaya O.D., Voiloshnikov G.I. Assessing possibility of technogenic raw material processing using ultra-low concentrations of sodium cyanide. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(5):1105-1112. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-5-1105-1112>.
14. Kakovsky I.A., Potashnikov Yu.M. *Kinetics of dissolution processes*. Moscow: Metallurgy; 1975, 222 p. (In Russ.).
15. Wadsworth M.E., Zhu Ximeng, Thompson J.S., Pereira C.J. Gold dissolution and activation in cyanide solution: Kinetics and mechanism. *Hydrometallurgy*. 2000;57(1):1-11. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(00\)00084-0](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(00)00084-0).
16. Kakovsky I.A., Naboychenko S.S. *Thermodynamics and kinetics of hydrometallurgical processes*. Alma-Ata: Science; 1989, 269 p. (In Russ.).
17. Wadsworth M.E., Zhu Ximeng. Kinetics of enhanced gold dissolution: activation by dissolved lead. *International Journal of Mineral Processing*. 2003;72(1-4):301-310. [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(03\)00106-6](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(03)00106-6).
18. Kakovsky Yu.V., Cherkasov G.F. On interaction mechanism of Cu, Ag, and Au with KCN aqueous solutions. *Tsvetnaya metallurgiya = Non-ferrous Metallurgy*. 1974;4:87-91. (In Russ.).
19. Byvaltsev A.V., Dementiev V.E., Khmel'nitskaya O.D., Marinyuk Z.A. *Method of gold extraction from mineral raw materials by cyanidation with stirring*. Patent RF, no. 2705585; 2019. (in Russ.).
20. Birich A., Stopic S., Friedrich B. Kinetic investigation and dissolution behavior of cyanide alternative gold leaching reagents. *Scientific reports*. 2019;9:7091-7101. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43383-4>.
21. Jeffrey M.I., Breuer P.L., Choo W.L. A kinetic study that compares the leaching of gold in the cyanide, thiosulfate and chloride systems. *Metallurgical and materials transactions*. 2001;32:979-986. <https://doi.org/10.1007/s11663-001-0086-7>.
22. Barlow B., Fosso-Kankeu E., Nyembwe K.J., Waanders F., Malenga E.N. The Kinetic dissolution of copper from chalcopyrite-containing carbonatite tailings samples in sulphate media. In: *17th JOHANNESBURG Int'l Conference on Science, Engineering, Technology and Waste Management*. 18-19 November 2019, Johannesburg. Johannesburg; 2019, p. 63-68. <https://doi.org/10.17758/EARES8.EAP1119256>.

**Список источников**

1. Волынкина Е.П. Анализ состояния и проблем переработки техногенных отходов в России // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2017. № 2. С. 43–49.
2. Чантурия В.А., Макаров В.Н., Макаров Д.В. Экологические и технологические проблемы переработки техногенного сульфидсодержащего сырья: монография. Апатиты: Кольский научный центр РАН, 2005. 218 с.
3. Gorlova O.E., Shadrunkova I.V., Zhilina V.A. Development of deep and comprehensive processing processes of technogenic mineral raw materials in a view of sustainable development strategy // XXIX IMPC 2018: Congress Proceeding (Moscow, 17–21 September 2018). Moscow, 2018. P. 3279–3287.
4. Брагина В.И., Коннова Н.И. О комплексности переработки золотосодержащих руд // Современные технологии освоения минеральных ресурсов: сб. науч. тр. IX Междунар. науч.-техн. конф. (г. Красноярск, 16 сентября 2011 г.). Красноярск, 2011. С. 43–46.
5. Фоменко А.И. Технологии переработки техногенного сырья. М.: Инфа-Инженерия, 2018. 137 с.
6. Курганов К.П. Гравитационная технология для оценки и комплексной разработки техногенных образований благородных металлов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2016. № 1. С. 49–56.
7. Dementiev V., Khmel'nitskaya O., Mullov V., Komlev M., Lanchakova O. The development plant testing of valuable metals recovery technology from pyrite cinders // 26th International mineral processing congress, IMPC 2012: Innovative processing for sustainable growth – conference proceedings (New Deli, 24–28 September 2012). New Deli, 2012. P. 2412–2420.
8. Galtseva O., Bordunov S., Zhiganov A., Plotnikova I. Technology of gold-containing technogenic raw materials processing using the electric explosion method // Materials Science Forum. 2019. Vol. 942. P. 30–39. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.942.30>.
9. Medina D., Anderson C.G. A review of the cyanidation treatment of copper-gold ores and concentrates. Metals. 2020. Vol. 10. Iss. 7. P. 897. <https://doi.org/10.3390/met10070897>.
10. Oraby E.A., Eksteen J.J., Tanda B.C. Gold and copper leaching from gold-copper ores and concentrates using a synergistic lixiviant mixture of glycine and cyanide // Hydrometallurgy. 2017. Vol. 169. P. 341–345. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.02.019>.
11. Oraby E.A., Eksteen J.J. The leaching of gold, silver and their alloys in alkaline glycine-peroxide solution and their adsorption on carbon // Hydrometallurgy. 2015. Vol. 152. P. 199–203. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.12.015>.
12. Patent no. 2016/0194734, United States of America, A1. A process for copper and/or precious metal recovery / J.J. Eksteen, E.A. Oraby. Filed 04.09.2014; publ. 01.03.2016.
13. Василькова А.О., Бывальцев А.В., Хмельницкая О.Д., Войлошников Г.И. Оценка возможности переработки техногенного сырья с применением ультранизких концентраций цианистого натрия // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 5. С. 1105–1112. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-5-1105-1112>.
14. Каковский И.А., Поташников Ю.М. Кинетика процессов растворения. М.: Металлургия, 1975. 222 с.
15. Wadsworth M.E., Zhu Ximeng, Thompson J.S., Pereira C.J. Gold dissolution and activation in cyanide solution: Kinetics and mechanism // Hydrometallurgy. 2000. Vol. 57. Iss. 1. P. 1–11. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(00\)00084-0](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(00)00084-0).
16. Каковский И.А., Набойченко С.С. Термодинамика и кинетика гидрометаллургических процессов. Алма-Ата: Наука, 1986. 269 с.
17. Wadsworth M.E., Zhu Ximeng. Kinetics of enhanced gold dissolution: activation by dissolved lead // International Journal of Mineral Processing. 2003. Vol. 72. Iss. 1-4. P. 301–310. [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(03\)00106-6](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(03)00106-6).
18. Каковский Ю.В., Черкасов Г.Ф. О механизме взаимодействия Cu, Ag, и Au с водными растворами KCN // Цветная Металлургия. 1974. № 4. С. 87–91.
19. Пат. № 2705585, Российская Федерация, С22В 11/08. Способ извлечения золота из минерального сырья методом цианирования при перемешивании / А.В. Бывальцев, В.Е. Дементьев, О.Д. Хмельницкая, З.А. Маринюк; заявитель и патентообладатель АО «Иркутский научно-исследовательский институт благородных и редких металлов и алмазов» (АО «Иргиредмет»). Заявл. 12.11.2018; опублик. 12.11.2019. Бюл. № 32.
20. Birich A., Stopic S., Friedrich B. Kinetic investigation and dissolution behavior of cyanide alternative gold leaching reagents // Scientific reports. 2019. Vol. 9. 7091–7101. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43383-4>.
21. Jeffrey M.I., Breuer P.L., Choo W.L. A kinetic study that compares the leaching of gold in the cyanide, thiosulfate and chloride systems // Metallurgical and materials transactions. 2001. Vol. 32. P. 979–986. <https://doi.org/10.1007/s11663-001-0086-7>.
22. Barlow B., Fosso-Kankeu E., Nyembwe K.J., Waanders F., Malenga E.N. The Kinetic dissolution of copper from chalcopyrite-containing carbonatite tailings samples in sulphate media // 17th JOHANNESBURG Int'l Conference on Science, Engineering, Technology and Waste Management (Johannesburg 18–19 November 2019). Johannesburg, 2019. P. 63–68. <https://doi.org/10.17758/EARES8.EAP1119256>.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Anastasiya O. Vasilkova,**  
Junior Researcher of the Hydrometallurgy Laboratory,  
JSC "Irgiredmet",  
38, Gagarin Boulevard, Irkutsk 664025, Russia  
✉ anastasiya.perepelkina.94@mail.ru

**Olga D. Khmel'nitskaya,**  
Cand. Sci. (Eng.),  
Leading Researcher at the Hydrometallurgy Laboratory,  
JSC "Irgiredmet",  
38, Gagarin Boulevard, Irkutsk 664025, Russia  
lab15@irgiredmet.ru

**Gregoriy I. Voyloshnikov,**  
Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Deputy Director for Science, Methodology  
and Innovations,  
JSC "Irgiredmet",  
38, Gagarin Boulevard, Irkutsk, Russia;  
greg@irgiredmet.ru

**Contribution of the authors**

Khmel'nitskaya O.D. and Voyloshnikov G.I. supervised the research, selected the sources, compiled the references on the subject of the research, edited the manuscript. Vasilkova A.O. conducted experiments, performed kinetic calculations and summarized the results obtained.

**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 06.02.2023; accepted for publication 08.06.2023.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Василькова Анастасия Олеговна,**  
м.н.с. лаборатории гидрометаллургии,  
АО «Иргиредмет»,  
664025, г. Иркутск, ул. Бульвар Гагарина, 38, Россия  
✉ anastasiya.perepelkina.94@mail.ru

**Хмельницкая Ольга Давыдовна,**  
к.т.н.,  
ведущий научный сотрудник лаборатории  
гидрометаллургии,  
АО «Иргиредмет»,  
664025, г. Иркутск, ул. Бульвар Гагарина, 38, Россия  
lab15@irgiredmet.ru

**Войлошников Григорий Иванович,**  
д.т.н., профессор,  
заместитель генерального директора по  
научно-методической  
и инновационной деятельности,  
АО «Иргиредмет»,  
664025, г. Иркутск, ул. Бульвар Гагарина, 38, Россия  
greg@irgiredmet.ru

**Вклад авторов**

Хмельницкая О.Д. и Войлошников Г.И. осуществляли научное руководство исследованиями, осуществили подбор списка литературных источников по тематике исследования и провели общее редактирование текста рукописи. Василькова А.О. провела эксперименты, кинетические расчеты и обобщила полученные результаты.

