

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

iPolytech Journal

Tom **28**, № 3. 2024 / Vol. **28**, No 3. 2024



<https://ipolytech.ru>

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

iPolytech Journal

Том 28, № 3. 2024 / Vol. 28, No.3. 2024



<https://ipolytech.elpub.ru>



НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Научный журнал «iPolytech Journal» – ежеквартальный журнал теоретических и прикладных исследований в области машиностроения, энергетики и металлургии. С 1997 по 2021 год журнал выходил под названием «Вестник Иркутского государственного технического университета».

Периодичность издания - **ежеквартально. Языки – русский и английский.**

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор): Регистрационный номер: **ПИ № ФС 77–82388 от 10 декабря 2021 г.**

(Ранее действовавшие Свидетельства:

И № 0327 от 19 сентября 1997 г.; ПИ № 77-13046 от 15 июля 2002 г.;

ПИ № ФС77- 42847 от 26 ноября 2010 г.,

ПИ № ФС77-47902 от 22 декабря 2011г.;

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

Учредитель и издатель:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ФГБОУ ВО ИРНИТУ).
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Издательство:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Иркутский национальный исследовательский технический университет»
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83А

Адрес редакции:

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

SCHOLARLY JOURNAL

"iPolytech Journal" is a quarterly academic journal publishing theoretical and applied research papers in mechanical engineering, energy and metallurgy. From 1997 to 2021 the journal was published under the title "Proceedings of Irkutsk State Technical University" ((Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta). Periodicity: Quarterly

Periodicity: Quarterly Articles are published in Russian and English.

The Journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media: Registration certificate PI No FS77-82388 of 10 December 2021.

(previously valid certificates:

И No 0327 of September 19, 1997; ПИ No77-13046 of July 15, 2002;

ПИ No ФС77- 42847 of November 26, 2010,

ПИ No ФС77-47902 of December 22, 2011;

ПИ No ФС77-62813 of August 18, 2015).

Founder and Publisher:

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education,
Irkutsk National Research Technical University (INRTU)
83, Lermontov St. Irkutsk, 664074, Russian Federation

Publishers:

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education
Irkutsk National Research Technical University (INRTU)
83A, Lermontov St. Irkutsk, 664074, Russian Federation

Editorial office:

83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation
e-mail: pgp@istu.edu



Редакционная коллегия

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

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

ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

ЗАЙДЕС С.А., д.т.н., профессор кафедры материаловедения, сварочных и аддитивных технологий Иркутского национального исследовательского технического университета, заместитель главного редактора по направлению «Машиностроение» (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»

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» (Иркутск, Россия)

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

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

БАЖИН В.Ю., д.т.н., заведующий кафедрой металлургии Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II (Санкт-Петербург, Россия)

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

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

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

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

ЕРМОЛОВ И.А., д.т.н., доцент, профессор РАН, заместитель директора по научной работе Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН (Москва, Россия)

ИЛЮШИН П.В., д.т.н., профессор, главный научный сотрудник ФГБУН «Институт энергетических исследований Российской академии наук», Руководитель Центра интеллектуальных электроэнергетических систем и распределенной энергетики (Москва, Россия)

КИМ Инсу, доцент кафедры электротехники Университета Инха (Инчхон, Южная Корея)

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

КОЛОСОК И.Н., д.т.н., ведущий научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (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 (Иркутск, Россия)

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

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

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

МУКЕШ Кумар Патхак, профессор, заведующий кафедрой электротехники Индийского технологического университета Рурки (Рурки, Индия)

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

ОГАР П.М., д.т.н., профессор, профессор кафедры подъемно-транспортных, строительных. дорожных машин и оборудования Братского государственного университета (Братск, Россия)

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

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

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

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

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

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

СУНЬ Хуапин, профессор Цзянсукого университета (Чженьцзян, Китай)

СУСЛОВ К.В., д.т.н., профессор Национального исследовательского университета «МЭИ» (Москва, Россия)

СЮЭМЭЙ Чжен, профессор кафедры электротехники Харбинского технологического университета (Харбин, Китай)

ЛЮ Фанг, 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» (Минск, Республика Беларусь)

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

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

Editorial Board

CHIEF EDITOR:

Denis N. SIDOROV, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Full Professor, Professor of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher, Melentiev Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)

DEPUTIES OF CHIEF EDITOR:

Semen A. ZAIDES, Dr. Sci. (Eng.), Full Professor, Professor of the Department of Materials Science, Welding and Additive Technologies, Irkutsk National Research Technical University, Deputy Editor-in-Chief in Mechanical engineering (Irkutsk, Russia)

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

Denis S. FEDOSOV, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Power Plants, Networks and Systems at Irkutsk National Research Technical University, Deputy Editor-in-Chief in Energy Sciences (Irkutsk, Russia)

MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:

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

Vladimir Yu. BAZHIN, Dr. Sci. (Eng.), Dean of the Mineral Resources Processing Faculty, Saint Petersburg Mining University named after the Empress Catherine II (Saint Petersburg, Russia)

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

Aleksander I. BOLDYREV, Dr. Sci. (Eng.), Full 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, Full Professor, Department of Production Technology and Automation, Krakow University of Technology (Krakow, Poland)

Ivan L. ERMOLOV, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Russian Academy of Sciences, Deputy Director for Research, Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)

Pavel V. ILYUSHIN, Dr. Sci. (Eng.), Full Professor, Chief Researcher, Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Head of the Center for Intelligent Electric Power Systems and Distributed Energy (Moscow, Russia)

Insu KIM, Associate Professor of Electrical Engineering at Inha University (Incheon, South Korea)

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)

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.), Full 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 (Novosibirsk, Russia)

Pathak Kumar MUKESH, Full Professor, Head of Department of Indian Institute of Technology Roorkee (Roorkee, India)

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

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

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

Vasily I. PANTELEEV, Dr. Sci. (Eng.), Full 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, Academician of RAS, Dr. Sci. (Eng.), Director, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)

Zbigniew A. STYCZYNSKI, Professor, Otto-von-Guericke University (Magdeburg, Germany)

Huaping SUN, Professor, Jiangsu University (Zhenjiang, China)

Konstantin V. SUSLOV, Dr. Sci. (Eng.), Full Professor, National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (Moscow, Russia)

Xuemei ZHENG, Professor of the Department of Electrical Engineering of Harbin University of Technology (Harbin, China)

Fang LIU, Professor, Central Southern University (Changsha, Hunan Province, China)

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

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

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



Содержание

Машиностроение

- Гудимова Л.Н., Серебряков И.А., Суджаян А.А.** Создание самоустанавливающихся многосателлитных планетарных передач 408
- Кузнецова Е.М., Овсянников В.Е., Некрасов Р.Ю., Путилова У.С.** Разработка экспертной системы технологического обеспечения требуемой шероховатости при обработке закаленных сталей на станках с числовым программным управлением 418
- Мельников А.П., Буглов Н.А.** Гидравлическая система долота для бурения нефтяных и газовых скважин 427

Энергетика

- Дхармаях Г., Сидоров Д.Н., Нойягдам С., Панов В.П.** Влияние неравномерного источника/стока тепла и Джоулева нагрева на конвективное движение микрополярной жидкости в химически излучающей МГД-среде поперек растянутого листа (In Eng.) 435
- Келембет А.А., Бигун А.Я.** Применение нейросетевой модели для прогнозирования температуры изолированных проводов воздушных линий 453
- Савина Н.В., Варыгина А.О.** Методика выбора оптимальных марки и сечения провода на основе интегрированного технико-экономического критерия 462
- Табаров Б.Д.** Исследование влияния нового управляемого регулятора напряжения на несинусоидальность тока и напряжения системы электроснабжения 475
- Тихонов А.В.** Исследование влияния параметров элегазовых выключателей на величину коммутационных перенапряжений на основе исследования номинальных режимов преобразовательных трансформаторов 489

Металлургия

- Войлошников Г.И., Чикин А.Ю.** Агитируемые мельницы тонкого и сверхтонкого измельчения для последующих обогатительно-металлургических операций 504
- Горланов Е.С., Сизяков В.М., Шариков Ф.Ю., Спекторук А.А., Бутакова Т.В.** Проблемы и решения защиты углеграфитовых электродов (In Eng.) 513
- Епифоров А.В., Баликов С.В., Шипнигов А.А.** Поведение основных элементов при автоклавном окислении полиметаллического сульфидного флотоконцентрата, содержащего вольфрам и молибден 538
- Ковязин А.А., Тимофеев К.Л., Мальцев Г.И., Краюхин С.А.** Гидротермальное осаждение меди из растворов выщелачивания металлургических пылей 547
- Немчинова Н.В., Ильин А.А., Тютрин А.А., Галачиева С.В., Яковлева А.А.** Изучение структуры и динамической вязкости модельных шлаковых систем CaO-SiO_2 и $\text{CaO-SiO}_2\text{-V}_2\text{O}_5$ 562
- Шкляев Ю., Дизер О.А., Луговицкая Т.Н., Головкин Д.И., Рогожников Д.А.** Определение кинетических характеристик растворения борнита и халькопирита в азотной кислоте 576

Content

Mechanical engineering

- Gudimova L.N., Serebryakov I.A., Sudzhayan A.A.** Creation of self-aligning multisatellite planetary gears 408
- Kuznetsova E.M., Ovsyannikov V.E., Nekrasov R.Yu., Putilova U.S.** Development of an expert system for technological support of required roughness when machining hardened steel parts on numerically controlled machines..... 418
- Melnikov A.P., Buglov N.A.** Drill bit hydraulic system for oil and gas boreholes 427

Power engineering

- Dharmaiah G., Sidorov D.N., Noeiaghdam S., Panov V.P.** The influence of a non-uniform heat source/sink and Joule heating on the convective motion of a micropolar fluid in a chemically radiative MHD medium across a stretched sheet 435
- Kelembet A.A., Bigun A.Ya.** A neural network model for predicting the temperature of insulated overhead lines 453
- Savina N.V., Varygina A.O.** Methodology for selecting optimal wire grade and cross-section based on an integrated technical and economic criterion..... 462
- Tabarov B.D.** Influence of a new controlled voltage regulator on the current and voltage non-sinusoidality of a power supply system 475
- Tikhonov A.V.** Effect of SF6 circuit breaker parameters on switching overvoltages evaluated based on nominal modes of converter transformers 489

Metallurgy

- Voiloshnikov G.I., Chikin A.Yu.** Stirred media mills of fine and ultrafine grinding for subsequent beneficiation operations 504
- Gorlanov E.S., Sizyakov V.M., Sharikov F.Yu., Spektoruk A.A., Butakova T.V.** Problems and solutions of carbon-graphite electrodes 513
- Epiforov A.V., Balikov S.V., Shipnigov A.A.** Element behavior during autoclave oxidation of polymetallic sulfide flotation concentrate containing tungsten and molybdenum..... 538
- Kovyazin A.A., Timofeev K.L., Maltsev G.I., Krayukhin S.A.** Hydrothermal precipitation of copper from leaching solutions of metallurgical dusts 547
- Nemchinova N.V., Ilin A.A., Tyutrin A.A., Galachieva S.V., Yakovleva A.A.** Structure and dynamic viscosity of CaO-SiO_2 and $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ model slag systems..... 562
- Shklyayev Yu., Dizer O.A., Lugovitskaya T.N., Golovkin D.I., Rogozhnikov D.A.** Kinetic characteristics of bornite and chalcopyrite dissolution in nitric acid 576



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 (**Категория К-1**).

«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. Металлургия черных, цветных и редких металлов

Редколлегия

Dear Readers!

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

The journal is included in the list of the leading scientific journals and publications, where the key scientific results of doctoral (candidate's) theses approved by the State Commission for Academic Degrees and Titles of the Russian Ministry of Education are to be published.

"iPolytech Journal" is included in the "Ulrichs Periodicals Directory", iPolytech Journal 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



Создание самоустанавливающихся многосателлитных планетарных передач

Л.Н. Гудимова^{1✉}, И.А. Серебряков², А.А. Суджаян³

¹⁻³Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

Резюме. Цель – выявление недостатков в работе многосателлитных планетарных редукторов и обоснование новых структур планетарных самоустанавливающихся механизмов, в которых возможна передача крутящего момента через все установленные сателлиты. Объектами исследования явились отечественный планетарный трехсателлитный редуктор МПЗ, установленный на магнитном сепараторе, предназначенном для мокрого разделения сильномагнитных руд и материалов на магнитные и немагнитные продукты, и планетарный редуктор особой структуры. Построение трехмерной модели классического трехсателлитного и одноподвижного самоустанавливающегося редукторов осуществлялось с помощью программного комплекса T – Flex в модуле «3D». Работоспособность механизмов оценивалась с точки зрения структурного анализа и формулы подвижности П.А. Чебышева. На построенных трехмерных моделях изучен процесс зацепления классического трехсателлитного и одноподвижного самоустанавливающегося редуктора, отличающегося тем, что в нем помимо трех сателлитов дополнительно введены два рычага. При проведении исследования боковой зазор между парами зубьев сателлитов и центральных колес принят соответственно требованию ГОСТ 1643-81. Согласно проведенному анализу контактов при повороте центрального ведущего колеса на 30°, 110°, 200° и 310° доказано, что дальнейшее проектирование применяемых планетарных передач нецелесообразно в силу невозможности осуществления передачи мощности одновременно через все сателлиты. Установлено, что основным недостатком работы многосателлитных редукторов является требование к выбору бокового зазора, который должен обеспечить работоспособность передачи в момент передачи движения. Показано, что для создания многосателлитных одноподвижных самоустанавливающихся планетарных механизмов необходимо вводить в структуру дополнительные рычаги, количество которых должно равняться числу сателлитов. Таким образом, применение самоустанавливающихся планетарных передач дает возможность уменьшить габариты за счет равномерного распределения передаваемого крутящего момента, так как величина момента при расчете может быть уменьшена на число сателлитов, адаптироваться зубчатым колесам в условиях рабочего нагружения, что существенно улучшает работу всей машины или агрегата.

Ключевые слова: планетарный механизм, сателлиты, зацепление, водило, подвижность, боковой зазор, самоустанавливающийся механизм

Для цитирования: Гудимова Л.Н., Серебряков И.А., Суджаян А.А. Создание самоустанавливающихся многосателлитных планетарных передач // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 3. С.408.–417. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-408-417>. EDN: PLNXAG.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Creation of self-aligning multisatellite planetary gears

Lyudmila N. Gudimova^{1✉}, Igor A. Serebryakov², Aram A. Sudzhayan³

¹⁻³Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Abstract. In this study, we aim to identify shortcomings in the operation of multisatellite planetary gearboxes and to justify improved designs of planetary self-aligning mechanisms, which allow torque to be transmitted through all installed satellites. To that end, we studied a domestic planetary three-satellite MPZ gearbox installed on a magnetic separator, designed for wet separation of strongly magnetic ores and materials into magnetic and non-magnetic products, and a planetary gearbox of a special structure. 3D models of the classical three-satellite and single-sliding self-aligning gearboxes were constructed in the 3D module of the T-Flex CAD software. The performance of the mechanisms was evaluated by structural analysis and Chebyshev's mobility formula. The constructed 3D models were used to study the engagement process of the classical three-satellite and single-sliding self-aligning gearbox. The latter is distinguished by the presence of two levers, which are introduced additionally to three satellites. During

the research, the lateral clearance between the pairs of satellite teeth and center wheels was accepted according to GOST 1643–81. The conducted analysis of contacts at rotation of the central driving wheel by 30° , 110° , 200° , and 310° established further designing of the applied planetary gears to be inexpedient due to impossibility of realization of power transfer simultaneously through all satellites. The main disadvantage of the operation of multi-satellite gearboxes was found to be the requirement for the side clearance selection, which should ensure the operability of the transmission at the moment of motion transfer. When designing multi-satellite single-slide self-aligning planetary mechanisms, additional levers should be introduced into the structure, the number of which should be equal to the number of satellites. Hence, the use of self-aligning planetary gears makes it possible to reduce the dimensions due to the uniform distribution of the transmitted torque, since the calculated value of the torque can be reduced by the number of satellites. This allows the gears to be adapted to the working loading conditions, which significantly improves the performance of the entire machine or unit.

Keywords: planetary gear, satellites, gearing, carrier, mobility, backlash, self-aligning mechanism

For citation: Gudimova L.N., Serebryakov I.A., Sudzhayan A.A. Creation of self-aligning multisatellite planetary gears. *iPolytech Journal*. 2024;28(3):408-417. (In Russ.).<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-408-417>. EDN: PLNXAG.

ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития машиностроения одной из задач является создание отечественных механизмов передач, которые максимально должны удовлетворять требованиям развивающейся промышленности как легкой, так и тяжелой, при этом обеспечивая импортозамещение. Наиболее распространенными механизмами передач являются зубчатые, к которым «относятся и планетарные, дифференциальные зубчатые передачи, нашедшие применение в металлообрабатывающих, транспортных, сельскохозяйственных, текстильных, грузоподъемных машинах, а также в военной и морской технике»⁴. Согласно стратегии развития промышленности, принято решение до 2035 г. только в судостроении довести использование до 75% комплектующими исключительно российского производства. Учитывая специфические конструктивные особенности планетарных механизмов и области их применения, одной из актуальных задач является задача не только усовершенствования существующих [1–4], но и создания новых структур механизмов [5, 6]. В работах [1, 8, 9] профессором Л.Т. Дворниковым дан подробный и обоснованный анализ, связанный с проблемой используемых в настоящее время структур многосателлитных планетарных механизмов.

Цель исследования. Основываясь на изучении работ в исследовании многосателлитных механизмов ведущими учеными-осно-

воположниками, такими как В.Н. Кудрявцев [10], Н.Ф. Руденко [11], В.П. Яглинский [12] и нашими современниками В.Б. Шеломовым [13], Ю.А. Алюшиным, Вержанским [14], Л.Н. Решетов⁵, в том числе и авторами данной статьи [16] можно утверждать, что вопросы, связанные с более глубоким исследованием работы планетарных механизмов⁶, являются своевременными и актуальными.

В работе поставлена и решена задача, связанная с передачей движения зубчатыми колесами (сателлитами) в планетарном механизме. Рассмотрим планетарную передачу со структурной точки зрения на примере трехсателлитного планетарного механизма (рис. 1 а).

Механизм состоит из пяти подвижных звеньев ($n = 5$), соединенных между собой пятью одноподвижными парами-шарнирами ($p_5 = 5$) и шестью двухподвижными ($p_4 = 6$). Подвижность, определенная по формуле П.Л. Чебышева, равна

$$W = 3n - 2p_5 - p_4 = 15 - 10 - 6 = -1, \quad (1)$$

т.е. механическая система является статически неопределимой, а, следовательно, неработоспособной.

Однако если учесть, что при работе планетарных передач с числом сателлитов более одного, «мощность от ведущего звена к ведомому передается до 80% только одним сателлитом, то согласно (1) подвижность бу-

⁴Козырев В.В. Планетарные редукторы в составе роботов и мехатронных систем: учеб. пособ. Владимир: Владим. гос. ун-т, 2008. 48 с.

⁵Решетов Л.Н. Самоустанавливающиеся механизмы: справочник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1985. 272 с.

⁶Тимофеев Г.А. Теория механизмов и машин: учебник и практикум для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Юрайт, 2024. 432 с.

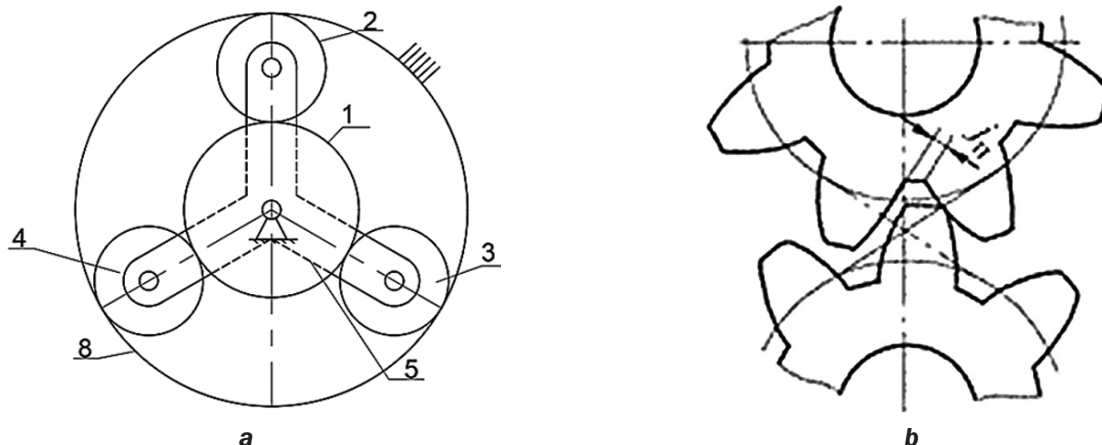


Рис. 1. Параметры планетарной передачи; а – структурная схема; б – боковой зазор j_n между парой зубчатых колес
Fig. 1. Planetary gear parameters; а – block diagram; б – backlash j_n between a pair of gears

дет равна $W = 3n - 2p_5 - p_4 = 15 - 10 - 4 = 1$ и механизм можно считать вполне работоспособным. Это утверждение подтверждается методикой, в которой расчет на прочность основных геометрических параметров планетарных передач основан на передаче мощности от ведущего к ведомому колесу через один сателлит [14]. В то же время необходимо отметить, что в передаче нагрузки в разные промежутки времени могут участвовать разные сателлиты, а, следовательно, каждый из сателлитов должен обладать достаточной прочностью, соответствующей условию нагружения. Наличие остальных сателлитов только усиливает прочность и долговечность редуктора в целом.

Заставить механизм работать при отрицательной подвижности можно, но как показывает история (параллелограммный механизм паровой машины Дж. Уатта), с низким коэффициентом полезного действия и быстрым износом основных деталей. В работе приведен пример трехсателлитной структуры планетарного механизма, который решает проблему передачи усилий через все установленные сателлиты.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для обоснования утверждения о том, что существующие структуры многосателлитных механизмов являются работоспособными только при этом утверждении, проведено изучение процесса зацепления на параметрической модели трехсателлитной планетарной

передаче (см. рис. 1 а), созданной в программном комплексе T-Flex PLM с использованием переменных. При проектировании зубчатых колес в работе учитывается зависимость степени точности от бокового зазора между парой зубчатых колес (рис. 1 б). Известно, что боковой зазор формирует пространство для свободного вращения зубчатых колес в момент передачи движения, а также устраняет возможность заклинивания при нагреве и обеспечивает поступление смазочного материала. «Кроме того, система допусков на зубчатые передачи устанавливает гарантированный боковой зазор j_{nmin} , который является наименьшим предписанным боковым зазором, не зависящим от степени точности колес и типа передачи. Выбранный зазор при создании модели планетарной передачи установлен по допуску T_{jn} , который определяется разностью между наибольшим и наименьшим зазорами» [18–20].

Гарантируемый боковой зазор в созданной водильной трехсателлитной планетарной передаче с межосевым расстоянием $a_w = 90$ мм, согласно ГОСТ 1643–81⁷, для вида сопряжения В, которое обеспечивает минимальную величину бокового зазора, исключающего возможность заклинивания передачи, равен $j_{nmin} = 140$ мкм, а допуск на боковой зазор равен $T_{jn} = \pm 80$ мкм. По параметрам трехсателлитной планетарной передачи по числам зубьев, модулю, диаметрам зубчатых колес и межцентровому расстоя-

⁷ГОСТ 1643–81. Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски. Введ. 01.07.1981. М.: Гос. комитет СССР по стандартам, 1981.

нию (таблица), с помощью программного комплекса T-FLEX PLM в модуле «2D», построена параметрическая двумерная модель водильной трехсателлитной планетарной передачи с боковыми зазорами между парами зубьев первого сателлита $j_{n1} = 140$ мкм, второго сателлита $j_{n2} = 180$ мкм, третьего сателлита и центрального колеса $j_{n3} = 220$ мкм.

Боковые зазоры между парами зубьев двумерной модели водильной трехсателлитной планетарной передачи обеспечивались масштабированием делительных диаметров сателлитов, переменными « K_3 », « K_4 » и « K_5 » для каждого сателлита, соответствующие программному обеспечению комплекса T-Flex PLM, таким образом, чтобы при задании движения центральному ведущему колесу переменной « $tetta$ » зубья сателлитов обкатывались по зубьям центральных колес и передавали движение на водило передачи.

Исследование процесса поворота сателлитов в трехсателлитной планетарной передаче основывалось на анализе контактов между парами зубьев колес при повороте центрального ведущего колеса (ЦВК) на 30, 110, 200 и 310°. Рассмотрим более подробно контакты между парами зубьев колес в положении, когда ЦВК водильной трехсателлитной планетарной передачи повернуто относительно начального положения на 30° (рис. 2 а).

На рис. 2 красными цветом и латинскими символами A, B, C обозначены точки контактов между парами зубьев сателлитов и ЦВК, а D – между сателлитами и неподвижным центральным колесом (НЦК). При повороте на 30° (рис. 2 а) сателлиты 3, 4 и 5 с ЦВК имеют по одной точке контакта, однако в тот же самый момент с НЦК точку контакта D имеет лишь сателлит 3.

Параметры трехсателлитной планетарной передачи*
 Parameters of a three-satellite planetary gear

z_a	z_b	z_g	m, MM	d_{a1}, MM	d_{g1}, MM	d_{b1}, MM
18	54	18	5	90	90	270
d_{aa}	d_{ga}	d_{ba}	d_{af1}	d_{gf}	d_{bf}	a_w
100	100	260	77,5	77,5	282,5	90

* z_a – число зубьев центрального ведущего колеса;
 z_b – число зубьев центрального неподвижного колеса;
 z_g – число зубьев сателлита;
 m – модуль;
 d_a – делительный диаметр центрального ведущего колеса;
 d_g – делительный диаметр сателлита;
 d_b – делительный диаметр неподвижного колеса.

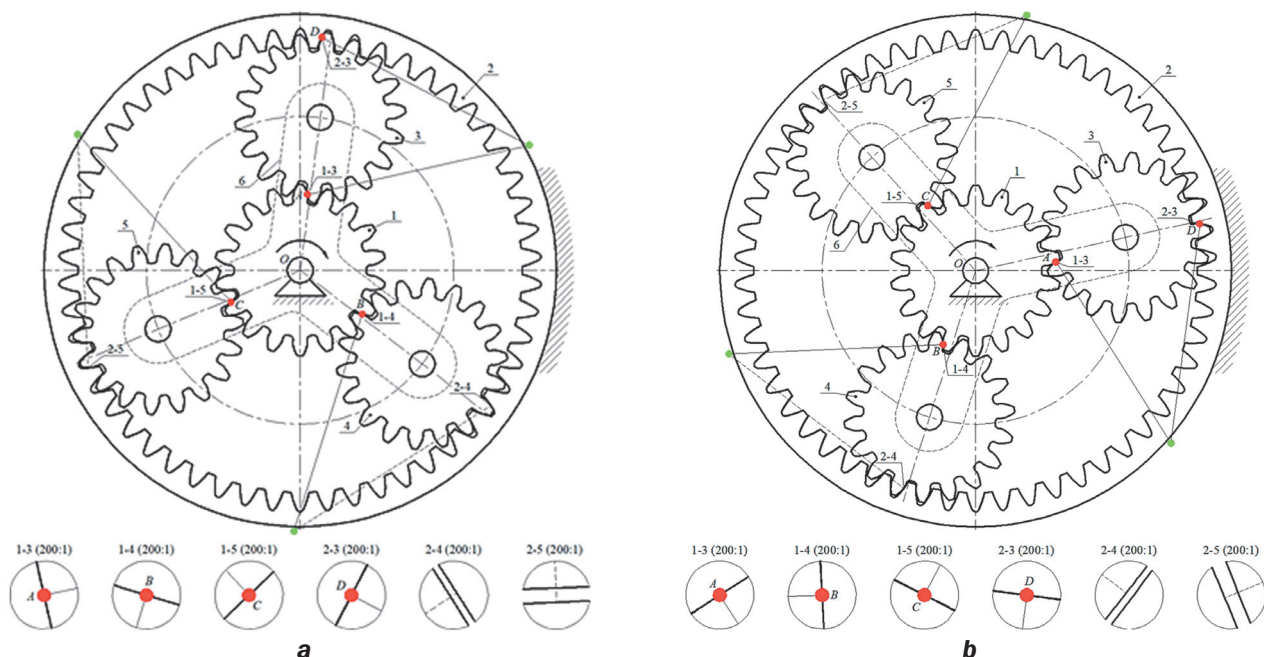


Рис. 2. Анализ контактов при повороте центрального ведущего колеса: а – на 30°; б – на 310°
 Fig. 2. Analysis of contacts when turning the central drive wheel: а – by 30°; б – by 310°

Чтобы окончательно убедиться в том, что мощность именно в водильных многосателлитных планетарных передачах; при рекомендуемых боковых зазорах в основном передается лишь через один сателлит, покажем контакты между парами зубьев колес в положении, когда центральное ведущее колесо водильной трехсателлитной планетарной передачи повернуто относительно начального положения на 310° (см. рис. 2 б). Как видно из рис. описанная ранее картина, при которой все три сателлита контактируют своими зубьями с центральным ведущим колесом, а ЦНК контактирует своими зубьями лишь с одним третьим сателлитом, полностью повторяется.

Таким образом, исследование процесса поворота сателлитов водильных многосателлитных планетарных передач на основе анализа контактов между парами зубьев сателлитов и центральных колес доказывает утверждение профессора В.Н. Кудрявцева о невозможности передачи мощности водильными многосателлитными планетарными механизмами через все установленные на водило сателлиты одновременно.

Смоделируем теперь на построенной двухмерной модели случай, при котором два сателлита (третий и четвертый) будут находиться в зацеплении с ЦВК. Со структурной точки зрения, когда появляется дополнительный контакт двухподвижной пары p_4 , то со-

гласно формуле (1) $W = 0$, т.е. структура механизма является неподвижной. Полученная картина зацепления (рис. 3) наглядно показывает, что контакта между ЦНК не происходит ни с одним из сателлитов. В реальных условиях работы при таком варианте возможно появление «заклинивания», устранения которого можно добиться за счет выбора зазоров между зубчатыми колесами.

При создании компьютерной двухмерной модели с контактом всех трех сателлитов наблюдалась аналогичная картина. Оценка работоспособности компьютерных моделей проводилась по динамическим параметрам используемой программы, которые фиксировали полную остановку движения при появлении дополнительного контакта. Для этой цели была создана трехмерная твердотельная модель исследуемого механизма.

Основным условием построенных сборочных трехмерных твердотельных моделей трехсателлитной планетарной передачи является наличие бокового зазора между парами зубьев сателлитов и центральных колес, соответствующего требованиям⁷:

- для первого случая при $W = 1$ боковые зазоры между парами зубьев сателлита и центральных колес принимались равными: первого $j_{n1} = 140$ мкм, второго сателлита $j_{n2} = 180$ мкм, третьего сателлита $j_{n3} = 220$ мкм;
- «для второго случая при условии $W = 0$ боковой зазор между парами зубьев перво-

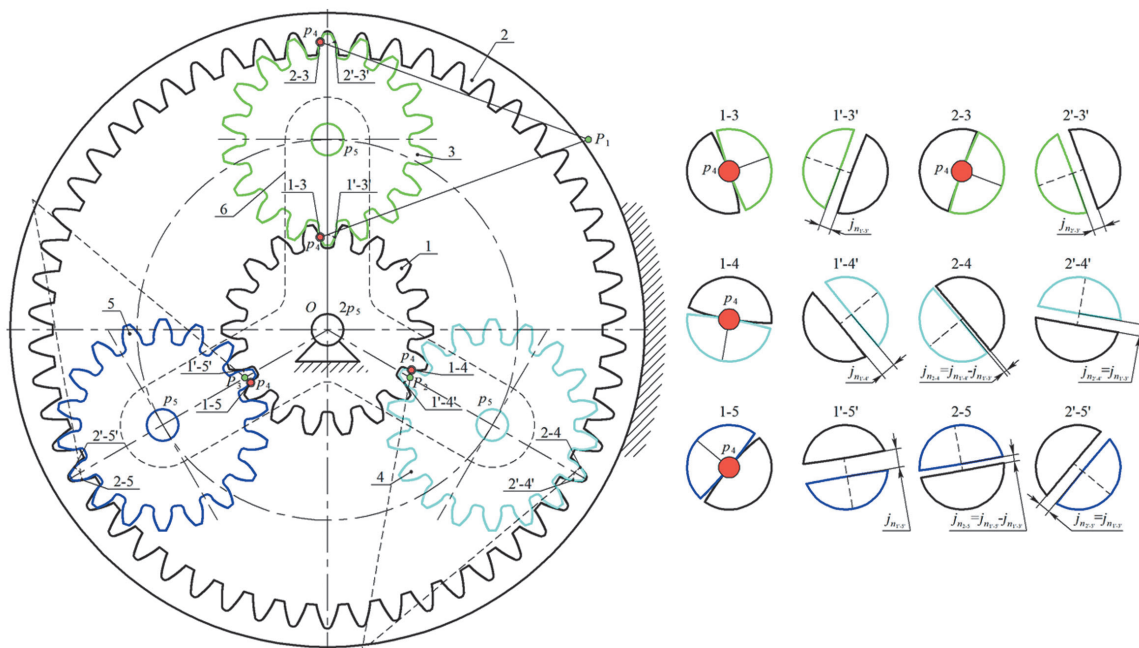


Рис. 3. Состояние «заклинивания»

Fig. 3. «Jamming» state

го и второго сателлитов и центральных колес $j_{n1} = j_{n2} = 140$ мкм, а между парами зубьев третьего сателлита и центральных колес прием равным $j_{n3} = 220$ мкм»;

– «для третьего случая при $W = -1$ боковой зазор между парами зубьев всех сателлитов и центральных колес» $j_{n1} = j_{n2} = j_{n3} = 140$ мкм.

Результатом решения задачи динамического анализа стало «оживление» сборочных трехмерных твердотельных моделей планетарной передачи. Пример демонстрации работы трехсателлитной планетарной передачи при передаче одним сателлитом (когда $W = 1$) показан на рис. 4.

Учитывая, что при проведении динамического анализа задавались параметры контактов, нагружения и ограничения, то «оживить» модели в двух других случаях не удалось.

Проведенные испытания, хотя и являются исследованиями, основанными на использовании возможностей автоматизированной программы, тем не менее позволяют сделать вывод о том, что «заклинивание» в многосателлитных планетарных передачах в реальных условиях работы возникает по двум причинам. В первом случае тогда, когда в зацеплении находится более одного сателлита, а во-втором – когда значение бокового зазора между зубьями одного из сателлитов и центрального колеса становится равным значению бокового зазора между зубьями других сателлитов, т.к. в этом случае также возможно появление дополнительных контактов зубьев.

Поставим задачу создания планетарного механизма, свободного от описанных выше недостатков, в котором все сателлиты способны участвовать в передаче усилий. Согласно новому подходу к проектированию одноподвижных планетарных передач, разра-

ботанному профессором Л.Т. Дворниковым, по которому единственно правильным путем для создания совершенных машин является метод, основанный на полном удовлетворении формул (1). «Основываясь на этом утверждении в (1), теоретически обосновано требование об обеспечении определенности движения в многосателлитных планетарных зубчатых передачах, при котором в структуру механизма необходимо вводить дополнительные рычаги ($n_{др}$) в количестве, равном числу сателлитов ($n_{дс}$), т.е. $n_{др} = n_{дс}$. Тогда в трехсателлитном механизме должно быть семь подвижных звеньев ($n = 7$).

На рис. 5 а приведена новая структура трехсателлитного планетарного зубчатого механизма, построенного по методике Л.Т. Дворникова. Предложенный механизм содержит подвижные звенья ($n = 7$), кинематические пары – шарниров ($p_5 = 7$) и 6 двухподвижных пары ($p_4 = 6$). Тогда, согласно формуле (1), $W = 21 - 14 - 6 = 1$. В отличие от существующих структур планетарных механизмов, приведенный механизм создан таким образом, что крутящий момент от центрального колеса 1 равномерно передается на все три сателлита через две группы нулевой подвижности, представленные в виде трехпарных шатунов, у которых шарниры, соединяющие их в пары, выполнены соосно с сателлитами передачи.