**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 06.02.2023; принята к публикации 08.06.2023.



Научная статья

УДК 669.782:669.054.1

<https://elibrary.ru/dwcqxz><https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-436-448>

## Повышение качества металлургического кремния путём кислотной очистки от примесей

Н.В. Немчинова<sup>1✉</sup>, А.А. Зайцева<sup>2</sup><sup>1,2</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

**Резюме.** Цель – провести исследования в области гидрометаллургического рафинирования металлургического кремния. Объектом исследований явился металлургический кремний после окислительного рафинирования с АО «Кремний» компании «РУСАЛ» (г. Шелехов Иркутской обл., Россия). Химический состав образцов был изучен рентгенофлуоресцентным методом анализа и рентгеноспектральным микроанализом. По данным элементного анализа в металлургическом кремнии содержатся, % масс.: Al – 0,53, Fe – 0,6094, Ti – 0,0491, Ca – 0,0628, V – 0,0066, Cr – 0,002, Mn – 0,014, Cu – 0,003, P – 0,010, Ba – 0,007, Ni – 0,007, Zn – 0,002. Показано, что в исследуемых образцах присутствуют интерметаллиды следующего состава: AlFeSi<sub>2</sub> (с примесью Ca), FeSi<sub>2</sub> (с примесью Al), FeSi<sub>2</sub>Ti (с примесью Zr). Нами в качестве растворителей для очистки кремния от примесей были выбраны 10%-ые H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HCl, HNO<sub>3</sub>, а также 4% HF в различных соотношениях. Для изучения возможности протекания реакций взаимодействия интерметаллических соединений с отобранными растворителями были рассчитаны значения изменения энергии Гиббса, которые имели отрицательные величины. Экспериментальные работы по выщелачиванию примесей проводились на пробах кремния с частицами крупностью -200 мкм при постоянном перемешивании с помощью магнитной мешалки (температура процесса составляла 60°C, соотношение жидкого к твердому было 5:1, продолжительность очистки – 60 мин). Установлено, что при использовании в качестве растворителя смеси серной и плавиковой кислот в соотношении 1:1 достигается наибольшая степень (86,85%) очистки кремния от суммы примесей. Показано, что при использовании смеси серной и соляной кислот при соотношении 1:3 степень очистки металлургического кремния составляет 41,48%. Таким образом, были определены растворители, с использованием которых можно достичь максимальной очистки кремния от примесных элементов.

**Ключевые слова:** металлургический кремний, производство кремния, гидрометаллургическое рафинирование, энергия Гиббса, примеси

**Для цитирования:** Немчинова Н.В., Зайцева А.А. Повышение качества металлургического кремния путём кислотной очистки от примесей // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 2. С. 436–448. EDN: DWCQXZ, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-436-448>.

## METALLURGY

Original article

## Improving the quality of metallurgical-grade silicon by acid leaching

Nina V. Nemchinova<sup>1✉</sup>, Anna A. Zaitseva<sup>2</sup><sup>1,2</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

**Abstract.** This work deals with the problem of hydrometallurgical refining of metallurgical-grade silicon. Samples of metallurgical-grade silicon after oxidative refining from JSC Silicon, RUSAL (Shelekhov, Irkutsk Oblast, Russia) were subjected to X-ray fluorescence and electron microprobe analysis. The conducted elemental analysis determined their following composition, wt%: Al – 0.53, Fe – 0.6094, Ti – 0.0491, Ca – 0.0628, V – 0.0066, Cr – 0.002, Mn – 0.014, Cu – 0.003, P – 0.010, Ba – 0.007, Ni – 0.007, and Zn – 0.002. The examined samples were found to comprise the following intermetallic compounds: AlFeSi<sub>2</sub> (with an admixture of Ca), FeSi<sub>2</sub> (with an admixture of Al), and FeSi<sub>2</sub>Ti (with an admixture of Zr). In order to purify silicon from impurities, 10% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HCl, HNO<sub>3</sub>, as well as 4% HF in different ratios were

used as solvents. The feasibility of interactions between the intermetallic compounds and the selected solvents was assessed by calculating changes in the Gibbs energy, which had negative values. Experiments on impurity leaching were carried out using silicon samples with a particle size of  $\sim 200 \mu\text{m}$  under constant stirring with a magnetic stirrer under the temperature of  $60^\circ\text{C}$ , the liquid-to-solid ratio of 5:1, and the leaching duration of 60 min. The highest degree of silicon purification (86.85%) was achieved under leaching with a mixture of sulfuric and hydrofluoric acids in a ratio of 1:1. The use of a mixture of sulfuric and hydrochloric acids at a ratio of 1:3 resulted in the silicon purification of 41.48%. Thus, optimal solvents allowing the maximum purification of silicon from impurities were determined.

**Keywords:** metallurgical silicon, silicon production, hydrometallurgical refining, Gibbs energy, impurities

**For citation:** Nemchinova N.V., Zaitseva A.A. Improving the quality of metallurgical-grade silicon by acid leaching. *iPolytech Journal*. 2023;27(2):436-448. (In Russ.). EDN: DWCQXZ, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-436-448>.

## ВВЕДЕНИЕ

Металлургический кремний в современном мире находит широкое применение. Кремний используется в качестве легирующей добавки при производстве различных сплавов, в химической промышленности для производства силиконов, в электронной промышленности для изготовления полупроводниковых приборов и элементов, а также в секторе производства фотоэлектрических преобразователей для солнечной энергетики<sup>3</sup> [1–3]. Широко известно применение кремния в виде различных его соединений – карбида, диоксида – в различных областях (производство абразивов, медицинских изделий и др. [4, 5]).

По данным <https://www.indexbox.ru/news/Mirovoj-rynok-kremniya-sostavil-10-mlrd.-doll./> в 2021 г. мировой объем производства кремния составил 3,4 млн т. Лидерами среди стран-производителей являются Китай, Норвегия, Россия и США.

Получение металлургического кремния можно описать одной общей химической реакцией (1), по которой происходит восстановление углеродистыми восстановителями (УВ) кремнеземсодержащего сырья в рудно-термических печах (РТП) [3, 5]:



На территории Российской Федерации крупнейшим предприятием, производящим металлургический кремний, является АО «Кремний» объединенной компании «РУСАЛ» (Иркутская область, г. Шелехов) с объемом производства в 2022 году 27,42 тыс. т. Данное предприятие функционирует с 1981 г., производит высокочистые марки кремния. На дан-

ном предприятии при использовании трехэлектродных вращающихся РТП получают кремний чистотой 98–99,5%. Сырьем для производства кремния служит кварцит Черемшанского месторождения, расположенного в Республике Бурятия и входящего в состав предприятия. Также на предприятии в качестве рудной составляющей шихты стали опробовать кварцит Урда-Гарган (кварцит Гарганской площади), добываемый в Окинском районе Бурятии и относящийся к химически чистому виду кремнеземсодержащего сырья.

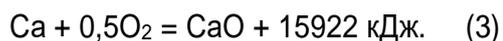
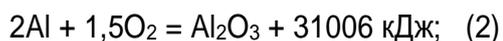
В качестве УВ используют смесь из древесного угля, нефтяного кокса, каменного угля различных производителей (Россия, Казахстан). В последнее время ввиду импортозамещения на предприятии опробывают новые виды углеродных материалов: уголь марки ССС Бачатского угольного разреза АО «УК «Кузбассразрезуголь», углеродосодержащий материал производства ЗАО «Технографит» (г. Вязьма).

Для снижения содержания примесных элементов в полученном в РТП металлургическом кремнии необходимо проводить его рафинирование.

В настоящее время ученые и производственники из разных стран уделяют много внимания методам очистки кремния от примесей, которые основаны на применении как пиро-, так и гидрометаллургических способов [6–13].

Единственным промышленным способом рафинирования металлургического кремния является окислительное рафинирование. По данному способу через расплав кремния в ковше пропускают воздух, тем самым происходит очистка от алюминия и кальция (в основном) по реакциям (2), (3)<sup>3</sup> [14–17]:

<sup>3</sup>Немчинова Н.В. Физикохимия и карботермия кремния: учебн. пособ. Иркутск: ИРНТУ, 2017. 287 с.



Технологическая схема окислительного рафинирования расплава кремния представлена на рис. 1.

### ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Химический состав образцов металлургического кремния АО «Кремний» (после окислительного рафинирования) был изучен различными методами анализа: рентгенофлуоресцентным (РФА) [19] и рентгеноспектральным микроанализом (РСМА) [20].

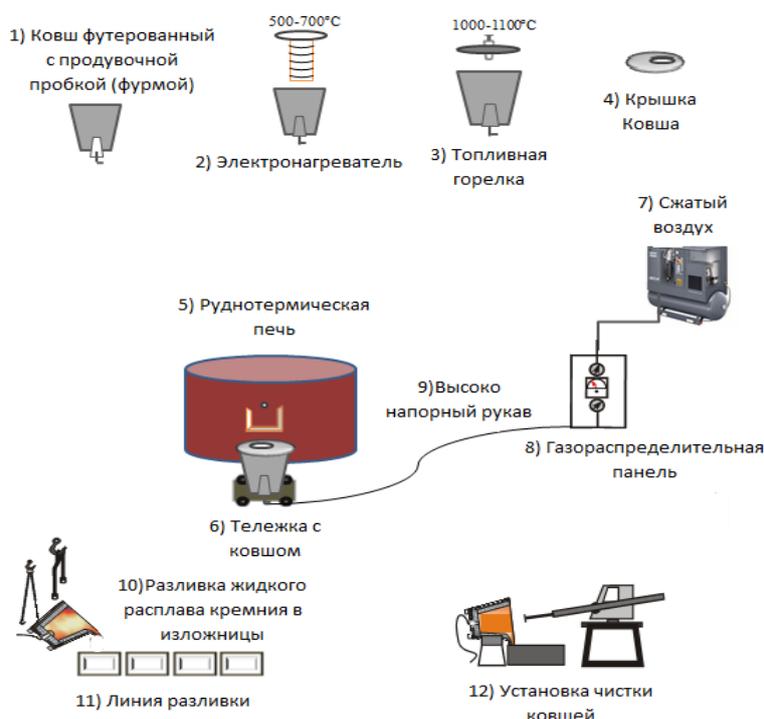
Для определения элементного химического состава полученного материала был проведен РФА, основанный на сборе и последующем анализе спектра, возникающего при облучении исследуемого материала рентгеновским излучением [19]. РФА проводили на

рентгеновском спектрометре S4 Pioneer (Bruker, Германия). Для проведения анализа в навеску кремния массой 0,7 г добавляли 0,3 г синтетического воска, далее провели смешивание в ступке (материал ступки – яшма) до визуально однородной массы. Прессование излучателя в виде таблетки производили на подложке из борной кислоты при усилии 10 т.

В результате РФА в исследуемом образце кремния были обнаружены следующие примеси, % масс., соответственно: Al – 0,53, Fe – 0,6094, Ti – 0,0491, Ca – 0,0628, V – 0,0066, Cr – 0,002, Mn – 0,014, Cu – 0,003, P – 0,010, Ba – 0,007, Ni – 0,007, Zn – 0,002. Содержание кремния по разнице содержания 12 примесных элементов составило 98,6939%.

По данным РФА Al, Fe, Ti, Ca содержатся в образце металлургического кремния после окислительного рафинирования в наибольшем количестве.

Сущность РСМА заключается в том, что при воздействии пучка электронов высокой энергии происходит возбуждение атомов и переход электронов на внешних орбиталях, сопровождающийся изменением энергии [20].



**Рис. 1. Технологическая схема окислительного рафинирования на АО «Кремний» [18]**

**Fig. 1. Process flow diagram of oxidation refining at JSC "Silicon" [18]**

Анализ образцов металлургического кремния после окислительного рафинирования проводили с помощью металлографического микроскопа «Olympus GX-51» (Olympus, Япония), оснащенного цифровой камерой «Altera 20» и предназначенного для получения в отраженном свете светопольных и темнопольных изображений, изображений дифференциального интерференциального контраста, изображений в поляризованном свете [21]. Максимальное увеличение микроскопа составляло  $\times 1000$ .

Результаты представлены на рис. 2 и в табл. 1.

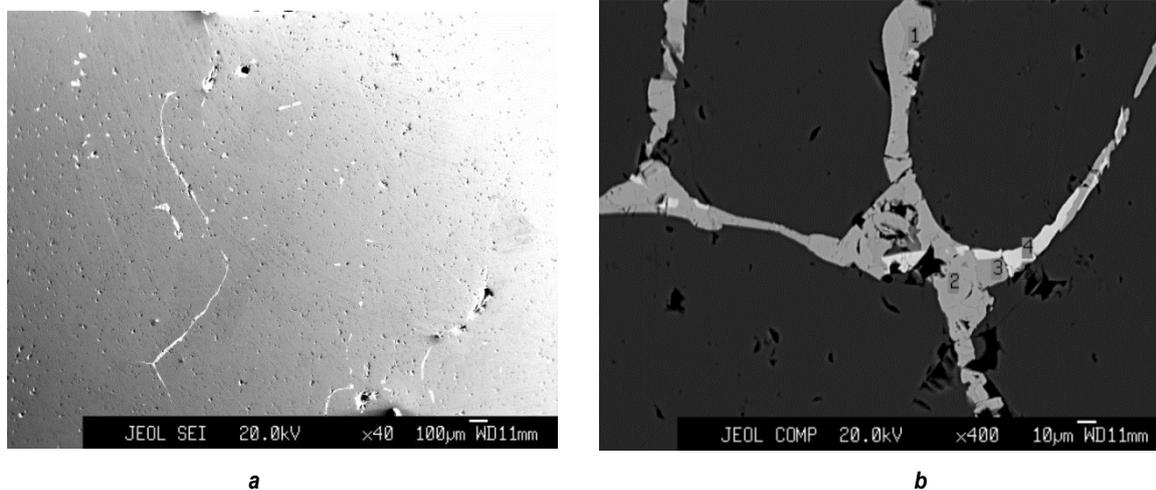
Как видно из представленных на рис. 2 и табл. 1 данных, включение в исследуемом образце представлено интерметаллидами следующего состава:  $\text{AlFeSi}_2$  (с примесью Ca),  $\text{FeSi}_2$  (с примесью Al),  $\text{FeSi}_2\text{Ti}$  (с примесью Zr). Наличие циркония в составе примесного включения можно объяснить его переходом в кремниевый расплав (в незначи-

тельном количестве) из кирпичной футеровки РТП.

### ТЕРМОДИНАМИКА РЕАКЦИЙ КИСЛОТНОГО РАФИНИРОВАНИЯ КРЕМНИЯ

Для повышения качества, полученного после окислительного рафинирования, кремния возможно применение кислотной обработки с целью уменьшения содержания примесных элементов [11, 13, 22]. Нами в качестве растворителей были выбраны следующие кислоты:  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{HF}$ .

Для изучения возможности протекания реакций взаимодействия с кислотами интерметаллических соединений, зафиксированных нами в образцах металлургического кремния, а также соединений, отмеченных ранее другими исследователями ( $\text{AlFeSi}_2$ ,  $\text{FeSi}_2$ ,  $\text{FeSi}_2\text{Ti}$ ,  $\text{Fe}_2\text{Si}$ ,  $\text{FeSi}$ ,  $\text{AlFeSi}$ ,  $\text{Al}_3\text{FeSi}_2$ ,  $\text{FeAlTiSi}$ ,  $\text{TiSi}_2$ ,  $\text{Ca}_2\text{Si}$  [23, 24]), были рассчитаны изменения энергии Гиббса ( $\Delta G^\circ_{298}$ ).



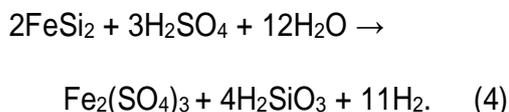
**Рис. 2.** Результаты рентгеноспектрального микроанализа образца кремния после окислительного рафинирования: а – общий вид поверхности (увеличение  $\times 40$ ); б – включение (увеличение  $\times 400$ )  
**Fig. 2.** Results of X-ray spectral microanalysis of a silicon sample after oxidative refining: a – general view of the surface ( $40\times$  magnification); b – inclusion ( $400\times$  magnification)

**Таблица 1.** Результаты рентгеноспектрального микроанализа образца кремния после окислительного рафинирования

**Table 1.** Results of X-ray spectral microanalysis of a silicon sample after oxidative refining

Области (см. рис. 2)	Содержание элемента, % масс.						Итого
	Si	Fe	Ti	Ca	Al	Zr	
1	34,263	34,495	–	6,974	24,268	–	100,00
2	52,010	45,088	–	0,000	2,902	–	100,00
3	35,209	34,381	–	7,002	23,407	–	100,00
4	34,408	32,459	25,964	–	1,147	6,022	100,00

Для экспресс-расчета  $\Delta G^{\circ}_{298}$  химических реакций нами была разработана компьютерная программа в редакторе Microsoft Excel<sup>3</sup>. Данные для расчета были приняты из справочных изданий<sup>4,5,6</sup> [25]. Так, например, взаимодействие  $\text{FeSi}_2$  с раствором серной кислоты происходит по реакции (4):



Расчет  $\Delta G^{\circ}_{298}$  по реакции производится следующим образом [26]:

$$\begin{aligned} \Delta G^{\circ}_{298} &= [(-2257,56) + 4 \cdot (-1022,01) + 11 \cdot 0,10] - [2 \cdot (-78,31) + 3 \cdot (-690,14) + 12 \cdot (-228,59)] = -6344,5 + 4970,26 = \\ &= -1374,24 \text{ кДж/моль.} \end{aligned}$$

Результаты проведенных расчетов приведены в табл. 2.

Рассчитанные значения  $\Delta G^{\circ}_{298}$  реакций взаимодействия примесей с растворами кислот имеют отрицательные значения, что свидетельствует о самопроизвольности протекания данных процессов.

## ЛАБОРАТОРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ОЧИСТКЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

Перед гидрометаллургическим рафинированием кремний подвергался дроблению с помощью щековой дробилки ЩД-10 (Россия) и далее измельчался в шаровой мельнице ШМ-1408 (Россия) до крупности частиц -200 мкм. Был проведен анализ гранулометрического состава полученного мелкофракционного кремния на лазерном анализаторе раз-

мера частиц Analyzette 22 NanoTecPlus (FRITSCH, Германия) (рис. 3).

По данным проведенного гранулометрического анализа установлено следующее распределение (выход, в %) частиц по классам крупности (в мкм): 0,72 – +150-200; 4,64 – +100-150; 27,14 – +45-100; 29,80 – +25-45; 23,51 – +12-25; 6,87 – +6-12; 3,48 – +3-6; 2,18 – +1,5-3; 1,66 – -1,5. Как видно из представленных данных, частицы пробы металлургического кремния представлены классом крупности -200 мкм, причем ~80% объема всех частиц составляет классами крупности +12-100 мкм. В качестве реагентов использовались 10%-ые  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (ГОСТ 2184-2013. Кислота серная техническая<sup>8</sup>),  $\text{HCl}$  (ГОСТ 3118-77. Реактивы. Кислота соляная<sup>9</sup>),  $\text{HNO}_3$  (ГОСТ 4461-77. Реактивы. Кислота азотная<sup>10</sup>), а также 4%  $\text{HF}$  (ГОСТ 10484-78. Реактивы. Кислота фтористоводородная<sup>11</sup>); приготавливались смеси данных кислот в различных соотношениях.

Для экспериментов по кислотной очистке металлургического кремния отбиралась проба массой 40 г. Далее проводили выщелачивание примесных элементов в термостойком стакане объемом 400 мл с использованием магнитной мешалки марки ПЭ6110 (с частотой вращения 100 об/мин) с автоматическим нагревом пульпы до 60°C. Выщелачивание проводили в течение 60 мин. Параметры выщелачивания были выбраны согласно ранее проведенным исследованиям авторов [14, 27].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для определения содержания основных примесей в полученном кеке выщелачивания был проведен рентгенофлуоресцентный ана-

<sup>3</sup>Свидетельство № 2022612200, Российская Федерация, Расчет термодинамической вероятности химических реакций при кислотном рафинировании металлургического кремния / Н.В. Немчинова, А.А. Зайцева; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ИРНИТУ». Заявка № 2022611199, заявл. 03.02.2022; опубл. 08.02.2022.

<sup>4</sup>Морачевский А.Г., Сладков И.Б. Термодинамические расчеты в металлургии: справочник. М.: Металлургия, 1993. 304 с.

<sup>5</sup>Равдель А.А., Пономарева А.М. Краткий справочник физико-химических величин. СПб.: Иван Федоров, 2003. 240 с.