Для изучения контакта в зацеплении зубчатых колес при работе планетарного механизма новой конструкции был проведен анализ зацепления каждого сателлита. Для этого в системе автоматизированной программы CAD T-Flex создана 3D модель механизма (рис. 5 б) с уникальным сбалансированным водилом, заданная скорость вращения которого 500 об/мин. При пово-

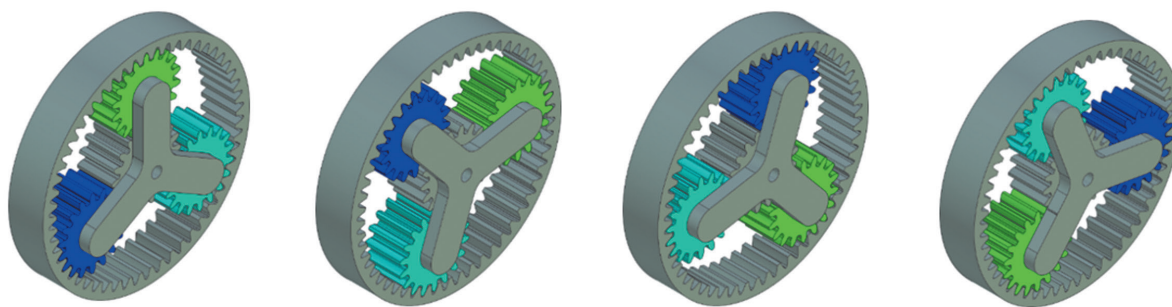


Рис. 4. Положение сателлитов трехмерной твердотельной модели планетарной передачи
 Fig. 4. Position of satellites in the planetary gear three-dimensional solid-state model

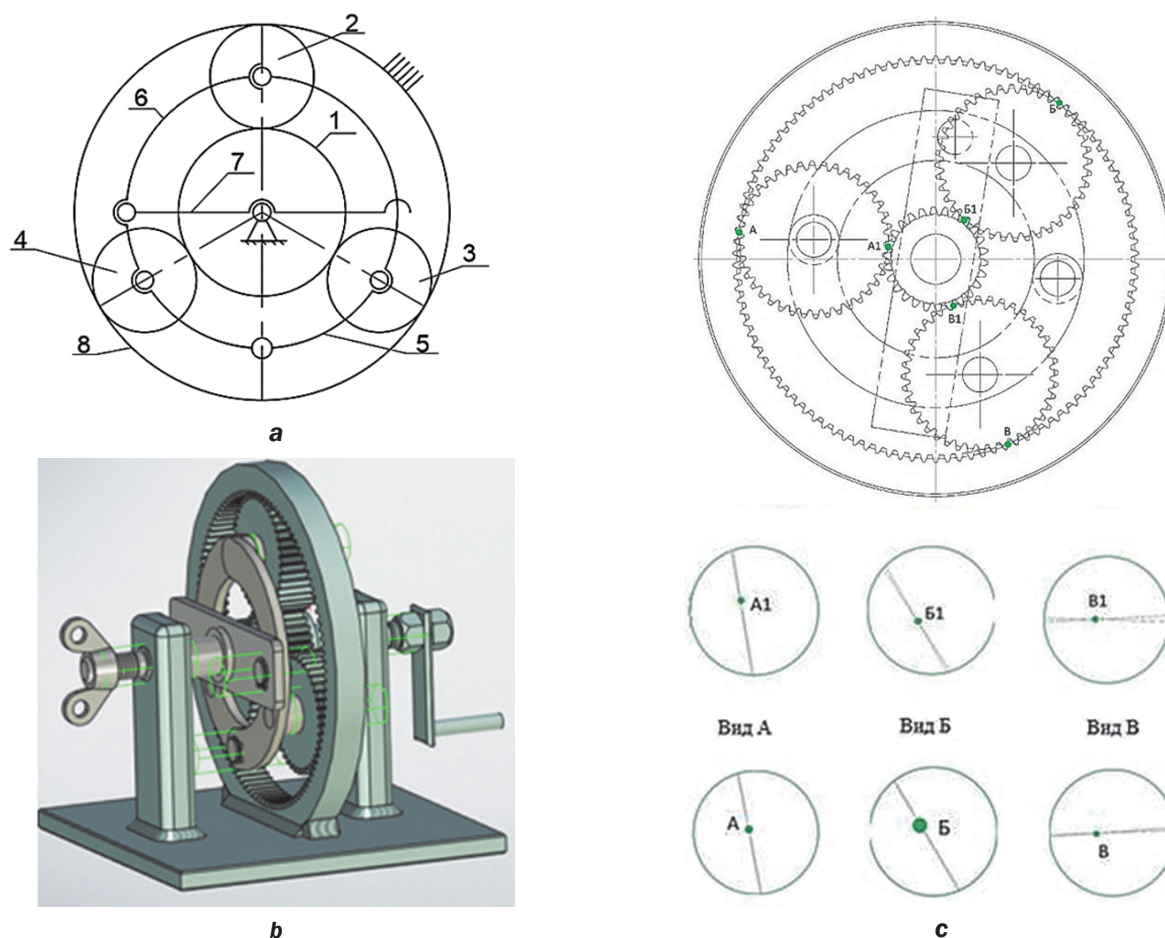


Рис. 5. Кинематическая схема одноподвижной трехсателлитной планетарной зубчатой передачи:

1 – солнечная шестерня, 2, 3 и 4 – сателлиты, 5 и 6 – трехпарные промежуточные звенья, 7 – водило, 8 – эпицикл

Fig. 5. Kinematic diagram of a one-degree-of-freedom three-satellite planetary gear train:

1 – sun gear, 2, 3 and 4 – satellites, 5 and 6 – three-pair extensions, 7 – carrier, 8 – epicycle

роте на ранее принятые углы центрального колеса планетарного механизма вся конструкция приводится в определенный момент в неподвижное состояние. После этого выполнялось тысячекратное увеличение числа зубьев колес, соприкасающихся друг с другом (рис. 5 с). Увеличение количества зубьев колес показало следующее: пара зацепления сателлит (4) – коронная шестерня – имеет плотное пятно контакта (см. вид А), в паре солнечная шестерня – сателлит (4) (см. вид А), разрыва в зацеплении зубьев колес не происходит [19].

Анализ вида Б показывает аналогичную ситуацию, при которой зацепление сателлита (3) и с коронной, и с солнечной шестерней Б1 имеет плотные контакты. На виде В и В1

имеется плотное пятно контакта в каждой паре зацепления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные лабораторные испытания на одноподвижном трехсателлитном планетарном редукторе [9], созданном по методу Л.Т. Дворникова, позволяют утверждать, что только при таком подходе к проектированию возможно осуществлять передачу мощности через все установленные сателлиты. Следовательно, равномерное распределение передаваемой мощности позволит существенно уменьшить габариты редуктора, применять рекомендуемые боковые зазоры как для обычной зубчатой передачи, обеспечивая самоустановку всех звеньев.

Список источников

1. Дворников Л.Т., Герасимов С.П. Принципиальные проблемы многосателлитных планетарных зубчатых передач и возможные пути их разрешения // Фундаментальные исследования. 2017. № 12-1. С. 44–51. EDN: ZXPVQT.

2. Miladinović S., Gajević S., Stojanovic B., Milojević S. Optimization of Ravigneaux planetary gear set // Conference on Mechanical Engineering Technologies and Applications: 4th international scientific conference COMETA (Sarajevo, 27–30 November 2018). Sarajevo, 2018. P. 366–373.
3. Плеханов Ф.И., Грахов В.П., Сунцов А.С. Рациональные конструкции планетарных передач строительных и дорожных машин и их технико-экономические показатели // Механизация строительства. 2016. Т. 77. № 4. С. 22–25. EDN: VTYZKZ.
4. Веденеев С.А. Ошибки теории расчета планетарных передач // Портал научно-практических публикаций. Режим доступа: <https://portalnp.snauka.ru/2016/03/3323> (дата обращения: 26.11.2023).
5. Плеханов Ф.И., Молчанов С.М. Вопросы проектирования высоконагруженной планетарной передачи с роликовым механизмом снятия движения // Интеллектуальные системы в производстве. 2012. № 2. С. 45–47. EDN: PJPJCJ.
6. Пивоваров А.О. Разработка конструкции планетарной передачи без избыточных связей // Фундаментальные исследования. 2013. № 6-3. С. 556–560. EDN: PZQFNB.
7. Курмаз Л.В., Скойбеда А.Т., Ткаченко В.Н. К вопросу проектирования планетарных передач // Современные методы проектирования машин: республиканский межведомственный сборник научных трудов: в 7 т. / под общ. ред. П.А. Витязя. Минск: Технопринт, 2004. Т. 3. Вып. 2. С. 42–43.
8. Дворников Л.Т., Жуков И.А. Обоснование начал единой теории планетарных передач // Вестник машиностроения. 2022. № 3-1. С. 24–32.
9. Дворников Л.Т., Жуков И.А. Обоснования начал единой теории планетарных передач // Вестник машиностроения. 2022. № 3. С. 3–9. <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2022-3-3-9>. EDN: NMBHMG.
10. Кудрявцев В.Н. Планетарные передачи. М.: Машиностроение, 1966. 307 с.
11. Руденко Н.Ф. Планетарные передачи. Теория, расчет, применение и проектирование. 3-е изд. испр. и доп. М.; Л.: Машгиз, 1947. 756 с.
12. Яглинский В.П., Гутыря С.С., Чанчин А.Н. Частотный анализ колебаний планетарного колесного редуктора // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2015. № 2. С. 3–10. EDN: UAOMET.
13. Шеломов В.Б. Структурный синтез кинематических схем планетарных коробок передач // Теория механизмов и машин. 2010. Т. 8. № 15. С. 52–61. EDN: MOUFWL.
14. Алюшин Ю.А., Вержанский П.М. Кинематика планетарных передач // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № S16. С. 463–473. EDN: MDWYJT.
15. Серебряков И.А., Гудимова Л.Н. Решение проблемы распределения сил по сателлитам в многосателлитных планетарных передачах // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения: тр. Всерос. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (г. Новокузнецк, 16–17 мая 2023 г.). Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет. 2023. С. 80–84. EDN: SSBVQK.
16. Абрамчук М.В. Рекомендации по организации контроля бокового зазора в зубчатых передачах // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2006. № 28. С. 206–210. EDN: JURYVX.
17. Дворников Л.Т., Жуков И.А. Принципиальные уточнения понятия перекрытия зацепления эвольвентных зубчатых передач // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2022. № 16. С. 37–45. <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2022-16-37-45>.
18. Hu Yong, Talbot D., Kahraman A. A load distribution model for planetary gear sets. In: Proceedings of the ASME 2017 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (Cleveland, 6–9 August 2017). Cleveland: ASME, 2017. Vol. 10. P. DETC2017-68354; V010T11A008. <https://doi.org/10.1115/DETC2017-68354>.
19. Гудимова Л.Н., Серебряков И.А. Исследование плавности хода зубчатого одноподвижного плоского планетарного механизма при применении уравновешенной конструкции водила // Черные металлы. 2023. № 10. С. 49–54. <https://doi.org/10.17580/chm.2023.10.08>. EDN: FDRYXY.
20. Vullo V. Gear trains and planetary gears // Gears. Springer Series in Solid and Structural Mechanics. Cham: Springer, 2020. Vol. 10. P. 695–772. https://doi.org/10.1007/978-3-030-36502-8_13.

References

1. Dvornikov L.T., Gerasimov S.P. The fundamental problem megasatellite planetary gear sets and possible ways of their permission. *Fundamental research*. 2017;12-1:44–51. (In Russ). EDN: ZXPVQT.
2. Miladinović S., Gajević S., Stojanovic B., Milojević S. Optimization of Ravigneaux planetary gear set. In: *Conference on Mechanical Engineering Technologies and Applications: 4th international scientific conference COMETA*. 27–30 November 2018, Sarajevo. Sarajevo; 2018, p. 366-373.
3. Plekhanov F.I., Grahov V.P., Suncov A.S. Planetary gear transmissions of build and travelling machines: rational design, cost and performance data. *Mekhanizaciya stroitel'stva*. 2016;77(4):22-25. (In Russ). EDN: VTYZKZ.
4. Vedeneev S.A. Errors in the planetary gear calculation theory. *Portal nauchno-prakticheskikh publikacij*. Available from: <https://portalnp.snauka.ru/2016/03/3323> [Accessed 26th November 2023]. (In Russ.).
5. Plekhanov F.I., Molchanov S.M. Design issues of high-loaded planetary gear with roller mechanism of movement withdrawal. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2012;2:45-47. (In Russ.). EDN: PJPJCJ.

6. Pivovarov A.O. Development of the construction of planetary gear without redundant links. *Fundamental research*. 2013;6-3:556-560. (In Russ.). EDN: PZQFHB.
7. Kurmaz L.V., Skojbeda A.T., Tkachenko V.N. On planetary gear design. *Sovremennyye metody proektirovaniya mashin: respublikanskij mezhdvostvennyj sbornik nauchnyh trudov = Modern methods of machine design: Republican Interdepartmental Collection of Scientific Papers*. Minsk: Tekhnoprint; 2004, vol. 3, iss. 2, p. 42-43. (In Russ.).
8. Dvornikov L.T., Zhukov I.A. Substantiation of the beginnings of a unified theory of planetary gears. *Russian Engineering Research*. 2022;3-1:24–32. (In Russ.).
9. Dvornikov L.T., Zhukov I.A. Substantiations of the beginnings of a unified theory of planetary gears. *Russian Engineering Research*. 2022;3:3-9. (In Russ.). <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2022-3-3-9>. EDN: NMBHMG.
10. Kudryavtsev V.N. *Planetary gears*. Moscow: Mashinostroenie; 1966, 307 p. (In Russ.).
11. Rudenko N.F. *Planetary gears. Theory, calculation, application and design*. Moscow; Leningrad: Mashgiz; 1947, 756 p. (In Russ.).
12. Yaglinskii V.P., Gutrya S.S., Chanchin A.N. Frequency analysis of planetary wheel reducer oscillations. *Sukhoi State Technical University of Gomel*. 2015;2:3-10. (In Russ.). EDN: UAOMET.
13. Shelomov V.B. Structural synthesis of kinematic schemes of planetary gearboxes. *Teoriya mekhanizmov i mashin*. 2010;8(15):52-61. (In Russ.). EDN: MOUFWL.
14. Alyushin Yu.A., Verzhanskij P.M. Planetary gear kinematics. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2009;S16:463-473. (In Russ.). EDN: MDWYTJ.
15. Serebryakov I.A., Gudimova L.N. Solving the problem of force distribution among satellites in multi-satellite planetary gear. In: *Nauka i molodezh': problemy, poiski, resheniya: trudy Vserossijskoj nauchnoj konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenykh = Science and youth: problems, searches, solutions: Proceedings of All-Russian scientific conference of students, postgraduates and young scientists*. 16–17 May 2023, Novokuznetsk. Novokuznetsk: Siberian State Industrial University; 2023, p. 80-84. (In Russ.). EDN: SSBVQK.
16. Abramchuk M.V. Recommendations for control organization in gear backlash. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2006;28:206-210. (In Russ.). EDN: JURYVX.
17. Dvornikov L.T., Zhukov I.A. Fundamental clarifications of the concept of overlapping engagement of involute gears. *Transportnoe, gornoe i stroitel'noe mashinostroenie: nauka i proizvodstvo*. 2022;16:37-45. (In Russ.). <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2022-16-37-45>.
18. Hu Yong, Talbot D., Kahraman A. A load distribution model for planetary gear sets. In: *Proceedings of the ASME 2017 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. 6–9 August 2017, Cleveland. Cleveland: ASME; 2017, vol. 10, p. DETC2017-68354; V010T11A008. <https://doi.org/10.1115/DETC2017-68354>.
19. Gudimova L.N., Serebryakov I.A. Study of the smooth running of a geared single-moving flat planetary mechanism when using a balanced carrier design. *Chernye Metally*. (In Russ.). 2023;10:49-54. <https://doi.org/10.17580/chm.2023.10.08>. EDN: FDRYXY.
20. Vullo V. Gear trains and planetary gears. In: *Gears. Springer Series in Solid and Structural Mechanics*. Cham: Springer; 2020, vol. 10, p. 695-772. https://doi.org/10.1007/978-3-030-36502-8_13.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гудимова Людмила Николаевна,

к.т.н., доцент,
доцент кафедры механики и машиноведения,
Сибирский государственный индустриальный
университет,
654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42, Россия
✉ lyu-gudiova@yandex.ru

Серебряков Игорь Александрович,

аспирант,
Сибирский государственный индустриальный
университет,
654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42, Россия
serebryackow.ig@yandex.ru

Суджаян Арам Александрович,

аспирант,
Сибирский государственный индустриальный
университет,
654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42, Россия
aramzes@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lyudmila N. Gudimova,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Mechanics
and Machine Science,
Siberian State Industrial University,
42 Kirov St., Novokuznetsk 654007, Russia
✉ lyu-gudiova@yandex.ru

Igor A. Serebryakov,

Postgraduate Student,
Siberian State Industrial University,
42 Kirov St., Novokuznetsk 654007, Russia
serebryackow.ig@yandex.ru

Aram A. Sudzhayan,

Postgraduate Student,
Siberian State Industrial University,
42 Kirov St., Novokuznetsk 654007, Russia
aramzes@mail.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 18.08.2024 г.; одобрена после рецензирования 09.09.2024 г.; принята к публикации 12.09.2024 г.

Authors' contribution

The authors contributed equally to the article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 18.08.2024; approved after reviewing 09.09.2024; accepted for publication 12.09.2024.



Разработка экспертной системы технологического обеспечения требуемой шероховатости при обработке закаленных сталей на станках с числовым программным управлением

Е.М. Кузнецова^{1✉}, В.Е. Овсянников², Р.Ю. Некрасов³, У.С. Путилова⁴

¹Курганский государственный университет, Курган, Россия

^{2,4}Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

Резюме. Цель – повышение качества поверхности деталей тел вращения, которые изготовлены из закаленных сталей, в ходе обработки на токарных станках с числовым программным управлением. Объектом исследования является шероховатость поверхности деталей. В процессе исследования были использованы методы системного анализа и синтеза систем, искусственных нейронных сетей, нечеткой логики, организации эксперимента, обработки результатов эксперимента. Разработана декомпозиционная схема структуры экспертной системы, позволяющая сформулировать требования к будущей экспертной системе мониторинга и прогнозирования параметров шероховатости. В результате исследований установлено, что используемые в практике модели описания взаимосвязи между параметрами качества поверхности деталей и технологическими режимами, которые применяются при технологическом обеспечении шероховатости, дают высокую погрешность (более 20%). Обоснована возможность применения моделей, которые основаны на искусственном интеллекте и содержат в своем составе нейросетевые блоки и устройства принятия решений, построенные на базе нечеткой логики. Показано, что такое сочетание дает возможность индивидуальной настройки системы на обработку деталей определенной номенклатуры, а также более корректной оценки наступления катастрофического износа режущего инструмента. Доказано, что нейронечеткая модель имеет погрешность не более 10%, что значительно ниже, чем при использовании спектральных или корреляционных моделей. В результате тестовых испытаний экспертной системы мониторинга и прогнозирования параметров шероховатости установлено, что разброс диапазона шероховатости по мере износа инструмента в 2,5 раза меньше, чем без нее. Таким образом, использование разработанной системы позволяет более корректно оценивать износ режущего инструмента и определять наступление предельного состояния.

Ключевые слова: шероховатость, закаленные стали, технологическое обеспечение, станок с ЧПУ, экспертная система

Для цитирования: Кузнецова Е.М., Овсянников В.Е., Некрасов Р.Ю., Путилова У.С. Разработка экспертной системы технологического обеспечения требуемой шероховатости при обработке закаленных сталей на станках с числовым программным управлением // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 3. С. 418–426. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-418-426>. EDN: WNRBPW.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Development of an expert system for technological support of required roughness when machining hardened steel parts on numerically controlled machines

Elena M. Kuznetsova^{1✉}, Viktor E. Ovsyannikov², Roman Yu. Nekrasov³, Ulyana S. Putilova⁴

¹Kurgan State University, Kurgan, Russia

^{2,4}Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Abstract. This work addresses the problem of improving the surface quality of parts of rotation bodies, which are made of hardened steels, in the course of their machining on lathes with numerical program control. The research object was the surface roughness of parts. The methodology involved system analysis and synthesis, artificial neural

networks, fuzzy logic, experiment, and processing of experimental results. A decomposition scheme for the expert system structure was developed, which can be used as the basis for formulating requirements to a future expert system for monitoring and prediction of roughness parameters. It was established that the models currently applied to describe the relationship between surface quality and the technological regimes used to ensure the technological level of roughness give a high error of over 20%. The possibility of using models that apply artificial intelligence and contain neural network blocks and decision-making devices based on fuzzy logic is substantiated. It is shown that such a combination makes it possible to customize the system for processing parts of a certain production range, as well as a more correct assessment of the onset of catastrophic wear of cutting tools. The neuro-fuzzy model was confirmed to have an error of less than 10%, which is significantly lower than when using spectral or correlation models. According to the testing results, the proposed expert system for monitoring and prediction of roughness parameters enables a 2.5-fold reduction in the scatter of roughness parameters under an increase in tool wear, compared to without its application. Thus, the proposed system makes it possible to assess the level of cutting tool wear more correctly and determine the onset of its limit state.

Keywords: roughness, hardened steels, process support, CNC machine, expert system

For citation: Kuznetsova E.M., Ovsyannikov V.E., Nekrasov R.Yu., Putilova U.S. Development of an expert system for technological support of required roughness when machining hardened steel parts on numerically controlled machines. *iPolytech Journal*. 2024;28(3):418-426. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-418-426>. EDN: WNRBPW.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях среднесерийного производства решение задачи по технологическому обеспечению требуемых выходных параметров процесса механической обработки базируется на использовании предварительной настройки технологического оборудования [1, 2]. Суть заключается в том, что на этапе настройки определяются значения режимов резания и других параметров процесса обработки [3, 4], которые позволяют получать заданные параметры точности размеров и качества поверхностного слоя в автоматическом формате.

Однако эффективность такого подхода ограничивается тем, что действующие на технологическую систему возмущающие воздействия приводят к возникновению погрешностей и, как следствие, могут вызывать появление брака. Одним из таких факторов является износ режущего инструмента. Вследствие износа режущего инструмента происходит увеличение усилий резания, деформаций элементов технологической обрабатывающей системы, рост температуры в зоне резания и увеличение вибраций [5, 6]. В конечном итоге наступает такое состояние, когда требуется замена инструмента. Применительно к случаю чистовой обработки проблема усугубляется тем, что переход из одного состояния в другое может произойти почти мгновенно. Качественно это можно оценить как потерю технологической системой устойчивости [7, 8]. Наступление данного факта можно отследить, например, на основе мониторинга вибраций (рис. 1).

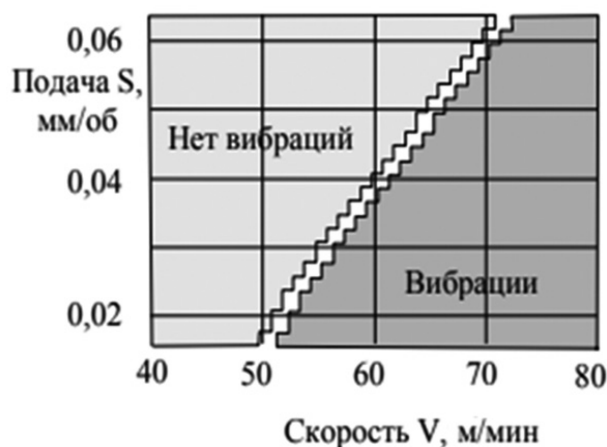


Рис. 1. Характеристика областей по устойчивости [9]

Fig. 1. Area robustness characteristics [9]

Так как в рамках данной статьи рассматривается обработка закаленных сталей, то помимо указанных выше факторов в расчет нужно принимать еще колебания свойств обрабатываемого материала и другие стохастические факторы. Все это приводит к тому, что граница перехода из одного состояния в другое является нечеткой [10, 11]. Изменение шероховатости поверхности (R_a) в зависимости от времени работы резца имеет нечеткий характер вследствие нечеткого изнашивания режущей части инструмента, что приводит к появлению области рассеяния значений получаемой шероховатости (R_{ah}) (рис. 2).

В современных условиях требуется сокращение трудоемкости технологической подготовки производства и одновременное увеличение эффективности эксплуатации оборудования и инструмента. В данном свете можно рассмотреть применение ме-

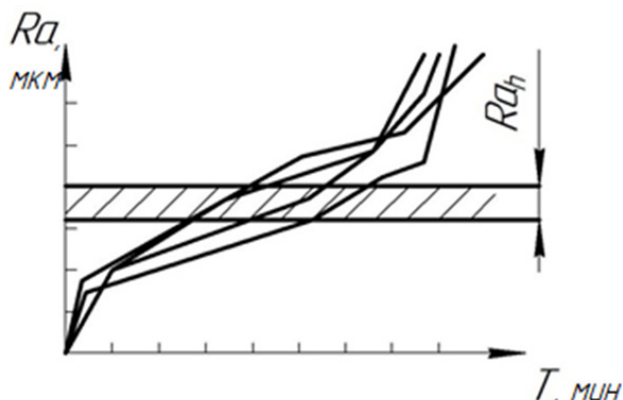


Рис. 2. Нечеткая граница изменения шероховатости обработанной поверхности в зависимости от времени работы резца [11]

Fig. 2. Fuzzy boundary of roughness variation of machined surface depending on cutter operation time [11]

тодологического подхода индустрии 4.0 [12, 13] – концепцию цифровых двойников. Уже сегодня применение цифровых двойников позволяет повысить эффективность эксплуатации оборудования и исключить аварийные ситуации на основе прогнозирования их наступления. Однако применяемые решения распространены в основном на медленно протекающие во времени процессы, кроме того, вопросы обработки информации в решении указанных выше задач все равно возложены на человека. Обработка же заготовок из закаленных сталей сопровождается именно интенсивным изнашиванием режущего инструмента. Во многом это является причиной того, что шероховатость обработанных деталей отличается высокой нестабильностью.

Для решения проблемы обеспечения качества поверхностного слоя при обработке на станках с числовым программным управлением (ЧПУ) необходимо прежде всего иметь надежный источник информации, который позволяет оценивать выходные параметры процесса. С учетом требований физического подобия необходимо, чтобы оценочные показатели были безразмерными величинами и имели общую природу с выходными величинами (в нашем случае с шероховатостью) [14, 15]. Следующей проблемой, которую необходимо решить, является неопределенность данных (колебания свойств обрабатываемого материала, параметры обрабатывающей системы и т.д.). Таким образом, реализация указанных выше

подходов должна быть представлена в виде системы мониторинга и прогнозирования параметров шероховатости, а также учитывать состояние режущего инструмента.

Цель данной работы – повышение качества поверхности деталей тел вращения, которые изготовлены из закаленных сталей, в ходе обработки на токарных станках с ЧПУ. Выполненные исследования заключаются в выборе методологического аппарата, который может быть использован для экспертной системы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе исследования были использованы методы системного анализа, искусственных нейронных сетей, нечеткой логики, организации эксперимента, обработки результатов эксперимента.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 приведена декомпозиционная схема структуры прилагаемой экспертной системы.

В ходе анализа рассматриваются альтернативные варианты X_{ε}^{β} . Количество целевых условий S принималось в диапазоне от 2 до 4. Оставшиеся блоки содержат G ограничений. Данные для анализа представляются в виде множеств [16, 17]:

$$X = \{X_s, X_G\}, x \in R_n. \quad (1)$$

При этом вводятся весовые коэффициенты λ , для которых выполняются следующие соотношения:

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_S; \quad (2)$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_S = 1. \quad (3)$$

Таким образом, используя выражения (2) и (3), имеется возможность ранжирования данных, которые представлены в табл. 1.

После ранжирования можно выбрать предпочтительные альтернативы:

$$\max \lambda_i G_1 \rightarrow X_{G_1}^{\beta}, \dots, \max \lambda_i G_1^{\beta} \rightarrow X_G^{\beta}. \quad (4)$$

На основании проведенного анализа можно сделать выводы, что экспертная система предусматривает:

Таблица 1. Декомпозиционная схема экспертной системы
Table 1. Expert system decomposition diagram

X_{ξ} Первый уровень декомпозиции		X_{ξ}^{β} Второй уровень декомпозиции	
X_1	Точность и скорость обработки измерений	X_1^1 X_1^2	Задается программой Не регулируется
X_2	Совместимость с системами верхнего уровня	X_2^1 X_2^2	Совместима Не совместима
X_3	Визуализация полученной информации	X_3^1 X_3^2 X_3^3	Цифровые индикаторы Панель управления SCADA система
X_4	Предварительная обработка сигналов	X_4^1 X_4^2	Не требуется Требуется
X_5	Опрос датчиков	X_5^1 X_5^2 X_5^3	Однократно по запросу В режиме реального времени По запросу и в режиме реального времени
X_6	Сохранение полученной информации	X_6^1 X_6^2	Отсутствует Электронный журнал измерений
X_7	Режим работы системы	X_7^1 X_7^2 X_7^3	Ручной Автоматический Ручной и автоматический
X_8	Управление системой измерений	X_8^1 X_8^2	Не автоматизированное Автоматизированное
X_9	Режим работы устройства для принятия решений	X_9^1 X_9^2	Расчет модели в реальном времени Расчет модели экспертной системой

Таблица 2. Результаты расчета весовых коэффициентов
Table 2. Calculation results of weight factors

X_{Gj}	X_{Gj}^{β}	$X_{S1} = X_2^1; \lambda_1 = 0,5$		$X_{S2} = X_8^2; \lambda_2 = 0,5$	
		λ_{1Gj}^{β}		λ_{2Gj}^{β}	
		Код	Значение	Код	Значение
$X_{G1} = X_1$	$[X_1^1]$	1	0,5	2	0,25
	X_1^2	3	0	2	0,25
$X_{G2} = X_3$	X_3^1	3	0	2	0,17
	X_3^2	3	0	2	0,17
	$[X_3^3]$	1	0,5	2	0,17
$X_{G3} = X_4$	X_4^1	3	0	2	0,25
	$[X_4^2]$	1	0,5	2	0,25
$X_{G4} = X_5$	X_5^1	2	0,17	3	0
	X_5^2	2	0,17	3	0
	$[X_5^3]$	2	0,17	1	0,5
$X_{G5} = X_6$	X_6^1	2	0,25	3	0
	$[X_6^2]$	2	0,25	1	0,5
$X_{G6} = X_7$	X_7^1	3	0	2	0,17
	X_7^2	3	0	2	0,17
	$[X_7^3]$	1	0,5	2	0,17
$X_{G7} = X_9$	X_9^1	2	0,25	3	0
	$[X_9^2]$	2	0,25	1	0,5

– совместимость с системами верхнего уровня (X_2^1);
– автоматизированное управление системой измерений (X_8^2);
обеспечивает:
– задаваемую программой точность и скорость обработки измерений (X_1^1);
– визуализацию полученной информации с помощью SCADA систем (X_3^3);

– предварительную обработку сигналов (X_4^2);
– опрос датчиков, запускаемый по запросу и в режиме реального времени (X_5^3);
– сохранение полученной информации в электронный журнал измерений (X_6^2);
– работу системы как в ручном (для наладки), так и в автоматическом режиме (X_7^3);
– расчет модели устройства принятия решений экспертной системой (X_9^2).

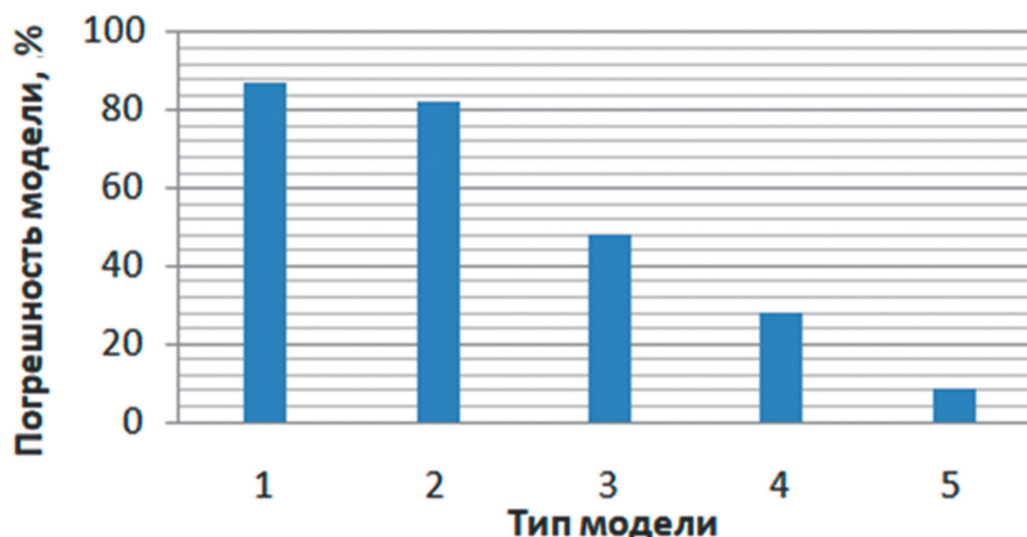


Рис. 3. Средняя погрешность моделей [18, 19]: 1 – модель «пространство состояний», 2 – модель «скользящее среднее»; 3 – спектральная модель; 4 – корреляционная модель; 5 – нейро-нечеткая модель

Fig. 3. Average error of models [18, 19]: 1 – state space model, 2 – moving average model; 3 – spectral model; 4 – correlation model; 5 – neuro-fuzzy model

На рис. 3 приведена средняя погрешность моделей, которые могут быть использованы для описания связей между блоками экспертной системы.

Как видно из рис. 3, применение нейро-нечетких моделей позволяет получить наименьшую погрешность (не более 10%).

В ходе работы экспертной системы осуществляется коррекция подачи по мере из-

носа режущего инструмента. На рис. 4 представлены результаты обработки тестовых деталей с применением коррекции подачи (зависимость шероховатости поверхности от времени обработки (T_0), а на рис. 5 – без нее.

В результате тестовых испытаний системы установлено, что разброс диапазона шероховатости по мере износа инструмента в 2,5 раза меньше, чем без нее.

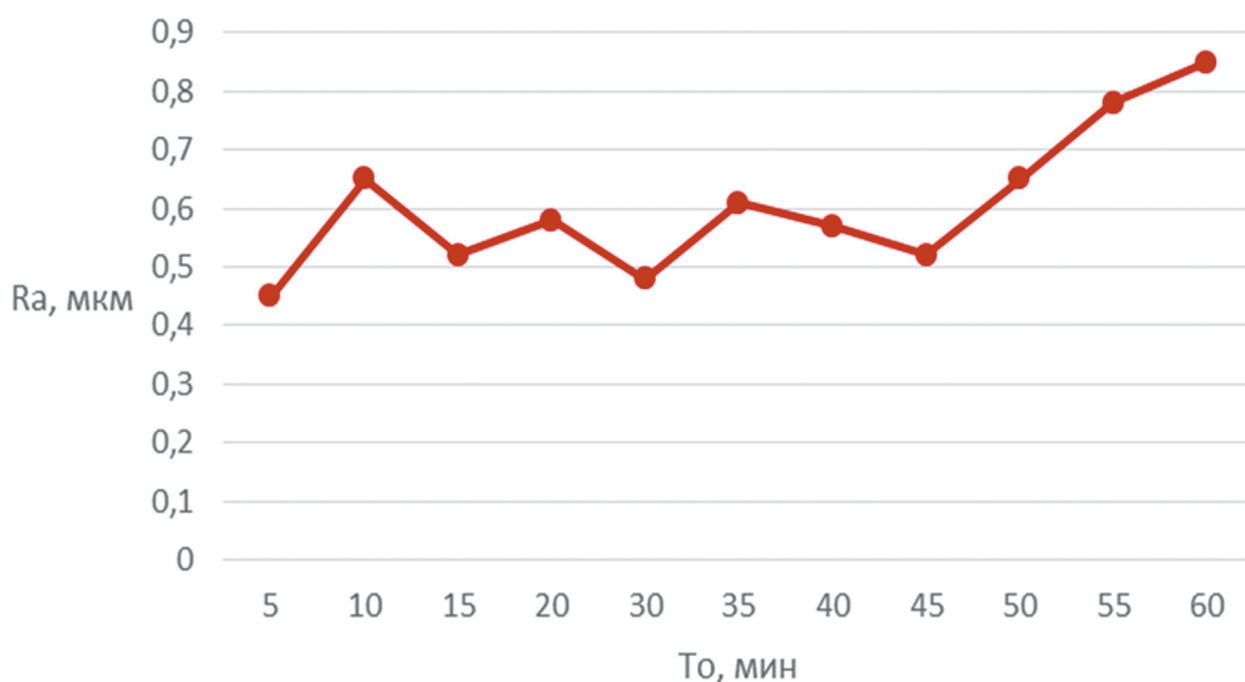


Рис. 4. Зависимость шероховатости поверхности от времени обработки с коррекцией подачи

Fig. 4. Surface roughness vs processing time with feed correction

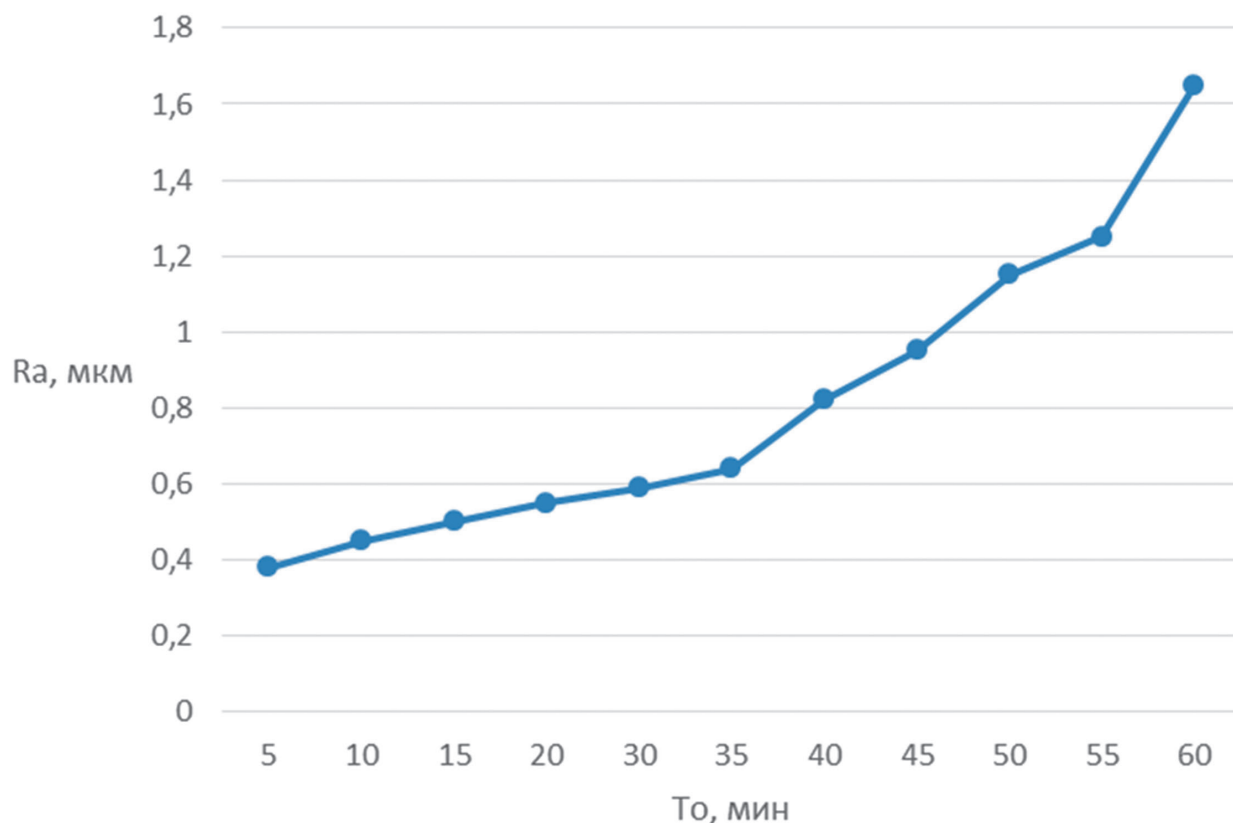


Рис. 5. Зависимость шероховатости поверхности от времени обработки без коррекции подачи
Fig. 5. Surface roughness vs processing time without feed correction

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная экспертная система, основанная на использовании нечеткой логики и искусственных нейронных сетей [20], позволяет аппроксимировать зависимости между входными параметрами (технологическими режимами) и параметрами качества поверхностного слоя с погрешностью, не превышающей 10%, что дает более точный результат, чем при использовании классических моделей, применяющих спектральные и корреляционные функции.

Выполненный системный анализ позволил аргументированно сформулировать требования к создаваемой экспертной системе. В результате тестовых испытаний системы установлено, что разброс диапазона шероховатости по мере износа инструмента в 2,5 раза меньше, чем без нее. Также использование системы позволяет более корректно оценивать износ режущего инструмента и определять наступление предельного состояния.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Смирнова Е.Н., Крылов Е.Г. Проблема автоматизированного проектирования технологических процессов с учетом технологической наследственности // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2011. № 13. С. 100–102. EDN: ONCNMF.
2. Карлина Ю.И. Интеграция этапов подготовки производства высокоточных малогабаритных деталей на станках с числовым программным управлением // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2021. № 1. С. 17–23. [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2021.1\(69\).17-23](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2021.1(69).17-23) EDN: WQHCPV.
3. Безъязычный В.Ф. Метод подобия в технологии машиностроения: монография. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. 356 с.
4. Kotlyarov V.P., Maslakov A.P., Tolstoles A.A. Digital modelling of production engineering for metalworking machine shops // Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS. 2019. Vol. 31. No. 3. P. 85–98. [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2019-31\(3\)-8](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2019-31(3)-8). EDN: LSIJGC.
5. Artamonov E.V., Tveryakov A.M., Shtin A.S. Investigation of electromagnetic properties of tool hard alloys under the influence of high temperatures // Materials Research Proceedings (Temryuk, 6–10 September 2021). Temryuk, 2022. P. 323–328. <https://doi.org/10.21741/97816444901755-57>. EDN: ZBJDOB.

6. Artamonov E., Vasilega N., Yadygin A. Analysis of factors affecting operability to assess risks and opportunities in the operation of built-up cutting tools // *Key Engineering Materials*. 2022. Vol. 910. P. 220–225. <https://doi.org/10.4028/p-wu7wdy>.
7. Kabaldin Yu.G., Bashkov A.A. Self-organization and friction in cutting // *Russian Engineering Research*. 2023. Vol. 43. No. 4. P. 451–456. <http://dx.doi.org/10.3103/S1068798X23050088>.
8. Кабалдин Ю.Г., Саблин П.А., Щетинин В.С. Управление динамической устойчивостью металлорежущих систем в процессе резания по фрактальности шероховатости обработанной поверхности // *Frontier Materials & Technologies*. 2023. № 3. С. 43–51. <https://doi.org/10.18323/2782-4039-2023-3-65-4>.
9. Кабалдин Ю.Г., Иванов С.В., Башков А.А. Управление устойчивостью трибосистемами при внешнем трении и резании на основе алгоритмов нелинейной динамики, теории фракталов и нейросетевого моделирования // *Мехатроника, автоматика и робототехника*. 2024. № 13. С. 150–156. <https://doi.org/10.26160/2541-8637-2024-13-150-156>. EDN: NXFIAU.
10. Zakovorotnyi V.L., Gvindjiliya V.E. Influence of speeds of forming movements on the properties of geometric topology of the part in longitudinal turning // *Journal of Manufacturing Processes*. 2024. Vol. 112. P. 202–213. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.01.037>. EDN: LHVZHV.
11. Zakovorotny V., Gvindjiliya V. The features of the evolution of the dynamic cutting system due to the regenerative effect // *Dynamics of technical systems: AIP Conference Proceedings of the 7 International Scientific-Technical Conference (Rostov-on-Don, 9–11 September 2023)*. Rostov-on-Don: American Institute of Physics Inc., 2023. Vol. 2507. Iss. 1. P. 030002. <https://doi.org/10.1063/5.0109559>. EDN: FLSYFX.
12. Галеев Н.Р., Галеев Ф.Р. Проявление Индустрии 4.0 в различных сферах экономики России // *Лучшая научная работа 2022: сб. ст. V Междунар. науч.-иссл. конкурса, (г. Пенза, 20 мая 2022 г.)*. Пенза: Наука и Просвещение, 2022. С. 57–62. EDN: QKZWCG.
13. Старостина В.А. Индустрия 4.0: понятие, ключевые технологии, тенденции, препятствия // *Актуальные вопросы экономики: сб. ст. IV Междунар. науч.-практ. конф. (г. Пенза, 20 декабря 2020 г.)*. Пенза: Наука и Просвещение, 2020. С. 193–195. EDN: JUSQKO.
14. Безъязычный В.Ф., Паламарь И.Н. Современные аспекты автоматизации научных исследований качества поверхности деталей машин с использованием методов машинного обучения // *Наукоемкие технологии в машиностроении*. 2021. № 7. С. 12–19. <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2021-7-12-19>. EDN: VIPEMD.
15. Stupnytsky V., Dragašius E., Baskutis S., Xianning Sh. Modeling and simulation of machined surface layer microgeometry parameters // *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*. 2022. Vol. 8. No. 1. P. 1–11. <https://doi.org/10.23939/ujmems2022.01.001>. EDN: FGAHMG.
16. Пухов А.С., Иванова И.А. Структурный синтез оптимальных систем управления // *Вестник Курганского государственного университета. Серия: Технические науки*. 2013. № 29. С. 107–110. EDN: RCJLJB.
17. Пухов А.С. Организационно-технические и экологические принципы создания автоматизированных систем // *Безопасность жизнедеятельности: проблемы и решения – 2017: матер. Междунар. науч.-практ. конф. (с. Лесниково, 25–26 мая 2017 г.)*. Лесниково: Курганская гос. сельскохозяй. акад. им. Т.С. Мальцева, 2017. С. 336–342. EDN: YQXKK.
18. Овсянников В.Е., Некрасов Р.Ю., Темпель Ю.А., Васильев В.И. Использование нейро-нечетких моделей при обеспечении точности обработки на станках с ЧПУ // *Известия Тульского государственного университета. Серия: Технические науки*. 2021. № 3. С. 249–253. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2021-3-249-253>. EDN: OFEIS.
19. Ovsyannikov V., Nekrasov R., Putilova U., Il'yaschenko D., Verkhoturova E. On the issue of automatic form accuracy during processing on CNC machines // *Revista Facultad de Ingenieria*. 2022. No. 103. P. 88–95. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20201111>. EDN: HCVDFL.
20. Proskuryakov N.A., Nekrasov R.Y., Starikov A.I., Solov'ev I.V., Barbyshev B.V., Tempel' Y.A. Fuzzy controllers in the adaptive control system of a CNC lathe // *Russian Engineering Research*. 2018. Vol. 38. No. 3. P. 220–222. <https://doi.org/10.3103/S1068798X18030188>. EDN: XMQTZ.

References

1. Smirnova E.N., Krylov E.G. Issues of technological process computer-aided design based on technological heredity. *Bulletin of the Technological University*. 2011;13:100-102. (In Russ). EDN: ONCNMF.
2. Karlina Yu.I. Integration of stages of preparation of production of high-precision small parts on CNC machines. *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2021;1:17-23. (In Russ). [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2021.1\(69\).17-23](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2021.1(69).17-23). EDN: WQHCPV.
3. Bezъazychnyy V.F. *Similarity method in mechanical engineering technology: monograph*. Moscow; Vologda: Infra-Inzheneriya; 2021, 356 p. (In Russ).
4. Kotlyarov V.P., Maslakov A.P., Tolstoles A.A. Digital modelling of production engineering for metalworking machine shops. *Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS*. 2019;31(3):85-98. [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2019-31\(3\)-8](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2019-31(3)-8). EDN: LSIJGC.

5. Artamonov E.V., Tveryakov A.M., Shtin A.S. Investigation of electromagnetic properties of tool hard alloys under the influence of high temperatures. In: *Materials Research Proceedings*. 6–10 September 2021, Temryuk. Temryuk; 2022, p. 323-328. <https://doi.org/10.21741/9781644901755-57>. EDN: ZBJDOB.
6. Artamonov E., Vasilega N., Yadygin A. Analysis of factors affecting operability to assess risks and opportunities in the operation of built-up cutting tools. *Key Engineering Materials*. 2022;910:220-225. <https://doi.org/10.4028/p-wu7wdy>.
7. Kabaldin Yu.G., Bashkov A.A. Self-organization and friction in cutting. *Russian Engineering Research*. 2023;43(4):451-456. <http://dx.doi.org/10.3103/S1068798X23050088>.
8. Kabaldin Yu.G., Sablin P.A., Shchetinin V.S. Control of the dynamic stability of metal-cutting systems in the process of cutting based on the fractality of roughness of the machined surface. *Frontier Materials & Technologies*. 2023;3:43-51. (In Russ). <https://doi.org/10.18323/2782-4039-2023-3-65-4>.
9. Kabaldin Yu.G., Ivanov S.V., Bashkov A.A. Tribosystem stability control under external friction and cutting based on the algorithms of nonlinear dynamics, fractal theory and neural network modeling. *Mekhatronika, avtomatika i robototekhnika*. 2024;13:150-156. <https://doi.org/10.26160/2541-8637-2024-13-150-156>. (In Russ). EDN: NXFIAU.
10. Zakovorotnyi V.L., Gvindjiliya V.E. Influence of speeds of forming movements on the properties of geometric topology of the part in longitudinal turning. *Journal of Manufacturing Processes*. 2024;112:202-213. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.01.037>. EDN: LHVZHV.
11. Zakovorotny V., Gvindjiliya V. The features of the evolution of the dynamic cutting system due to the regenerative effect. In: *Dynamics of technical systems: AIP Conference Proceedings of the 7 International Scientific-Technical Conference*. 9–11 September 2023, Rostov-on-Don. Rostov-on-Don: American Institute of Physics Inc.; 2023, vol. 2507, Iss. 1, P. 030002. <https://doi.org/10.1063/5.0109559>. EDN: FLSYFX.
12. Galeev N.R., Galeev F.R. Development of industry 4.0 in various areas of the Russian economy. In: *Luchshaya nauchnaya rabota 2022: sbornik statej V Mezhdunarodnogo nauchno-issledovatel'skogo konkursa = Best Scientific Work 2022: Collected articles of the 5th International scientific and research competition*. 20 May 2022, Penza, Penza: Nauka i Prosveshchenie; 2022, p. 57-62. (In Russ). EDN: QKZWCG.
13. Starostina V.A. Industry 4.0: concept, key technologies, trends, obstacles. In: *Aktual'nye voprosy ekonomiki: sbornik statej IV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Actual issues of economics: collected articles of the 4th International scientific and practical conference*. 20 December 2020, Penza, Penza: Nauka i Prosveshchenie; 2020, p. 193-195. (In Russ). EDN: JUSQKO.
14. Bezyazychnyy V.F., Palamar' I.N. Current aspects in automation of scientific researches of machinery surface quality using machine learning methods. *Science intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2021;7:12-19. (In Russ). <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2021-7-12-19>. EDN: VIPEMD.
15. Stupnytsky V., Dragašius E., Baskutis S., Xianning Sh. Modeling and simulation of machined surface layer microgeometry parameters. *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*. 2022;8(1):1-11. (In Russ). <https://doi.org/10.23939/ujmems2022.01.001>. EDN: FGAHMG.
16. Pukhov A.S., Ivanova I.A. Structural synthesis of optimum control systems. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*. 2013;29:107-110. (In Russ). EDN: RCJLJB.
17. Pukhov A.S. Organizational, technical and environmental principles for automated system creation. In: *Bezopasnost' zhiznedejatel'nosti: problemy i resheniya – 2017: materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Life Safety: Problems and Solutions - 2017: Proceedings of the International scientific and practical conference*. 25–26 May 2017, Lesnikovo. Lesnikovo: Kurgan State Agricultural Academy named after T.S. Maltsev; 2017, 336-342. (In Russ). EDN: YQXKK.
18. Ovsyannikov V.E., Nekrasov R.Yu., Tempel' Yu.A., Vasiliev V.I. Use of neuro-fuzzy models while ensuring accuracy of machining on CNC machines. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Technical Sciences*. 2021;3:249-253. (In Russ). <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2021-3-249-253>. EDN: OFEELS.
19. Ovsyannikov V., Nekrasov R., Putilova U., Il'yaschenko D., Verkhoturova E. On the issue of automatic form accuracy during processing on CNC machines. *Revista Facultad de Ingenieria*. 2022;103:88-95. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20201111>. EDN: HCVDFL.
20. Proskuryakov N.A., Nekrasov R.Y., Starikov A.I., Solov'ev I.V., Barbyshev B.V., Tempel' Y.A. Fuzzy controllers in the adaptive control system of a CNC lathe. *Russian Engineering Research*. 2018;38(3):220-222. <https://doi.org/10.3103/S1068798X18030188>. EDN: XMQTZ.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецова Елена Михайловна,
старший преподаватель кафедры автоматизации
производственных процессов,
Курганский государственный университет,
640669, г. Курган, ул. Советская, 63/4, Россия
✉ lenkuz@bk.ru
<https://orcid.org/0009-0002-0057-8550>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Elena M. Kuznetsova,
Senior Lecturer of the Department of Industrial Process
Automation,
Kurgan State University,
63/4 Sovetskaya St., Kurgan 640669, Russia
✉ lenkuz@bk.ru
<https://orcid.org/0009-0002-0057-8550>

Овсянников Виктор Евгеньевич,

д.т.н., доцент,
профессор кафедры технологии машиностроения,
Тюменский индустриальный университет,
625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38, Россия
vik9800@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8775-0781>

Некрасов Роман Юрьевич,

к.т.н., доцент,
заведующий кафедрой технологии машиностроения,
Тюменский индустриальный университет,
625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38, Россия
nekrasovryu@tyuiu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7594-6114>

Путилова Ульяна Сергеевна,

к.т.н., доцент,
доцент кафедры технологии машиностроения,
Тюменский индустриальный университет,
625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38, Россия
putilovaus@tyuiu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4128-4129>

Viktor E. Ovsyannikov,

Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Professor of the Department of Mechanical
Engineering Technology,
Industrial University of Tyumen,
38 Volodarsky St., Tyumen 625000, Russia
vik9800@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8775-0781>

Roman Yu. Nekrasov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Head of the Department of Mechanical
Engineering Technology,
Industrial University of Tyumen,
38 Volodarsky St., Tyumen 625000, Russia
nekrasovryu@tyuiu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7594-6114>

Ulyana S. Putilova,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of
Mechanical Engineering Technology,
Industrial University of Tyumen,
38 Volodarsky St., Tyumen 625000, Russia
putilovaus@tyuiu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4128-4129>

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 11.04.2024 г.; одобрена после рецензирования 23.06.2024 г.; принята к публикации 30.08.2024 г.

Authors' contribution

The authors contributed equally to the article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 11.04.2024; approved after reviewing 23.06.2024; accepted for publication 30.08.2024.



Гидравлическая система долота для бурения нефтяных и газовых скважин

А.П. Мельников^{1,2✉}, Н.А. Буглов²

¹Геологоразведочный техникум, Иркутск, Россия

^{1,2}Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Резюме. Цель – усовершенствовать конструкцию поликристаллического алмазного долота со стальным или матричным корпусом для создания гидромониторного эффекта. Объектом исследований явилась гидравлическая система данного алмазного долота с наддолотным струйным насосом. Исследование работы наддолотной эжекторной системы заключается в теоретическом анализе работы гидравлической системы долота с помощью канонических зависимостей и гипотез. Предложена гидравлическая система поликристаллического алмазного долота, отличающаяся наличием струйного насоса высокого давления, который позволяет усилить гидромониторный эффект на забое скважины. Рассчитаны основные гидравлические характеристики промывочной системы долота со струйным насосом: при подаче буровых насосов 18,4 л/с и плотности бурового раствора 1180 кг/м³ рабочий коэффициент инжекции струйного насоса – 0,34; диаметр рабочей насадки – 10,3 мм, камеры смешения – 11,9 мм, гидромониторных насадок долота – 11,1 мм; число гидромониторных насадок – 3; скорость на выходе из гидромониторных насадок – 85,0 м/с; перепад давления на долоте – 15,7 МПа. Обоснована возможность применения гидромониторного эффекта, усиленного наддолотным струйным насосом, так как скорость на выходе из гидромониторных насадок достаточна для разрушения большинства горных пород (песчаник, известняк, доломиты, каменная соль, гипсовый камень, базальт, мрамор, гранит). Струйный насос в разработанной конструкции поликристаллического алмазного долота создает дополнительный контур циркуляции над забоем скважины, инжектирует шлам из затрубного пространства и подает его на гидромониторные насадки, что позволяет более эффективно разрушать забой скважины. Мощности гидромониторных струй вполне достаточно для повышения показателей бурения.

Ключевые слова: буровое долото, высоконапорный струйный насос, гидромонитор, бурение, эжектор

Для цитирования: Мельников А.П., Буглов Н.А. Гидравлическая система долота для бурения нефтяных и газовых скважин // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 3. С. 427–434 <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-427-434>. EDN: SEUQFG.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Drill bit hydraulic system for oil and gas boreholes

Alexander P. Melnikov^{1,2✉}, Nikolay A. Buglov²

^{1,2}Geological Prospecting College, Irkutsk, Russia

²Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. We set out to improve the existing design of a polycrystalline diamond bit with a steel or matrix body with the purpose of creating a hydro-monitoring effect. The research object was the hydraulic system of a diamond bit with a near-bit jet pump. The near-bit ejector system was studied by a theoretical analysis of the operation of the bit hydraulic system by means of canonical dependencies and hypotheses. A hydraulic system for a polycrystalline diamond bit is proposed. This system includes a high-pressure jet pump, which enhances the hydro-monitoring effect at the bottomhole. The main hydraulic characteristics of the bit flushing system with a jet pump are as follows: at a drilling pump feed of 18.4 l/s and a drilling fluid density of 1180 kg/m³, the working coefficient of jet pump injection equals 0.34; the working nozzle diameter equals 10.3 mm; the mixing chamber is 11.9 mm, bit hydromonitor nozzles are 11.1 mm; the number of hydromonitor nozzles is 3; the velocity at the exit of hydromonitor nozzles is 85.0 m/s; the pressure drop at the bit is 15.7 MPa. The possibility of using the hydro-monitoring effect enhanced by a near-bit jet pump was substantiated, since the velocity at the exit from the hydro-monitoring nozzles is sufficient to destroy most rocks (sandstone, limestone, dolomites, rock salt, gypsum stone, basalt, marble, granite). The jet pump in the

proposed design of a polycrystalline diamond bit creates an additional circulation circuit above the bottomhole, injects cuttings from the annular space and feeds them to the hydro-monitor nozzles. This enables a more efficient destruction of the bottomhole rock. The power of hydro-monitor jets is sufficient to improve drilling performance.

Keywords: drilling bit, high-pressure jet pump, jet nozzle, drilling, ejector

For citation: Melnikov A.P., Buglov N.A. Drill bit hydraulic system for oil and gas boreholes. *iPolytech Journal*. 2024;28(3):427-434. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-427-434>. EDN: SEUQFG.

ВВЕДЕНИЕ

Фактический дебит нефтегазовой скважины напрямую зависит от технологии строительства скважины [1, 2]. Чтобы повысить эффективность работы скважины, необходимо повысить механическую скорость проходки (МСП) [3–5] и уменьшить время физико-химического взаимодействия бурового раствора с пластом-коллектором. Этого возможно добиться с помощью применения правильно подобранной для конкретных геолого-технических условий компоновки низа буровой колонны [6], в состав которой обязательно входит долото.

Механическая скорость проходки скважины обеспечивается не только благодаря механическому разрушению горных пород вооружением долота, но и эрозионному разрушению горной породы струями [7], истекающими из насадок долота.

Известно разборное шарошечное долото [8]. Поток бурового раствора по каналу буровой колонны поступает на конфузор 1 (рис. 1), после этого в рабочую насадку 2 струйного насоса. Струйный насос инжектирует жидкость из призабойной зоны [9] через отверстие 4 в лапе долота, затем жидкость поступает по каналу 3 в насадку 5. Преимуществом данного устройства является то, что данное техническое решение позволяет создать дополнительный контур циркуляции над забоем скважины с максимальной эффективностью, поскольку энергия от буровых насосов передается непосредственно на струйный насос, который усиливает гидромониторный эффект на забой скважины. Недостатком данной конструкции является тот факт, что шарошечное долото по сравнению с долотом PDC (от англ. Polycrystalline diamond compact) [10, 11] отличается более низкой надежностью и стабильностью траектории бурения [12, 13].

Известно шарошечное буровое долото [14], у которого в лапах корпуса 1 установлены твердосплавные гидромониторные насадки 3 (рис. 2). Гидромониторные насадки 3 и центральная насадка 5 представляют

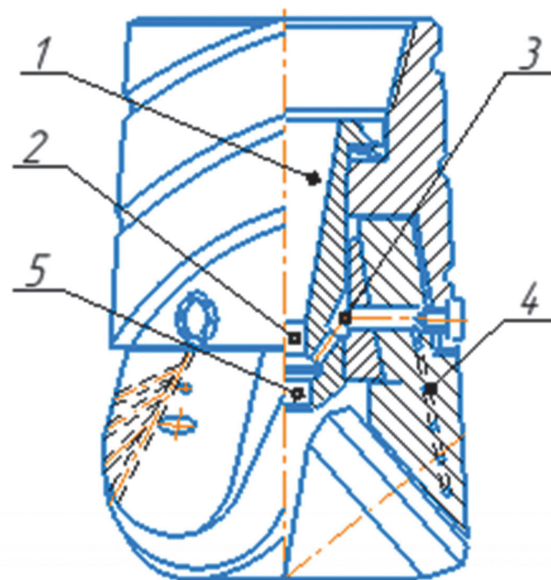


Рис. 1. Разборное шарошечное долото: 1 – конфузор; 2 – насадка струйного насоса; 3 – канал инжекции; 4 – отверстие; 5 – гидромониторная насадка [8]

Fig. 1. Demountable roller bit: 1 – confuser; 2 – jet pump nozzle; 3 – injection channel; 4 – hole; 5 – jet nozzle [8]

собой параллельные струйные насосы. Разрушение забоя происходит благодаря вращению шарошек 2 и гидромониторному эффекту. Преимуществом данного долота является то, что гидромониторные насадки 3 и 5 усиливают гидравлическое эрозионное разрушение забоя за счет инжекции шлама из зоны над забоем. Недостатком данного устройства считается то, что гидравлическая энергия распределяется между параллельными струйными насосами, а это негативно влияет на эффективность работы каждого.

Цель данной работы – усовершенствовать конструкцию долота PDC, дав ему возможность создавать гидромониторный эффект при разрушении горных пород. Усилиться гидромониторный эффект будет благодаря применению струйного насоса.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование работы наддолотной эжекторной системы заключается в теоретическом анализе работы гидравлической системы долота с помощью канонических зависимостей и гипотез.

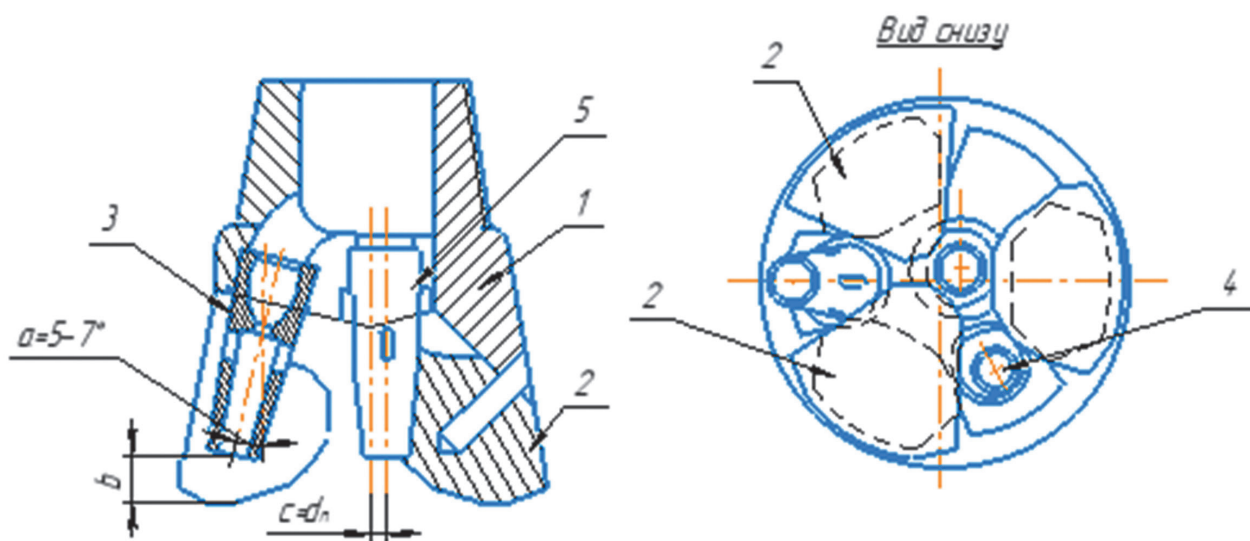


Рис. 2. Буровое долото: 1 – корпус, 2 – шарошка; 3-5 – насадка [14]
 Fig. 2. Drilling bit: 1 – body, 2 – cutter; 3-5 – nozzle [14]

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Предлагается усовершенствованная конструкция гидравлической системы долота PDC (рис. 3).

Гидравлическая система долота (см. рис. 3) работает следующим образом. Буровой раствор по каналу бурильной колонны поступает на рабочую насадку 1. За счет значительной скорости рабочей струи создается зона пониженного давления в камере инжек-

ции 4, благодаря чему инжектируется смесь бурового раствора и шлама из затрубного пространства по каналу инъекции 6. Рабочий и инжектированный потоки смешиваются в камере смешения 2 и поступают в диффузор 3, затем на гидромониторные насадки 5.

Расчет предложенной гидравлической системы производится в описанной ниже последовательности.

Необходимое давление на выходе из диффузора p_2 :

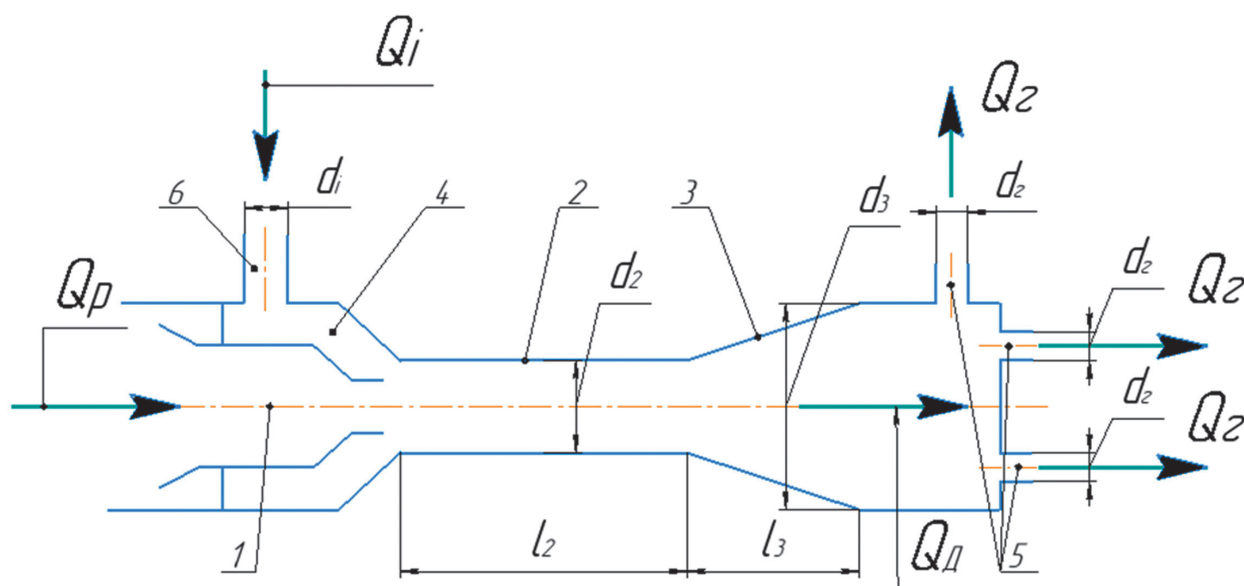


Рис. 3. Гидравлическая схема: 1 – рабочая насадка; 2 – камера смешения; 3 – диффузор; 4 – камера инъекции; 5 – гидромониторные насадки, 6 – канал инъекции; Q_p – рабочий поток, $\text{м}^3/\text{с}$; Q_i – инжектированный поток, $\text{м}^3/\text{с}$; Q_d – смешанный поток, $\text{м}^3/\text{с}$; Q_r – расход жидкости через гидромониторную насадку, $\text{м}^3/\text{с}$
 Fig. 3. Hydraulic circuit: 1 – working nozzle; 2 – mixing chamber; 3 – diffuser; 4 – injection chamber; 5 – jet nozzles, 6 – injection channel; Q_p – working flow, $\text{м}^3/\text{с}$; Q_i – injected flow, $\text{м}^3/\text{с}$; Q_d – mixed flow, $\text{м}^3/\text{с}$; Q_r – fluid flow through the jet nozzle, $\text{м}^3/\text{с}$

$$p_2 \geq \frac{(w_r^2 - w_1^2) \cdot \rho_2}{2} + \Sigma \xi \frac{w_k^2 \cdot \rho_2}{2} + p_3, \quad (1)$$

где $w_k = 60$ м/с – необходимая скорость потока на выходе из гидромониторной насадки, м/с; $w_1 = 1 \div 2$ м/с – скорость в распределительном коллекторе, за выходным сечением диффузора; $\Sigma \xi = 0,98$ – коэффициент местного сопротивления [15] гидромониторной насадки; p_3 – потери давления в затрубном пространстве, Па.

Расход жидкости через гидромониторные насадки определим по формуле:

$$Q_k = Q_p \cdot (1 + q) / z, \quad (2)$$

где $q = 0,1 \div 0,5$ – коэффициент инжекции наддолотного струйного насоса; z – число гидромониторных насадок.

Диаметр гидромониторной насадки долота определится по формуле [18]:

$$d_r = \sqrt[4]{\frac{8Q_p^2 \cdot \rho_2}{\pi^2 \cdot \varphi_1^2 \cdot z^2 \cdot (p_2 - p_3)}}, \quad (3)$$

где ρ_2 – плотность смешанного потока на выходе из диффузора, кг/м³; $\varphi_1 = 0,95$ – коэффициент скорости гидромониторной насадки.

Диаметр рабочей насадки струйного насоса [16]:

$$d_1 = \sqrt[4]{\frac{8Q_p^2 \cdot \rho_p}{\pi^2 \cdot \varphi_1^2 \cdot \Delta p_p}}, \quad (4)$$

где ρ_p – начальная плотность бурового раствора, кг/м³; $\varphi_1 = 0,95$ – коэффициент скорости рабочей насадки; $\Delta p_p > 15$ МПа – перепад давления на рабочей насадке струйного насоса.

Диаметр d_2 и длина l_2 камеры смешения, диаметр d_3 и длина l_3 диффузора определяются по методике Е.Я. Соколова [17]. Формулы для расчета коэффициента напора $\bar{h}$ струйного насоса, коэффициента скорости камеры смешения φ_2 и диффузора φ_3 опубликованы в работе «Применение методики исследования характеристик наддолотного струйного насоса для временной изоляции продуктивного пласта» [18].

Пьезометрическая высота $\frac{p_1}{\rho_1 g}$ на входе в камеру смешения определится по формуле:

$$\frac{p_1}{\rho_1 g} = l_2 + l_3 + \frac{8Q_p^2(1+q)^2}{\pi^2 \cdot g} \left[\left(\frac{1}{d_3^4} - \frac{1}{d_2^4} \right) + \frac{\varphi_2^2 - 1}{d_2^4} + \frac{\varphi_3^2 - 1}{d_3^4} \right] + \frac{p_2}{\rho_2 g}, \quad (5)$$

где $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения.

Давление на входе в рабочую насадку:

$$p_p = \left\{ \frac{8Q_p^2}{\pi^2} \left[\frac{(1+q)^2}{d_2^4} + \left(\frac{1}{\varphi_1^2} - 1 \right) \frac{1}{d_1^4} - \frac{1}{d_b^4} \right] + \frac{p_1}{\rho_1} \right\} \cdot \rho_{BP}, \quad (6)$$

где d_b – внутренний диаметр бурильной колонны, м.

Перепад давления на струйном насосе:

$$\Delta p_{CH} = p_p - p_2. \quad (7)$$

Давление в приемной камере струйного насоса [19]:

$$p_i = \frac{\bar{h} \cdot p_p - p_2}{\bar{h} - 1}. \quad (8)$$

Если $p_i > p_3$, это значит, что струйный насос работает в режиме отрицательной инжекции, то есть жидкость выбрасывается в затрубное пространство. В этом случае необходимо уменьшить диаметр рабочей насадки, то есть перейти к расчету по формуле (4), задать более высокое значение Δp_p и повторить все расчеты до тех пор, пока $p_i < p_3$.

Уточняем перепад статического давления на рабочей насадке:

$$\Delta p_p = p_p - p_i. \quad (9)$$

Перепад давления на линии инжекции:

$$\Delta p_{3-i} = p_3 - p_i. \quad (10)$$

Диаметр отверстия для инжекции бурового раствора определится по формуле [18]:

$$d_i = \sqrt[4]{\frac{8Q_p^2 \cdot q^2 \cdot \rho_3}{\pi^2 \cdot \varphi_i^2 \cdot \Delta p_{3-i}}}, \quad (11)$$

где $\varphi_i = \sqrt{1/(1 + \Sigma \xi)}$ – коэффициент скорости канала инжекции; $\Sigma \xi$ – сумма коэффициентов местных сопротивлений в канале инжекции.

Воспользовавшись описанными выше формулами, определены основные гидравлические характеристики устройства, изображенного на рис. 4. Результаты расчета представлены в табл. 1.

Воспользовавшись гипотезой Кирпичева-Кика [19], становится возможным рассчитать минимально необходимую скорость струи гидромонитора, которая необходима для объемного разрушения горной породы:

Таблица 1. Характеристики гидравлической системы долота
Table 1. Drilling bit hydraulics

Расчетный параметр	Значение
Подача буровых насосов, л/с	18,4
Плотность бурового раствора, кг/м ³	1180
Коэффициент инжекции	0,34
Диаметр рабочей насадки, мм	10,3
Диаметр камеры смещения, мм	11,9
Диаметр на выходе диффузора, мм	20,2
Длина камеры смещения, мм	83,0
Длина диффузора, мм	54,0
Диаметр гидромониторных насадок долота, мм	11,1
Число гидромониторных насадок долота	3
Скорость на выходе из гидромониторной насадки, м/с	85,0
Перепад давления на струйном насосе, МПа	11,4
Давление на входе в рабочую насадку, МПа	18,7
Диаметр отверстия для инжекции, мм	14,3
Перепад давления на долоте, МПа	15,7

Таблица 2. Разрушение горной породы гидравлической струей плотностью $\rho = 1180 \text{ кг/м}^3$
Table 2. Rock destruction by hydraulic jet with the density of $\rho = 1180 \text{ kg/m}^3$

Горная порода	Модуль Юнга [20], 10^{10} Па	Предел прочности на сжатие [20], 10^6 Па	Минимальная скорость рабочей струи, м/с
Песчаник	0,5–0,65	100	36,1–41,2
Известняк	0,11–0,86	100	31,4–87,7
Доломиты	0,71–0,93	79	23,8–27,3
Каменная соль	0,01–0,2	30	19,5–87,3
Гипсовый камень	0,05	15–30	19,5–39,1
Базальт	6,2–11,3	300	26,0–35,1
Мрамор	5,6–7,3	200	21,1–24,6
Гранит	2,1–7,0	250	27,5–50,2

$$v_{min} = \sqrt{\frac{\sigma^2}{2 \cdot E \cdot \rho \cdot \sin \alpha}}, \quad (12)$$

где σ – предел прочности на сжатие горной породы, Па; E – модуль Юнга, Па; ρ – плотность струи гидромонитора, кг/м³; α – угол между поверхностью стенки скважины и осью струи гидромонитора, градусы.

Воспользовавшись формулой (12), определим минимально необходимую скорость струи гидромонитора, которая необходима для разрушения забоя при расчетной плотности бурового раствора $\rho = 1180 \text{ кг/м}^3$. Результаты расчета для разных горных пород отображены в табл. 2.

Как видно из табл. 1 и табл. 2, скорости на выходе из гидромониторной насадки достаточно для разрушения большинства горных пород.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана конструкция гидравлической системы долота PDC, которая может повысить эффективность углубления скважин. Это становится возможным благодаря работе гидромониторных струй. Рассчитаны основные параметры наддолотного струйного насоса и общие гидравлические характеристики долота. При рабочей подаче буровых насосов 18,4 л/с бурового раствора плотностью 1180 кг/м³ на долоте создается перепад давления 15,7 МПа, при этом скорость на выходе из гидромониторных насадок составляет 85 м/с. Мощности гидромониторных струй вполне достаточно для повышения показателей бурения.