<sup>6</sup>Рабинович В.А., Хавин З.Я. Краткий химический справочник. Л.: Химия, 1978. 269 с.

<sup>8</sup>ГОСТ 2184-2013. Кислота серная техническая. Введ. 01.01.2015. М.: Стандартинформ, 2019.

<sup>9</sup>ГОСТ 3118-77. Реактивы. Кислота соляная. Введ. 22.12.1977. М.: Изд-во стандартов, 1977.

<sup>10</sup>ГОСТ 4461-77. Реактивы. Кислота азотная. Введ. 01.01.1979. М.: Стандартинформ, 2006.

<sup>11</sup>ГОСТ 10484-78. Реактивы. Кислота фтористоводородная. Введ. 01.01.1980. М.: Изд-во стандартов, 1999.

лиз. На рис. 4 приведены спектры РФА некоторых проб кремния после выщелачивания примесей в результате кислотной обработки. Спектры других образцов (при использовании различных комбинаций кислот в качестве рас-

творителя) имеют аналогичный характер.

На рис. 5 приведены результаты РФА в кремнии до и после кислотной обработки смесями различных кислот по содержанию основных примесей (Al, Ca, Ti, Fe).

**Таблица 2.** Результаты расчета  $\Delta G^{\circ}_{298}$  реакций взаимодействия примесей с растворами кислот  
**Table 2.** Calculation results of  $\Delta G^{\circ}_{298}$  interaction reactions of impurities and acid solutions

№	Реакция взаимодействия примесей с растворителем	$\Delta G^{\circ}_{298}$ , кДж/моль
1	$\text{FeSi}_2 + 3\text{HCl} + 6\text{H}_2\text{O} = \text{FeCl}_3 + 2\text{H}_2\text{SiO}_3 + 5,5\text{H}_2$	-712,12
2	$\text{Fe}_2\text{Si} + 6\text{HCl} + 3\text{H}_2\text{O} = 2\text{FeCl}_3 + \text{H}_2\text{SiO}_3 + 5\text{H}_2$	-491,50
3	$\text{FeSi} + 3\text{HCl} + 3\text{H}_2\text{O} = \text{FeCl}_3 + \text{H}_2\text{SiO}_3 + 3,5\text{H}_2$	-380,69
4	$\text{AlFeSi} + 6\text{HCl} + 3\text{H}_2\text{O} = \text{AlCl}_3 + \text{FeCl}_3 + \text{H}_2\text{SiO}_3 + 5\text{H}_2$	-595,03
5	$\text{AlFeSi}_2 + 6\text{HCl} + 6\text{H}_2\text{O} = \text{AlCl}_3 + \text{FeCl}_3 + 2\text{H}_2\text{SiO}_3 + 7\text{H}_2$	-1105,49
6	$\text{Al}_3\text{FeSi}_2 + 12\text{HCl} + 6\text{H}_2\text{O} = 3\text{AlCl}_3 + \text{FeCl}_3 + 2\text{H}_2\text{SiO}_3 + 10\text{H}_2$	-1777,10
7	$\text{FeSiTi} + 7\text{HCl} + 3\text{H}_2\text{O} = \text{FeCl}_3 + \text{TiCl}_4 + \text{H}_2\text{SiO}_3 + 5,5\text{H}_2$	-787,48
8	$\text{FeSi}_2\text{Ti} + 7\text{HCl} + 6\text{H}_2\text{O} = \text{FeCl}_3 + \text{TiCl}_4 + 2\text{H}_2\text{SiO}_3 + 7,5\text{H}_2$	-1117,95
9	$\text{FeAlTiSi} + 10\text{HCl} + 3\text{H}_2\text{O} = \text{FeCl}_3 + \text{AlCl}_3 + \text{TiCl}_4 + \text{H}_2\text{SiO}_3 + 14\text{H}_2$	-1123,89
10	$\text{TiSi}_2 + 4\text{HCl} + 3\text{H}_2\text{O} = \text{TiCl}_4 + \text{H}_2\text{SiO}_3 + 4\text{H}_2$	-560,55
11	$\text{CaSi}_2 + 2\text{HCl} + 6\text{H}_2\text{O} = \text{CaCl}_2 + 2\text{H}_2\text{SiO}_3 + 5\text{H}_2$	-1207,11
12	$\text{Fe}_2\text{Si} + 3\text{H}_2\text{SO}_4 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{H}_2\text{SiO}_3 + 5\text{H}_2$	-441,64
13	$2\text{FeSi} + 3\text{H}_2\text{SO}_4 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 2\text{H}_2\text{SiO}_3 + 7\text{H}_2$	-711,50
14	$2\text{AlFeSi} + 6\text{H}_2\text{SO}_4 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 2\text{H}_2\text{SiO}_3 + 10\text{H}_2$	-1844,85
15	$2\text{AlFeSi}_2 + 6\text{H}_2\text{SO}_4 + 12\text{H}_2\text{O} = \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 4\text{H}_2\text{SiO}_3 + 14\text{H}_2$	-2505,77
16	$2\text{Al}_3\text{FeSi}_2 + 12\text{H}_2\text{SO}_4 + 12\text{H}_2\text{O} = 3\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 4\text{H}_2\text{SiO}_3 + 20\text{H}_2$	-4532,29
17	$2\text{FeSiTi} + 7\text{H}_2\text{SO}_4 + 6\text{H}_2\text{O} = \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 2\text{Ti}(\text{SO}_4)_2 + 2\text{H}_2\text{SiO}_3 + 11\text{H}_2$	-2412,34
18	$2\text{FeSi}_2\text{Ti} + 7\text{H}_2\text{SO}_4 + 12\text{H}_2\text{O} = \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 2\text{Ti}(\text{SO}_4)_2 + 4\text{H}_2\text{SiO}_3 + 15\text{H}_2$	-3073,26
19	$2\text{FeAlTiSi} + 10\text{H}_2\text{SO}_4 + 6\text{H}_2\text{O} = \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + 2\text{Ti}(\text{SO}_4)_2 + 2\text{H}_2\text{SiO}_3 + 14\text{H}_2$	-3425,61
20	$\text{TiSi}_2 + 2\text{H}_2\text{SO}_4 + 6\text{H}_2\text{O} = \text{Ti}(\text{SO}_4)_2 + 2\text{H}_2\text{SiO}_3 + 6\text{H}_2$	-1339,41
21	$\text{CaSi}_2 + 2\text{H}_2\text{SO}_4 + 6\text{H}_2\text{O} = \text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{SiO}_3 + 5\text{H}_2$	-3843,66
22	$2\text{FeSi}_2 + 6\text{HNO}_3 + 12\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 + 4\text{H}_2\text{SiO}_3 + 11\text{H}_2$	-1418,06
23	$2\text{FeSi} + 6\text{HNO}_3 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 + 2\text{H}_2\text{SiO}_3 + 7\text{H}_2$	-755,18
24	$\text{AlFeSi} + 6\text{HNO}_3 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}(\text{NO}_3)_3 + \text{Fe}(\text{NO}_3)_3 + \text{H}_2\text{SiO}_3 + 5\text{H}_2$	-1023,92
25	$\text{AlFeSi}_2 + 6\text{HNO}_3 + 6\text{H}_2\text{O} = \text{Al}(\text{NO}_3)_3 + \text{Fe}(\text{NO}_3)_3 + 2\text{H}_2\text{SiO}_3 + 7\text{H}_2$	-1354,37
26	$\text{Al}_3\text{FeSi}_2 + 12\text{HNO}_3 + 6\text{H}_2\text{O} = 3\text{Al}(\text{NO}_3)_3 + \text{Fe}(\text{NO}_3)_3 + 2\text{H}_2\text{SiO}_3 + 10\text{H}_2$	-2526,95
27	$2\text{FeSiTi} + 14\text{HNO}_3 + 6\text{H}_2\text{O} = 2\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 + 2\text{Ti}(\text{NO}_3)_4 + 2\text{H}_2\text{SiO}_3 + 11\text{H}_2$	-1074,94
28	$2\text{FeSi}_2\text{Ti} + 14\text{HNO}_3 + 12\text{H}_2\text{O} = 3\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 + 2\text{Ti}(\text{NO}_3)_4 + 4\text{H}_2\text{SiO}_3 + 15\text{H}_2$	-2072,61
29	$\text{FeAlTiSi} + 10\text{HNO}_3 + 3\text{H}_2\text{O} = \text{Fe}(\text{NO}_3)_3 + \text{Al}(\text{NO}_3)_3 + \text{Ti}(\text{NO}_3)_4 + \text{H}_2\text{SiO}_3 + 7\text{H}_2$	-1123,76
30	$\text{TiSi}_2 + 4\text{HNO}_3 + 6\text{H}_2\text{O} = \text{Ti}(\text{NO}_3)_4 + 2\text{H}_2\text{SiO}_3 + 6\text{H}_2$	-648,87
31	$\text{Fe}_2\text{Si} + 6\text{HNO}_3 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 + \text{H}_2\text{SiO}_3 + 5\text{H}_2$	-485,32
32	$\text{CaSi}_2 + 2\text{HNO}_3 + 6\text{H}_2\text{O} = \text{Ca}(\text{NO}_3)_2 + 2\text{H}_2\text{SiO}_3 + 5\text{H}_2$	-1244,30
33	$2\text{FeSi}_2 + 6\text{HF} + 12\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{FeF}_3 + 4\text{H}_2\text{SiO}_3 + 11\text{H}_2$	-1155,50
34	$\text{Fe}_2\text{Si} + 6\text{HF} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{FeF}_3 + \text{H}_2\text{SiO}_3 + 5\text{H}_2$	-222,76
35	$2\text{FeSi} + 6\text{HF} + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{FeF}_3 + 2\text{H}_2\text{SiO}_3 + 7\text{H}_2$	-493,02
36	$\text{AlFeSi}_2 + 6\text{HF} + 6\text{H}_2\text{O} = \text{AlF}_3 + \text{FeF}_3 + 2\text{H}_2\text{SiO}_3 + 7\text{H}_2$	-1233,14
37	$\text{Al}_3\text{FeSi}_2 + 12\text{HF} + 6\text{H}_2\text{O} = 3\text{AlF}_3 + \text{FeF}_3 + 2\text{H}_2\text{SiO}_3 + 10\text{H}_2$	-2425,79
38	$2\text{FeSiTi} + 14\text{HF} + 6\text{H}_2\text{O} = 2\text{FeF}_3 + 2\text{TiF}_4 + 2\text{H}_2\text{SiO}_3 + 11\text{H}_2$	-1509,10
39	$2\text{FeSi}_2\text{Ti} + 14\text{HF} + 12\text{H}_2\text{O} = 2\text{FeF}_3 + 2\text{TiF}_4 + 4\text{H}_2\text{SiO}_3 + 15\text{H}_2$	-2170,02
40	$\text{FeAlTiSi} + 10\text{HF} + 3\text{H}_2\text{O} = \text{FeF}_3 + \text{AlF}_3 + \text{TiF}_4 + \text{H}_2\text{SiO}_3 + 7\text{H}_2$	-1350,88
41	$\text{TiSi}_2 + 4\text{HF} + 6\text{H}_2\text{O} = \text{TiF}_4 + 2\text{H}_2\text{SiO}_3 + 6\text{H}_2$	-997,23
42	$\text{AlFeSi} + 6\text{HF} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{AlF}_3 + \text{FeF}_3 + \text{H}_2\text{SiO}_3 + 5\text{H}_2$	-902,68
43	$\text{CaSi}_2 + 2\text{HF} + 6\text{H}_2\text{O} = \text{CaF}_2 + 2\text{H}_2\text{SiO}_3 + 5\text{H}_2$	-1266,01

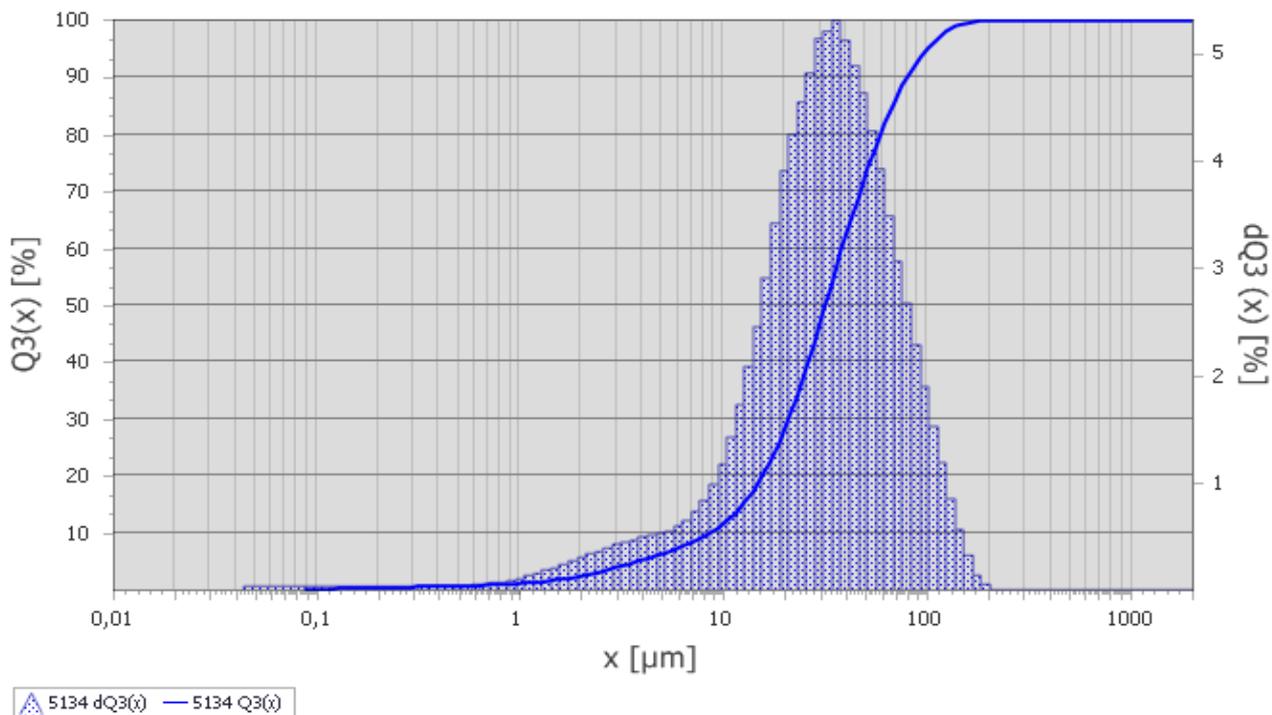
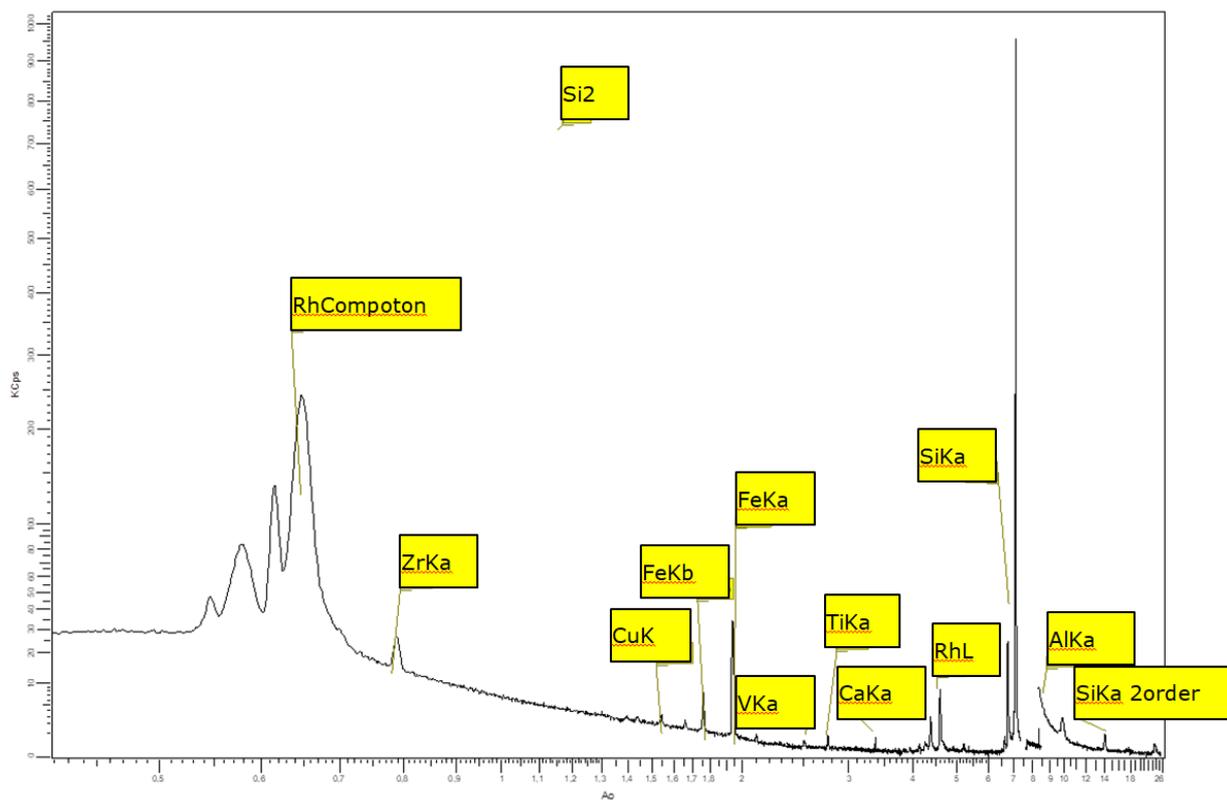


Рис. 3. Распределение частиц пробы металлургического кремния (после окислительного рафинирования) по классам крупности  
 Fig. 3. Distribution of metallurgical silicon sample particles (after oxidative refining) by size classes



a

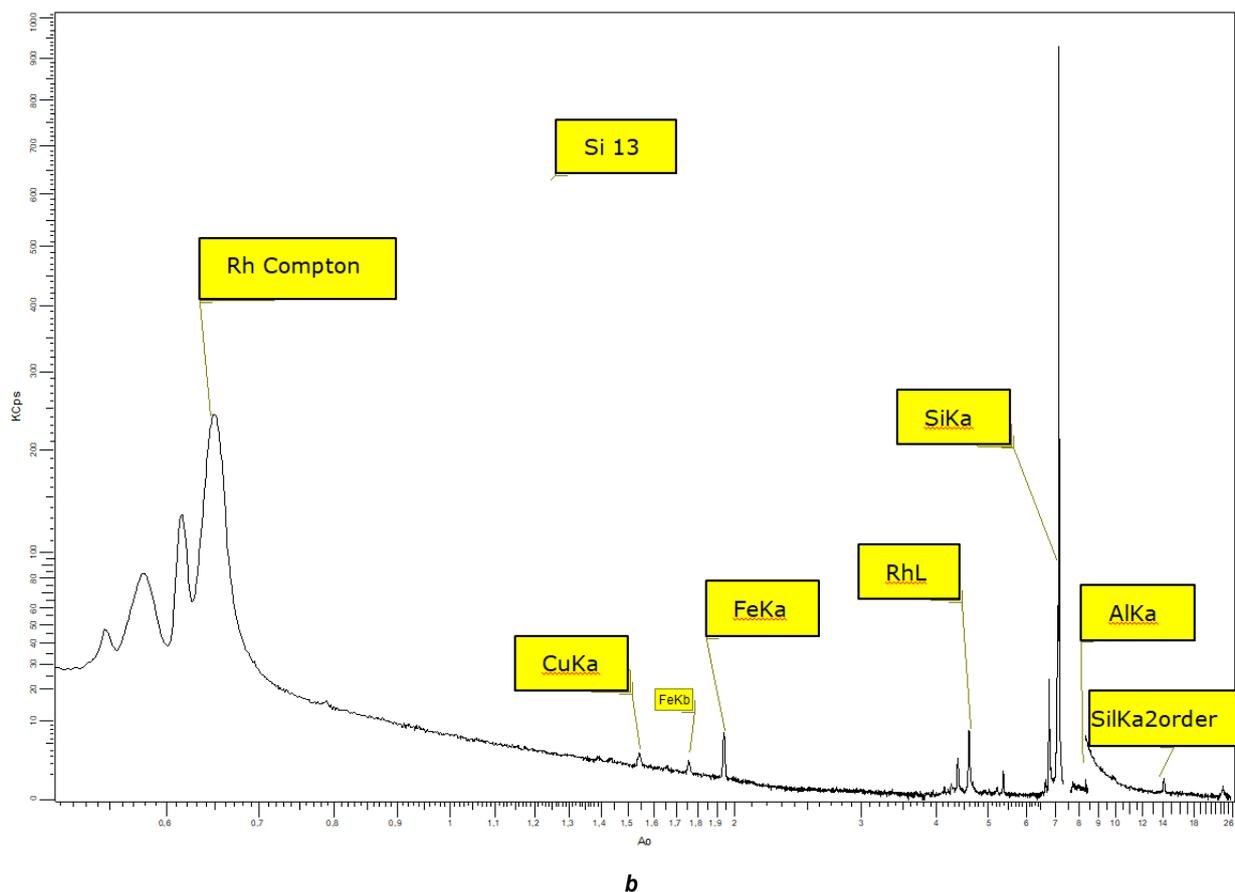


Рис. 4. Спектры рентгенофлуоресцентного анализа проб кремния (кека) после кислотной очистки с использованием в качестве растворителя: а – смеси  $H_2SO_4$  и  $HCl$  в соотношении 1:3, б – смеси  $H_2SO_4$  и  $HF$  в соотношении 1:1