Список источников

1. Bogdanov E. Efficient development of the formation system of the oil and gas field using integrated modeling // 82nd EAGE Annual Conference & Exhibition (Amsterdam, 18–21 October 2021). Amsterdam: European Association of Geoscientists & Engineers, 2021. Vol. 4. P. 2637–2641. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202012044>. EDN: BQOVLY.
2. Myachina K.V., Petrishchev V.P., Chibilev A.A., Krasnov E.V. The features of the formation and the functioning principles of oil and gas field technogeosystems // Geography and Natural Resources. 2021. Vol. 42. No. 1. P. 10–16. <https://doi.org/10.1134/S187537282101011X>. EDN: IMZGFA.
3. Овчинников В.П., Дружинина И.В., Парфиров В.А., Бастиков С.Н., Овчинников П.В., Закиров Н.Н. [и др.]. Математическое моделирование показателей свойств бурового раствора для первичного вскрытия продуктивного пласта // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2023. № 8. С. 19–26. [https://doi.org/10.33285/0130-3872-2023-8\(368\)-19-26](https://doi.org/10.33285/0130-3872-2023-8(368)-19-26). EDN: KKCJIC.
4. Guo Ying, Ren Guangying, Yang Fei, Yang Yong, Bokov D.O., Fardeeva I.N. An analytical method to select appropriate linear and non-linear correlations on the effectiveness of penetration rate parameter towards mechanical specific energy // Energy Reports. 2021. Vol. 7. P. 3647–3654. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.06.055>. EDN: WWIKGH.
5. Tsouprikov A.A. A mathematical model of mechanical penetration rate with three control parameters to optimize oil and gas well drilling // Control Sciences. 2022. Iss. 4. P. 17–23. <https://doi.org/10.25728/cs.2022.4.3>. EDN: NQVMBK.
6. Jung T.J., Jeong Ye.H., Shin Y. Simulation of directional drilling by dynamic finite element method // Journal of Mechanical Science and Technology. 2022. Vol. 36. Iss. 7. P. 3239–3250. <https://doi.org/10.1007/s12206-022-0605-9>. EDN: VHOXYU.
7. Лягов И.А., Лягов А.В., Гагарин Е.Ф., Первушин А.С., Исангулов Д.Р., Новосёлов А.А. Гидромониторный переводник с эффектом волнообразного механического колебания частиц распространяющиеся в упругих средах – газообразных и жидких разработанный для работы в технологической системе компании «Перфобур» // Современные проблемы нефтегазового оборудования – 2021: материалы Междунар. науч.-техн. конф. (г. Уфа, 15 декабря 2021 г.). Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2021. С. 30–39. EDN: VXZWTO.
8. Пат. № 2034126, Российская Федерация, С1, E21B 10/18. Разборное буровое долото / Г.К. Ешимов; заявитель Сургутское отделение Западно-Сибирского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института технологии глубокого разведочного бурения. № 5031678/03. Заявл. 10.03.1992; опубл. 30.04.1995. EDN: YFKQRX.
9. Suleimanov R.I., Khabibullin M.Ya. Enhancement of efficiency of the hydraulic distributor of the hydraulic drive of the bottom-hole pump // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2021. Vol. 1064. P. 012071. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1064/1/012071>. EDN: CJAEUR.
10. Pei Ju. Cutter load distribution analysis and crown shape optimal design of complex curved PDC bit // Journal of Engineering and Technological Sciences. 2019. Vol. 51. No. 1. P. 14–27. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2019.51.1.2>. EDN: XAJIXJ.
11. Mazen A.Z., Rahmanian N., Mujtaba I.M., Hassanpour A. Effective mechanical specific energy: a new approach for evaluating PDC bit performance and cutters wear // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2021. Vol. 196. P. 108030. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.108030>. EDN: ROKLSX.
12. Cai Zhen, Lai Xuzhi, Wu Min, Lu Chengda, Chen Luefeng. Trajectory azimuth control based on equivalent input disturbance approach for directional drilling process // Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics. 2021. Vol. 25. No. 1. P. 31–39. <https://doi.org/10.20965/JACIII.2021.P0031>. EDN: RVVGWE.
13. Liagova A.A., Liagov I.A. The technology of completion reservoir by drilling a network of branched channels under controlled trajectory // Youth Technical Sessions Proceedings: 6th Youth Forum of the World Petroleum Council-Future Leaders Forum (St. Petersburg, 23–28 June 2019). St. Petersburg, 2019. P. 345–351. <https://doi.org/10.1201/9780429327070-47>. EDN: NTBQDD.
14. Пат. № 2244797, Российская Федерация, С1, E21B 10/18. Буровое долото / В.С. Новиков; заявитель ООО «ЛУКОЙЛ-ВолгоградНИПИморнефть». № 2003119852/03. Заявл. 30.06.2003; опубл. 20.01.2005. EDN: SDDSJS.
15. Chorshanbiev U., Ibadullaev A., Babaev A., Kurbanov S. Theoretical analysis of reduction of pressure and energy loss due to pipe friction through modification of dispers systems // Universum: технические науки. 2022. No. 8. P. 28–32. <https://doi.org/10.32743/UniTech.2022.101.8.14187>. EDN: QWKVZJ.
16. Шайдаков В.В., Мельников А.П., Чернова К.В., Коробков Г.Е. Эффективное вскрытие продуктивного пласта при бурении нефтяных и газовых скважин // НИПИ «Нефтегаз». 2018. № 4. С. 26–34. <https://doi.org/10.5510/OGP20180400368>. EDN: YURILZ.
17. Мельников А.П., Буглов Н.А. Применение методики исследования характеристик наддолотного струйного насоса для временной изоляции продуктивного пласта // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 6. С. 176–184. <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/6/3920>. EDN: WNNTQO.
18. Паневник А.В., Концур И.Ф., Паневник Д.А. Определение эксплуатационных параметров наддолотной эжекционной компоновки // Нефтяное хозяйство. 2018. № 3. С. 70–73. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2018-3-70-73>. EDN: YSWARI.

19. Ivanova A.S., Leontiev D.N. The origin of engineering education in late 19th - early 20th centuries in pre-revolutionary Russia // Глобальный научный потенциал. 2019. № 10. С. 21–24. EDN: PGKKT.
20. Литвинский Г.Г. Основы теории резания и разрушения горных пород // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. 2017. № 8. С. 5–15. EDN: YPWFL.

References

1. Bogdanov E. Efficient development of the formation system of the oil and gas field using integrated modeling. In: *82nd EAGE Annual Conference & Exhibition*. 18–21 October 2021, Amsterdam. Amsterdam: European Association of Geoscientists & Engineers; 2021, vol. 4, p. 2637-2641. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202012044>. EDN: BQOVLY.
2. Myachina K.V., Petrishchev V.P., Chibilev A.A., Krasnov E.V. The features of the formation and the functioning principles of oil and gas field technogeosystems. *Geography and Natural Resources*. 2021;42(1):10-16. <https://doi.org/10.1134/S187537282101011X>. EDN: IMZGFA.
3. Ovchinnikov V.P., Druzhinina I.V., Parfir'ev V.A., Bastrikov S.N., Ovchinnikov P.V., Zakirov N.N., et al. Mathematical modeling of indicators of drilling fluid properties for primary opening of a productive formation. *Stroitel'stvo neftyanyh i gazovyh skvazhin na sushe i na more*. 2023;8:19-26. [https://doi.org/10.33285/0130-3872-2023-8\(368\)-19-26](https://doi.org/10.33285/0130-3872-2023-8(368)-19-26). (In Russ.). EDN: KKCJIC.
4. Guo Ying, Ren Guangying, Yang Fei, Yang Yong, Bokov D.O., Fardeeva I.N. An analytical method to select appropriate linear and non-linear correlations on the effectiveness of penetration rate parameter towards mechanical specific energy. *Energy Reports*. 2021;7:3647-3654. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.06.055>. EDN: WWIKGH.
5. Tsouprikov A.A. A mathematical model of mechanical penetration rate with three control parameters to optimize oil and gas well drilling. *Control Sciences*. 2022;4:17-23. <https://doi.org/10.25728/cs.2022.4.3>. EDN: NQVMBK.
6. Jung T.J., Jeong Ye.H., Shin Y. Simulation of directional drilling by dynamic finite element method. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2022;36(7):3239-3250. <https://doi.org/10.1007/s12206-022-0605-9>. EDN: VHOXYU.
7. Lyagov I.A., Lyagov A.V., Gagarin E.F., Pervushin A.S., Isangulov D.R., Novosyolov A.A. Jet sub with the effect of wave-like particle mechanical oscillation propagating in gaseous and liquid elastic media developed for the Perfobur company technological system. In: *Sovremennye problemy neftegazovogo oborudovaniya – 2021: materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii = Modern problems of oil and gas equipment - 2021: proceedings of the International scientific and technical conference*. 15 December 2021, Ufa. Ufa: Ufa State Petroleum Technological University; 2021, p. 30-39. (In Russ.). EDN: VXZWT0.
8. Eshimov G.K. *Demountable drilling bit*. Patent RF, no. 2034126; 1995. (In Russ.). EDN: YFKQRX.
9. Suleimanov R.I., Khabibullin M.Ya. Enhancement of efficiency of the hydraulic distributor of the hydraulic drive of the bottom-hole pump. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2021;1064:012071. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1064/1/012071>. EDN: CJAEUR.
10. Pei Ju. Cutter load distribution analysis and crown shape optimal design of complex curved PDC bit. *Journal of Engineering and Technological Sciences*. 2019;51(1):14-27. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2019.51.1.2>. EDN: XAJIXJ.
11. Mazen A.Z., Rahmanian N., Mujtaba I.M., Hassanpour A. Effective mechanical specific energy: a new approach for evaluating PDC bit performance and cutters wear. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021;196:108030. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.108030>. EDN: ROKLSX.
12. Cai Zhen, Lai Xuzhi, Wu Min, Lu Chengda, Chen Luefeng. Trajectory azimuth control based on equivalent input disturbance approach for directional drilling process. *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*. 2021;25(1):31-39. <https://doi.org/10.20965/JACIII.2021.P0031>. EDN: RVVGWE.
13. Liagova A.A., Liagov I.A. The technology of completion reservoir by drilling a network of branched channels under controlled trajectory. In: *Youth Technical Sessions Proceedings: 6th Youth Forum of the World Petroleum Council-Future Leaders Forum*. 23–28 June 2019, St. Petersburg. St. Petersburg; 2019, p. 345-351. <https://doi.org/10.1201/9780429327070-47>. EDN: NTBQDD.
14. Novikov V.S. *Drill bit*. Patent RF, no. 2244797; 2005. (In Russ.). EDN: SDDSJS.
15. Chorshanбиеv U. Ibadullaev A. Babaev A. Kurbanov S. Theoretical analysis of reduction of pressure and energy loss due to pipe friction through modification of dispersed systems. *Universum*. 2022;8:28-32. <https://doi.org/10.32743/UniTech.2022.101.8.14187>. EDN: QWKVZJ.
16. Shaidakov V.V., Melnikov A.P., Chernova K.V., Korobkov G.E. Efficient drilling-in in the oil and gas wells drilling. *SOCAR Proceedings*. 2018;4:26-34. <https://doi.org/10.5510/OGP20180400368>. (In Russ.). EDN: YURILZ.
17. Melnikov A.P., Buglov N.A. Application of the methodology for studying the characteristics of a near-bit jet pump for temporary isolation of a productive reservoir. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2023;334(6):176-184. <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/6/3920>. (In Russ.). EDN: WNTTQO.
18. Panevnik A.V., Kontsur I.F., Panevnik D.A. Determination of operating parameters of near-bit ejector assembly. *Oil Industry*. 2018;3:70-73. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2018-3-70-73>. (In Russ.). EDN: YSWARI.
19. Ivanova A.S., Leontiev D.N. The origin of engineering education in late 19th – early 20th centuries in pre-revolutionary Russia. *Global Scientific Potential*. 2019;10:21-24. EDN: PGKKT.
20. Litvinsky G.G. The theory fundamentals of rock cutting. *Sbornik nauchnyh trudov Donbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2017;8:5-15. (In Russ.). EDN: YPWFL.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**Мельников Александр Павлович,**

преподаватель,

Геологоразведочный техникум,

664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 104, Россия;

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

✉ m1a1p@yandex.ru

Буглов Николай Александрович,

к.т.н., доцент,

заведующий кафедрой нефтегазового дела,

Иркутский национальный исследовательский

технический университет,

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

bna@istu.edu

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**Alexander P. Melnikov,**

Lecturer,

Geological Prospecting College,

104 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;

83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

✉ m1a1p@yandex.ru

Nikolay A. Buglov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,

Head of the Department of Oil and Gas Business,

Irkutsk National Research Technical University,

83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

bna@istu.edu

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 03.03.2024 г.; одобрена после рецензирования 11.06.2024 г.; принята к публикации 20.06.2024 г.

Authors' contribution

The authors contributed equally to the article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 03.03.2024; approved after reviewing 11.06.2024; accepted for publication 20.06.2024.



The influence of a non-uniform heat source/sink and Joule heating on the convective motion of a micropolar fluid in a chemically radiative MHD medium across a stretched sheet

Gurram Dharmiah¹, Denis N. Sidorov², Samad Noeiaghdam^{3✉}, Vitaliy P. Panov⁴

¹Narasaraopeta Engineering College, Yellamanda, Narasaraopet, India

²Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia

^{2,3}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

³South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

⁴Sungkyunkwan University, Seoul, South Korea

Abstract. The objective of the present exploration is to examine impactions of radiation, a non-uniform intensity source, and a permeable medium on a temperamental MHD blended convective micropolar liquid over an extended sheet subject to Joule heating. To transform the formulated problem into ordinary differential equations, the applicable similarity transformation is implemented. By utilizing R-K-F 4th-5th order approach with shooting method with MATLAB, the numerical solution is obtained. For the relevant profiles, the dimensionless parameters are visually displayed and described. Skin friction, the Nusselt number, and the Sherwood number have all been calculated using the answer found for the velocity, temperature, and concentration. With the assistance of line graphs, the impact of different flow factors being introduced into the problem is addressed. This research is conducted on the implications of MHD, porous, thermal radiation, viscous dissipation, Joule heating, non-linear thermal radiation and chemical reaction. For large values of micropolar parameter, the temperature is reduced and velocity and angular momentum distributions are raised. With the thermal radiation parameter, the temperature distribution gets better and thermal boundary layer is improved while the large values of Eckert number and non-uniform heat source or sink parameters, thermal boundary layer is improved. The higher thermal conductivity is proportional to the thickness of the thermal boundary layer. The concentration profile degrades with higher Schmidt number and chemical reaction parameter values. The current examination pertains to the significant subject matter of cooling of systems, artificial heart identification, oil-pipelined frictions, flow-tracers.

Keywords: radiation, Joule heating, injection/suction, heat sink/heat source, functional materials

Funding. The work was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project no. FZZS-2024-0003).

For citation: Dharmiah G., Sidorov D.N., Noeiaghdam S., Panov V.P. The influence of a non-uniform heat source/sink and Joule heating on the convective motion of a micropolar fluid in a chemically radiative MHD medium across a stretched sheet. *iPolytech Journal*. 2024;28(3):435-452. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-435-452>. EDN: ZFGRZC.

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 54-79

Влияние неравномерного источника/стока тепла и Джоулева нагрева на конвективное движение микрополярной жидкости в химически излучающей МГД-среде поперек растянутого листа

Г. Дхармаях¹, Д.Н. Сидоров², С. Нойягдхам^{3✉}, В.П. Панов⁴

¹Кафедра математики, Инженерный колледж Нарасараопета, Йелламанда, Нарасараопет, Индия

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

^{2,3}Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

³Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

⁴Университет Сонгюнкан, Сеул, Южная Корея

Резюме. Проведенное исследование направлено на изучение динамики воздействия излучения, источника неоднородной интенсивности и проницаемой среды на магнитную гидродинамику смешанной конвек-

тивной микрополярной жидкости на протяженном слое плоской пластины, подверженной джоулевому нагреву. Исходная задача сведена к решению обыкновенных дифференциальных уравнений. Для построения численного решения обыкновенных дифференциальных уравнений использованы методы Рунге–Кутты–Фельберга четвертого и пятого порядков и метод стрельбы. В качестве программной среды и для визуализации численных результатов моделирования использован пакет MATLAB. Для соответствующих профилей потоков найдены безразмерные параметры. Исследовано поведение поверхностного натяжения. Число Нуссельта и число Шервуда рассчитаны с учетом скорости потока, температуры и концентрации. Динамика влияния различных параметров потока представлена в графическом виде. Моделирование проведено с учетом магнитогидродинамики потока, пористой структуры конвективной микрополярной жидкости на протяженном слое плоской пластины, влияния вязкой диссипации, нагрева Джоуля, а также нелинейного теплового излучения. Установлено, что для больших значений микрополярного параметра температура снижается, а скорости потока и углового импульса увеличиваются. С использованием параметров теплового излучения с учетом больших значений Эккерта и неравномерного источника тепла распределение температуры и теплового пограничного слоя улучшается. Более высокая теплопроводность пропорциональна толщине теплового пограничного слоя. Профиль концентрации ухудшается с ростом числа Шмидта. Проведенное численное исследование магнитной гидродинамики смешанной конвективной микрополярной жидкости на протяженном слое плоской пластины касается важных прикладных задач охлаждения в системах, таких как анализ трения в масляных трубопроводах, исследованиях сердечно-сосудистой системы, а также может использоваться для построения систем мониторинга потоков.

Ключевые слова: излучение, Джоулев нагрев, впрыск/всасывание, теплоотвод/источник тепла, функциональные материалы

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FZZS-2024-0003).

Для цитирования: Дхармая Г., Сидоров Д.Н., Нойягдам С., Панов В.П. Влияние неравномерного источника/стока тепла и Джоулева нагрева на конвективное движение микрополярной жидкости в химически излучающей МГД-среде поперек растянутого листа // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 3. (In Eng.). С. 435–452. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-435-452>. EDN: ZFGRZC.

INTRODUCTION

In many engineering and industrial processes, the flow of a boundary layer composed of an incompressible liquid across a stretched sheet is a regular occurrence. Over the last several decades, there has been an influx of researchers into this topic. A stretchable surface is an area that is supported at one end and moves in reaction to a tug at that end. This kind of surface may be pulled or stretched in either direction. During the process of manufacturing sheets, molten material is removed from the slit and then stretched to the necessary dimensions. Because of this, the qualities of a product manufactured by industrial extrusion will depend on the rates at which the sheet is stretched and cooled after being produced. Nevertheless, the investigation of laminar flow over a stretched surface is an integral part of a wide variety of manufacturing procedures, such as the production of glass fiber and paper, metal spinning, the reinforcement of copper wires, and hot rolling. The velocity at which the sheet is dragged away from the emulsion slit may be defined in a number of different ways, including linearly, exponentially, and nonlinearly, among other conceivable ways. Several situations that occur in the real world for the use of a nonlinear stretching sheet. In light of this, it is sometimes needed to assume that the velocity of the sheet changes nonlinearly as a function of distance from the slit. This is due to the fact that the slit causes the velocity of the sheet to change in a nonlinear fashion. Within the scope of this work, our primary focus is on nonlinear stretching sheets. As a consequence of this, external flow control devices like a magnetic field are necessary in order to guarantee that the proper feature is shown.

Theory of fluids with microscopic rotation, first investigated by Eringen [1], can provide an explanation for the flow behavior. Unlike the classical Newtonian fluids theory, which does not take into account micro- and nano-scale movements of fluid components on a microscopic scale, the theory of micro rotation fluids can. Stiff micromolecules are suspended in a diluted solution in these liquids; Spin-inertia controls their independent movements, which maintain tension and body moments. Eringen's original microcontinuum theory is comprised of the micropolar, microstretch, and micromorphic theories [2–5]. Micropolar fluids refer to non-Newtonian fluid models that provide a means of studying the properties and behavior of unique lubricants, colloidal suspensions, polymeric fluids, and liquid crystals. The effects of heat source and sink on heat transmission are also important to take into account in the context of numerous physical issues. The heat distribution in the fluid, which may be generated or absorbed by the system,

may effects over particle depositions like nuclear reactors, electronics, and semiconductors. It's feasible to arrange heat sources and sinks as one or the other steady, area or temperature-subordinate, or both. In this article, we'll discuss heat sources and sinks that fluctuate regarding both area and temperature. Within the sight of warm radiation/substance response, Mabood et al. [6, 7] looked into heat source affected magneto non-Darcian convected micropolar flow on a stretched plane. Numerous researchers have investigated the significance of heat sink/source in micropolar liquids with various factors [8–12].

The importance of understanding radiation's effect on MHD flows and heat transfers from an industrial perspective has grown. Many cycles in the designing process happen at high temperatures, making knowledge of radiation heat motion crucial for constructing sturdy hardware, thermal energy stations, gas turbines, and a broad variety of propulsion equipment for aircraft, rockets, satellites, and spacecraft. Using exact analytical techniques, Rashidi [13] examined the impact of heat radiation on a micropolar fluid trapped in a porous medium. Numerous industrial processes, such as hot rolling, chemical plating of flat plates, and polymer extrusion [14], make use of chemical reactions. Late writing on the effect of substance responses in different stream fields is given in Refs. [15–19]. Since they were on a similar request thus little, the impacts of gooey and Joule warming were dismissed [20]. Heat transport is significantly influenced by viscous dissipation. While managing extremely thick liquids, the dispersal term becomes huge. While working at high temperatures, as in polymer creation, thick dissemination can't be disregarded. A few authors [21, 22] review the synergistic effect of Joule warming and thick dissemination on various kinds of streams [23–27]. Contain additional MHD studies. Morozova et al discussed propagation of heat and angular velocity for micropolar medium in [28]. There are lots of ways we can use nanomechanical modeling to understand and study very tiny structures. We can also use theories of bending and twisting in various elastic materials including functional materials. You can find examples of this in some books or papers [29–31].

There are several areas where knowledge gained from studying two-layer limit layer stream, intensity, and mass exchange across a nonlinear extending surface might be useful. Streamlining the removal of plastic sheets, building up cycles of metal plates in cooling showers, and removing polymer sheets from colors are only some of the more recent applications of thick stream across an extended sheet. When making these sheets, the dissolve that results from a cutting process is then prolonged till the desired thickness is reached. The eventual outcomes of wanted qualities are prominently affected by the extending rate, the pace of the cooling simultaneously, and the method involved with extending. Vajravelu [32] concentrated on the stream and intensity move qualities in a thick liquid over a nonlinearly extending sheet without heat dispersal impact. Cortell [33–34] has dealt with thick stream and intensity move over a nonlinearly extending plane. Raptis and Perdakis [35] concentrated on thick stream over a nonlinear extending sheet within the sight of a substance response and attractive field. Radiation impact with magneto stream owing to a spreading regime in a permeable media were discussed by Abbas and Hayat [36]. Studying the relevance of similarity response for stream and intensity move of a silent liquid across a nonlinear expanding surface, Cortell [37] found some interesting results. Solutions for a stream across a nonlinearly expanding sheet with synthetic response and attractive field was found by Awang and Hashim [38].

This article inspects the impacts of a synthetic response and a permeable media on the MHD blended convection stream of a micropolar liquid across an extended sheet, as well as the overseeing conditions for this issue. In this exploration, the limit layer is represented by a bunch of conditions including the coherence, force, miniature turn, energy, and focus conditions. To tackle limit layer issues, an arrangement of incomplete differential conditions (PDEs) should be changed into a Tribute framework by means of closeness change. Runge-Kutta-Fehlberg fourth-fifth request approach is then used to take care of the issue mathematically.

PRELIMINARIES

Here, we presented some main definitions and preliminaries [11–14]. Liquid mechanics is among the finest seasoned parts of material science which manages the way of behaving

of liquids (fluids and gases) very still as well as moving. Like different parts of science, liquid mechanics can be extensively named liquid insights, liquid kinematics and liquid elements. Liquid elements manages the investigation of movement of liquids, the powers that are answerable for this movement and the collaboration of liquids with solids. The hypothetical investigation of movement of liquids is the best, captivating and helpful utilization of science. Liquid elements is a profoundly evolved part of science which has been the constant and growing exploration movement beginning around 1840. It has its own significance in the fields of designing, physiology, satellite innovation, and so forth. Liquid elements in without a doubt contacts pretty much every part of our life. It is examined both hypothetically and tentatively and the outcomes are portrayed both mathematically and truly. The journey for more profound comprehension of the subject has assisted the improvement of the subject as well as recommended the advancement in supporting regions with enjoying applied arithmetic, mathematical registering and exploratory procedures.

Liquids are not sensibly compressible except under the action of heavy forces. Hence, for all practical considerations they are taken as incompressible. Gases, on the other hand, are widely compressible whenever external pressures are exerted. Because of this behavior, gases are considered as compressible fluids in general.

In liquids, the erosion between the particles is as digressive or shearing powers (stresses). The inside rubbing among the atoms of liquid which offers protection from the deformity of the liquid is called thickness. In examining fluid behavior and smooth movements near a limit, this property is crucial. The proportion of thickness is known as the coefficient of consistency. It is an actual property. In spite of the fact that gases as well as fluids have consistency, the thickness of gases is less clear in regular daily existence.

LAMINAR FLOW

A stream where every liquid molecule has an unequivocal way and the way of one molecule doesn't cross the way of some other molecule is supposed to be laminar stream. This stream happens when an exceptionally gooey liquid like sloppy water, streams at an extremely low speed through a pipeline. Implies, it happens at a low speed so that powers because of the consistency are transcendent over the inner powers. The thickness of the liquid prompts relative movement with the liquid as the liquid layer slides over one another, which thusly leads to shearing stresses. Assuming the Reynolds number is under 2000, the stream is called laminar stream.

TURBULENT FLOW

A stream wherein liquid particles don't have an unmistakable way and the way of one molecule crosses the way of different particles during stream is called non-laminar or tempestuous stream. This stream happens when a liquid of low thickness like petroleum, courses through a pipeline.

The event of fierce stream is more regular than that of laminar stream. The speed circulation in tempestuous stream is somewhat uniform. On the off chance that the Reynolds number is more than 4000, the stream is called violent. Assuming the Reynolds number lies somewhere in the range of 2000 and 4000, the stream might be tempestuous or laminar.

STEADY FLOW

A stream where the properties and conditions related with the movement of the liquid are free of time so the stream design stays unaltered with time is supposed to be a consistent stream.

For a steady flow $\frac{\partial}{\partial t}(\zeta) = 0$ when the fluid is at any, where ζ is a parameter.

UNSTEADY FLOW

A stream where the properties and conditions related with the movement of the liquid are subject to time so the stream design fluctuates with time is supposed to be a flimsy stream. Insecure stream is found when a compressible liquid (i.e., gas) courses through a pipeline.

For an unsteady flow $\frac{\partial}{\partial t}(\zeta) \neq 0$ when the fluid is at any, where ζ is a parameter.

HEAT TRANSFER

The concept of heat transmission is crucial to many fields of study and development. It is a fundamental part of thermal engineering. Heat transfer happens whenever there is a temperature differential inside or between two media.

The uses of intensity move are different both in nature and businesses like warming, ventilating and cooling frameworks, nuclear energy stations, fridges and intensity siphons, gas detachment and liquefaction, cooling machines, warming up or chilling off of creation parts, sunlight based warm frameworks, and so on. The study of intensity move is likewise expected in thermodynamics, liquid mechanics, material science, mechine plan, and so forth. The various kinds of intensity move are typically alluded to as methods of intensity move. There are three essential systems during the time spent heat move as per which intensity can move from a high-temperature locale to a low-temperature district. All intensity move processes include at least one of these modes. The three methods of intensity move are:

- conduction;
- convection;
- radiation.

CONDUCTION

The transfer of thermal energy between particles may be conceptualized as a transfer of intrinsic energy. Whether the body is at rest or in motion, heat will always flow kinematically or by the direct influence of particles from a region of high temperature to a region of low temperature. The energy moved by conduction and the intensity move rate per unit region is corresponding to the typical temperature angle, i.e,

$$\frac{q}{A} \approx \frac{\partial T}{\partial x}.$$

At the point when the proportionality steady is presented, we have

$$q = -K A \frac{\partial T}{\partial x},$$

where q is the heat transfer rate, A is the surface area through which heat flows and $\frac{\partial T}{\partial x}$ is the temperature gradient in the direction of heat flow. The second rule of thermodynamics states that heat must travel from hotter to cooler regions, hence the positive constant K denoting the thermal conductivity of a material must be prefixed with a negative sign.

CONVECTION

Convection is the exchange of intensity energy because of the movement of warmed liquid particles. This motion occurs into a fluid or within a fluid. It cannot occur in solids due to the atoms not being able to flow freely.

We have three types of heat convections as:

- free or natural;
- forced;
- mixed.

MASS TRANSFER

Changes in the relative abundance of different species in a given environment might result in the transfer of mass. The concentration gradient aids in the speed of the mass transfer. The direction of a reacting concentration gradient is always the direction of mass transfer. Mass transfer is a common occurrence in stellar structure theories. It may be used in a broad variety of technological, engineering, and scientific applications. Common mass transfer processes may be found in the fields of electronics, architecture, aviation, metallurgy, environmental engineering, refrigeration, and manufacturing. Geophysics, astronomy, meteorology, and even the preparation of food all need an understanding of heat and mass transfer. The foundation of many biological and chemical processes is mass transfer. Oxygenation of blood, renal-functioning, osmosis,

medicine and food absorption, fog dispersion, and other biological processes are only a few examples. Chemical processes including distillation, gas absorption, solids and liquids interaction from their combination, etc. all use mass transfer applications. Mathematical analysis benefits greatly from the parallels between heat and mass transmission.

Due to the following two methods, mass transfer appears:

- (i) Diffusion mass transfer
- (ii) Convective mass transfer

(i) Mass diffusion:

Diffusion is the movement of molecules, species, or particles from one component to another to effect a change in mass. Diffusion mass transfer may be brought on by either a concentration gradient or a temperature gradient or even a pressure gradient.

(ii) Mass convection:

The dynamic property of the moving fluid frequently helps in transfer of mass from a flowing fluid to a stationary surface or between two immiscible moving fluids that are at different speeds on a moveable interface. This kind of transmission is known as convective mass transfer. The dynamic capabilities and transmission properties of the fluid are crucial. The process of convective heat transmission is identical to that of mass transfer. Convective mass transfer may be split into two types: natural or free convective mass transfer, and forced convective mass transfer.

Natural convective mass transfer occurs when species move due to density variations caused by temperature or concentration differences or mixes of varying composition, whereas forced convection mass transfer depends on external causes.

Mathematical formulation:

Over a permeable stretched sheet, we study with Micropolar magnetohydrodynamic fluid in an unstable viscous incompressible 2D mixed convection flow.

1. The fluid is in a constant condition at time $t < 0$, whereas the heat and mass fluxes are in an erratic state at time $t \geq 0$.
2. The y-axis is measured perpendicular to the s-axis, along the lengthening/shortening sheet.
3. The magnetic field strength B is applied along the y-axis (see Fig. 1).
4. Chemical processes, heat dissipation through viscous dissipation in a porous medium, and thermal radiation are all accounted for.

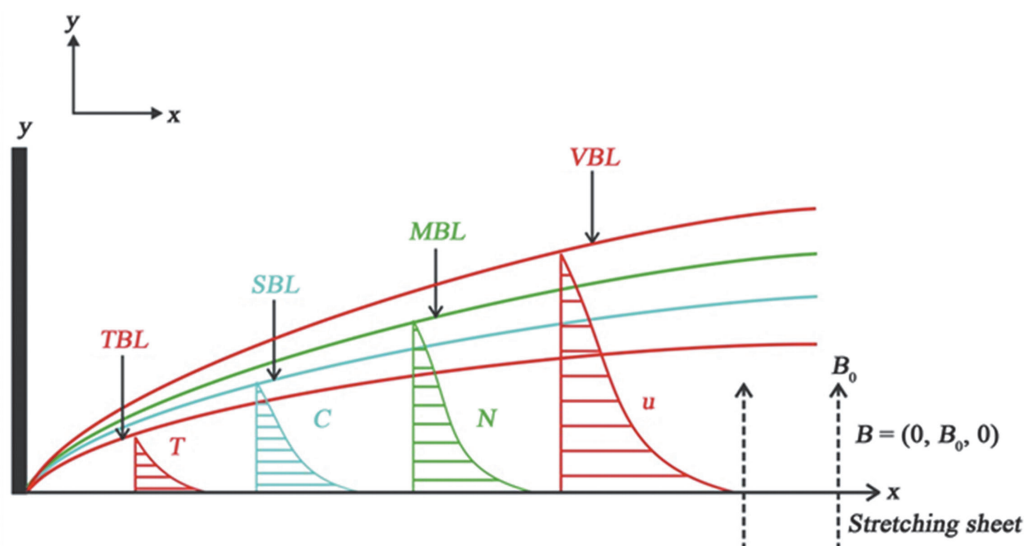


Fig. 1. Physical model of the flow

Рис. 1. Физическая модель потока

The governing equations of the flow under the aforementioned presumptions are:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \left(\frac{\mu + \kappa}{\rho} \right) \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \left(\frac{\kappa}{\rho} \right) \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\sigma B_0^2}{\rho} u - \frac{v}{\rho K_p^*} u; \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} = \frac{\gamma}{\rho j} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \frac{\kappa}{\rho j} \left(2w + \frac{\partial u}{\partial y} \right); \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\kappa}{\rho c_p} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} - \frac{1}{\rho c_p} \frac{\partial q_r}{\partial y} + \left(\frac{\mu + \kappa}{\rho c_p} \right) \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \frac{\sigma B^2}{\rho c_p} u^2 + q'''; \quad (4)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = D_m \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - kr(C - C_\infty). \quad (5)$$

Boundary conditions:

$$u = \lambda U_w(x, t), \quad v = v_w, \quad w = -\frac{1}{2} \frac{\partial u}{\partial y}, \quad T = T_w(x, t), \quad C = C_w(x, t) \quad \text{at } y = 0,$$

$$u \rightarrow 0, \quad w \rightarrow 0, \quad T \rightarrow T_\infty, \quad C \rightarrow C_\infty, \quad \text{as } y \rightarrow \infty. \quad (6)$$

The heat source or sink is not consistent, thus we obtain

$$q''' = HU_w(x, t)k / xv, \quad (7)$$

where $H = (A^*(T_w - T_\infty)f' + B^*(T - T_\infty))$; the A^* and B^* characteristics of the interior heat source/sink space change with temperature.

A positive value for A^* and a negative value for B^* indicate a heat source and a heat sink, respectively.

Rosseland diffusion approximation is used to model thermal radiation and thereby calculate the radiative heat flow.

$$q_r = -\frac{4\sigma^*}{3k^*} \frac{\partial T^4}{\partial y}, \quad (8)$$

where k^* refers Rosseland coefficient and σ^* refers constant of Stefan-Boltzman.

$$T^4 \cong 4T_\infty^3 T - 3T_\infty^4. \quad (9)$$

Invoking equations (8) and (9), equation (4) becomes

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \left(\frac{\kappa}{\rho c_p} + \frac{16T_\infty^3}{3\rho c_p k^*} \right) \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \left(\frac{\mu + \kappa}{\rho c_p} \right) \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \frac{\sigma B^2}{\rho c_p} u^2 + q'''. \quad (10)$$

The following non-dimensional variables are included in order to find a similarity solution to the issue:

$$\begin{aligned} \zeta &= \sqrt{\frac{a}{v(1-et)}} y; \quad \psi = \sqrt{\frac{va}{(1-et)}} x f(\zeta); \quad w = \sqrt{\frac{a^3}{v(1-et)^3}} x h(\zeta); \\ \theta &= \frac{T - T_\infty}{T_w - T_\infty}; \quad \phi = \frac{C - C_\infty}{C_w - C_\infty}; \quad B = \frac{B_0}{\sqrt{1-et}}; \quad kr = \frac{k_0}{(1-et)}, \end{aligned} \quad (11)$$

where $\psi(x, y)$ is the stream function specified by and ζ is the similarity variable.

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y} = U_w f'(\zeta); \quad v = -\frac{\partial \psi}{\partial x} = -\sqrt{\frac{va}{(1-et)}} f(\zeta),$$

which identically satisfies equation (1). The following set of ordinary differential equations is created using similarity variables (11), equations (2), (3), (9) and (5):

$$(1 + K) f''' + ff'' - f'^2 - \tau \left(f' + \frac{1}{2} \zeta f'' \right) + Kh' - (M + Kp) f' = 0; \quad (12)$$

$$\left(1 + \frac{K}{2}\right)h'' + \left|\frac{f}{h} \frac{f'}{h'}\right| - \tau \left(\frac{3}{2}h + \frac{1}{2}\zeta h'\right) - K(2h + f'') = 0; \quad (13)$$

$$\left(1 + \frac{4}{3}Nr\right)\theta'' + \text{Pr} \left|\frac{f}{\theta} \frac{f'}{\theta'}\right| - \text{Pr} \tau \left(\theta + \frac{1}{2}\zeta \theta'\right) + \text{Pr} Ec(1 + K)f''^2 + \text{Pr} MEcf'^2 + A^*f' + B^*\theta = 0; \quad (14)$$

$$\phi'' + Sc \left|\frac{f}{\phi} \frac{f'}{\phi'}\right| - Sc \tau \left(\phi + \frac{1}{2}\zeta \phi'\right) - Sc \gamma \phi = 0. \quad (15)$$

And we have the following boundary conditions:

$$f(0) = S, \quad f'(0) = \lambda, \quad h(0) = -\frac{1}{2}f''(0), \quad \theta(0) = 1, \quad \phi(0) = 1, \quad f'(\infty) = 0, \quad h(\infty) = 0, \\ \theta(\infty) = 0, \quad \phi(\infty) = 0, \quad (16)$$

where the parameters are specified in the following form which the notation primes denotes differentiation with respect to ζ

$$\tau = \frac{a}{e}; \quad K = \frac{\kappa}{\mu}; \quad M = \frac{\sigma B_0^2}{\rho a}; \quad K_p = \frac{\nu}{\rho K_p^* a}; \quad Gr = \frac{g\beta(T_w - T_\infty)x^2}{aU_w^3}; \quad Gc = \frac{g\beta^*(C_w - C_\infty)x^2}{\nu U_w}; \\ S = -\frac{\nu_w}{\sqrt{av}}; \quad \text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha}; \quad Ec = \frac{U_w^2}{c_p(T_w - T_\infty)}; \quad R = \frac{4\sigma T_\infty^3}{\kappa k^*}; \quad Sc = \frac{\nu}{D_m}; \quad \gamma = \frac{k_0}{a}.$$

The local heat and mass transmission rates as well as the pair stress and skin friction factors, which are:

$$C_{fx} = \frac{\tau_w|_{y=0}}{\rho U_w^2} = 2(1 + K)\text{Re}_x^{\frac{1}{2}}f''(0); \quad (17)$$

$$C_{sx} = \frac{\gamma a U_w}{\nu(1 - et)}h'(0); \quad (18)$$

$$Nu_x = -x(T_w - T_\infty)^{-1} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = -(\text{Re}_x)^{\frac{1}{2}}\theta'(0); \quad (19)$$

$$Sh_x = -x(C_w - C_\infty) \frac{\partial C}{\partial y} \Big|_{y=0} = -(\text{Re}_x)^{\frac{1}{2}}\phi'(0), \quad (20)$$

where $\text{Re}_x = \frac{U_w x}{\nu}$ is the Reynolds number.

NUMERICAL ANALYSIS

The fourth-fifth-order Runge-Kutta technique is one of the most well-known constant-step procedures. The Runge-Kutta approach, with some reasonable approximation adjustments, may achieve the precision of a Taylor Series approximation without resorting to more complex derivative computations. This technique could be seen as the ancestor of many other techniques. On the other hand, the Runge-Kutta-Fehlberg technique, which uses an adjustable step size, provides more accurate error estimates than the Runge-Kutta method, which uses a fixed step size. At each stage, the Runge-Kutta-Fehlberg approach detailed the computation using two Runge-Kutta procedures of different order (RK4 and RK5). If the differences between the two are small enough, the following stage with the same step size as before. The step size should be decreased to maintain the same level of precision. The step size is raised if the answers match to more digits of precision than are needed. Therefore, we infer that the step size is automatically organized as a recombination to the computation truncation errors in the one-step algorithm technique coupled with an adaptable step size. Nonlinear models are no match for this technique, which has been proved to function in a broad variety of other contexts, including deterministic and stochastic, linear and nonlinear, difficulties in physics, biology, and chemical processes, and so on.

A set of regular nonlinear DEs (12-15) with boundary conditions (16) is built using the Runge-Kutta Felherberg-45 process with shooting approach.

Follow the steps below to figure out how to fix the problem:

- i. The BVPs undergo a transmute to become the IVPs.
- ii. Assume suitable significant digits for η_{∞} .
- iii. Following the selection of baseline prediction values, at random, Secant method, utilized to provide further approximative results for those assessments.
- iv. Use the aforementioned approximations to compute IVP using RKF-45 approach with step variance $h = 0.001$.
- v. Iterations of the RKF-45 algorithm were performed until 10^{-6} order of convergence results was achieved.
- vi. The correct step length, represented by “h”, is determined by an iterative process in this approach.
- vii. At each stage, we generate and compare two new estimates.
- viii. The findings are used to fine-tune the step size until the results of the most recent two estimates are consistent with one another.

Applying the RK of order 4 method yields the required result for the given problem.

$$y_{m+1} = y_m + \frac{25}{216}k_1 + \frac{1408}{2565}k_3 + \frac{2197}{4104}k_4 - \frac{1}{5}k_5.$$

An improved solution may be obtained by using the R-K method of order 5:

$$y_{m+1} = y_m + \frac{16}{135}k_1 + \frac{6656}{12825}k_3 + \frac{28561}{56430}k_4 - \frac{9}{50}k_5 + \frac{2}{25}k_6.$$

The following six values are needed for each step:

$$k_1 = hf(y_k, t_k);$$

$$k_2 = hf\left(y_k + \frac{h}{4}, t_k + \frac{h}{4}, k_1\right);$$

$$k_4 = hf\left(y_k + \frac{12h}{13}, t_k + \frac{1932}{2197}k_1 - \frac{7200}{2197}\right);$$

$$k_5 = hf\left(y_k + h, t_k + \frac{439}{216}k_1 - 8k_2 + \frac{3680}{513}k_3 - \frac{845}{4104}k_4\right);$$

$$k_6 = hf\left(y_k + \frac{h}{2}, t_k - \frac{8}{27}k_1 + 2k_2 - \frac{3544}{2565}k_3 - \frac{1859}{4104}k_4 - \frac{11}{40}k_5\right)$$

This is achieved by first inserting additional variables into the coupled ODEs and converting them to first order ODEs. The R-K-F 4th-5th order technique is utilized numerically solve the system of transformed ordinary differential equations. The effects of parameters on the velocity $f'(\zeta)$ micro-rotation $h(\zeta)$, temperature $\theta(\zeta)$ and concentration $\phi(\zeta)$ profiles are analyzed. Also, we found the results based on $f''(0)$, $h'(0)$, local Nusselt number $\theta'(0)$ and local Sherwood number $\phi'(0)$. Comparison of results are shown in Table.

The Nusselt number is compared with its present results at $Pr=0.733$, $K=0.2$, $R=\delta=A^*=B^*=Kp=M=\gamma=0.0$

Число Нуссельта сравнивается с его текущими результатами при $Pr=0,733$, $K=0,2$, $R=\delta=A^*=B^*=Kp=M=\gamma=0,0$

S	Ref [39]	Current		Ref [39]	Current		Ref [39]	Current
3.0	-0.2492	-0.2493	1	-0.2492	-0.249253	0	0.8889	0.888959
3.5	0.1291	0.12916	2	0.1466	0.146611	1	0.5444	0.54445
4.0	0.4599	0.45992	3	0.4659	0.465979	2	0.1709	0.170959
4.5	0.7506	0.75069	4	0.7155	0.715571	3	0.2492	-0.249249
5.0	1.0127	1.0128	5	0.9165	0.916569	4	-0.7330	-0.733087

RESULTS AND DISCUSSIONS

The findings demonstrate the impact of the non-dimensional governing factors on the flow's velocity, microrotation, temperature, and concentration distributions, providing a clear understanding of the issue. Fig. 2–9 illustrate how the magnetic field and the permeability of the porous media affect the distributions of velocity, microrotation, temperature, and concentration in both the suction and injection cases. We infer from Fig. 2–5 that raising the magnetic parameter and the permeability of the porous media lower the velocity profile and increase the microrotation close to the boundary, and that the microrotation reverses its effect at $\zeta_{\infty}=2.0$ level, causing a drop in angular momentum. Owing to the drag force that is created when a magnetic parameter is given to an electrically conducting fluid, which causes a drop in velocity. Increased values of magnetic factor on angular momentum suggest an increasing trend, which is caused by the higher influence of stimulated Lorentz force in the non-negative x-orientation. When there is a greater disparity in speeds, the thickness of the boundary layer that corresponds to those speeds will decrease. Because of this overextension in the distribution of velocities, we can see that the velocity of the fluid surrounding the stretched sheet is lower than its velocity in the free stream. A higher value for the modified magnetic quantity is correlated to a lower value for the outside electrical profile, which in turn causes a higher value for the velocity field. In addition to this, as the boundary layer grew, there was a downward trend in the magnitude of the wall velocity gradient.

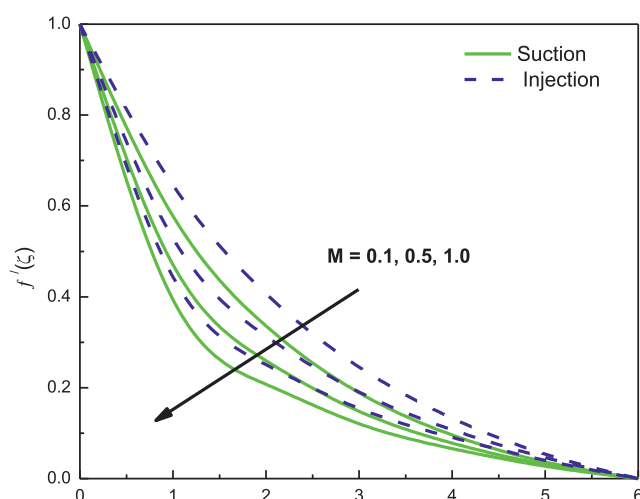


Fig. 2. The effect of M on the velocity profile

Рис. 2. Влияние величины M на профиль скорости

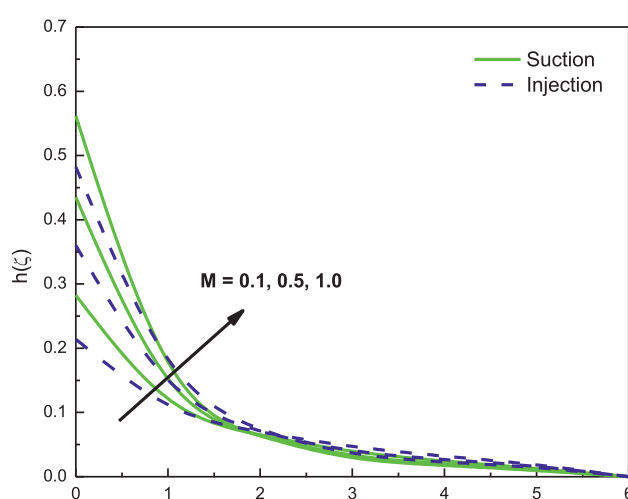


Fig. 3. The effect of M on the angular momentum profile

Рис. 3. Влияние величины M на профиль углового момента

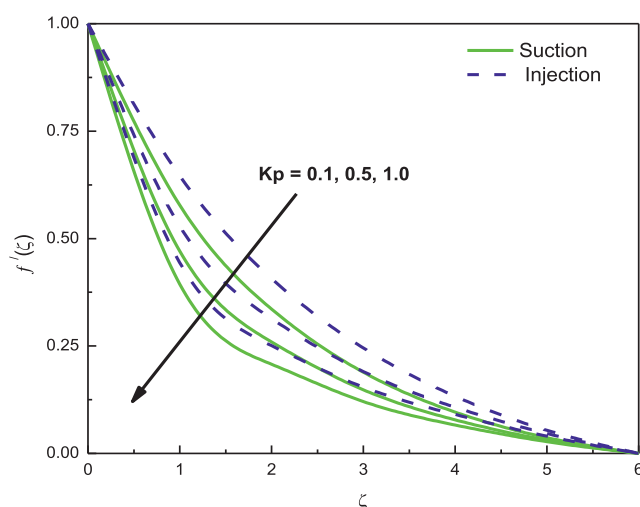


Fig. 4. The effect of K_p on the velocity profile

Рис. 4. Влияние K_p на профиль скорости

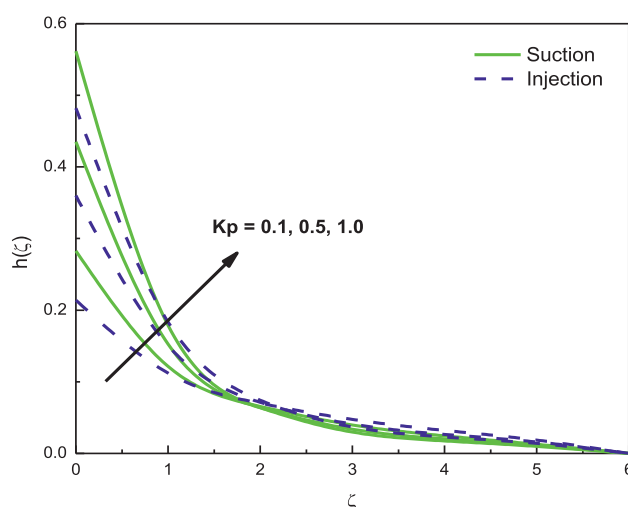


Fig. 5. The effect of K_p on the angular momentum profile

Рис. 5. Влияние K_p на профиль углового момента

Fig. 6–7 show velocity, angular momentum, and temperature distributions for the suction and injection instances, respectively, illustrating the impact of the micropolar parameter. These graphs demonstrate the relationship between the micropolar parameter and changes in velocity, angular momentum, and temperature.

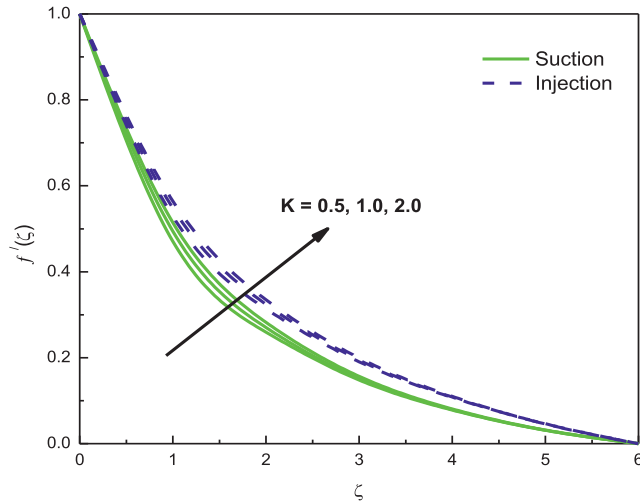


Fig. 6. The effect of K on the velocity profile
Рис. 6. Влияние K на профиль скорости

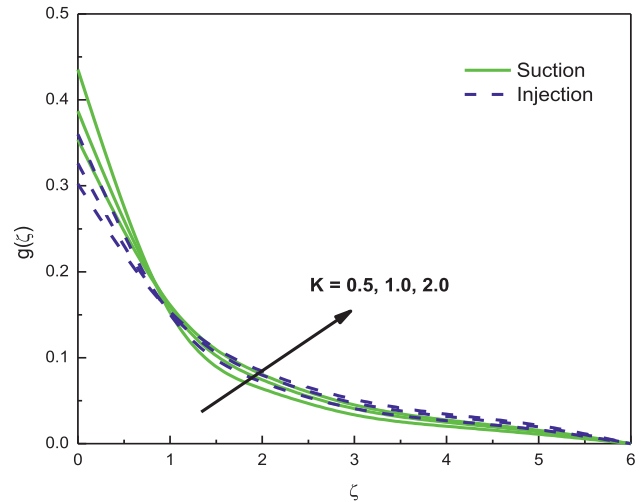


Fig. 7. The effect of K on the angular momentum profile
Рис. 7. Влияние K на профиль углового момента

In general, the angular velocity of an additional material increases as the fluid's consistency weakens. Temperature distribution during suction and injection is shown to be affected by the thermal radiation parameter in Fig. 8.

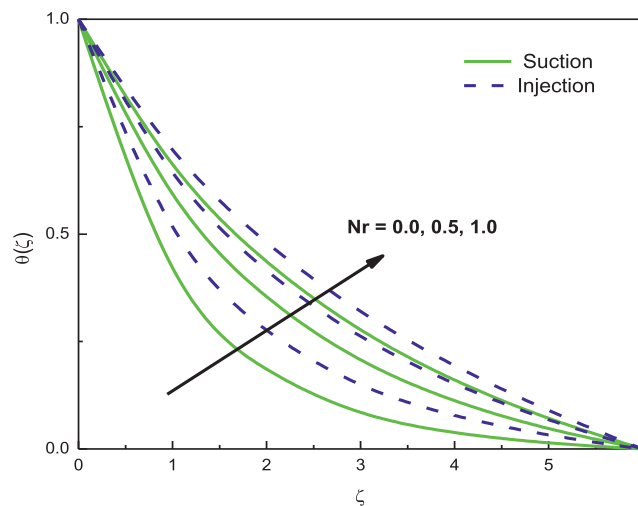


Fig. 8. The effect of Nr on the temperature profile
Рис. 8. Влияние Nr на температурный профиль

These plots show that an increase in the thermal radiation parameter results in a more optimal temperature distribution under both conditions. Both the suction and injection cases may be understood by reference to Fig. 9 and 10, which show how the Eckert number and a non-uniform heat source or sink affect temperature distributions. Statistical analysis reveals that temperature distributions benefit from non-uniform heat sources or sinks and a higher Eckert number. The Eckert number, sometimes known as Ec , does not have any dimensions in continuum mechanics. It does this by describing the connection between the kinetic energy of a flow and the enthalpy difference in the boundary layer. This gives it the ability to characterize heat

transfer dissipation. The Eckert number is a way to quantify the flow's kinetic energy in relation to the enthalpy difference between flows with high viscosity and flows that are dissipative. Fig. 5 illustrates how the Eckert amount, denoted by Ec , behaves in relation to the energy contours. Ec in the flow field increases the energy, which results in a higher fluid temperature in the fluid region due to dissipation caused by viscosity and elastic deformation. This is due to the fact that Ec in the flow field increases the energy. Because of the amount of internal friction heating that occurred between the molecules of the fluid, the quantity of mechanical energy was changed into thermal energy, and this thermal energy is now stored in the fluid. As a consequence of this, an increase in the Eckert number causes an increase in the thermal energy of the flow, which in turn causes an increase in the temperature of the fluid across the thermal boundary layer.

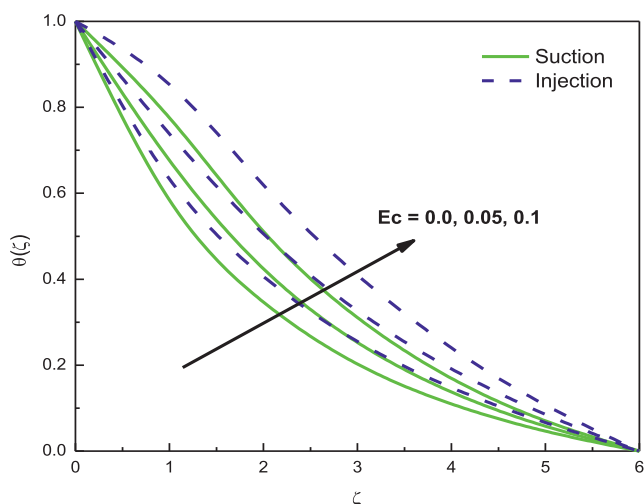


Fig. 9. The effect of Ec on the temperature profile
Рис. 9. Влияние Ec на температурный профиль

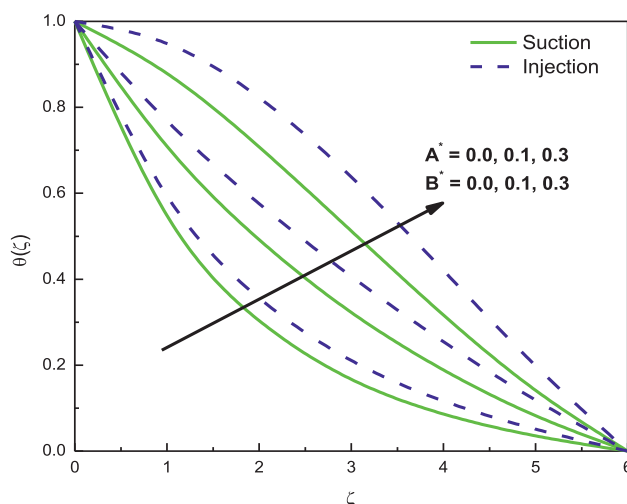


Fig. 10. The effect of points A^* and B^* on the temperature profile
Рис. 10. Влияние точек A^* и B^* на температурный профиль

Additional parameters, such as the unsteady parameter, may impact the distributions of velocities, angular velocities, temperatures, and concentrations in both suction and injection conditions, as illustrated in Fig. 11–14. When the unsteadiness parameter is raised, the graphs show rising trends in velocity, angular momentum, temperature, and concentration.

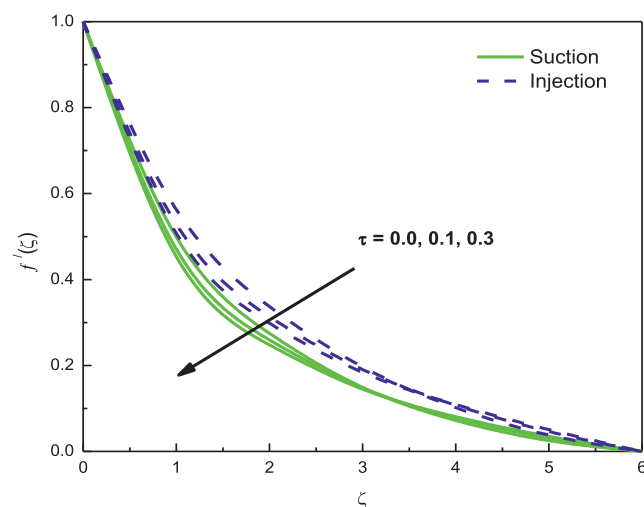


Fig. 11. The effect of τ on the velocity profile
Рис. 11. Влияние на τ профиль скорости

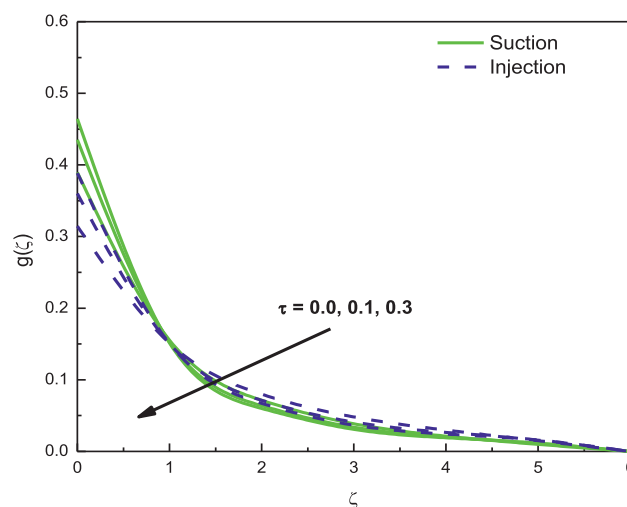


Fig. 12. The effect of τ on the angular momentum profile
Рис. 12. Влияние на τ профиль углового момента

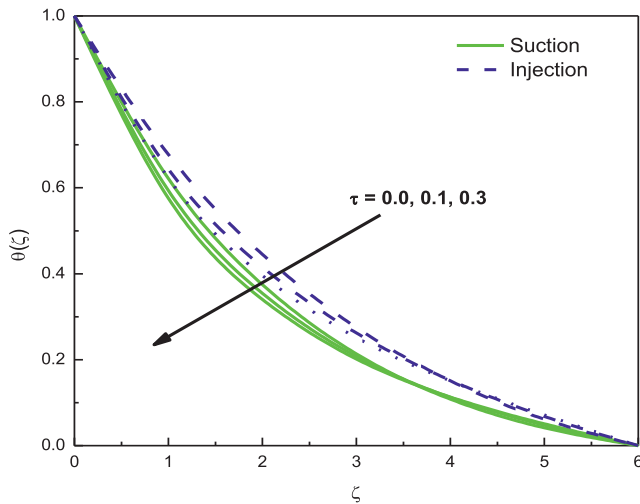


Fig. 13. The effect of τ on the temperature profile
Рис. 13. Влияние на τ температурный профиль

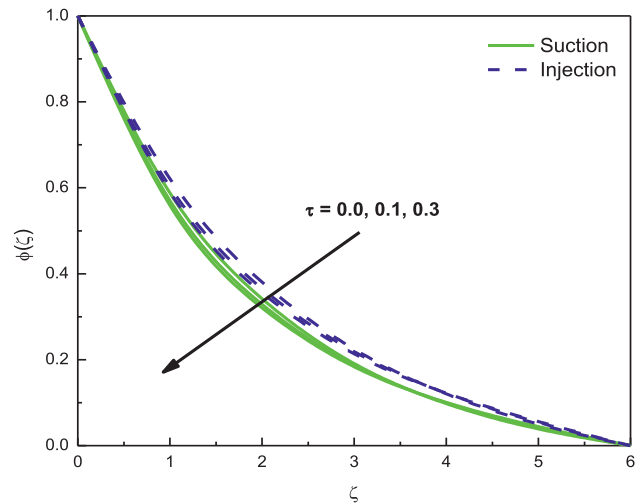


Fig. 14. The effect of τ on the concentration profile
Рис. 14. Влияние на τ профиль концентрации

Fig. 15 and 16 exhibit velocity and concentration curves for suction and injection scenarios, respectively, and illustrate the impacts of the Schmidt number and the chemical reaction parameter. As can be seen in the Fig. 15 and 16, the concentration distributions degrade with an increase in both the Schmidt number and the chemical reaction parameter. The Schmidt number, often known as Sc , is a representation of the connection between momentum and mass diffusivity. It does this by calculating the relative efficiency of momentum and mass transfer in the hydrodynamic (velocity) and concentration (species) boundary layer. The fluid's mass diffusivity is reduced as the value of the Schmidt number increases, which results in a decrease in the concentration profiles. With the typical physical behavior of the parameters of chemical reactions, which indicates that a faster rate of chemical reaction would lead to a thinner concentration boundary layer. It is deduced from the appearance of the reactive species that the solute profiles have been subjected to a destructive chemical reaction. The behavior of the destructive reaction that was caused by the positive values that were investigated in the present scenario may be explained by deriving it from the mathematical expression of the governing equation of the solute profile and examining it.

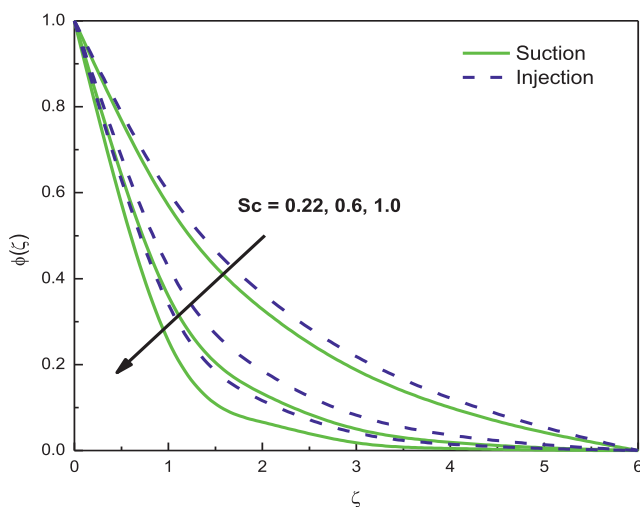


Fig. 15. The effect of Sc on the concentration profile
Рис. 15. Влияние Sc на профиль концентрации

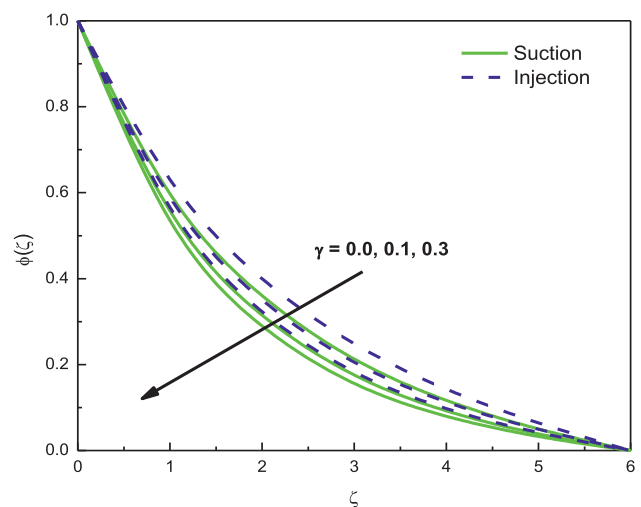


Fig. 16. The effect of γ on the concentration profile
Рис. 16. Влияние на γ профиль концентрации

When γ is increased, it can be seen that there is a corresponding drop in the concentration profile. This is due to the fact that chemical processes taking place in this system are responsible for consuming the chemical, which in turn results in a drop in the concentration profile. The tendency of the first-order chemical reaction to lessen the overshoot in the concentration profiles of the boundary layer is the most notable repercussion of the reaction's first-order status.

CONCLUSIONS

The primary conclusions of the present research are:

1. A rise in the micropolar parameter causes a decline in temperature, but an increase in speed and angular momentum.
2. In both scenarios, the temperature distribution gets better when the thermal radiation parameter is increased.
3. An increase in Eckert number and non-uniform heat source or sink characteristics both improve the temperature profiles.
4. The concentration distributions deteriorate with increasing Schmidt number and chemical reaction parameter.
5. Decreases in the thickness of the concentration boundary layer are frequently seen in conjunction with increases in the rate of chemical reaction.

References

1. Eringen A.C. Theory of micropolar fluids. *Journal of Mathematics and Mechanics*. 1966;16(1):1-18.
2. Eringen A.C. Simple microfluids. *International Journal of Engineering Science*. 1964;2(2):205-217. [http://doi.org/10.1016/0020-7225\(64\)90005-9](http://doi.org/10.1016/0020-7225(64)90005-9).
3. Sachhin S.M., Mahabaleshwar U.S., Chan A. Effect of slip and thermal gradient on micropolar nano suspension flow across a moving hydrogen fuel-cell membrane. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024;63:59-81. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.02.332>.
4. Eringen A.C. Microcontinuum field theories. In: *Foundations and solid*. New York: Springer; 1999, part. 1, p. 1-56. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-0555-5>.
5. Eringen A.C. Microcontinuum field theories. In: *Fluent media*. New York: Springer; 2001, part. II, p. 1-80.
6. Mabood F., Ibrahim S.M., Rashidi M.M., Shadloo M.S., Lorenzini G. Non-uniform heat source/sink and Soret effects on MHD non-Darcian convective flow past a stretching sheet in a micropolar fluid with radiation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016;93:674-682. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.10.014>.
7. Mabood F., Ibrahim S.M. Effects of Soret and non-uniform heat source on MHD non-Darcian convective flow over a stretching sheet in a dissipative micropolar fluid with radiation. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2016;9(5):2503-2513. <https://doi.org/10.18869/ACADPUB.JAFM.68.236.24674>.
8. Singh K., Kumar M. Effects of thermal radiation on mixed convection flow of a micropolar fluid from an unsteady stretching surface with viscous dissipation and heat generation/absorption. *International Journal of Chemical Engineering*. 2016;2016:1-10. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2016/8190234>.
9. Uddin Z., Kumar M., Harmand S. Influence of thermal radiation and heat generation/absorption on MHD heat transfer flow of a micropolar fluid past a wedge with hall and ion slip currents. *Thermal Science*. 2014;18(2):S489-S502. <https://doi.org/10.2298/TSCI110712085U>.
10. Mohamed R.A., Abo-Dahab S.M. Influence of chemical reaction and thermal radiation on the heat and mass transfer in MHD micropolar flow over a vertical moving porous plate in a porous medium with heat generation. *International Journal of Thermal Sciences*. 2009;48(9):1800-1813. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2009.01.019>.
11. Ziabakhsh Z., Domairry G., Baramnia H. Analytical solution of non-Newtonian micropolar fluid flow with uniform suction/blowing and heat generation. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2009;40(4):443-451. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2008.12.005>.
12. Mahmoud M.A.A., Waheed S.E. MHD flow and heat transfer of a micropolar fluid over a stretching surface with heat generation (absorption) and slip velocity. *Journal of the Egyptian Mathematical Society*. 2012;20(1):20-27. <https://doi.org/10.1016/j.joems.2011.12.009>.
13. Rashidi M.M., Mohimani S.A., Abbasbandy S. Analytic approximation solutions for heat transfer of a micropolar fluid through a porous medium with radiation. *Communications in Non-linear Science and Numerical Simulation*. 2011;16(4):1874-1889. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2010.08.016>.
14. Seini I.Ya., Makinde O.D. Chemically reacting Magnetohydrodynamics (MHD) boundary layer flow of heat and mass transfer past a low-heat-resistant sheet moving vertically downwards. *Scientific Research and Essays*. 2011;6(22):4762-4775.
15. Bhattacharyya K., Mukhopadhyay S., Layek G.C. Unsteady MHD boundary layer flow with diffusion and first-order chemical reaction over a permeable stretching sheet with suction or blowing. *Chemical Engineering Communication*. 2013;200(3):379-397. <https://doi.org/10.1080/00986445.2012.712577>.

16. Ibrahim F.S., Elaiw A.M., Bakr A.A. Effect of the chemical reaction and radiation absorption on the unsteady MHD free convection flow past a semi infinite vertical permeable moving plate with heat source and suction. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. 2008;13(6):1056-1066. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2006.09.007>.
17. Ravindran R., Ganapathirao M., Pop I. Effects of chemical reaction and heat generation/absorption on unsteady mixed convection MHD flow over a vertical cone with non-uniform slot mass transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014;73:743-751. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.02.053>.
18. Venkateswarlu B., Satya Narayana P.V. Chemical reaction and radiation absorption effects on the flow and heat transfer of a nanofluid in a rotating system. *Applied Nanoscience*. 2015;5(3):351-360. <https://doi.org/10.1007/s13204-014-0324-3>.
19. Pal D., Talukdar B. Perturbation analysis of unsteady magneto hydrodynamic convective heat and mass transfer in a boundary layer slip flow past a vertical permeable plate with thermal radiation and chemical reaction. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. 2010;15(7):1813-1830. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2009.07.011>.
20. Sparrow E.M., Cess R.D. The effect of a magnetic field on free convection heat transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1961;3(4):267-274. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(61\)90042-4](https://doi.org/10.1016/0017-9310(61)90042-4).
21. Chen Chien-Hsin. Combined effects of Joule heating and viscous dissipation on magnetohydrodynamic flow past a permeable, stretching surface with free convection and radiative heat transfer. *ASME Journal of Heat and Mass Transfer*. 2010;132(6):064503. <https://doi.org/10.1115/1.4000946>.
22. Pal D., Talukdar B. Combined effects of Joule heating and chemical reaction on unsteady magnetohydrodynamic mixed convection of viscous dissipating fluid over a vertical plate in porous media with thermal radiation. *Mathematical and Computer Modelling*. 2011;54(11-12):3016-3036. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2011.07.030>.
23. Maheswari C., Ramana R.M., Shaw S.M., Dharmaiah G., Noeiaghdam S. Numerical investigation on MHD forchheimer flow of $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-H}_2\text{O}$, $\text{Cu-H}_2\text{O}$ and $\text{Ag-H}_2\text{O}$ nanofluids over permeable stretching sheet with radiation. *Results in Engineering*. 2023;18:101194. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101194>.
24. Guled C.N., Tawade J.V., Kumam P., Noeiaghdam S., Maharudrappa I., Chithra S.M., et al. The heat transfer effects of MHD slip flow with suction and injection and radiation over a shrinking sheet by optimal homotopy analysis method. *Results in Engineering*. 2023;18:101173. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101173>.
25. Dharmaiah G., Rama Prasad J.L., Balamurugan K.S., Nurhidayat I., Fernandez-Gamiz U., Noeiaghdam S. Performance of magnetic dipole contribution on ferromagnetic non-Newtonian radiative MHD blood flow: an application of biotechnology and medical sciences. *Heliyon*. 2023;9(2):e13369. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13369>.
26. Manvi B., Tawade J., Biradar M., Noeiaghdam S., Fernandez-Gamiz U., Govindan V. The effects of MHD radiating and non-uniform heat source/sink with heating on the momentum and heat transfer of Eyring-Powell fluid over a stretching. *Results in Engineering*. 2022;14:100435. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100435>.
27. Arulmozhi S., Sukkiramathi K., Santra S.S., Edwan R., Fernandez-Gamiz U., Noeiaghdam S. Heat and mass transfer analysis of radiative and chemical reactive effects on MHD nanofluid over an infinite moving vertical plate. *Results in Engineering*. 2022;14:100394. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100394>.
28. Morozova A.S., Vilchevskaya E.N., Müller W.H., Bessonov N.M. Interrelation of heat propagation and angular velocity in micropolar media: studies on socio-ecological systems vulnerability, resilience and governance. *Climate Change and Coastal Resources in Tanzania*. 2019;413-425. https://doi.org/10.1007/978-3-030-11665-1_23.
29. Nowacki W. Theory of asymmetric elasticity. Oxford, New York, Toronto, Sydney, Paris, Frankfurt: Pergamon Press; 1986, 383 p.
30. Zubov L.M. *Nonlinear theory of dislocations and disclinations in elastic bodies*. Berlin-Heidelberg-New York: Springer-Verlag; 1997, 205 p.
31. Lurie S., Belov P., Volkov-Bogorodsky D., Tuchkova N. Nanomechanical modeling of the nanostructures and dispersed composites. *Computational Materials Science*. 2003;28(3-4):529-539. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2003.08.010>.
32. Vajravelu K. 2001. Viscous flow over a nonlinearly stretching sheet. *Applied Mathematics and Computation*. 2001;124(3):281-288. [https://doi.org/10.1016/S0096-3003\(00\)00062-X](https://doi.org/10.1016/S0096-3003(00)00062-X).
33. Cortell R. MHD flow and mass transfer of an electrically conducting fluid of second grade in a porous medium over a stretching sheet with chemically reactive species. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 2007;46(8):721-728. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2006.09.008>.
34. Cortell R. Viscous flow and heat transfer over a nonlinearly stretching sheet. *Applied Mathematics and Computation*. 2007;184(2):864-873. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2006.06.077>.
35. Raptis A., Perdikis C. Viscous flow over a non-linearly stretching sheet in the presence of a chemical reaction and magnetic field. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2006;41(4):527-529. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2005.12.003>.
36. Abbas Z., Hayat T. Radiation effects on MHD flow in a porous space. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2008;51(5-6):1024-1033. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.05.031>.
37. Cortell R. Effects of viscous dissipation and radiation on the thermal boundary layer over a nonlinearly stretching sheet. *Physics Letters, Section A*. 2008;372(5):631-636. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2007.08.005>.