Fig. 4. Spectra of X-ray fluorescence analysis of silicon samples (cake) after acid treatment using the following solvents: a – 1:3 mixture of  $H_2SO_4$  and  $HCl$ , b – 1:1 mixture of  $H_2SO_4$  and  $HF$

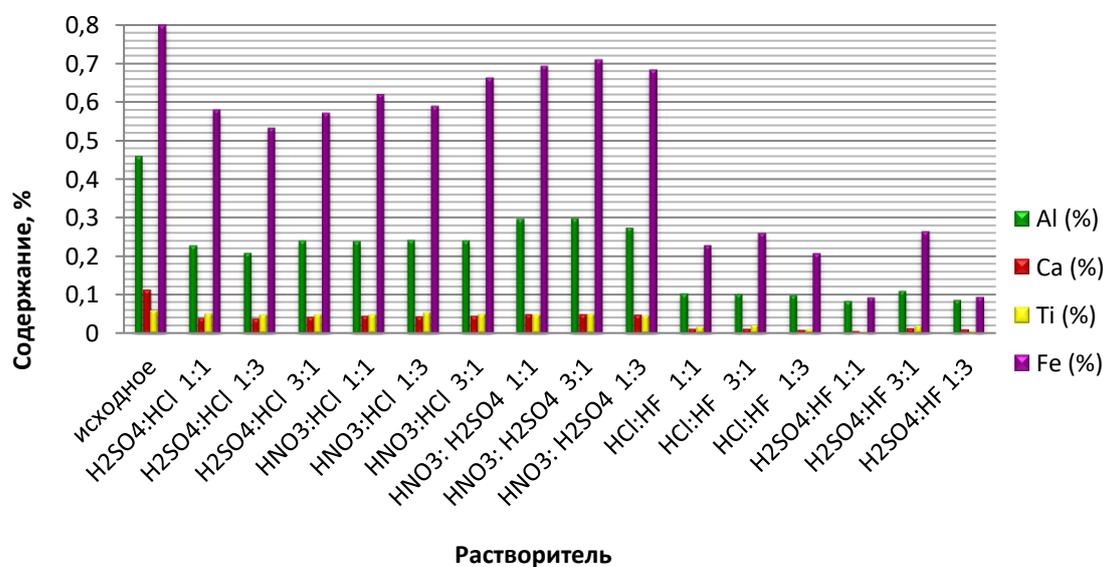


Рис. 5. Результаты рентгенофлуоресцентного анализа по содержанию основных примесных элементов в металлургическом кремнии до и после гидрOMETALLУРГИЧЕСКОГО РАФИНИРОВАНИЯ СМЕСЯМИ КИСЛОТ  
Fig. 5. Results of the X-ray fluorescence analysis of content of main impurity elements in metallurgical silicon before and after hydrometallurgical refining with acid mixtures

**Таблица 3.** Результаты рентгенофлуоресцентного анализа кека выщелачивания после кислотной обработки  
**Table 3.** Results of X-ray fluorescence analysis of leaching cake after acid treatment

Смесь растворителей	Суммарное содержание примесей, % масс.	Содержание Si (по разнице), % масс.	Степень очистки, %
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> :HCl = 1:1	0,957	99,043	36,60
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> :HCl = 1:3	0,884	99,116	41,48
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> :HCl = 3:1	0,959	99,041	36,50
HNO <sub>3</sub> :HCl = 1:1	1,009	98,991	33,20
HNO <sub>3</sub> :HCl = 1:3	0,987	99,013	34,63
HNO <sub>3</sub> :HCl = 3:1	1,054	98,946	30,20
HNO <sub>3</sub> :H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> = 1:1	1,142	98,858	24,39
HNO <sub>3</sub> :H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> = 3:1	1,166	98,834	22,77
HNO <sub>3</sub> :H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> = 1:3	1,109	98,891	26,58
HCl:HF = 1:1	0,383	99,617	74,65
HCl:HF = 3:1	0,422	99,578	72,06
HCl:HF = 1:3	0,342	99,658	77,34
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> :HF = 1:1	0,199	99,801	86,85
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> :HF = 3:1	0,438	99,562	70,99
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> :HF = 1:3	0,207	99,793	86,28

По результатам РФА в образцах кека выщелачивания с использованием в качестве растворителя смеси плавиковой и серной кислот в соотношении 1:1 зафиксировано наименьшее содержание примесных элементов, % масс., соответственно: Al – 0,083, Ca – 0,006, Ti – 0,00459, Fe – 0,093. Однако ввиду высокого класса опасности плавиковой кислоты использование ее в промышленном масштабе сильно усложняется. Достаточно хороший результат по очистке кремния от четырех основных примесей был достигнут при использовании в качестве растворителя смеси серной и соляной кислот в соотношении 1:3. При использовании такой комбинации растворителей содержание примесных элементов в исследуемой пробе кремния составило, % масс., соответственно: Al – 0,208, Ca – 0,038, Ti – 0,049, Fe – 0,533.

Для более полной оценки эффективности предлагаемой методики был произведен расчет степени очистки металлургического кремния от примесей. Результаты представлены в табл. 3.

Высокие показатели степени очистки металлургического кремния от алюминия, кальция, железа и титана (более 70%) при его гидрометаллургическом рафинировании были зафиксированы при использовании в качестве реагента смеси плавиковой и серной

кислот, а также смеси плавиковой и соляной кислот. Использование в качестве растворителя смеси серной и соляной кислот (при соотношении 1:3 и 1:1) позволило достигнуть степени очистки металлургического кремния от примесей (Al, Fe, Ti, Ca, V, Cr, Mn, Cu, P, Ba, Ni, Zn) 41,48% и 36,60%, соответственно.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Металлургический кремний, получаемый выплавкой в РТП, для получения высококачественных марок, востребованных в различных отраслях промышленности, подвергается на производстве окислительному рафинированию продувкой расплава воздухом.

Методами РФА и РСМА был изучен химический состав полученных образцов металлургического кремния (после окислительного рафинирования) АО «Кремний» компании «РУСАЛ». Методом РФА было определено содержание 12 примесных элементов; содержание кремния в исследуемых образцах (по разнице) составило 98,6939% масс. Методом РСМА нами были зафиксированы следующие интерметаллиды: AlFeSi<sub>2</sub> (с примесью Ca), FeSi<sub>2</sub> (с примесью Al), FeSi<sub>2</sub>Ti (с примесью Zr). С целью уменьшения содержания примесей в металлургическом кремнии проводилась кислотная обработка образцов измельченного кремния. В качестве

растворителей использовались смеси неорганических кислот ( $H_2SO_4$ ,  $HCl$ ,  $HF$ ,  $HNO_3$ ) в различных соотношениях. Для оценки возможности применения выбранных реагентов была изучена термодинамика взаимодействия примесных элементов с данными кислотами. Полученные значения  $\Delta G^{\circ}_{298}$  имели отрицательные значения, что свидетельствует о самопроизвольности протекания данных реакций.

Для определения химического состава полученного кека выщелачивания был проведен РФА. По результатам анализа в исследуемых образцах с использованием в ка-

честве растворителя смеси плавиковой и серной кислоты в соотношении 1:1 зафиксировано наименьшее содержание примесных элементов, % масс., соответственно: Al – 0,083, Ca – 0,006, Ti – 0,00459, Fe – 0,093. Степень очистки кремния при использовании данной смеси кислот составила 86,85%. Достаточно хороший результат по очистке кремния примесей (12 элементов) был достигнут при использовании в качестве растворителя смеси серной и соляной кислот в соотношении 1:3. При использовании такой комбинации кислот степень очистки металлургического кремния составила 41,48%.