38. Kechil S.A., Hashim I. Series solution of flow over nonlinearly stretching sheet with chemical reaction and magnetic field. *Physics Letters A*. 2008;372(13):2258-2263. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2007.11.027>.
39. Sandeep N., Sulochana C. Dual solutions for unsteady mixed convection flow of MHD micropolar fluid over a stretching/shrinking sheet with non-uniform heat source/sink. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2015;18(4):738-745. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2015.05.006>.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Eringen A.C. Theory of micropolar fluids // *Journal of Mathematics and Mechanics*. 1966. Vol. 16. No. 1. P. 1–18.
2. Eringen A.C. Simple microfluids // *International Journal of Engineering Science*. 1964. Vol. 2. Iss. 2. P. 205–217. [http://doi.org/10.1016/0020-7225\(64\)90005-9](http://doi.org/10.1016/0020-7225(64)90005-9).
3. Sachhin S.M., Mahabaleswar U.S., Chan A. Effect of slip and thermal gradient on micropolar nano suspension flow across a moving hydrogen fuel-cell membrane // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 63. P. 59–81. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.02.332>.
4. Eringen A.C. Microcontinuum field theories // *Foundations and solid*. New York: Springer, 1999. Part. 1. P. 1–56. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-0555-5>.
5. Eringen A.C. Microcontinuum field theories // *Fluent media*. New York: Springer, 2001. Part. II. P. 1–80.
6. Mabood F., Ibrahim S.M., Rashidi M.M., Shadloo M.S., Lorenzini G. Non-uniform heat source/sink and Soret effects on MHD non-Darcian convective flow past a stretching sheet in a micropolar fluid with radiation // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016. Vol. 93. P. 674–682. <https://doi.org/10.1016/j.jheatmasstransfer.2015.10.014>.
7. Mabood F., Ibrahim S.M. Effects of Soret and non-uniform heat source on MHD non-Darcian convective flow over a stretching sheet in a dissipative micropolar fluid with radiation // *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2016. Vol. 9. No. 5. P. 2503–2513. <https://doi.org/10.18869/ACADPUB.JAFM.68.236.24674>.
8. Singh K., Kumar M. Effects of thermal radiation on mixed convection flow of a micropolar fluid from an unsteady stretching surface with viscous dissipation and heat generation/absorption // *International Journal of Chemical Engineering*. 2016. Vol. 2016. P. 1–10. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2016/8190234>.
9. Uddin Z., Kumar M., Harmand S. Influence of thermal radiation and heat generation/absorption on MHD heat transfer flow of a micropolar fluid past a wedge with hall and ion slip currents // *Thermal Science*. 2014. Vol. 18. Iss. 2. P. S489–S502. <https://doi.org/10.2298/TSCI110712085U>.
10. Mohamed R.A., Abo-Dahab S.M. Influence of chemical reaction and thermal radiation on the heat and mass transfer in MHD micropolar flow over a vertical moving porous plate in a porous medium with heat generation // *International Journal of Thermal Sciences*. 2009. Vol. 48. Iss. 9. P. 1800–1813. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2009.01.019>.
11. Ziabakhsh Z., Domairry G., Bararnia H. Analytical solution of non-Newtonian micropolar fluid flow with uniform suction/blowing and heat generation // *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2009. Vol. 40. Iss. 4. P. 443–451. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2008.12.005>.
12. Mahmoud M.A.A., Waheed S.E. MHD flow and heat transfer of a micropolar fluid over a stretching surface with heat generation (absorption) and slip velocity // *Journal of the Egyptian Mathematical Society*. 2012. Vol. 20. Iss. 1. P. 20–27. <https://doi.org/10.1016/j.joems.2011.12.009>.
13. Rashidi M.M., Mohimanian S.A., Abbasbandy S. Analytic approximation solutions for heat transfer of a micropolar fluid through a porous medium with radiation // *Communications in Non-linear Science and Numerical Simulation*. 2011. Vol. 16. Iss. 4. P. 1874–1889. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2010.08.016>.
14. Seini I.Ya., Makinde O.D. Chemically reacting Magnetohydrodynamics (MHD) boundary layer flow of heat and mass transfer past a low-heat-resistant sheet moving vertically downwards // *Scientific Research and Essays*. 2011. Vol. 6. Iss. 22. P. 4762–4775.
15. Bhattacharyya K., Mukhopadhyay S., Layek G.C. Unsteady MHD boundary layer flow with diffusion and first-order chemical reaction over a permeable stretching sheet with suction or blowing // *Chemical Engineering Communication*. 2013. Vol. 200. Iss. 3. P. 379–397. <https://doi.org/10.1080/00986445.2012.712577>.
16. Ibrahim F.S., Elaiw A.M., Bakr A.A. Effect of the chemical reaction and radiation absorption on the unsteady MHD free convection flow past a semi infinite vertical permeable moving plate with heat source and suction // *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. 2008. Vol. 13. Iss. 6. P. 1056–1066. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2006.09.007>.
17. Ravindran R., Ganapathirao M., Pop I. Effects of chemical reaction and heat generation/absorption on unsteady mixed convection MHD flow over a vertical cone with non-uniform slot mass transfer // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014. Vol. 73. P. 743–751. <https://doi.org/10.1016/j.jheatmasstransfer.2014.02.053>.
18. Venkateswarlu B., Satya Narayana P.V. Chemical reaction and radiation absorption effects on the flow and heat transfer of a nanofluid in a rotating system // *Applied Nanoscience*. 2015. Vol. 5. Iss. 3. P. 351–360. <https://doi.org/10.1007/s13204-014-0324-3>.
19. Pal D., Talukdar B. Perturbation analysis of unsteady magneto hydrodynamic convective heat and mass transfer in a boundary layer slip flow past a vertical permeable plate with thermal radiation and chemical reaction // *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. 2010. Vol. 15. Iss. 7. P. 1813–1830. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2009.07.011>.

20. Sparrow E.M., Cess R.D. The effect of a magnetic field on free convection heat transfer // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1961. Vol. 3. Iss. 4. P. 267–274. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(61\)90042-4](https://doi.org/10.1016/0017-9310(61)90042-4).
21. Chen Chien-Hsin. Combined effects of Joule heating and viscous dissipation on magnetohydrodynamic flow past a permeable, stretching surface with free convection and radiative heat transfer // *ASME Journal of Heat and Mass Transfer*. 2010. Vol. 132. Iss. 6. P. 064503. <https://doi.org/10.1115/1.4000946>.
22. Pal D., Talukdar B. Combined effects of Joule heating and chemical reaction on unsteady magnetohydrodynamic mixed convection of viscous dissipating fluid over a vertical plate in porous media with thermal radiation // *Mathematical and Computer Modelling*. 2011. Vol. 54. Iss. 11-12. P. 3016–3036. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2011.07.030>.
23. Maheswari C., Ramana R.M., Shaw S.M., Dharmaiah G., Noeiaghdam S. Numerical investigation on MHD forchheimer flow of $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-H}_2\text{O}$, $\text{Cu-H}_2\text{O}$ and $\text{Ag-H}_2\text{O}$ nanofluids over permeable stretching sheet with radiation // *Results in Engineering*. 2023. Vol. 18. P. 101194. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101194>.
24. Guled C.N., Tawade J.V., Kumam P., Noeiaghdam S., Maharudrappa I., Chithra S.M., et al. The heat transfer effects of MHD slip flow with suction and injection and radiation over a shrinking sheet by optimal homotopy analysis method // *Results in Engineering*. 2023. Vol. 18. P. 101173. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101173>.
25. Dharmaiah G., Rama Prasad J.L., Balamurugan K.S., Nurhidayat I., Fernandez-Gamiz U., Noeiaghdam S. Performance of magnetic dipole contribution on ferromagnetic non-Newtonian radiative MHD blood flow: an application of biotechnology and medical sciences // *Heliyon*. 2023. Vol. 9. Iss. 2. P. e13369. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13369>.
26. Manvi B., Tawade J., Biradar M., Noeiaghdam S., Fernandez-Gamiz U., Govindan V. The effects of MHD radiating and non-uniform heat source/sink with heating on the momentum and heat transfer of Eyring-Powell fluid over a stretching // *Results in Engineering*. 2022. Vol. 14. 100435. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100435>.
27. Arulmozhi S., Sukkiramathi K., Santra S.S., Edwan R., Fernandez-Gamiz U., Noeiaghdam S. Heat and mass transfer analysis of radiative and chemical reactive effects on MHD nanofluid over an infinite moving vertical plate // *Results in Engineering*. 2022. Vol. 14. P. 100394. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100394>.
28. Morozova A.S., Vilchevskaya E.N., Müller W.H., Bessonov N.M. Interrelation of heat propagation and angular velocity in micropolar media: studies on socio-ecological systems vulnerability, resilience and governance // *Climate Change and Coastal Resources in Tanzania*. 2019. P. 413–425. https://doi.org/10.1007/978-3-030-11665-1_23.
29. Nowacki W. *Theory of asymmetric elasticity*. Oxford, New York, Toronto, Sydney, Paris, Frankfurt: Pergamon Press, 1986. 383 p.
30. Zubov L.M. *Nonlinear theory of dislocations and disclinations in elastic bodies*. Berlin-Heidelberg-New York: Springer-Verlag, 1997. 205 p.
31. Lurie S., Belov P., Volkov-Bogorodsky D., Tuchkova N. Nanomechanical modeling of the nanostructures and dispersed composites // *Computational Materials Science*. 2003. Vol. 28. Iss. 3-4. P. 529–539. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2003.08.010>.
32. Vajravelu K. 2001. Viscous flow over a nonlinearly stretching sheet // *Applied Mathematics and Computation*. 2001. Vol. 124. Iss. 3. P. 281–288. [https://doi.org/10.1016/S0096-3003\(00\)00062-X](https://doi.org/10.1016/S0096-3003(00)00062-X).
33. Cortell R. MHD flow and mass transfer of an electrically conducting fluid of second grade in a porous medium over a stretching sheet with chemically reactive species // *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 2007. Vol. 46. Iss. 8. P. 721–728. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2006.09.008>.
34. Cortell R. Viscous flow and heat transfer over a nonlinearly stretching sheet // *Applied Mathematics and Computation*. 2007. Vol. 184. Iss. 2. P. 864–873. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2006.06.077>.
35. Raptis A., Perdikis C. Viscous flow over a non-linearly stretching sheet in the presence of a chemical reaction and magnetic field // *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2006. Vol. 41. Iss. 4. P. 527–529. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2005.12.003>.
36. Abbas Z., Hayat T. Radiation effects on MHD flow in a porous space // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2008. Vol. 51. Iss. 5-6. P. 1024–1033. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.05.031>.
37. Cortell R. Effects of viscous dissipation and radiation on the thermal boundary layer over a nonlinearly stretching sheet // *Physics Letters A*. 2008. Vol. 372. Iss. 5. P. 631–636. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2007.08.005>.
38. Kechil S.A., Hashim I. Series solution of flow over nonlinearly stretching sheet with chemical reaction and magnetic field // *Physics Letters A*. 2008. Vol. 372. Iss. 13. P. 2258–2263. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2007.11.027>.
39. Sandeep N., Sulochana C. Dual solutions for unsteady mixed convection flow of MHD micropolar fluid over a stretching/shrinking sheet with non-uniform heat source/sink // *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2015. Vol. 18. Iss. 4. P. 738–745. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2015.05.006>.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Gurram Dharmaiah,
PhD (Math.),
Department of Mathematics,
Narasaraopeta Engineering College,
Yellamanda, Narasaraopet, A.P, 522601, India
dharma.g2007@gmail.com

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дхармаях Гуррам,
PhD (математика),
Отделение математики,
инженерный колледж Нарасараопета,
Йелламанда, Нарасараопет, А.Р.,
522601, Индия
dharma.g2007@gmail.com

Denis N. Sidorov,
Dr. Sci. (Phys.-Math.),
Professor of the Russian Academy of Sciences,
Chief Researcher,
Applied Mathematics Department,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia;
Professor of the Industrial Mathematics Laboratory
of the Baikal School of BRICS,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
contact.dns@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-3131-1325>

Samad Noeiaghdam,
PhD (Applied Math.),
Leading Researcher of Industrial Mathematics
Laboratory
of the Baikal School of BRICS,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
Senior Researcher of the Department of Applied
Mathematics and Programming
South Ural State University,
76 Lenin Prospect, Chelyabinsk 454080, Russia;
✉ snoei@istu.edu; noiagdams@susu.ru

Vitaliy P. Panov,
PhD (Phys.)
Professor of the Laboratory of Display Devices and
Materials Laboratory,
Sungkyunkwan University,
Seoul 2066, South Korea
petrovich75@list.ru

Сидоров Денис Николаевич,
д-р ф.-м. наук, профессор РАН,
главный научный сотрудник
Отдела прикладной математики,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия;
профессор Лаборатории промышленной
математики БИ БРИКС,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
contact.dns@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-3131-1325>

Самад Нойягдам,
PhD (прикладная математика),
ведущий научный сотрудник лаборатории
промышленной математики,
БИ БРИКС,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
г. Иркутск, 664074, ул. Лермонтова, 83, Россия;
старший научный сотрудник кафедры прикладной
математики и программирования,
Южно-Уральский государственный университет,
454080, г. Челябинск, просп. Ленина, 76, Россия
✉ snoei@istu.edu; noiagdams@susu.ru

Панов Виталий Петрович,
PhD (физика),
профессор лаборатории дисплейных устройств
и материалов,
Университет Сунгкюнкван, 2066
г. Сеул, Южная Корея
petrovich75@list.ru

Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

Denis N. Sidorov has been a member of the editorial board of the iPolytech Journal since 2021, but he 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 14.03.2024; approved after reviewing 25.04.2024; accepted for publication 01.05.2024.

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Сидоров Д.Н. является членом редакционной коллегии журнала «iPolytech Journal» с 2021 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 14.03.2024 г.; одобрена после рецензирования 25.04.2024 г.; принята к публикации 01.05.2024 г.



Применение нейросетевой модели для прогнозирования температуры изолированных проводов воздушных линий

А.А. Келембет^{1✉}, А.Я. Бигун²

¹Омский государственный технический университет, Омск, Россия

²Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

Резюме. Целью работы является разработка нейросетевой модели на основе кривых нагрева и охлаждения изолированных проводов воздушных линий при изменении скорости ветра и его направления относительно оси провода, полученных экспериментальным путем. Объектом исследований выступают изолированные провода воздушных линий марки СИП-3. Для моделирования нагрева и охлаждения изолированного провода при разных скоростях ветра и его направлении была использована нейросетевая модель на основе многослойного перцептрона. В качестве критерия оценки результатов прогнозирования температуры жилы и изоляции провода была принята средняя абсолютная ошибка. Приведены основные параметры разработанной нейросетевой модели: количество скрытых слоев и нейронов в каждом из скрытых слоев, степень регуляции и регулирующая жесткость модели. По результатам моделирования построены прогнозируемые кривые нагрева и охлаждения изолированных проводов, которые в дальнейшем были сравнены с кривыми, полученными в ходе экспериментальных исследований. Получены следующие значения средней абсолютной ошибки: для прогнозируемой температуры жилы средняя абсолютная ошибка составила 1,74 °С, а для прогнозируемой температуры изоляции – 4,08 °С. Установлено, что разность между кривыми нагрева при малых скоростях ветра находится в пределах 9 °С. Показано, что при увеличении скорости ветра разность между кривыми уменьшается. Таким образом, анализ полученных результатов показал, что для повышения точности прогнозирования при помощи нейросетевой модели требуется более широкий перечень входящих параметров для обучения модели. Только в таком случае разность между экспериментальными данными и полученными при помощи разрабатываемой модели может составить менее 5%.

Ключевые слова: нейросетевая модель, изолированные провода, воздушная линия, влияние погодных условий, прогнозирование параметров линий электропередачи

Для цитирования: Келембет А.А., Бигун А.Я. Применение нейросетевой модели для прогнозирования температуры изолированных проводов воздушных линий // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 3. С. 453–461. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-453-461>. EDN: NBWEBZ.

POWER ENGINEERING

Original article

A neural network model for predicting the temperature of insulated overhead lines

Aleksandr A. Kelembet^{1✉}, Aleksandr Ya. Bigun²

¹Omsk State Technical University, Omsk, Russia

²Surgut State University, Surgut, Russia

Abstract. In this work, we develop a neural network model based on experimental heating and cooling curves of insulated wires of overhead lines under changes in wind speed and its direction relative to the wire axis. Insulated SIP-3 wire used in overhead lines was investigated. A multilayer perceptron neural network was employed to model the process of heating and cooling of insulated wire under changes in wind speed and its direction. The average absolute error was taken as a criterion for evaluating the prediction accuracy of wire core and insulation temperatures. The main parameters of the developed neural network model include the number of hidden layers and neurons in each hidden layer, the degree of regulation, and the regulatory rigidity of the model. The modelled heating and cooling curves of insulated wire were compared with those obtained experimentally. The average absolute error was equal to 1.74 and –4.08 °C for the predicted core and insulation temperatures, respectively. The difference between the heating curves at low wind speeds was found to range within 9 °C. It was shown that an increase in wind speed

leads to a decrease in the difference between the curves. Our analysis showed that neural network models used for predicting variations in the temperature of insulated overhead lines should be trained using a larger number of input parameters. This is the main prerequisite for high prediction accuracy of such models, when the difference between the simulated and experimental data does not exceed 5%.

Keywords: neural network model, insulated conductors, overhead power line, influence of weather conditions, forecasting power line parameters

For citation: Kelembet A.A., Bigun A.Ya. A neural network model for predicting the temperature of insulated overhead lines. *iPolytech Journal*. 2024;28(3):453-461. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-453-461>. EDN: NBWEBZ.

ВВЕДЕНИЕ

Спрос на электроэнергию неуклонно растет, эта тенденция будет поддерживаться в следующие десятилетия. Электроснабжение становится все более важным в связи с современными потребностями развития общества [1–9]. Различные факторы, такие как старение существующих электрических сетей, увеличение нагрузки [16], включение возобновляемых источников энергии [1, 3, 4], растущий спрос на электромобили [9], децентрализация и гибкость энергосистемы, критично влияют на системы передачи электроэнергии. На сегодняшний день темпы строительства новых линий электропередачи значительно отстают от темпов роста потребления электроэнергии, поэтому возникает необходимость увеличения пропускной способности существующих линий электропередачи³ [5–11, 19]. Пропускная способность линий электропередачи ограничивается различными условиями, такими как провис провода, ограничения длительно допустимой температуры провода, устойчивость, уровень напряжения [2]. Последние два фактора относятся к требованиям надежности.

Одним из многочисленных подходов к повышению пропускной способности воздушных линий (ВЛ) электропередачи является метод, учитывающий влияние климатических факторов на их температуру [12–17]. В основе данного метода лежит зависимость активного сопротивления провода и потерь активной мощности от температуры провода. При эксплуатации ВЛ при различных климатических условиях возможный уровень загрузки линии по условиям нагрева может отличаться. Существует несколько подходов для решения поставленной задачи.

Для оценки нагрева провода могут использоваться различные системы мониторинга, главным недостатком данных систем

являются большие финансовые вложения, связанные с монтажом и эксплуатацией оборудования. Также для оценки и прогнозирования температуры проводов используются расчетные методы (для стационарных и нестационарных режимов), но для их верификации требуются экспериментальные данные. Проведению таких экспериментальных исследований посвящено значительное количество работ [18–20]. В последнее время набирает популярность нейросетевое моделирование. Искусственные нейронные сети способны обрабатывать и анализировать огромные объемы данных, и уже используются во многих областях науки. Одним из возможных применений нейросетового моделирования является прогнозирование. Исходными данными при прогнозировании являются, как правило, результаты измерений. При помощи нейронных сетей возможно моделирование нелинейной зависимости будущего значения величины от его прошлых значений и от значений внешних факторов.

Представляет интерес применение метода нейросетового моделирования для прогнозирования температуры провода воздушной линии с учетом погодных условий.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим применение искусственной нейронной сети для прогнозирования температуры жилы и изоляции провода СИП-3.

Для задачи прогнозирования температуры жилы и изоляции провода СИП-3 была выбрана нейронная сеть на основе MLP (от англ. Multilayer Perceptron). MLP – это разновидность искусственных нейронных сетей, которые часто используются для задач регрессии благодаря их гибкости и способности моделировать сложные зависимости между признаками [10].

Характеристики используемой сети для прогнозирования параметров провода СИП-

³Conductors for the uprating of existing overhead lines // B2 Overhead lines. Paris, 2019. 244 p. Режим доступа: <https://www.e-cigre.org/publications/detail/763-conductors-for-the-uprating-of-existing-overhead-lines.html> (дата обращения: 25.04.2024).

3 показаны на рис. 1. Входными параметрами выступают следующие величины: ток нагрузки, скорость ветра, длительность нагрева и угол направления ветра; на выходе мы получаем температуру жилы и температуру изоляции.

Данные, используемые для обучения и тестирования нейронной сети, были получены из эксперимента [13], в ходе данного эксперимента было проведено исследование влияния ветра на нагрев и охлаждение изолированного провода СИП-3 сечением 16 мм². В ходе экспериментальных исследований проводилось более трех измерений при одинаковых условиях на временном интервале 30 мин, затем производилось усреднение полученных данных. Погрешность измерений не превышала 6%. Наибольший интерес вызывает интервал времени от 0 до 10 мин, так как в нем происходит наиболее интенсивное изменение температуры провода. Усредненные значения в интересующем интервале представлены в работе [11].

Подготовив экспериментальные данные, они были разделены на обучающие и тестовые выборки. После этого данные нормализуются с помощью StandartScaler (инструмент библиотеки Scikit-learn, предназначенный для нормализации данных) и переводятся в формат тензоров PyTorch, что

необходимо для работы с нейронной сетью. В роли оптимизатора модели выбран SGD (от англ. Stochastic Gradient Descent), а для оценки качества прогнозирования модели взята средняя абсолютная ошибка MAE (от англ. Minimum Absolute Error).

Средняя абсолютная ошибка рассчитывается следующим образом:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - y'_i|, \quad (1)$$

где N – число примеров обучающей выборки, y_i – целевое значение i -го примера, y'_i – предсказанное моделью значение.

Количество слоев: 6.

Количество нейронов в скрытых слоях: 5.

Количество нейронов в выходящем слое: 1.

Минимального отклонения удалось достичь при количестве эпох обучения сети равным 10000. На каждой эпохе модель делает прогноз, основанный на обучающих данных, вычисляются градиенты ошибок прогнозирования и используются для обновления весов модели. Для теста нейросети были выбраны следующие сценарии:

1) изменение температуры жилы и температуры изоляции при увеличении токовой нагрузки:

– угол направления ветра относительно оси провода – 50°;

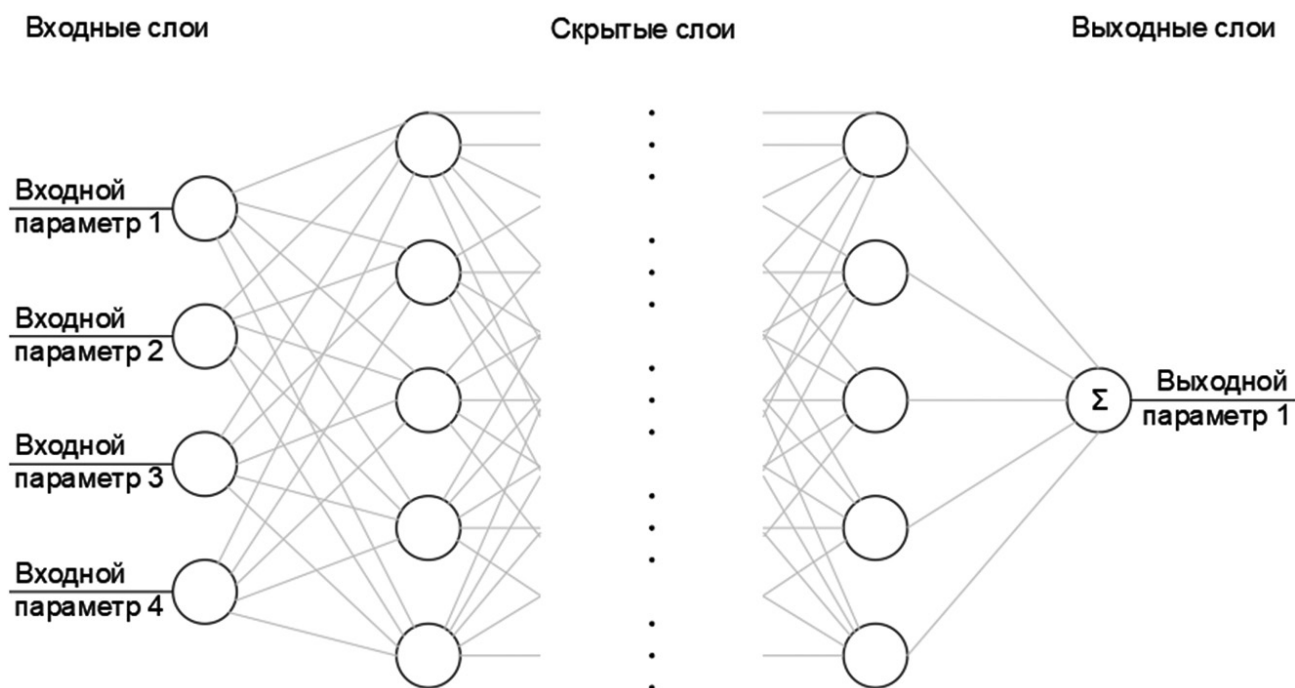


Рис. 1. Структура нейросети, используемой для прогнозирования температур жилы и изоляции провода СИП-3
 Fig. 1. The structure of the neural network used to predict the temperatures of the SIP-3 wire core and insulation

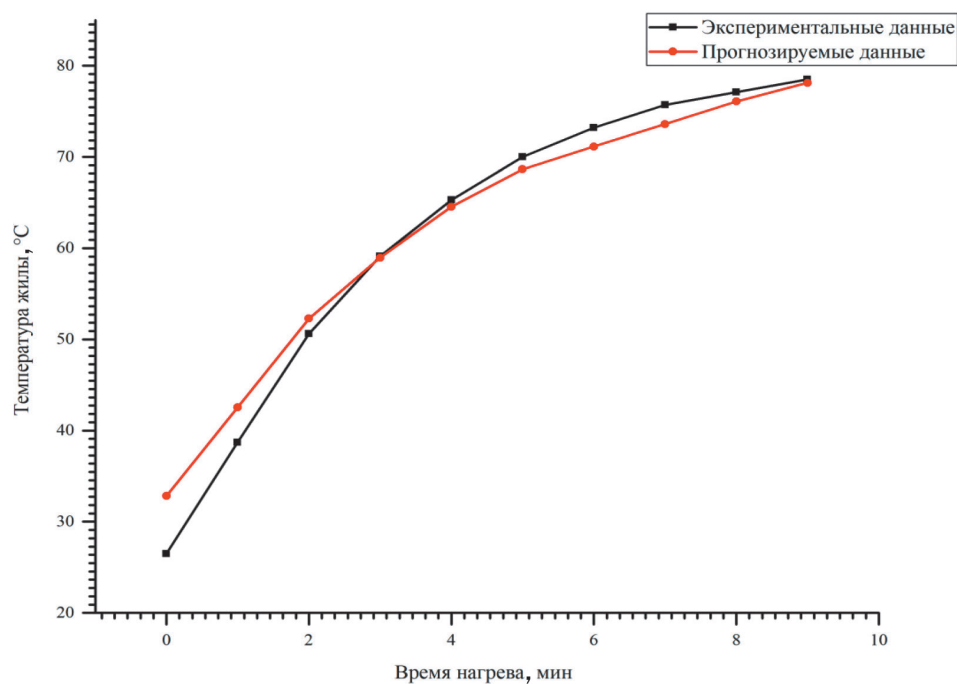


Рис. 2. Изменение температуры жилы при увеличении токовой нагрузки от 13 А до 130 А ($u = 0,6$ м/с, $\alpha = 50^\circ$)

Fig. 2. Core temperature variation when current load increases from 13 A to 130 A ($u = 0.6$ m/s, $\alpha = 50^\circ$)

- токовая нагрузка – 13–130 А;
- время нагрева – 9 мин;
- скорость ветра – 0,6 м/с.

Стоит отметить некоторые допущения исследования: изменение тока в исследуемой сети происходило мгновенно (переходные процессы в сети по времени крайне малы и

их можно не учитывать) от значения 13 А до 130 А, температура окружающего воздуха при проведении исследования оставалась постоянной, угол атаки и скорость ветра во время нагрева не изменялись. Экспериментальные и прогнозируемые нейронной сетью параметры провода представлены на рис. 2, 3.

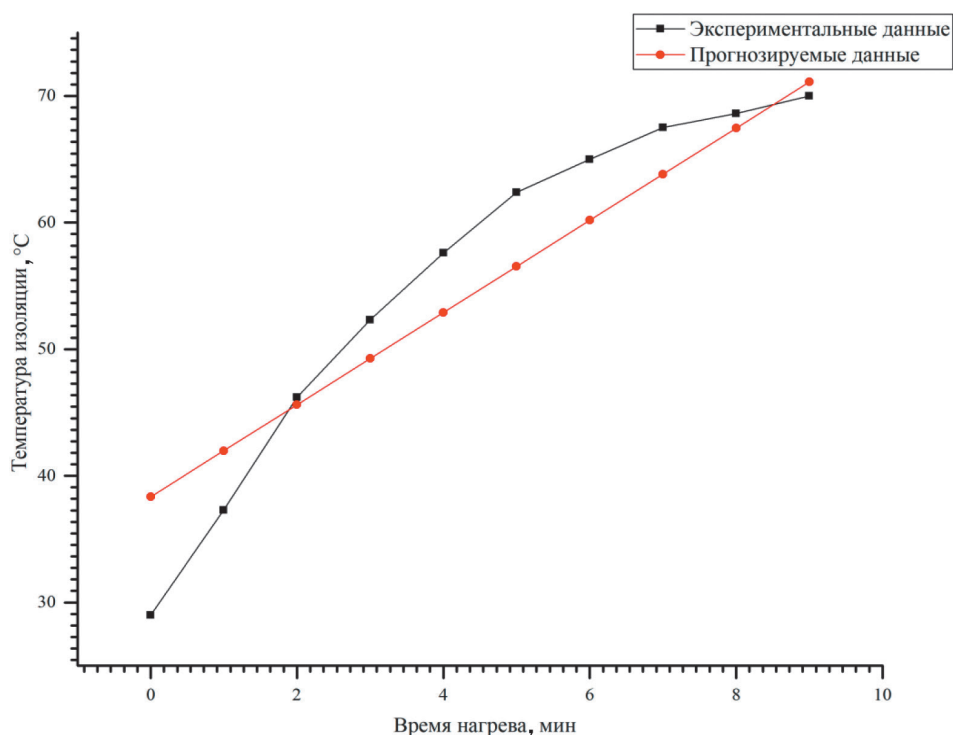


Рис. 3. Изменение температуры изоляции при увеличении токовой нагрузки от 13 А до 130 А ($u = 0,6$ м/с, $\alpha = 50^\circ$)

Fig. 3. Insulation temperature variation when current load increases from 13 A to 130 A ($u = 0.6$ m/s, $\alpha = 50^\circ$)

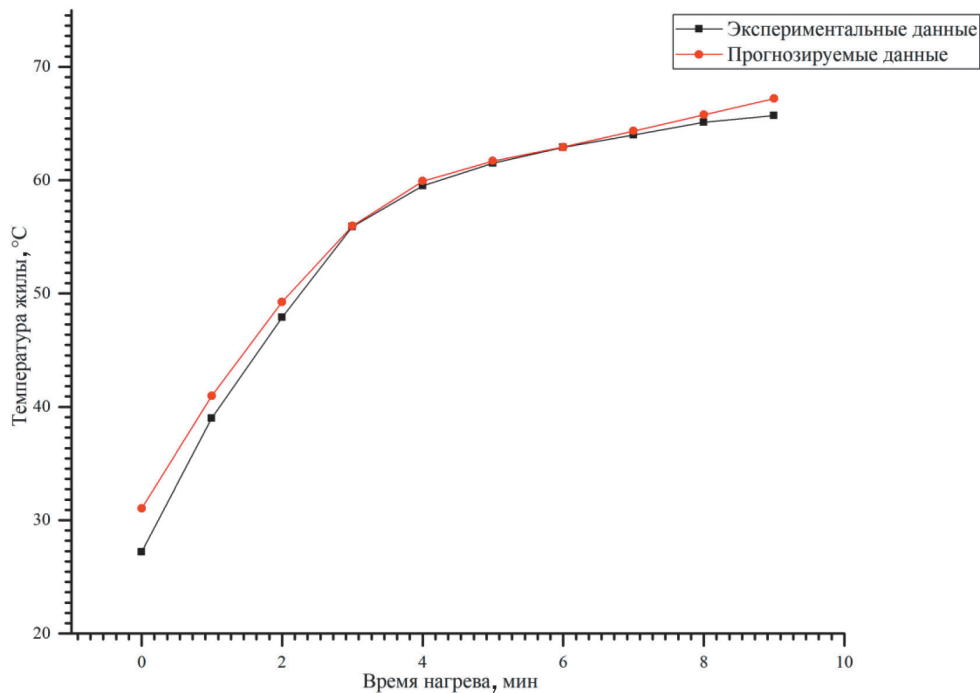


Рис. 4. Изменение температуры жилы при увеличении скорости ветра от 0,6 м/с до 1,6 м/с ($I = 130$ А, $\alpha = 90^\circ$)
Fig. 4. Core temperature variation when wind speed increases from 0.6 m/s to 1.6 m/s ($I = 130$ A, $\alpha = 90^\circ$)

2) Изменение температуры жилы и температуры изоляции при скорости ветра:
 – угол направления ветра относительно оси провода – 90° ;
 – токовая нагрузка – 130 А;
 – время нагрева – 9 мин;

– диапазон изменения скорости составил 0,6–1,5 м/с.

Стоит отметить следующие допущения исследования: ток в исследуемой сети не изменяется, угол атаки ветра во время нагрева не изменяется, скорость ветра изменяется

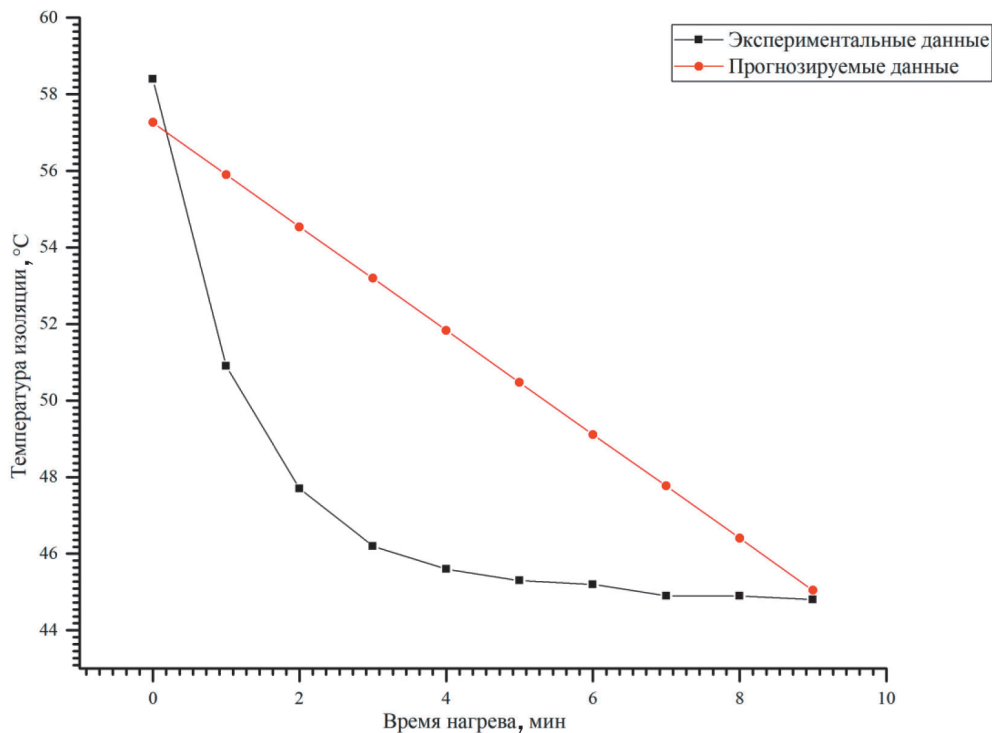


Рис. 5. Изменение температуры изоляции при увеличении скорости ветра от 0,6 м/с до 1,6 м/с ($I = 130$ А, $\alpha = 90^\circ$)
Fig. 5. Insulation temperature variation when wind speed increases from 0.6 m/s to 1.6 m/s ($I = 130$ A, $\alpha = 90^\circ$)

мгновенно. Изменение скорости ветра производилось путем изменения напряжения на электрическом двигателе постоянного тока, установленного в аэродинамической трубе. Экспериментальные и прогнозируемые нейронной сетью параметры провода представлены на рис. 4, 5.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате эксперимента получены следующие значения средней абсолютной ошибки:

- 1) для прогнозируемой температуры жилы $MAE = 1,74^{\circ}C$;
- 2) для прогнозируемой температуры изоляции $MAE = 4,08^{\circ}C$.

Учитывая результаты, показанные на рисунках выше (см. рис. 1–5), можно увидеть, что нейросетевая модель является подходящим инструментом для прогнозирования температуры изолированных проводов ВЛ. Зная параметры окружающей среды, возможно прогнозировать параметры провода с погрешностью менее 5%, что, в свою очередь, позволит определить фактическую длительно допустимую токовую нагрузку провода. На рис. 2 и 4 видно, что разница между прогнозируемыми и экспериментальными данными крайне мала. На рис. 3 и 5 наблюдаются существенные отклонения между экспериментальными и прогнозируемыми данными, максимальная разница между экспериментальным и прогнозируемым значением в одной из точек на рис. 3 равна $9^{\circ}C$, на рис. 5 максимальное отклонение равно $7^{\circ}C$. Для обоих случаев подобные отклонения могут быть связаны с недостатком исходных данных, так, например, для рис. 3 и 5 экспериментальных данных о нагреве изоляции было значительно меньше, чем о нагреве жилы, что вызвало дополнительные трудности при обучении нейросетевой модели. Отсюда можно сделать вывод, что количество и качество экспериментальных данных для обучения нейросетевых моделей имеют ключевое значение.

Также стоит отметить, что использование математических моделей для оценки температуры тоже является хорошим методом, поскольку все математические модели имеют схожие погрешности.

Нейросетевая модель может учитывать множество параметров при прогнозировании, в данном случае были использованы данные о направлении ветра, скорости ветра, токовой нагрузке, а также учитывалось время нагрева. Учесть такое количество входных данных в рамках одной математической модели крайне затруднительно. Также стоит отметить еще один недостаток математических моделей – жесткие требования к объему и качеству исходных данных при производстве расчетов. Применение нейросетевой модели для устранения нехватки исходных данных путем прогнозирования параметров является еще одним перспективным подходом к использованию нейронных сетей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье с помощью нейросетевой модели было рассмотрено влияние скорости и направления ветра на температуру провода СИП-3. Из полученных результатов видно, что расхождения могут как минимальными при достаточном количестве экспериментальных данных, так и значительными при недостатке данных. В дальнейшем представляет интерес использование более широкого перечня входящих параметров для обучения нейросетевой модели. Что, в свою очередь, позволит прогнозировать более точно длительно допустимые токи и время превышения длительно допустимых токов в линиях электропередачи, стрелы провеса провода, потери в линиях. Уточнение произойдет вследствие уменьшения расхождения кривых нагрева и охлаждения, получаемых при помощи нейросетевой модели и снятых параметров на стендах и действующих линиях.

Использование нейронных сетей может найти применение в диспетчерских службах, энергосбытовых компаниях и при производстве электротехнического оборудования. Так, например, для диспетчеров нейронные сети могут использоваться в следующих случаях: прогнозирование нагрузки; прогнозирование мощности, генерируемой возобновляемыми источниками энергии; оптимизация энергопотребления; аварийные сценарии, обнаружение неисправностей и т.д. Это может быть реализовано в виде человеко-машинного интерфейса, где нейросеть выступает «помощником» для диспетчера.

Список источников

1. Alassi A., Banales S., Ellabban O., Adam G., MacIver C. HVDC transmission: technology review, market trends and future outlook // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. Vol. 112. P. 530–554. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.062>.
2. Arcia-Garibaldi G., Cruz-Romero P., Gomez-Exposito A. Future power transmission: visions, technologies and challenges // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 94. P. 285–301. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.004>.
3. Bedialauneta M.T., Fernandez E., Albizu I., Mazon A.J., Valverde V., Buigues G. Pilot installation for the monitoring of the tension-temperature curve of a distribution overhead line // *IEEE International Energy Conference and Exhibition (Florence, 9–12 September 2012)*. Florence: IEEE, 2012. P. 305–314. <https://doi.org/10.1109/EnergyCon.2012.6347772>.
4. Beryozkina S. Evaluation study of potential use of advanced conductors in transmission line projects // *Energies*. 2019. Vol. 12. Iss. 5. P. 822. <https://doi.org/10.3390/en12050822>.
5. Capelli F., Riba J.-R., Gonzalez D. Thermal behavior of energy-efficient substation connectors // *10th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (Bydgoszcz, 29 June 2016 – 1 July 2016)*. Bydgoszcz: IEEE, 2016. P. 104–109. <https://doi.org/10.1109/CPE.2016.7544167>.
6. Capelli F., Riba J.-R., Sanllehi J. Finite element analysis to predict temperature rise tests in high capacity substation connectors // *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2017. Vol. 11. Iss. 9. P. 2283–2291. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.1717>.
7. Rashmi, Shivashankar G.S., Poornima. Overview of different overhead transmission line conductors // *Materials Today: Proceedings Journal*. 2017. Vol. 4. Iss. 10. P. 11318–11324. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.09.057>.
8. Situmorang Yo.A., Zhao Zhongkai, Yoshida A., Abudula A., Guan Guoqing. Small-scale biomass gasification systems for power generation (<200 kW class): a review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020. Vol. 117. P. 109486. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109486>.
9. Zheng Yanchong, Niu Songyan, Shang Yitong, Shao Ziyun, Jian Linni. Integrating plug-in electric vehicles into power grids: a comprehensive review on power interaction mode, scheduling methodology and mathematical foundation // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. Vol. 112. P. 424–439.
10. Андронов Ю.В., Мельников В.Н., Стрекалов А.В. Оценка прогнозирующих способностей многослойного персептрона с различными функциями активации и алгоритмами обучения // *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*. 2015. № 9. С. 18–20. EDN: UIKRNВ.
11. Белый В.Б., Куницын Р.А. Оценка способов снижения потерь напряжения в системах сельского электро-снабжения // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2023. № 4. С. 107–113. <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2023-222-4-107-113>. EDN: TBGICK.
12. Бигун А.Я. Анализ нестационарных тепловых режимов воздушных линий электропередачи с учетом нелинейности процессов теплообмена и климатических факторов // *Омский научный вестник*. 2018. № 1. С. 40–44. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2018-157-40-44>. EDN: YSCCXT.
13. Бигун А.Я., Владимиров Л.В. Нагрев и охлаждение изолированных проводов воздушных линий электропередачи при вариации направления ветра // *Вестник Югорского государственного университета*. 2023. № 3. P. 107–116. <https://doi.org/10.18822/byusu202303107-116>. EDN: FKPBBSG.
14. Бигун А.Я., Сидоров О.А., Осипов Д.С., Гиршин С.С., Горюнов В.Н., Петрова Е.В. Влияние режимных и климатических факторов на потери энергии при нестационарных тепловых режимах линий электропередачи // *Динамика систем, механизмов и машин*. 2017. Т. 5. № 3. С. 8–17. <https://doi.org/10.25206/2310-9793-2017-5-3-08-17>. EDN: ZTSRLJ.
15. Бубенчиков А.А., Бубенчикова Т.В. Анализ учета неоднородности токоведущих жил самонесущих изолированных проводов // *Вестник Югорского государственного университета*. 2023. № 4. С. 153–160. <https://doi.org/10.18822/byusu202304153-160>. EDN: BFLWWO.
16. Галстян Р.А., Цыгулев Н.И., Антонов М.А., Ткаченко А.С. Повышение эффективности передачи электроэнергии в электрической сети путём гибкого регулирования реактивной мощности // *Энергосбережение и водоподготовка*. 2022. № 5. С. 51–55. EDN: JFQMQR.
17. Дед А.В., Горюнов В.Н., Гиршин С.С., Бубенчиков А.А., Петров А.С., Петрова Е.В. [и др.]. Повышение точности расчета технологических потерь электрической энергии в ВЛ на основе учета режимных и климатических факторов // *Омский научный вестник*. 2010. № 1. С. 114–119. EDN: QBNDMT.
18. Игнатенко И.В., Власенко С.А., Пухова А.И., Тряпкин Е.Ю., Казакул А.А., Варыгина А.О. Алгоритм контроля токов в ЛЭП в заданных эксплуатационных условиях // *Энергия единой сети*. 2021. № 3. С. 44–53. EDN: ОТПУНЗ.
19. Латыпов И.С., Сушков В.В., Хмара Г.А., Паршуков А.Н., Хамитов Р.Н. Увеличение пропускной способности электрической сети и повышение энергоэффективности действующей электроэнергетической системы нефтегазопромысловых потребителей // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2022. Т. 333. № 4. С. 236–247. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/4/3497>. EDN: EVNHKG.
20. Фигурнов Е.П., Харчевников В.И. Опыты по нагреву неизолированных проводов воздушных линий // *Электрические станции*. 2016. № 11. С. 41–47. EDN: XALDST.

References

1. Alassi A., Banales S., Ellabban O., Adam G., MacIver C. HVDC transmission: technology review, market trends and future outlook. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019;112:530-554. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.062>.
2. Arcia-Garibaldi G., Cruz-Romero P., Gomez-Exposito A. Future power transmission: visions, technologies and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018;94:285-301. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.004>.
3. Bedialauneta M.T., Fernandez E., Albizu I., Mazon A.J., Valverde V., Buigues G. Pilot installation for the monitoring of the tension-temperature curve of a distribution overhead line. In: *IEEE International Energy Conference and Exhibition*. 9–12 September 2012, Florence. Florence: IEEE; 2012, p. 305-314. <https://doi.org/10.1109/EnergyCon.2012.6347772>.
4. Beryozkina S. Evaluation study of potential use of advanced conductors in transmission line projects. *Energies*. 2019;12(5):822. <https://doi.org/10.3390/en12050822>.
5. Capelli F., Riba J.-R., Gonzalez D. Thermal behavior of energy-efficient substation connectors // 10th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering. 29 June 2016 – 1 July 2016, Bydgoszcz. Bydgoszcz: IEEE; 2016, p. 104-109. <https://doi.org/10.1109/CPE.2016.7544167>.
6. Capelli F., Riba J.-R., Sanllehi J. Finite element analysis to predict temperature rise tests in high capacity substation connectors. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2017;11(9):2283-2291. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.1717>.
7. Rashmi, Shivashankar G.S., Poornima. Overview of different overhead transmission line conductors. *Materials Today: Proceedings Journal*. 2017;4(10):11318-11324. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.09.057>.
8. Situmorang Yo.A., Zhao Zhongkai, Yoshida A., Abudula A., Guan Guoqing. Small-scale biomass gasification systems for power generation (<200 kW class): a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020;117:109486. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109486>.
9. Zheng Yanchong, Niu Songyan, Shang Yitong, Shao Ziyun, Jian Linni. Integrating plug-in electric vehicles into power grids: a comprehensive review on power interaction mode, scheduling methodology and mathematical foundation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019;112:424-439.
10. Andronov Yu.V., Melnikov V.N., Strekalov A.V. Assessment of predicting capacities of multi-layer perceptron with various functions of activation and training algorithms. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanyh i gazovyh mestorozhdenij*. 2015;9:18-20. (In Russ.). EDN: UIKRNb.
11. Beliy V.B., Kunitsyn R.A. Evaluation of ways to reduce voltage losses in rural power supply systems. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2023;4:107-113. (In Russ.). <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2023-222-4-107-113>. EDN: TBGICK.
12. Bigun A.Ya. The analysis of non-stationary thermal modes of overhead power lines with the non-linearity of heat transfer processes and climatic factors. *Omsk Scientific Bulletin*. 2018;1:40-44. (In Russ.). <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2018-157-40-44>. EDN: YSCCXT.
13. Bigun A.Ya., Vladimirov L.V. Heating and cooling of insulated wires of overhead power lines with variations in wind direction. *Yugra State University Bulletin*. 2023;3:107-116. (In Russ.). <https://doi.org/10.18822/byusu202303107-116>. EDN: FKPSBG.
14. Bigun A.Ya., Sidorov O.A., Osipov D.S., Girshin S.S., Goryunov V.N., Petrova E.V. Influence of regime and climatic factors on energy losses under non-stationary thermal conditions of power lines. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin*. 2017;5(3):8-17. (In Russ.). <https://doi.org/10.25206/2310-9793-2017-5-3-08-17>. EDN: ZTSRLJ.
15. Bubenchikov A.A., Bubenchikova T.V. Analysis of the insulated self-supporting conductor obstacle. *Yugra State University Bulletin*. 2023;4:153-160. (In Russ.). <https://doi.org/10.18822/byusu202304153-160>. EDN: BFLWWO.
16. Galstyan R.A., Tsygulev N.I., Antonov M.A., Tkachenko A.S. Increasing the efficiency of electricity transmission in the electrical network by flexible regulation of reactive power. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*. 2022;5:51-55. (In Russ.). EDN: JFQMQR.
17. Ded A.V., Goryunov V.N., Girshin S.S., Bubenchikov A.A., Petrov A.S., Petrova E.V., et al. Improving calculation accuracy of electric energy technological losses in overhead lines based on regime and climatic factors. *Omsk Scientific Bulletin*. 2010;1:114-119. (In Russ.). EDN: QBNDMT.
18. Ignatenko I.V., Vlasenko S.A., Puhova A.I., Tryapkin E.Yu., Kazakul A.A., Varygina A.O. Algorithm for power line currents monitoring under specified operating conditions. *Energy of Unified Grid*. 2021;3:44-53. (In Russ.). EDN: OTPUHZ.
19. Latypov I.S., Sushkov V.V., Khmara G.A., Parshukov A.N., Khamitov R.N. The electric grid capacity increasing and the energy efficiency improving for the existing oil and gas consumers' electric power system. *Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2022;333(4):236-247. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/4/3497>. EDN: EVHKHG.
20. Figurnov E.P., Kharchevnikov V.I. Experiments on heating uninsulated wires of overhead transmission lines. *Power Technology and Engineering*. 2016;11:41-47. EDN: XALDST. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Келембет Александр Александрович,
аспирант,
Омский государственный технический университет,
644050, г. Омск, пр. Мира, 11, Россия
✉ alexandr.kelembet@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0002-3880-7531>

Бигун Александр Ярославович,
к.т.н.,
доцент кафедры радиоэлектроники
и электроэнергетики,
Сургутский государственный университет,
628403, г. Сургут, пр. Ленина, 1, Россия
bigun_aya@surgu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6004-0974>

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 18.06.2024 г.; одобрена после рецензирования 02.09.2024 г.; принята к публикации 07.09.2024 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksandr A. Kelembet,
Postgraduate Student,
Omsk State Technical University,
11 Mira pr., Omsk 644050, Russia
✉ alexandr.kelembet@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0002-3880-7531>

Aleksandr Ya. Bigun,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of
Radio Electronics and Electrical Power Engineering,
Surgut State University,
1 Lenin pr., Surgut 628403, Russia
bigun_aya@surgu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6004-0974>

Authors' contribution

The authors contributed equally to the article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 18.06.2024; approved after reviewing 02.09.2024; accepted for publication 07.09.2024.



Методика выбора оптимальных марки и сечения провода на основе интегрированного технико-экономического критерия

Н.В. Савина¹, А.О. Варыгина²✉

^{1,2}Амурский государственный университет, Благовещенск, Россия

Резюме. Цель – разработка новой методики совокупного выбора оптимальных марки и сечения провода воздушных линий электропередачи напряжением выше 1 кВ в условиях интенсивного развития электросетевого комплекса. Работа основана на двух авторских методах: методе выбора оптимальной марки провода, разработанного на базе метода анализа иерархий, и методе выбора оптимального сечения провода путем оптимизации удельных дисконтированных затрат на протяжении всего периода строительства и эксплуатации воздушной линии электропередачи. Отличительными особенностями предложенной авторами новой методики являются интеграция методов выбора оптимальных марки и сечения в единую методику и реализация проверок провода до проведения технико-экономических расчетов, так как они уже учтены при выборе марки провода и внутри метода выбора сечения. Апробация предложенной методики проведена на характерном примере реконструкции воздушной линии 110 кВ Западная – Давыдовка, которая создает ограничения в электроснабжении Приморского края из-за недостаточной пропускной способности провода и эксплуатации его свыше нормативного срока. В качестве решения для рассматриваемого примера выбран провод СЕНИЛЕК АТЗ/С 150/24. Его применение позволяет не только увеличить пропускную способность воздушной линии на 151% без замены существующих опор, но и снизить потери активной мощности в электрической сети на 18,9%, а реактивной мощности – на 2,5%. Предложенная методика обеспечивает выбор оптимальных марки и сечения провода любой конструкции с учетом динамично меняющихся условий функционирования электросетевого комплекса. Найденные по новой методике решения при дальнейшей эксплуатации линий позволяют получать оптимальные условия их функционирования и дополнительные эффекты: существенное повышение пропускной способности линии электропередачи, снижение количества используемых опор или реализацию замены провода линии без замены опор, уменьшение гололедообразования на проводах, снижение потерь электроэнергии.

Ключевые слова: воздушная линия электропередачи, марка провода, провод нового поколения, сечение провода, критерий, конструкция, проектирование

Для цитирования: Савина Н.В., Варыгина А.О. Методика выбора оптимальных марки и сечения провода на основе интегрированного технико-экономического критерия // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 3. С. 462–474. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-462-474>. EDN: HKKXBE.

POWER ENGINEERING

Original article

Methodology for selecting optimal wire grade and cross-section based on an integrated technical and economic criterion

Natalia V. Savina¹, Aleksandra O. Varygina²✉

^{1,2}Amur State University, Blagoveshchensk, Russia

Abstract. The aim was to develop a methodology for selecting an optimal wire grade and cross-section for overhead power lines with a voltage of above 1 kV under intensive development of power grid systems. This aim was solved using the authors' previously developed methods: selection of an optimal wire grade based on hierarchy analysis and selection of an optimal wire cross-section by optimizing the specific discounted costs during the entire period of construction and operation of overhead power lines. In the present study, these methods are integrated into a single methodology. It is proposed to implement wire inspections prior to the stage of technical and economic calculations, since the necessary data has already been taken into account during the selection of a wire grade and its cross-section. The proposed methodology was tested on a typical example of reconstruction of the Zapadnaya–Davydovka 110 kV overhead line, which creates limitations in the power supply of Primorsky Krai due to insufficient wire capacity and its operation beyond the normative period. SENILEK AT3/C 150/24 wire was selected as a solution

for the example under consideration. The application of this wire grade allows not only the overhead line capacity to be increased by 151% without replacing the existing supports, but also active and reactive power losses in the electric network to be reduced by 18.9 and 2.5%, respectively. The proposed methodology enables selection of an optimal grade and cross-section of any wire design, taking the dynamically changing operational conditions of power grid systems into account. The solutions found by the proposed methodology may contribute to a more efficient operation of power lines due to increasing their transmission capacity, reducing the number of used supports, replacing the line wire without replacing supports, decreasing ice formation on wires, and reducing power losses.

Keywords: overhead power line, wire brand, new generation wire, wire cross-section area, criterion, construction, design

For citation: Savina N.V., Varygina A.O. Methodology for selecting optimal wire grade and cross-section based on an integrated technical and economic criterion. *iPolytech Journal*. 2024;28(3):462-474. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-462-474>. EDN: HKKXBE.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время проектирование электросетевых объектов осуществляется в условиях внедрения технологий индустрии 4.0 в электросетевой комплекс [1] существенного и стабильного роста потребления электроэнергии во всем мире, внимания к повышению эффективности его функционирования [2], а также технических и экономических требований к принимаемым решениям [3, 4]. Все это способствует появлению на рынке электротехнического оборудования большого разнообразия новых технических решений для сооружения воздушных линий (ВЛ). Конструктивное исполнение ВЛ подвергается существенным изменениям, по сравнению с традиционным, практически по всем элементам [5–7]: опорам, проводам, средствам грозозащиты, изолирующей подвеске.

Среди проводниковой продукции выделилось большое количество новых марок проводов, которые за счет изменения конструкции провода и используемых материалов позволяют не только улучшить характеристики провода (например, повышение пропускной способности, улучшение механической прочности), но и получить дополнительные положительные эффекты от их применения (например, снижение гололедообразования на проводах) и существенные экономические выгоды [8, 9]. Такие провода обобщенно стали называть проводами нового поколения (ПНП) [10]. В зарубежной литературе для обозначения данного вида проводов встречаются следующие термины: «energy-saving conductors» (энергосберегающие провода) [11], «high temperature conductors» (высокотемпературные провода) [12] или «High Temperature Low Sag conductors – HTLS conductors» (высокотемпературные провода с малым провисанием) [13], «advanced

conductors» (улучшенные провода) [14, 15]. Следовательно, параметры линий электропередачи (ЛЭП) претерпевают существенные изменения, которые должны быть учтены при проектировании.

Учитывая, что проекты реконструкции, модернизации, технического перевооружения и нового строительства в электросетевом комплексе реализуются в рамках инвестиционных программ электросетевых компаний, то решение задачи выбора оптимальных марки и сечения провода должно рассматриваться в контексте инвестиционного планирования. Как следствие, сложность и требования к проектированию ЛЭП многократно возрастают.

Поскольку сечение провода определяет основные технико-экономические характеристики ВЛ, то поиску его оптимального значения отводится ключевая роль. Актуальность этой задачи становится острее с появлением новых марок проводов, расширением линейки возможных значений сечений и развитием рыночных отношений в электроэнергетике. Примерами новых марок проводов могут служить высокотемпературный провод из алюминиевого сплава Al-Zr со стальным сердечником марки АСТ, провод повышенной нагрузочной способности марок СЕНИЛЕК АТЗ/С и АТЗП/С, высокопрочный провод АСВП.

В то же время неоднократно в технической литературе упоминается, что существующие традиционные методы выбора сечения провода (метод экономической плотности тока, метод экономических токовых интервалов) имеют множество недостатков [16, 17] и не учитывают современные условия функционирования электроэнергетических систем, а к выбору сечений проводов нового поколения и вовсе не применимы. К тому же в настоящее время не существу-

ет методик совокупного выбора оптимальных марки и сечения провода ВЛ, что подтверждает необходимость ее разработки и актуальность темы исследования.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью исследования является разработка новой методики совокупного выбора марки и сечения провода воздушных линий электропередачи напряжением выше 1 кВ, обеспечивающей оптимальные условия эксплуатации ВЛ при выполнении всех поставленных требований на фоне интенсивного развития электросетевого комплекса и подтверждение корректности и целесообразности ее применения на конкретном примере.

МЕТОДИКА СОВОКУПНОГО ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ МАРКИ И СЕЧЕНИЯ ПРОВОДА

Выбор оптимальных марки и сечения провода является сложной многокритериальной задачей при большом количестве возможных альтернативных вариантов решения. Они формируются не только традиционными марками и сечениями проводов воздушных линий электропередачи, но и новыми марками проводов, различными вариантами их исполнения, и их (в некоторых случаях) измененными рядами сечений. Характеристики и стоимость проводов могут варьироваться не только в зависимости от их конструктивных особенностей, но и от условий технико-коммерческих предложений поставщиков проводниковой продукции. Данные обстоятельства свидетельствуют о том, что выбор марки и сечения провода должен быть в единой методике, при этом необходимо сначала выбрать оптимальную марку провода, а затем – оптимальное сечение. Такой подход сократит трудозатраты поиска решения при большой области его поиска и снимет противоречия, возникающие при их раздельном выборе, как это происходит в настоящее время. При этом выбор оптимальной марки провода должен быть основан на системном и многокритериальном анализе выбора альтернатив, а выбор оптимального сечения – на основе интегрированного технико-экономического критерия.

Новая методика выбора провода в современных условиях функционирования электросетевого комплекса должна:

1) интегрировать в себе выбор марки и сечения провода, который позволит сфор-

мировать ограниченную область возможных решений;

2) быть применима к проводам любой существующей конструкции;

3) соответствовать всем возможным видам проектов, реализуемым в электросетевом комплексе и связанным с проектированием ВЛ напряжением выше 1 кВ;

4) базироваться на современном технико-экономическом критерии, позволяющем учитывать особенности проекта (условия трассы, конструктивные особенности ВЛ) и экономические условия его реализации;

5) обеспечивать легко интерпретируемый результат, который позволяет получать оптимальные условия эксплуатации проектируемого объекта при выполнении всех поставленных требований.

В предложенной методике выбора провода предлагается интеграция выбора оптимальных марки и сечения в единый алгоритм. В ней выбор оптимальной марки провода построен на наиболее востребованном в инвестиционно-строительной деятельности методе анализа иерархий. Этот метод является авторским, а суть его реализации заключается в попарном сравнении альтернативных вариантов множества марок проводов I для каждого отдельного из определенных по целям проекта множества критериев K с использованием шкалы сравнительной важности при наборе внешних условий, представляемых множеством J . По результатам оценок составляются K прямоугольных матриц, где элемент матрицы, стоящий на пересечении i -й строки и j -го столбца, представляет собой численную оценку i -й альтернативы марки провода по критерию k при реализации набора внешних условий с номером j .

Для выбора марки провода вводится многокритериальная функция полезности, под которой понимается числовая функция, определенная на множестве возможных альтернативных вариантов и имеющая следующий вид:

$$u_{ij} = f(u^1(x_{ij}^1), u^2(x_{ij}^2), \dots, u^k(x_{ij}^k), \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k), \quad (1)$$

где $u^k(x_{ij}^k)$ – одномерные функции для каждого критерия, аналитическое представление которых пока неизвестно, где $k = \overline{1, K}$, $i = \overline{1, I}$, $j = \overline{1, J}$; λ_k – весовые коэффициенты.

Та марка провода, численная оценка полезности которой будет больше, и будет являться предпочтительной, а, следовательно, оптимальной.

Тогда критерий оптимальности для выбора марки провода представляется в виде

$$u_{ij} \rightarrow \max. \quad (2)$$

Данный авторский метод в полном объеме используется в единой методике выбора оптимального провода. Подробно он представлен в [18], а порядок его реализации приведен на рис. 1.

Затем для выбранной оптимальной марки провода выбирается его сечение. В общем случае технико-экономическое обоснование (ТЭО) служит основанием для выявления его инвестиционной эффективности. Выбор сечения проводов традиционной конструкции по³ основывается на минимуме приведенных затрат. Данный критерий не учитывает изменения, произошедшие в электросете-

вом комплексе, и не отвечает современным требованиям ТЭО проектов в отрасли. К тому же в настоящее время перечень критериев для ТЭО расширился. В [19] на основе системного подхода к построению технико-экономической модели провода и анализа существующих методов ТЭО проектных решений авторами разработана технико-экономическая модель сечения провода, учитывающая тепловую модель провода [20] и случайный характер изменения тока ВЛ. Эта модель позволяет выбирать оптимальные сечения проводов различной конструкции и марок. Принципиальным отличием предложенного методического подхода является совместный учет физических основ протекания тока по проводу, конструкции провода, свойств окружающей среды и экономических параметров. Такой подход позволяет получить интегрированный технико-экономический критерий выбора провода в виде удельных дисконтированных затрат (УДЗ), определяемых на единицу длины провода:

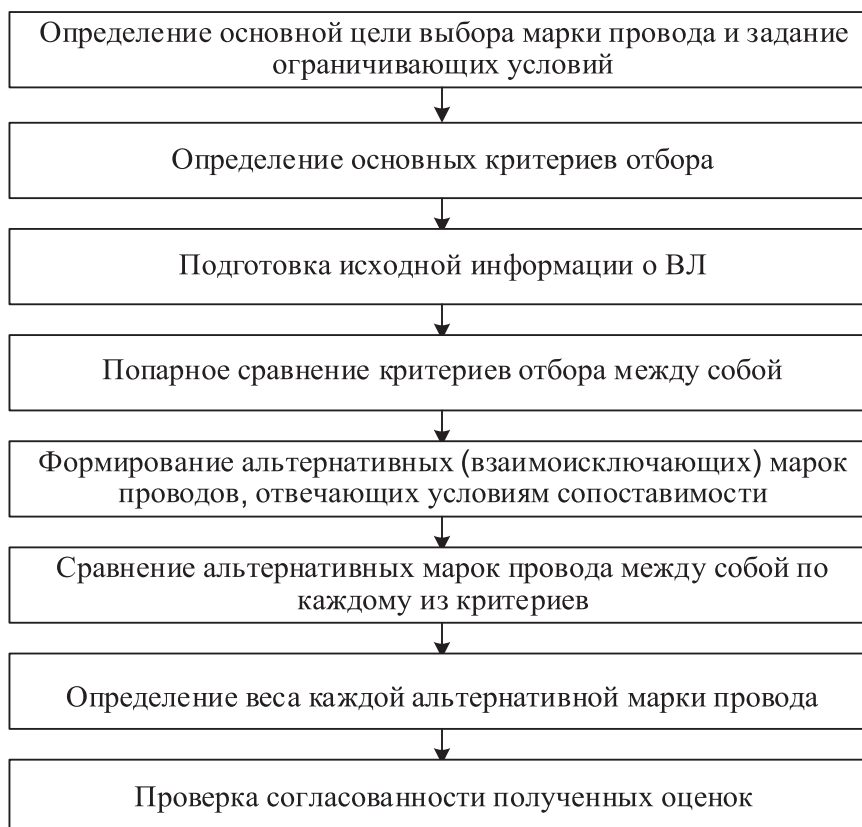


Рис. 1. Порядок реализации метода выбора оптимальной марки провода

Fig. 1. Implementation procedure for the optimal wire brand selection method

³Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е изд. СПб.: ДЕАН, 2008. 704 с. Режим доступа: https://mwtct.ru/images/stories/download/certificate/PUЕ_7.pdf. (дата обращения: 03.04.2024).

$$Z_{\text{диск}} = \sum_{t=0}^T [K_t(1 + \alpha_{\text{ам}} + \alpha_{\text{рзо}}) + C_{\Delta W}(3 \cdot I(t)^2 \cdot R \cdot T_p \cdot 10^3 + 8760 \cdot \Delta P_{\text{кор}} + \frac{U_n^2 \cdot T_{\text{вл.п.}} \cdot N_{\text{зир}}}{3 \cdot N_{\text{из}} \cdot R_{\text{из}} \cdot 10^3})] \cdot (1 + r)^{-t}, \quad (3)$$

где T – период эксплуатации и строительства ВЛ, количество лет; t – конкретный год рассматриваемого периода; K_t – капитальные вложения, руб.; $\alpha_{\text{ам}}$ – коэффициент амортизационных отчислений; $\alpha_{\text{рзо}}$ – коэффициент (норма) отчислений на ремонт, эксплуатацию и обслуживание ЛЭП; $C_{\Delta W}$ – удельная стоимость потерь электроэнергии, руб/кВт·ч; $I(t)$ – значение тока, протекающего по линии, А; R – сопротивление единицы длины линии, Ом; T_p – число рабочих часов ЛЭП за год, ч; $\Delta P_{\text{кор}}$ – удельные потери мощности на корону в проводах ВЛ, кВт; U_n – номинальное напряжение линии, кВ; $T_{\text{вл.п.}}$ – среднее число часов влажной погоды в году, ч; $N_{\text{зир}}$ – число гирлянд на единицу длины ВЛ, шт.; $N_{\text{из}}$ – число изоляторов в гирлянде, шт.; $R_{\text{из}}$ – сопротивление одного подвесного изолятора в гирлянде, Ом; r – ставка дисконтирования.

Взяв за основу интегрированный технико-экономический критерий по формуле (3), алгоритм метода выбора оптимального сечения можно представить следующими этапами:

1) определение ряда сечений оптимальной марки провода для дальнейшей оптимизации на основе целей выбора и традиционных проверок сечения провода по выполнению условий механической прочности, длительно допустимого нагрева, ограничения воздействия коронного разряда и радиопомех от короны, что приводит к снятию противоречий, возникающих при выборе марки и дальнейшем выборе сечения при их отдельном рассмотрении;

2) подготовка исходных данных для оптимизации сечения;

3) построение зависимостей УДЗ от тока, протекающего по линии, для сформированного ряда сечений провода по формуле (1);

4) выбор оптимального сечения провода выбранной марки по минимуму УДЗ:

$$Z_{\text{диск}} \rightarrow \min. \quad (4)$$

Таким образом, отличительной особенностью метода выбора оптимального сечения является реализация проверок провода до технико-экономических расчетов, что позволяет получить ограниченный ряд сечений для дальнейших расчетов. Это обеспечивает не только упрощение расчета, но и исключение потенциального противоречия результатов метода выбора сечения и их проверок. К выбору сечения допускаются только те альтернативные варианты, которые потенциально соответствуют всем установленным требованиям.

Интеграция разработанных методов выбора оптимальной марки провода и оптимального сечения провода в единую методику выбора провода позволила впервые осуществить объективный сравнительный анализ ВЛ различных конструктивных исполнений по исходной информации, актуальной на рассматриваемый период времени и для конкретного района размещения ВЛ.

Область применения новой методики не ограничивается только ВЛ напряжением выше 1 кВ, она может быть применена к воздушной части кабельно-воздушных ЛЭП, которые стали получать широкое распространение как реализация востребованной технологии электропередачи для ТЭК РФ⁴.

ВЫПОЛНЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Реализация и подтверждение целесообразности и корректности применения авторской методики осуществлены на реальном проекте реконструкции одноцепной ВЛ 110 кВ Западная – Давыдовка, которая является изношенной и создает ограничения в электроснабжении Приморского края. Данный пример является характерным, так как направлен на повышение пропускной способности ВЛ.

ВЛ 110 кВ Западная – Давыдовка введена в эксплуатацию в 1968 г. Ее протяженность составляет 20,48 км, из которых 4,74 км выполнены проводом АС-120/19, а 15,74 км выполнены проводом М-70. Кли-

⁴Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года: Распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 № 1523-р (ред. от 28.02.2024). Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/ministry/energy-strategy> (дата обращения: 05.03.2024).

матогеографическая характеристика региона расположения ВЛ: умеренно мусонный климат с максимальной и минимальной температурами $+35^{\circ}\text{C}$ и -44°C , соответственно, средняя температура самого теплого месяца (августа) $+21^{\circ}\text{C}$ и средняя скорость ветра в августе составит 4 м/с.

Цель проекта: замена физически изношенных проводов, которые выработали нормативный срок службы, без замены опор на провод отечественной марки.

Задачи проекта: повышение пропускной способности и надежности ВЛ; снижение механических нагрузок.

Расчет токовой нагрузки ЛЭП, выполненный с помощью ПВК RastWin3, показал, что в режиме зимнего максимума нагрузки 2024 года ток, протекающий по линии, составляет 350 А, а в режиме летнего максимума – 261 А. Ток ВЛ в режиме зимнего максимума превышает длительно допустимый ток (ДДТ) участка ВЛ, выполненного проводом М-70, и равного 337 А. Максимальный ток ВЛ при наиболее тяжелом послеаварийном режиме в схеме района (ремонт ВЛ 110 кВ Западная – Кипарисово-Раздольное-1) составляет 488 А и также превышает ДДТ участка ВЛ, выполненного проводом М-70, что приводит к отключению потребителей. Среднегодовой темп прироста потребления электрической энергии в Приморском крае составляет 1,42%⁴. Прогноз токовой нагрузки для зимнего максимума составляет 376 А, для летнего – 281 А.

Предлагаются следующие отечественные марки провода к применению: АС, АСВТ, АСВП, АСку, АСТ, СЕНИЛЕК АТЗ/С, СЕНИЛЕК АТЗП/С. Варианты медных проводов не рас-

сматриваются, так как в приведенном примере медные провода с сечением больше 70 мм² не позволят реализовать проект без замены опор из-за своего веса по условиям механической прочности.

Предварительные сечения отобранных марок проводов принимаются по исходным данным о существующей ВЛ. В данном случае в качестве базовых провода и сечения принят АС 120/19, так как он используется в настоящее время, для остальных марок взяты соразмерные сечения. Если же имеются замечания по пропускной способности к применяемому в настоящее время сечению, то для выбора марки можно взять следующий размер сечения из ряда проводниковой продукции.

Уточнение значений длительно допустимых токов для отобранных проводов реализуется с использованием предложенной в [20] тепловой модели и учетом климатических особенностей региона. Тем самым обеспечивается выполнение условия длительно допустимого нагрева. Представим в табл. 1 результаты уточнения ДДТ с оценкой отклонений от справочных значений^{6,7}.

Как видно из табл. 1, значения ДДТ существенно изменились, в некоторых случаях даже свыше 5%. В большинстве случаев уточненное значение ДДТ возросло, что легко объясняется более низким значением принятой к расчету температуры (21°C) по сравнению со справочной (25°C), для которой приведены значения ДДТ. В ряде случаев при пересчете ДДТ оказывается ниже справочного значения в результате воздействия принятых к расчету температуры и скорости ветра.

Таблица 1. Уточнение значений длительно допустимых токов

Table 1. Revised values of long-term permissible currents

№	Марка провода	ДДТ справочный, А	ДДТ расчетный, А	Отклонение, %
1	АС 120/19	390	419	+ 7,4
2	АСВТ 128/36	665	689	+ 3,6
3	АСВП 128/36	408	461	+ 13,0
4	АСТ 120/19	862	733	- 15,0
5	СЕНИЛЕК АТЗ/С 120/19	724	764	+ 5,5
6	СЕНИЛЕК АТЗП/С 120/19	706	733	+ 3,8

⁴Схема и программа перспективного развития электроэнергетики Приморского края на 2021–2025 гг. Режим доступа: <https://primorsky.ru/authorities/executive-agencies/ministries/energy/structure/sipr.php> (дата обращения: 01.03.2024).

⁶Кабели, провода, материалы для кабельной индустрии: технический справочник. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Эллипс, 2006. 360 с.

Таблица 2. Характеристики рассматриваемых проводов
Table 2. Characteristics of wires under investigation

№	Марка провода	ДДТ, А	Стоимость, тыс. руб/км	Масса, кг/км
1	АС 120/19	419	165,0	471
2	АСВТ 128/36	689	236,2	659,5
3	АСВП 128/36 1	461	231,0	659,5
4	АСТ 120/19	733	180,0	471
5	СЕНИЛЕК АТЗ/С 120/19	764	240,7	471
6	СЕНИЛЕК АТЗП/С 120/19	733	277,5	478

После уточнения значений ДДТ переходим непосредственно к *выбору марки провода*. Критерии отбора (далее критерии): первый – ДДТ; второй – стоимость провода. Критерием ограничения обозначена масса провода, по контрольному значению массы провода М-70 614,82 кг/км. В данном случае критерии приняты для демонстрации реализации метода и задания условия по механической прочности. Характеристика проводов по критериям отображена в табл. 2.

Провода марок АСВТ и АСВП исключены по причине превышения ограничения по массе провода.

Сравнение критериев представлено в табл. 3 с учетом большей важности выполнения условия по нагреву для провода над его стоимостью. Вес каждого критерия рассчитан как отношение среднего геометрического элемента соответствующей строки к сумме значений средних геометрических по столбцу. Промежуточные результаты выбора оптимальной марки провода, полученные по алгоритму, приведенному в [18], показаны в

табл. 4–5. В них отражено попарное сравнение марок провода между собой по каждому из критериев с определением веса каждой марки провода. При одинаковой характеристике по критерию присваивается значение «1», при средней степени превосходства – «3», при существенном превосходстве – «5», а при очень сильном превосходстве – «7», в противном же случае (характеристики одной марки провода в разной степени уступают другой) отражаются обратные соответствующие значения ($1/3 = 0,33$, $1/5 = 0,20$, $1/7 = 0,14$).

Проверка согласованности сравнения оценивается по максимальным собственным значениям матриц сравнения λ_{max} , индексу согласованности $C.I.$ и коэффициенту согласованности $C.R.$ по формулам:

$$C.I. = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}; \quad (5)$$

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.}, \quad (6)$$

Таблица 3. Сравнение критериев

Table 3. Criteria comparison

Критерий	ДДТ	Стоимость	Среднее геометрическое	Вес критерия
ДДТ	1,00	3,00	1,73	$1,73 / 2,31 = 0,75$
Стоимость	0,33	1,00	0,58	$0,58 / 2,31 = 0,25$
Сумма	1,33	4,00	2,31	1,00

Таблица 4. Сравнение марок проводов по критерию 1

Table 4. Wire brand comparison according to criterion 1

По ДДТ	АС	АСТ	АТЗ/С	АТЗП/С	Среднее геометрическое	Вес
АС	1,00	0,20	0,14	0,20	0,27	0,05
АСТ	5,00	1,00	0,33	1,00	1,14	0,21
АТЗ/С	7,00	3,00	1,00	3,00	2,82	0,53
АТЗП/С	5,00	1,00	0,33	1,00	1,14	0,21
Сумма	18,00	5,20	1,81	5,20	5,36	1,00

Таблица 5. Сравнение марок проводов по критерию 2
Table 5. Wire type comparison according to criterion 2

По стоимости	АС	АСТ	АТЗ/С	АТЗП/С	Среднее геометрическое	Вес
АС	1,00	3,00	5,00	7,00	3,20	0,57
АСТ	0,33	1,00	3,00	4,00	1,41	0,25
АТЗ/С	0,20	0,33	1,00	3,00	0,67	0,12
АТЗП/С	0,14	0,25	0,33	1,00	0,33	0,06
Сумма	1,68	4,58	9,33	15,00	5,61	1,00

где n – порядок матрицы (матрицы формируются по данным таблиц).