#### Список источников

1. Гасик М.И., Гасик М.М. Электротермия кремния. Днепропетровск: Национальная металлургическая академия Украины, 2011. 487 с.
2. Schei A., Tuset J.Kr., Tveit H. Production of high silicon alloys. Trondheim: Tapir, 1998. 363 p.
3. Miguez J.M., Perez A., Souto A., Dieguez J., Ordas R. New and future applications of different silicon qualities: how could we produce them // Silicon for the Chemical and Solar Industry XIII (Kristiansand, 13–16 June 2016). Kristiansand, 2016. P. 15–22. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21782.34883>.
4. Sun Kaidi, Wang Tongtong, Gong Weibo, Lu Wenyang, He Xin, Eddings E.G., et al. Synthesis and potential applications of silicon carbide nanomaterials / nanocomposites // Ceramics International. 2022. Vol. 48. Iss. 22. P. 32571–32587. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.07.204>.
5. Henstock J.R., Canham L.T., Anderson S.I. Silicon: the evolution of its use in biomaterials // Acta Biomaterialia. 2015. Vol. 11. P. 17–26. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2014.09.025>.
6. Колобов Г.А., Критская Т.В. Рафинирование кремния // Металургія (Наукові праці ЗДІА). 2009. № 20. С. 77–83.
7. Елисеев И.А., Непомнящих А.И. Разработка промышленной технологии удаления бора при рафинировании кремния // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2013. № 1. С. 95–101.
8. Jiang Dachuan, Tan Yi, Shi Shuang, Dong Wei, Gu Zheng, Zou Ruixun. Removal of phosphorus in molten silicon by electron beam candle melting // Materials Letters. 2012. Vol. 78. P. 4–7. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2012.03.031>.
9. Wei Kuixian, Zheng Damin, Ma Wenhui, Yang Bin, Dai Yongnian. Study on Al removal from MG-Si by vacuum refining // Silicon. 2015. Vol. 7. Iss. 3. P. 269–274. <https://doi.org/10.1007/s12633-014-9228-9>.
10. Nemchinova N.V., Tyutrin A.A., Zelinskaya E.V. Acidic-ultrasonic refining of silicon by carbothermic technology // Metallurgist. 2015. Vol. 59. Iss. 3. P. 258–263. <https://doi.org/10.1007/s11015-015-0094-5>.
11. Xi Fengshuo, Li Shaoyuan, Ma Wenhui, Chen Zhengjie, Wei Kuixian, Wu Jijun. A review of hydrometallurgy techniques for the removal of impurities from metallurgical-grade silicon // Hydrometallurgy. 2021. Vol. 201. P. 105553. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105553>.
12. Немчинова Н.В., Тютрин А.А., Хоанг В.В., Будько Т.В. О способах рафинирования кремния // Молодежный вестник ИрГТУ. 2022. Т. 12. № 4. С. 924–934.
13. Xi Fengshuo, Li Shaoyuan, Ma Wenhui, Chen Zhengjie, Wei Kuixian, Wu Jijun. A review of hydrometallurgy techniques for the removal of impurities from metallurgical-grade silicon // Hydrometallurgy. 2021. Vol. 201. P. 105553. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105553>.
14. Попов С.И. Металлургия кремния в трехфазных руднотермических печах. Иркутск: ЗАО «Кремний», 2004. 237 с.
15. Bjørnstad E.L., Jung In-Ho, Van Ende M.A., Gabriella T. Oxidative refining of metallurgical grade silicon: lab-scale measurements on the overarching refining behavior of Ca and Al // Metallurgical and Materials Transactions B. 2022. Vol. 53. P. 1103–1111. <https://doi.org/10.1007/s11663-022-02425-5>.
16. Næss M.K., Tranell G., Olsen J.E., Nils E.K., Kai T. Mechanisms and kinetics of liquid silicon oxidation during industrial refining // Oxidation of Metals. 2012. Vol. 78. P. 239–251. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.13947.52005>.
17. Johnston M.D., Barati M. Distribution of impurity elements in slag–silicon equilibria for oxidative refining of metallurgical silicon for solar cell applications // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2010. Vol. 94. Iss. 12. P. 2085–2090. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.06.025>.
18. Тютрин А.А., Фереферова Т.Т. Применение современных методов анализа для исследования шлаков кремниевое производство // Вестник Иркутского технического университета. 2016. Т. 20. № 9. С. 139–146. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-9-139-146>.

19. Чупарина Е.В., Смагунова А.Н., Елисеева Л.А. Исследование процессов образования фона в длинноволновой области рентгеновского спектра // Журнал аналитической химии. 2015. Т. 70. № 8. С. 828–834.
20. Reed S.J.B. Electron microprobe analysis. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 350 p.
21. Немчинова Н.В., Бузикова Т.А. Исследование фазово-химического состава печных шлаков кремниевого производства // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2017. № 1. С. 31–39. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-31-39>.
22. Немчинова Н.В., Тютрин А.А., Бузикова Т.А. Исследование шлаков пирометаллургии кремния // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2015. Т. 8. № 4. С. 457–467.
23. Немчинова Н.В. Исследование химического состава металлургического кремния // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2012. № 1. С. 129–134.
24. Nemchinova N.V., Hoang V.V., Tyutrin A.A. Formation of impurity inclusions in silicon when smelting in ore-thermal furnaces // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2020. Vol. 969. P. 012038. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/969/1/012038>.
25. Barin I. Thermochemical data of pure substances. 3d Edition. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft mbH, 1995. 1683 p. <https://doi.org/10.1002/9783527619825>.
26. Зайцева А.А., Зырянов Н.В. Исследование возможности применения различных кислот при гидрометаллургическом рафинировании металлургического кремния // Перспективы развития технологии переработки углеводородных и минеральных ресурсов: матер. XII Междунар. науч.-практ. конф. (г. Иркутск, 20–21 апреля 2022 г.). Иркутск, 2022. С. 88–91.
27. Тамендаров М.Ф., Чуников Г.Н., Токмолдин С.Ж. Исследование фосфорных шлаков для получения кремния солнечного качества // Химия и металлургия комплексной переработки минерального сырья: матер. междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 90-летию выдающегося ученого, академика АН КазССР, лауреата государственной премии СССР Букетова Евнея Арстановича (г. Караганда, 25–26 июня 2015 г.). Караганда, 2015. Караганда, 2015. С. 115–120.

#### References

1. Gasik M.I., Gasik M.M. *Electrothermics of silicon*. Dnepropetrovsk: National Metallurgical Academy of Ukraine; 2011. 487 p. (in Russ.).
2. Schei A., Tuset J.Kr., Tveit H. *Production of high silicon alloys*. Trondheim: Tapir; 1998. 363 p.
3. Miguez J.M., Perez A., Souto A., Dieguez J., Ordas R. New and future applications of different silicon qualities: how could we produce them. In: *Silicon for the Chemical and Solar Industry XIII*. 13–16 June 2016, Kristiansand; 2016, 15–22. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21782.34883>.
4. Sun Kaidi, Wang Tongtong, Gong Weibo, Lu Wenyang, He Xin, Eddings E.G., et al. Synthesis and potential applications of silicon carbide nanomaterials / nanocomposites. *Ceramics International*. 2022;48(22):32571-32587. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.07.204>.
5. Henstock J.R., Canham L.T., Anderson S.I. Silicon: the evolution of its use in biomaterials. *Acta Biomaterialia*. 2015;11:17-26. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2014.09.025>.
6. Kolobov G.A., Kritskaya T.V. Silicon refining. *Metallurgy (Scientific Work ZDIA)*. 2009;20:77-83. (In Russ.).
7. Eliseev I.A., Nepomnyaschikh A.I. Development of industrial technology of boron removal during the refining of silicon. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2013;1:95-101. (In Russ.).
8. Jiang Dachuan, Tan Yi, Shi Shuang, Dong Wei, Gu Zheng, Zou Ruixun. Removal of phosphorus in molten silicon by electron beam candle melting. *Materials Letters*. 2012;78:4-7. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2012.03.031>.
9. Wei Kuixian, Zheng Damin, Ma Wenhui, Yang Bin, Dai Yongnian. Study on Al removal from MG-Si by vacuum refining. *Silicon*. 2015;7(3):269-274. <https://doi.org/10.1007/s12633-014-9228-9>.
10. Nemchinova N.V., Tyutrin A.A., Zelinskaya E.V. Acidic-ultrasonic refining of silicon by carbothermic technology. *Metallurgist*. 2015;59(3):258-263. <https://doi.org/10.1007/s11015-015-0094-5>.
11. Xi Fengshuo, Li Shaoyuan, Ma Wenhui, Chen Zhengjie, Wei Kuixian, Wu Jijun. A review of hydrometallurgy techniques for the removal of impurities from metallurgical-grade silicon. *Hydrometallurgy*. 2021;201:105553. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105553>.
12. Nemchinova N.V., Hoang V.V., Tyutrin A.A., Budko T.V. On the silicon refining methods. *Young Researchers' Journal of ISTU*. 2022;12(4):924–934.
13. Xi Fengshuo, Li Shaoyuan, Ma Wenhui, Chen Zhengjie, Wei Kuixian, Wu Jijun. A review of hydrometallurgy techniques for the removal of impurities from metallurgical-grade silicon. *Hydrometallurgy*. 2021;201:105553. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105553>.
14. Popov S.I. *Silicon metallurgy in three-phase ore-thermal furnaces*. Irkutsk: CJSC "Silicon"; 2004, 237 p. (In Russ.).
15. Bjørnstad E.L., Jung In-Ho, Van Ende M.A., Gabriella T. Oxidative refining of metallurgical grade silicon: lab-scale measurements on the overarching refining behavior of Ca and Al. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2022;53:1103-1111. <https://doi.org/10.1007/s11663-022-02425-5>.

16. Næss M.K., Tranell G., Olsen J.E., Nils E.K., Kai T. Mechanisms and kinetics of liquid silicon oxidation during industrial refining. *Oxidation of Metals*. 2012;78:239-251. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.13947.52005>.
17. Johnston M.D., Barati M. Distribution of impurity elements in slag–silicon equilibria for oxidative refining of metallurgical silicon for solar cell applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2010;94(12):2085-2090. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.06.025>.
18. Tyutrin A.A., Fereferova T.T. Using modern analysis methods to study silicon production slags. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2016;20(9):139-146. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-9-139-146>.
19. Chuparina E.V., Smagunova A.N., Eliseeva L.A. Study of the processes of background formation in the long-wavelength region of X-RAY spectrum. *Zhurnal analiticheskoy himii = Journal of Analytical Chemistry*. 2015;70(8):828-834. (In Russ.).
20. Reed S.J.B. *Electron microprobe analysis*. Cambridge: Cambridge University Press; 1997, 350 p.
21. Nemchinova N.V., Buzikova T.A. Study of the phase-and-chemical composition of silicon production furnace slags. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya = Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2017;(1):31-39. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-31-39>.
22. Nemchinova N.V., Tyutrin A.A., Buzikova T.A. Investigation of pyrometallurgical silicon slags. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies*. 2015;8(4):457-467.
23. Nemchinova N.V. Investigation of metallurgical silicon chemical composition. *Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2012;1:129-134.
24. Nemchinova N.V., Hoang V.V., Tyutrin A.A. Formation of impurity inclusions in silicon when smelting in ore-thermal furnaces. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020;969:012038. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/969/1/012038>.
25. Barin I. *Thermochemical data of pure substances. 3d Edition*. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft mbH; 1995, 1683 p. <https://doi.org/10.1002/9783527619825>.
26. Zaitseva A.A., Zyryanov N.V. Studying the possibility of using various acids in hydrometallurgical refining of metallurgical silicon. In: *Perspektivy razvitiya tekhnologii pererabotki uglevodородnyh i mineral'nyh resursov»: materialy XII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Development prospects of processing technology for hydrocarbon and mineral resources»: materials of the 12<sup>th</sup> International Scientific and Practical Conference*. 20–21 April 2022, Irkutsk. Irkutsk; 2022, p. 88-91.
27. Tamendarov M.F., Chumakov G.N., Tokmoldin S.Zh. Investigation of phosphoric slags for obtaining solar-quality silicon. In: *Himiya i metallurgiya kompleksnoj pererabotki mineral'nogo syr'ya: materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj 90-letiyu vydayushchegosya uchenogo, akademika AN KazSSR, laureata gosudarstvennoj premii SSSR Buketova Evneya Arstanovicha = Chemistry and metallurgy of complex processing of mineral raw materials: materials of the international scientific and practical conference dedicated to the 90th anniversary of the outstanding scientist, academician of the Academy of Sciences of the Kazakh SSR, laureate of the USSR State Prize Buketov Evney Arstanovich*. 25–26 June 2015, Karaganda, Kazakhstan; 2015, p. 115-120. (In Russ.).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Немчинова Нина Владимировна**,  
д.т.н., профессор,  
заведующая кафедрой металлургии цветных  
металлов,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83  
✉ ninavn@yandex.ru  
<http://orcid.org/0000-0001-9895-1709>

**Зайцева Анна Александровна**,  
аспирант,  
ассистент кафедры металлургии цветных металлов,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83  
vo1odkinaa@yandex.ru  
<https://orcid.org/0009-0002-1107-7268>

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Nina V. Nemchinova**,  
Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Head of the Department of Non-Ferrous  
Metals Metallurgy,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia  
✉ ninavn@yandex.ru  
<http://orcid.org/0000-0001-9895-1709>

**Anna A. Zaitseva**,  
Postgraduate Student,  
Assistant Professor of the Department of Non-Ferrous  
Metals Metallurgy,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia  
vo1odkinaa@yandex.ru  
<https://orcid.org/0009-0002-1107-7268>

#### **Вклад авторов**

Немчинова Н.В. осуществляла научное руководство исследованиями, выполнила подбор списка литературных источников по тематике исследования и провела общее редактирование текста рукописи. Зайцева А.А. провела эксперименты, термодинамические расчеты и обобщила полученные результаты.

#### **Конфликт интересов**

Немчинова Н.В. является членом редакционной коллегии журнала «iPolytech Journal» с 2000 года, но не имеет отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах авторы не заявляли.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

#### **Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 18.04.2023; одобрена после рецензирования 19.05.2023; принята к публикации 14.06.2023.

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

Nemchinova N.V. supervised the research, selected the sources and compiled the list of references on the subject of the research, edited the text of the article. Zaitseva A.A. conducted experiments, performed thermodynamic calculations and summarized the results.

#### **Conflict of interests**

Nina V. Nemchinova has been a member of the editorial board of the iPolytech Journal since 2000, but she did not take part in making decision about publishing the article under consideration. The article was reviewed following the Journal's review procedure. The authors did not report any other conflicts of interest.

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

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

The article was submitted 18.04.2023; approved after reviewing 19.05.2023; accepted for publication 14.06.2023.

## ПЕРСОНАЛИЯ

<https://elibrary.ru/fhbaxp>

## К 85-летию Юбилею А.В. Баева

Анатолий Васильевич Баев родился 30 апреля 1938 г. в Кировской области. После окончания школы работал на Днепродзержинском вагоностроительном заводе им. газеты «Правда» токарем-карусельщиком, электромонтажником энергопоезда № 4. С 1958 по 1961 г. – служба в рядах Советской Армии в Артиллерийской радиотехнической академии им. Маршала Советского Союза Л.А. Говорова (г. Харьков).

Демобилизовавшись, Анатолий Васильевич поступил в Иркутский политехнический институт на специальность «Автоматизация производственных процессов». В 1966 г., получив диплом с отличием, был принят на должность ассистента кафедры с аналогичным названием.

Через четыре года А.В. Баев поступил в аспирантуру по специальности «Металлургия цветных металлов». В 1973 г. он защитил диссертацию на

соискание ученой степени кандидата технических наук на тему «Об электрохимическом механизме растворения сульфидов при их гидрометаллургической переработке». Его научным руководителем был профессор А.И. Орлов.

С 1976 г. Анатолий Васильевич стал доцентом кафедры автоматизации производственных процессов. В 1991 г. был избран на должность профессора. С 2005 г., в течение 10 лет, Анатолий Васильевич Баев руководил кафедрой автоматизации производственных процессов.

А.В. Баев читал основные курсы по специальности: теория автоматического управления, технологические процессы и производства, исполнительные устройства систем управления, пакеты прикладных программ, автоматизация технологических процессов и производств; проводил лабораторные и практические занятия; руководил курсовым и дипломным проектированием. Во всех читаемых курсах широко использовал новые информационные технологии, построенные на базе вычислительной техники, математических пакетов MATHCAD и MATLAB, ввел в практику проектно-конструкторские и проектно-исследовательские лабораторные работы, использовал методику преподавания FESTO-DIDACTIC.

За время работы в университете А.В. Баев постоянно повышал квалификацию: прошел ФПК в МЭИ, курсы – в МХТИ, в МРЦПК ИрГТУ; был участником трех семинаров FESTO-DIDACTIC, в том числе «Методические и психологические основы диалоговой формы обучения». Как результат прохождения повышения квалификации – разработка и внедрение курса дистанционного обучения для дисциплины «Исполнительные устройства систем управления». А.В. Баевым проведена большая организационная работа по приобретению пакета UniSim, который фирма «Honeywell» передала кафедре на безвозмездной основе. Применение указанного пакета повысило качество обучения студентов специализации «Автоматизация технологических процессов и производств в нефтяной и газовой промышленности», открытой по его инициативе в 2009 г.

Анатолий Васильевич Баев всегда принимал активное участие в общественной жизни г. Иркутск, ИрГТУ. В 1978 г. был заместителем председателя, а с 1979 г. – председателем



Организационно-методической комиссии по контролю качества подготовки специалистов при ректоре института, преобразованной в 1992 г. в Инспекцию по качеству подготовки специалистов при ректоре университета. Принимал активное участие в проведении областных выставок технического творчества школьников в качестве председателя жюри.

Профессор Баев является автором более 40 научных публикаций.

Руководя кафедрой АПП, был корректен и внимателен, пользовался заслуженным авторитетом и уважением среди коллег и студентов, посвятив себя служению науке, своей родной кафедре, политеху. В 2017 г. А.В. Баев ушел на заслуженный отдых.

За добросовестный труд, заслуги в области высшего образования Анатолий Васильевич Баев удостоен медали «Ветеран труда», нагрудного значка МВиССО СССР «За отличные успехи в работе», нагрудного знака «Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации». Ему объявлена благодарность Министра ВиССО СССР, вручена Почетная Грамота Правительства Республики Бурятия, Почетная Грамота Мэра г. Иркутск. А.В. Баев неоднократно поощрялся ректором института и университета.

Анатолий Васильевич активно занимался спортом: 1 разряд по волейболу, 3 разряд по шахматам, судья 3 категории по волейболу.

***Друзья, коллеги и ученики тепло поздравляют А.В. Баева со славным юбилеем и желают юношеского задора, искрометного юмора, крепкого здоровья и творческого долголетия!***

***К поздравлениям юбиляру присоединяется и редколлегия журнала «iPolytech Journal». Анатолий Васильевич долгие годы был рецензентом вузовского издания.***

### **Уважаемые коллеги!**

**Мы приглашаем Вас к участию в нашем журнале в качестве авторов, рекламодателей и читателей и сообщаем требования к статьям, принимаемым к публикации**

I. Статья представляется в **электронном и распечатанном видах**. Рекомендуемый объем статьи не менее 10 000 знаков.

К статье прилагаются:

1. Экспертное заключение.
2. Название рубрики, в которой должна быть размещена Ваша статья; УДК; название статьи; реферат (аннотация), количество слов в реферате – не менее 200; ключевые слова (4-5); сведения об авторах: название учреждения, его адрес; фамилия, имя, отчество (полностью); ученая степень; звание и должность; контактный телефон и e-mail (вся информация предоставляется одним файлом).
3. Статья должна иметь личную подпись автора; на статьях адъюнктов и аспирантов должна стоять также подпись научного руководителя.

II. **Текст статьи, сведения об авторах, реферат, ключевые слова, адрес учреждения, контактный телефон и E-mail** должны быть также представлены по электронной почте: [pgp@istu.edu](mailto:pgp@istu.edu) в виде файла с расширением **\*.DOC** – документа, построенного средствами Microsoft Word 97 или последующих версий.

При наборе статьи в Microsoft Word рекомендуются следующие установки:

- 1) параметры страницы и абзаца: отступы сверху и снизу – 2 см; слева и справа – 2 см; табуляция – 2 см; ориентация – книжная;
- 2) шрифт – **Times New Roman**, размер – **12**, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;
- 3) при вставке формул использовать **Microsoft Equation 3** при установках: элементы формулы выполняются **курсивом**; для греческих букв и символов назначать шрифт **Symbol**, для остальных элементов – **Times New Roman**. Размер символов: обычный – 12 пт, крупный индекс – 7 пт, мелкий индекс – 5 пт, крупный символ – 18 пт, мелкий символ – 12 пт. Все экспликации элементов формул необходимо также выполнять в виде формул;
- 4) рисунки, вставленные в текст, должны быть выполнены с разрешением 300 dpi, B&W – для черно-белых иллюстраций, Grayscale – для полутонов, максимальный размер рисунка с надписью: ширина 150 мм, высота 245 мм и представлены в виде файла с расширением \*.BMP, \*.TIFF, \*.JPG, должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. **Схемы, графики** выполняются во встроенной программе **MS Word** или в **MS Excel**, с приложением файлов (**представляемые иллюстрации должны быть четкими и ясными во всех элементах**);
- 5) библиографические ссылки должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ Р 7.05 2008.

**Внимание! Публикация статьи является бесплатной.**

«iPolytech Journal» включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, в DOAJ, международный каталог периодических изданий «UlrichsPeriodicals Directory», EBSCO, в Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU), представлен в Научной электронной библиотеке «КиберЛенинка» (CYBERLENINKA), рассылается 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](mailto:pgp@istu.edu)

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

# iPolytech Journal

Том 27, № 2. 2023 / Vol. 27, №2. 2023

16+



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 30.06.2023 г.  
Формат 60x90/8.  
Бумага офсетная. Печать трафаретная.  
Усл. печ. л. 29,5.  
Тираж 500 экз. Номер по реестру 58 / 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