Для подтверждения непротиворечивости результатов сравнения и проверки корректности оценок должно выполняться условие:

$$C.R. \leq 0,10. \quad (7)$$

Проверка согласованности полученных оценок показала, что парные сравнения не противоречивы, а оценка верна и убедительна, так как условие по формуле (7) выполняется:

- для табл. 4 $C.I. = 0,025$ при $n = 4$, $\lambda_{max} = 4,075$, $R.I. = 0,89$, $C.R. = 0,028 \leq 0,10$;
- для табл. 5 $C.I. = 0,035$ при $n = 4$, $\lambda_{max} = 4,104$, $R.I. = 0,89$, $C.R. = 0,039 \leq 0,10$.

При весах критериев первого (ДДТ) – 0,75, а второго (стоимости) – 0,25 получим результаты, выраженные в долях и процентах и приведенные в табл. 6.

Как видно из табл. 6, наибольшее соответствие поставленным целям проекта по установленным критериям показал провод

марки СЕНИЛЕК АТЗ/С со значением равным 42,4%. Таким образом, выбрана оптимальная марка провода для данного случая.

Для дальнейшего анализа для выбранной марки ПНП СЕНИЛЕК АТЗ/С берутся те сечения из ряда, которые по массе не превышают значения 614,82 кг/км и по ДДТ провода выдерживают требуемую прогнозную токовую нагрузку ЛЭП в режиме зимнего максимума (376 А) и наихудшего послеаварийного режима (488 А). Таких всего 4 варианта, которые показаны в табл. 7. Также для отобранных сечений выполняется условие ограничения отрицательного воздействия коронного разряда и радиопомех от короны. Если бы речь шла о проводе традиционной марки, то в случае, если на ВЛ 110 кВ уже используется провод АС 120/19, необходимо рассматривать сечения, начиная со 120 мм² с соблюдением технических ограничений. Но в рассматриваемом примере провода марки АС исключаются из рассмотрения, так как до сечения 185 мм² они не удовлетворяют условиям по значениям ДДТ, а после – введенному ограничению по массе для

Таблица 6. Результат выбора марки провода для рассматриваемого случая
Table 6. The result of wire brand selection for the case under consideration

Марка	АС	АСТ	СЕНИЛЕК АТЗ/С	СЕНИЛЕК АТЗП/С
Итоговый результат в долях	0,181	0,222	0,424	0,173
Итоговый результат в %	18,1	22,2	42,4	17,3

Таблица 7. Сформированный ряд сечений выбранной марки
Table 7. Formed series of wire sections of the selected type

№	СЕНИЛЕК АТЗ/С	ДДТ, А	Удельная масса провода (со смазкой), кг/км	Цена, приведенная к 2001 г. ¹ , тыс. руб. за 1 км	Стоимость провода для сооружения 1 км ВЛ, тыс. руб.
1	70/11	501	276	19,6	430,95
2	95/16	627	385	26,2	576,06
3	120/19	724	471	32,1	705,78
4	150/24	846	599	39,7	872,88

Таблица 8. Техничко-экономические параметры воздушных линий**Table 8.** Overhead line performance characteristics

Параметр	Значение
Срок службы линии	50 лет
Номинальное напряжение	110 кВ
Коэффициент амортизационных отчислений	0,02
Коэффициент (норма) отчислений на ремонт, эксплуатацию и обслуживание ЛЭП	0,008
Число рабочих часов в год	8760 ч
Удельные потери мощности на корону в проводах ВЛ	0,14 кВт/км
Среднее число часов влажной погоды в году (на примере г. Владивосток)	1608 ч
Число изоляторов в гирлянде	7 шт
Соппротивление одного подвешного изолятора в гирлянде	300 МОм
Число гирлянд на 1 км ВЛ	27 шт/км
Одноставочный тариф	1,757руб/кВт·ч
Ставка дисконтирования	0,1

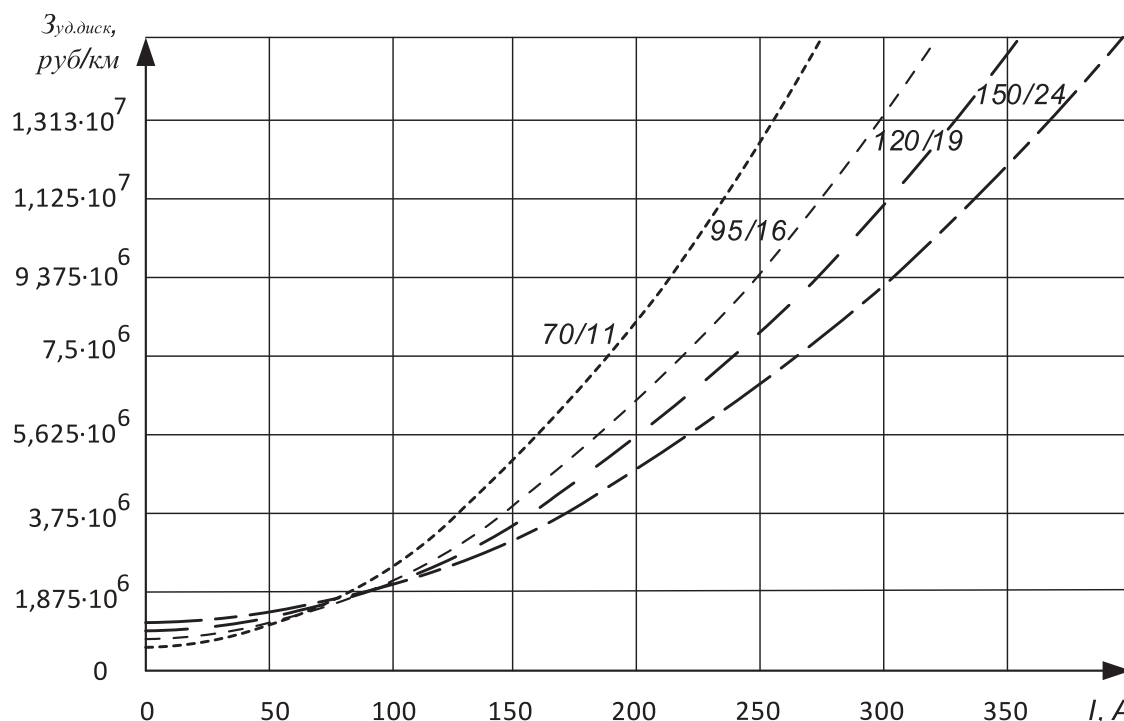
реализации рассматриваемого проекта без замены опор [21].

Перечень технико-экономических параметров ВЛ для расчета УДЗ представлен в табл. 8.

После формирования технико-экономических параметров ВЛ, выбранной марки провода и ее сечений переходим к непосредственному построению семейства зави-

симостей УДЗ от тока, протекающего по ВЛ в режиме зимнего максимума. На рис. 2 показано построение семейства зависимостей УДЗ от тока с учетом расчета всех составляющих издержек⁷.

В табл. 9 приведена интервальная оценка оптимальных токовых диапазонов для рассматриваемого случая.

**Рис. 2.** Построение семейства зависимостей удельных дисконтированных затрат от тока в линии**Fig. 2.** Construction of a family of dependences of specific discounted costs on overhead line current

⁷СТО 56947007-29.060.50.268-2019. Указания по проектированию ВЛ 220 кВ и выше с неизолированными проводами нового поколения. М.: ФСК ЕЭС, 2019. 98 с.

Таблица 9. Интервальная оценка оптимальных токовых диапазонов для рассматриваемого случая реконструкции ВЛ 110 кВ

Table 9. Interval assessment of optimal current ranges for the studied reconstruction case of the 110 kV overhead line

Сечение СЕНИЛЕК АТЗ/С	70/11	95/16	120/19	150/24
Токовый диапазон, А	до 58	59–80	81–97	свыше 97

На завершающем этапе *выбора оптимального сечения*, учитывая, что в режиме зимнего максимума нагрузка по ВЛ составляет 376 А, выбран провод СЕНИЛЕК АТЗ/С 150/24 для всей реконструируемой линии. Аналогичная проверка реализована для режима летнего максимума нагрузки ВЛ со значением 281 А. Результат не изменился. Оптимальные условия функционирования ВЛ обеспечены в течение всего года.

Дополнительные проверки провода после получения оптимального результата по новой методике не требуются, так как они уже учтены как при выборе марки провода, так и при формировании ряда возможных сечений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для подтверждения целесообразности и корректности применения новой методики рассчитаны потери в электрической энергии в сети 110 кВ до замены провода и после, а также оценено увеличение пропускной способности ВЛ. В табл. 10 представлены результаты расчета потерь электрической энергии с помощью программно-вычислительного комплекса RastrWin 3.

Замена провода в данном случае позволит не только увеличить пропускную способность ВЛ на 151% без замены существующих опор, но и снизить потери активной мощности в рассматриваемой электрической сети на 18,9%, а реактивной мощности – на 2,5%. Таким образом, предлагаемая методика позволяет получать дополнительные эффекты для электросетевого комплекса. Полученные результаты подтверждают целесообразность применения методики выбора оптимальных

марки и сечения провода в эксплуатационной и проектной практике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методика совокупного выбора оптимальных марки и сечения провода:

1) позволяет выбрать оптимальные марку и сечение провода любой конструкции для любых сценариев проектирования электросетевого объекта (реконструкция, модернизация, новое строительство, проектирование развития), снимая необходимость в ряде дополнительных проверок, присущих традиционным методам выбора сечений проводов;

2) обеспечивает учет всех требований и особенностей проекта и позволяет получать дополнительные положительные эффекты, такие как существенное повышение пропускной способности ВЛ, снижение количества используемых опор или реализация замены провода линии без замены опор, снижение потерь электроэнергии;

3) интегрирует реализацию проверок в саму методику выбора оптимального провода ВЛ, тем самым позволяя уйти от возможных противоречий при получении результатов при выборе марки и сечения провода.

Таким образом, в результате проведенного исследования предложена новая методика выбора провода ВЛ, принципиально отличающаяся от существующих совокупным выбором марки и сечения провода, реализацией проверок проводов до их технико-экономического сопоставления на основе интегрированного технико-экономического критерия и направленного на получение оптимальных технических и экономических эффектов.

Таблица 10. Сравнение величины потерь электрической энергии в электрической сети

Table 10. Comparison of the amount of electrical energy losses in the electrical network

Расчетный случай	До замены провода	После замены провода	Снижение потерь, %
Потери активной мощности, МВт	3,34	2,71	18,9
Потери реактивной мощности, Мвар	5,42	5,29	2,5

Список источников

1. Демьянова О.В., Бадриева Р.Р. Особенности реализации проектов индустрии 4 в электроэнергетике // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Социально-экономические науки. 2022. № 3. С. 161–175. <https://doi.org/10.15593/2224-9354/2022.3.12>. EDN: MOGVMV.
2. Zhu Yuan, Liu Yijiang, Zuo Anxin, Dong Jun, Xu Dan. A comparative study of investment efficiency of Chinese provincial power grid companies based on Super Efficiency SBM model // 5th International Conference on Power and Energy Technology (Tianjin, Jul 2023). Tianjin, 2023. P. 854–858. <https://doi.org/10.1109/ICPET59380.2023.10367562>.
3. Harbi F.Al., Csala D. Saudi Arabia's electricity: energy supply and demand future challenges // 1st Global Power, Energy and Communication Conference (Nevsehir, 12–15 June 2019). Nevsehir, 2019. P. 467–472. <https://doi.org/10.1109/GPECOM.2019.8778554>.
4. Wang Rizhao, Zhang Hengxu, Shi Fang, Zhang Yong, Zhang Lei. Empirical study of the relationship between global energy consumption and economic growth // China International Electrical and Energy Conference (Beijing, 1 October 2017). Beijing: IEEE, 2017. P. 394–399. <https://doi.org/10.1109/CIEEC.2017.8388480>.
5. Selvaraj M., Kulkarni S.M., Rameshbabu R. Performance analysis of a overhead power transmission line tower using polymer composite material // Procedia Materials Science. 2014. Vol. 5. P. 1340–1348. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.451>.
6. Reddy B.S., Mitra G. Investigations on high temperature low sag (HTLS) conductors // IEEE Transactions on Power Delivery. 2020. Vol. 35. No. 4. P. 1716–1724. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2019.2950992>.
7. Вариводов В.Н., Казаков С.Е., Кулик В.В., Ударов В.М. Стальные многогранные опоры для распределительных электрических сетей: возможности и перспективы // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2005. № 2. С. 37–42. EDN: KUHWOV.
8. Hadzimuratovic 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>.
9. Zhen Liu, Jian Zhang, Jiao Zhu, Dongyang Lin, Shengchun Liu, Cheng Yao. Development of high stress and large capacity conductor for large crossing transmission lines // International Conference on Applied Physics and Computing (Ottawa, 2022). Ottawa: IEEE, 2022. P. 248–251. <https://doi.org/10.1109/ICAPC57304.2022.00053>.
10. Федоров Н.А. Провода нового поколения и вопросы надежности ЛЭП // Работы систем электроснабжения в условиях гололедно-ветровых нагрузок: материалы Междунар. науч.-практ. конф. (г. Уфа, 19 октября 2016 г.). Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2016. С. 42–49. EDN: ХСКУКТ.
11. Bingran Shao, Jin Liu, Yingmin Feng, Guangsheng Cui, Bo Yan, Guoqi Ren. Analysis on selecting application of energy-saving conductors in overhead transmission line construction // China International Conference on Electricity Distribution. 2016. <https://doi.org/10.1109/CICED.2016.7576160>.
12. Lauria D., Quaia S. An investigation on line loadability increase with high temperature conductors // 6th International Conference on Clean Electrical Power. 2017. P. 645–649. <https://doi.org/10.1109/ICCEP.2017.8004757>.
13. Hoffman J., Reil M., Waters D.H., Wong C.K.W., M. Kumosa S.M. Evaluation of strains in dead-end fittings of high-temperature low sag electrical conductors using FBG sensors // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2024. Vol. 73. <https://doi.org/10.1109/TIM.2024.3352708>.
14. Beryozkina S. Potential application of the advanced conductors in a transmission line project // IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe. 2018. <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2018.8493858>.
15. David T., Dave B. How advanced conductors are improving the T&D system and combating climate change // IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. 2022. <https://doi.org/10.1109/TD43745.2022.9816899>.
16. Зуев Э.Н. К вопросу об актуализации нормативов на экономическую плотность тока // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2002. № 6. С. 39–45.
17. Song Yanrong, Zeng Hubiao. Optimization design of the conductor section selection in the transmission line // Third Pacific-Asia Conference on Circuits, Communications and System. 2011. <https://doi.org/10.1109/PACCS.2011.5990283>.
18. 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. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-339-353>. EDN: PRKWCM.
19. Varygina A.O., Savina N.V. Technical and economic model of the conductor cross-section for active-adaptive electrical networks // Majlesi Journal of Electrical Engineering. 2022. Vol. 16. No. 3. P. 27–34. <https://doi.org/10.52547/mjee.16.3.27>.
20. Варыгина А.О., Савина Н.В. Расчет длительно допустимого тока проводов нового поколения воздушных линий // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 4. С. 3–15. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-4-3-15>. EDN: MSHLRM.
21. Саати Т.Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: аналитические сети / пер. с англ.; науч. ред. А.В. Андрейчиков, О.Н. Андрейчикова. М.: ЛКИ, 2008. 360 с.

References

1. Demyanova O.V., Badriyeva R.R. Features of industry 4.0 projects in the energy sector. *Bulletin of the Perm national research polytechnic university. Sociology and Economics*. 2022;3:161-175. (In Russ.). <https://doi.org/10.15593/2224-9354/2022.3.12>. EDN: MOGVMV.
2. Zhu Yuan, Liu Yijiang, Zuo Anxin, Dong Jun, Xu Dan. A comparative study of investment efficiency of Chinese provincial power grid companies based on Super Efficiency SBM model. In: *5th International Conference on Power and Energy Technology*. Jul 2023, Tianjin. Tianjin; 2023, p. 854-858. <https://doi.org/10.1109/ICPET59380.2023.10367562>.
3. Harbi F. Al., Csala D. Saudi Arabia's electricity: energy supply and demand future challenges. In: *1st Global Power, Energy and Communication Conference*. 12–15 June 2019, Nevsehir. Nevsehir; 2019, p. 467-472. <https://doi.org/10.1109/GPECOM.2019.8778554>.
4. Wang Rizhao, Zhang Hengxu, Shi Fang, Zhang Yong, Zhang Lei. Empirical study of the relationship between global energy consumption and economic growth. In: *China International Electrical and Energy Conference*. 1 October 2017, Beijing. Beijing: IEEE; 2017, p. 394-399. <https://doi.org/10.1109/CIEEC.2017.8388480>.
5. Selvaraj M., Kulkarni S.M., Rameshbabu R. Performance analysis of a overhead power transmission line tower using polymer composite material. *Procedia Materials Science*. 2014;5:1340-1348. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.451>.
6. Reddy B.S., 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>.
7. Varivodov V.N., Kazakov S.E., Kulik V.V., Udarov V.M. Steel polyhedral supports for electrical distribution networks. Possibilities and prospects. *ELEKTRO. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost'*. 2005;2:37-42. (In Russ.). EDN: KUHWOV.
8. Hadzimuratovic 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>.
9. Zhen Liu, Jian Zhang, Jiao Zhu, Dongyang Lin, Shengchun Liu, Cheng Yao. Development of high stress and large capacity conductor for large crossing transmission lines. In: *International Conference on Applied Physics and Computing*. 2022, Ottawa. Ottawa: IEEE; 2022, p. 248-251. <https://doi.org/10.1109/ICAPC57304.2022.00053>.
10. Fedorov N.A. New generation of wires and reliability issues of overhead lines. In: *Raboty sistem elektrosnabzheniya v usloviyah gololedno-vetrovyh nagruzok: materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Power supply system operation under ice-wind loads: Proceedings of the International scientific and practical conference* 19 October 2016, Ufa. Ufa: Ufa University of Science and Technology; 2016, p. 42-49. (In Russ.). EDN: XCKUKT.
11. Bingran Shao, Jin Liu, Yingmin Feng, Guangsheng Cui, Bo Yan, Guoqi Ren. Analysis on selecting application of energy-saving conductors in overhead transmission line construction. In: *China International Conference on Electricity Distribution*. 2016. <https://doi.org/10.1109/CICED.2016.7576160>.
12. Lauria D., Quaia S. An investigation on line loadability increase with high temperature conductors. In: *6th International Conference on Clean Electrical Power*. 2017;645-649. <https://doi.org/10.1109/ICCEP.2017.8004757>.
13. Hoffman J., Reil M., Waters D.H., Wong C.K.W., M. Kumosa S.M. Evaluation of strains in dead-end fittings of high-temperature low sag electrical conductors using FBG sensors. In: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2024;73. <https://doi.org/10.1109/TIM.2024.3352708>.
14. Beryozkina S. Potential application of the advanced conductors in a transmission line project. 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.2018.8493858>.
15. David T., Dave B. How advanced conductors are improving the T&D system and combating climate change. In: *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*. 2022. <https://doi.org/10.1109/TD43745.2022.9816899>.
16. Zuev E.N. To standards adaptation for economic density of current. *ELEKTRO. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost'*. 2002;6:39-45. (In Russ.).
17. Song Yanrong, Zeng Hubiao. Optimization design of the conductor section selection in the transmission line. In: *Third Pacific-Asia Conference on Circuits, Communications and System*. 2011. <https://doi.org/10.1109/PACCS.2011.5990283>.
18. 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.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-339-353>. EDN: PRKWCM.
19. Varygina A.O., Savina N.V. Technical and economic model of the conductor cross-section for active-adaptive electrical networks. *Majlesi Journal of Electrical Engineering*. 2022;16(3):27-34. <https://doi.org/10.52547/mjee.16.3.27>.
20. Varygina A.O., Savina N.V. Calculating the current carrying capacity of the new generation overhead line conductors. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2020;22(4):3-15. (In Russ.). <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-4-3-15>. EDN: MSHLRM.
21. Saati T.L. Decision making with dependences and feedback, 2008, 360 p. (Russ. ed.: *Prinyatie reshenij pri zavisimostyah i obratnyh svyazyah: analiticheskie seti*. Moscow: LKI; 2008, 360 p.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**Савина Наталья Викторовна,**

д.т.н., профессор,
заведующий кафедрой энергетики,
Амурский государственный университет,
675028, г. Благовещенск,
ул. 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,
ул. Игнатьевское шоссе, 21, Россия
✉ alleks_13@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3500-7723>

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 03.08.2024 г.; одобрена после рецензирования 02.09.2024 г.; принята к публикации 07.09.2024 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**Natalia V. Savina,**

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of the Department of Power Engineering,
Amur State University,
21, Ignatyevskoe Shosse St., Blagoveshchensk
675028, Russia
nataly-savina@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3497-8819>

Aleksandra O. Varygina,

Postgraduate Student,
Amur State University,
21, Ignatyevskoe Shosse St., Blagoveshchensk
675028, Russia
✉ alleks_13@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3500-7723>

Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 03.08.2024; approved after reviewing 02.09.2024; accepted for publication 07.09.2024.



Исследование влияния нового управляемого регулятора напряжения на несинусоидальность тока и напряжения системы электроснабжения

Б.Д. Табаров¹✉

¹Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Комсомольск-на-Амуре, Россия

Резюме. Цель – оценка влияния нового управляемого регулятора напряжения на несинусоидальность тока и напряжения на разных участках системы электроснабжения при плавном (дискретном) регулировании напряжения на высокой стороне цехового трансформатора. При разработке блочно-модульной модели трансформаторной подстанции с предлагаемым управляемым регулятором напряжения и измерительными модулями использовалась программа MatLab. На данной разработанной блочно-модульной модели трансформаторной подстанции проводилось исследование несинусоидальности тока и напряжения на разных участках системы электроснабжения при стабилизации напряжения у потребителей на заданном уровне. Исследование осуществлялось в цеховом трансформаторе мощностью 1 МВА и напряжением 6/0,4 кВ при активно-индуктивном характере нагрузки с углом фазового сдвига тока нагрузки $\varphi=45$ град. Полученные результаты исследования несинусоидальности тока и напряжения на разных участках системы электроснабжения подтверждают, что, благодаря расширению функциональных возможностей предлагаемого технического решения, напряжение у потребителей сохраняется на заданном уровне с высокими технико-экономическими показателями. Показано, что предлагаемое устройство при снижении напряжения сети на 5% и повышении тока активно-индуктивной нагрузки на 35% создает несинусоидальность напряжения, величина которой не превышает допустимые нормы, установленные отечественным и международным стандартами. При этом предлагаемое устройство сохраняет напряжение у потребителей на заданном уровне. Из полученной интегральной характеристики стабилизации напряжения видно, что применение предлагаемого технического решения взамен существующего механического регулятора напряжения типа «переключение без возбуждения» позволяет сохранить номинальное напряжение на шине распределительного устройства. В рамках данной работы в дальнейшем планируется проводить исследование стабилизации напряжения у потребителей с одновременной компенсацией реактивной мощности для комплексного улучшения технико-экономических показателей систем электроснабжения при нестабильности напряжения питающей сети и тока нагрузки.

Ключевые слова: питающая сеть, цеховой трансформатор, двухподдиапазонный реакторно-тиристорный управляемый регулятор напряжения, коэффициент несинусоидальности напряжения, коэффициент искажения синусоидальности тока, активно-индуктивная нагрузка, система электроснабжения

Для цитирования: Табаров Б.Д. Исследование влияния нового управляемого регулятора напряжения на несинусоидальность тока и напряжения системы электроснабжения // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 3. С. 475–488. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-475-488>. EDN: MMQUKA.

POWER ENGINEERING

Original article

Influence of a new controlled voltage regulator on the current and voltage non-sinusoidality of a power supply system

Bekhruz D. Tabarov¹✉

¹Komsomolsk-na-Amure State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia

Abstract. This work evaluates the influence of a new controlled voltage regulator on the current and voltage non-sinusoidality in different sections of a power supply system during smooth (discrete) voltage regulation on the high-voltage side of a shop transformer. The MatLab software application was used to develop a block-modular model for a transformer substation with the proposed controlled voltage regulator and measurement modules. The developed model was used to investigate the current and voltage non-sinusoidality in different parts of a power

supply system when stabilizing the voltage at the consumer end at a given level. The study was carried out using a shop transformer with a capacity of 1 MVA and a voltage of 6/0.4 kV under an active-inductive character of the load with the load current phase angle of $\varphi=45$ deg. The obtained results confirm that, due to the extended functional capabilities of the proposed technical solution, the voltage at consumers is maintained at a given level under high technical and economic performance. When the network voltage is reduced by 5% and the active-inductive load current is increased by 35%, the proposed device was shown to create voltage non-sinusoidality. The voltage non-sinusoidality value does not exceed the permissible domestic and international norms. In addition, the proposed device is capable of maintaining the voltage at the consumer end at a given level. The obtained integral characteristic of voltage stabilization shows that the application of the proposed technical solution instead of the existing mechanical voltage regulator of the "switching without excitation" type allows the nominal voltage at the busbar of the switchgear to be retained. Further research will investigate voltage stabilization at consumers with simultaneous compensation of reactive power for complex improvement of technical and economic indicators of power supply systems under the conditions of unstable supply voltage and load current.

Keywords: power supply network, shop transformer, double-subrange reactor-thyristor controlled voltage regulator, voltage non-sinusoidal coefficient, current total harmonic distortion coefficient, active inductive load, power supply system

For citation: Tabarov B.D. Influence of a new controlled voltage regulator on the current and voltage non-sinusoidality of a power supply system. *iPolytech Journal*. 2024;28(3):475-488. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-475-488>. EDN: MMQUKA.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день улучшение качества электроэнергии является одним из актуальных вопросов во всех отраслях систем электроснабжения, в частности на промпредприятиях и агропромышленных комплексах, и согласуется с Энергетической Стратегией России на период до 2035 года и рядом отраслевых программ².

Опыт эксплуатации трансформаторных подстанций напряжением (6, 10)/0,4 кВ показывает, что в настоящее время в системах электроснабжения (СЭС) низкого и среднего класса напряжения не рассматривается вопрос стабилизации напряжения у потребителей на заданном уровне. Как известно, изменения напряжения в питающей сети и (или) тока на нагрузке создают отклонения и колебания напряжения у потребителей, значения которых в большинстве случаев превышают предельно допустимые нормы, установленные ГОСТами^{3,4}. Стоит также отметить, что, как показывает практика, не всегда в СЭС (6, 10)/0,4 кВ рассматривается защита электроустановки от перенапряжения, в результате чего в лучшем случае это приводит к нарушению технологического процесса и сокращению срока службы электрооборудования.

Вопросом сохранения напряжения у потребителей на заданном уровне достаточно

глубоко занимались как отечественные^{5,6} [1–6], так и зарубежные [7–20] ученые, среди публикаций которых можно отметить работы [1, 7, 9]. В этих работах ученые, учитывая возникновение положительного и отрицательного отклонения напряжения у потребителей, на основе базовых элементов разработали разные технические решения и способы управления ими для поддержания напряжения в системах электроснабжения на заданном уровне. Положительная сторона этих технических решений заключается в сохранении напряжения у потребителей на номинальном уровне, несмотря на нестабильности напряжения в сети и (или) тока на нагрузке. Известные устройства [1, 7, 9] помимо преимуществ также имеют и недостатки, основными из которых являются наличие несинусоидальности напряжения, создаваемое устройством, сложное устройство, а также низкие технико-экономические показатели.

В целом аналитический обзор информационных источников, посвященных вопросам поддержания напряжения у потребителей на заданном уровне без создания несинусоидальности напряжения, показал, что применение энергосберегающих установок, переход на цифровые устройства, появление новых потребителей электроэнергии, низкое

²Распоряжение Правительства РФ от 09 июня 2020 г. № 1523-р «Энергетическая стратегия России на период до 2035 года». Режим доступа: <http://government.ru/docs/39847/> (дата обращения: 16.03.2024).

³ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 01.07.2014. М.: Росстандарт, 2014.

⁴AC Sources for IEC 1000. Harmonics and Flicker Testing (Международный стандарт МЭК 1000) Режим доступа: <https://shop.standards.govt.nz/catalog> (дата обращения: 17.03.2024).

быстродействие регуляторов напряжения и сравнительно невысокая точность регулирования напряжения ухудшают качество электроэнергии, что приводит к сокращению срока службы электрооборудования и значительному снижению технико-экономических показателей систем электроснабжения [14, 15]. Учитывая недостатки существующих СЭС и результаты аналитических обзоров информационных источников, посвященных вопросам повышения качества электроэнергии, предлагается применение нового регулятора напряжения типа двухподдиапазонного реакторно-тиристорного управляемого регулятора напряжения (ДР-ТУРН) [16], который, несмотря на снижение напряжения в сети и повышение тока на нагрузке, позволяет сохранить напряжение у потребителей на номинальном уровне и комплексно улучшить технико-экономические показатели системы электроснабжения. Областью применения, предлагаемого ДР-ТУРН, являются трансформаторные подстанции всех отраслей систем электроснабжения низкого и среднего класса напряжения.

Ниже, используя метод имитационного моделирования, в среде MatLab проводятся исследования влияния устройства ДР-ТУРН на несинусоидальность тока и напряжения на разных участках СЭС при нестабильности напряжения питающей сети и тока активно-индуктивной нагрузки.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью данной работы является оценка влияния нового автоматизированного регулятора напряжения типа ДР-ТУРН на несинусоидальность тока и напряжения СЭС при стабилизации напряжения у потребителей на заданном (номинальном) уровне.

Для достижения поставленной цели решались нижеприведенные задачи:

1) разработать функциональную схему трансформаторной подстанции с предлагаемым двухподдиапазонным реакторно-тиристорным управляемым регулятором напряжения для обеспечения нормальной работы, улучшения показателей качества электроэ-

нергии и технико-экономических показателей всех отраслей системы электроснабжения при стационарных и динамических процессах;

2) разработать блочно-модульную модель трансформаторной подстанции СЭС с предлагаемым ДР-ТУРН и измерительными модулями для проведения исследования и оценки влияния ДР-ТУРН на несинусоидальность тока и напряжения на разных участках СЭС при плавном регулировании напряжения на высокой стороне цехового трансформатора;

3) на основе полученных осциллограмм мгновенных значений токов и напряжений, приведенных в работе [17], построить характеристику стабилизации напряжения у потребителей с устройством ДР-ТУРН при разных уровнях напряжения питающей сети и тока активно-индуктивной нагрузки;

4) исследовать и оценить влияние ДР-ТУРН на несинусоидальность тока и напряжения на разных участках СЭС при стабилизации напряжения у потребителей на заданном уровне.

РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ С ПРЕДЛАГАЕМЫМ ДВУХПОДДИАПАЗОННЫМ РЕАКТОРНО-ТИРИСТОРНЫМ УПРАВЛЯЕМЫМ РЕГУЛЯТОРОМ НАПЯЖЕНИЯ

Аналитическое исследование информационных источников и опыта эксплуатации трансформаторных подстанций, связанное с обеспечением нормальной работы, сохранением срока службы электрооборудования, улучшением качества электроэнергии и технико-экономических показателей всех отраслей СЭС при стационарных и динамических процессах, позволило выявить недостатки широко распространенных технических решений и способов управления, которые разработаны на основе механических и электронных компонентов как совместно (гибридный), так и отдельно. Это позволило разработать новый принцип построения трансформаторных подстанций на основе

⁵Волков Н.Г. Качество электроэнергии в системах электроснабжения: учеб. пособ. Томск: Томский политехнический ун-т, 2010. 152 с.

⁶Решения для повышения качества электроснабжения в сетях 0,4 кВ. Акционерное общество высоковольтного оборудования «Электроаппарат». Режим доступа: https://enertek63.ru/wp-content/uploads/2021/03/jea_buster.pdf (дата обращения: 16.03.2024 г.).

двух модулей тиристорных ключей, трехфазного контактора и двух реакторов с разными индуктивными сопротивлениями. Принципу действия предлагаемого технического решения и его специализированному способу управления в широкой интерпретации посвящена работа [16].

На рис. 1 в однолинейном исполнении показана функциональная схема цехового трансформатора подстанции с новым устройством, которая представляет собой трехфазную сеть (G), линию электропередачи (W), трехфазный сетевой высоковольтный выключатель (Qc), блок ДР-ТУРН, цеховой трансформатор (ЦТ), блоки датчика отклонения напряжения (ДОН) и авторегулирования (БАР), трехфазный автоматический выключатель (QF) и блок активно-индуктивной нагрузки (Z).

На рис. 1 блок регулятора (ДР-ТУРН), блок нагрузки (Z_H) с гибридными пускателями и их системы формирователя управляющих им-

пульсов (ФУИ) выделены пунктиром и представлены в виде силовой управляющей составляющей.

БЛОЧНО-МОДУЛЬНАЯ ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ С НОВЫМ РЕГУЛЯТОРОМ НАПЯЖЕНИЯ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМИ МОДУЛЯМИ

Автором статьи в среде MatLab была построена блочно-модульная имитационная модель трансформаторной подстанции⁷, на которой проводились исследования стабилизации напряжения у потребителей на заданном уровне при внезапном снижении напряжения в сети и повышении тока активно-индуктивной нагрузки [17]. Для проведения исследования влияния ДР-ТУРН на несинусоидальность тока и напряжения СЭС при стабилизации напряжения у потребителей

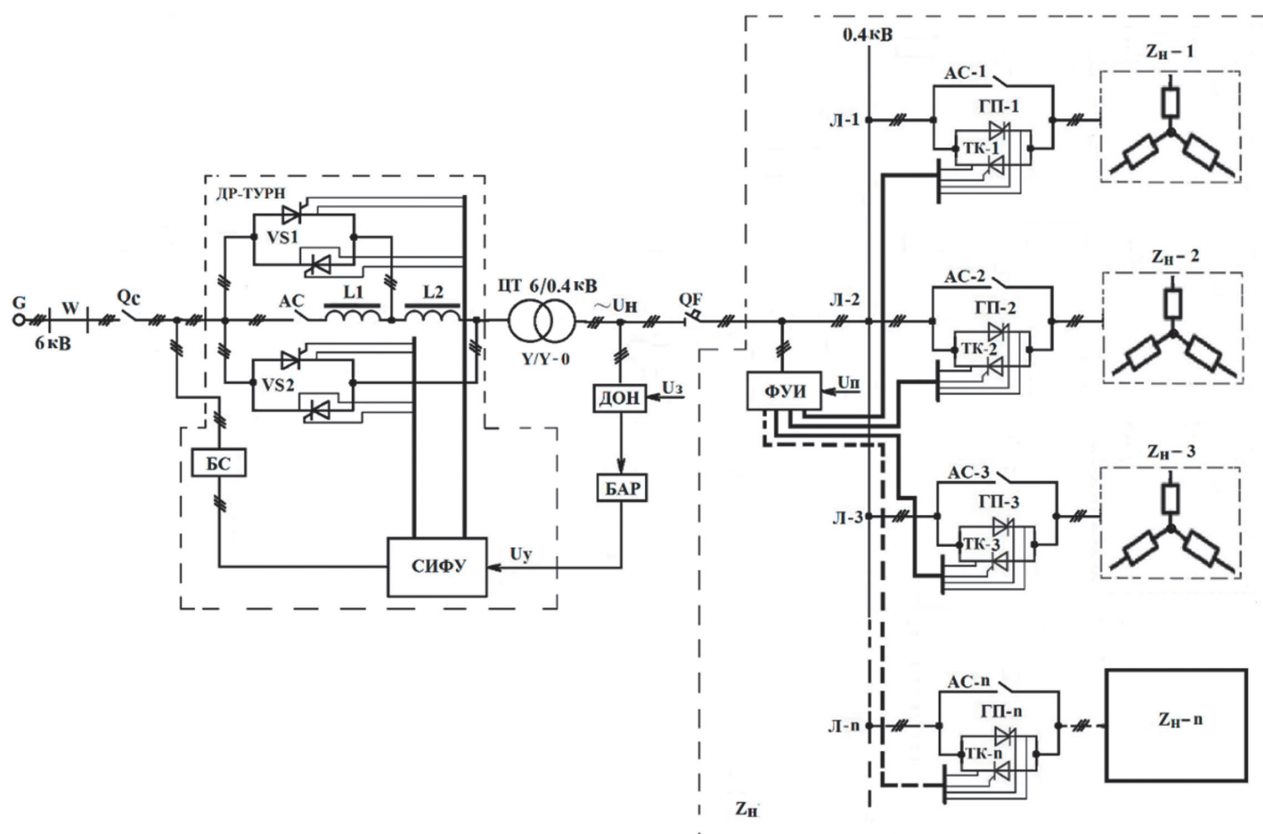


Рис. 1. Функциональная схема трансформаторной подстанции с предлагаемым двухподдиапазонным реакторно-тиристорным управляемым регулятором напряжения

Fig. 1. Functional diagram of a transformer substation with the proposed double-subrange reactor-thyristor controlled voltage regulator

⁷А.с. № 2022611670, Российская Федерация. Блочнo-модульная модель двухтрансформаторной подстанции с двухподдиапазонным реакторно-тиристорным устройством / В.С. Климаш, Б.Д. Табаров. Заявл. 24.01.2022; опубли. 31.01.2022. Бюл. № 2.

на заданном уровне построена имитационная модель трансформаторной подстанции с предлагаемым регулятором напряжения и измерительными модулями.

Под измерительными модулями понимаются модули для вычисления коэффициента несинусоидальности напряжения и коэффициента искажения синусоидальности тока. Измерительные модули разработаны на основе известных математических выражений⁸ и представлены в развернутом виде в работе [18]. Исследование коэффициента несинусоидальности напряжения и коэффициента искажения синусоидальности тока на разных участках системы электроснабжения проводилось для определения влияния устройства ДР-ТУРН на несинусоидальность тока и напряжения системы электроснабжения при стабилизации напряжения у потребителей на заданном уровне.

Имитационная модель трансформаторной подстанции системы электроснабжения с устройством ДР-ТУРН и измерительными модулями показана на рис. 2. Как видно из рис. 2, она состоит из блока питающей

сети (ПС), блока сетевого выключателя (Q1), линии электропередачи (ЛЭП), модулей основных (ТК-1) и дополнительных (ТК-2) тиристорных ключей, синхронизированных с сетью, блоков системы импульсно-фазового управления СИФУ-1 и СИФУ-2, основного (L1) и дополнительного (L2) реакторов, блока контактора переменного тока АС (от англ. Alternative Current), цехового трансформатора (ЦТ), блоков гибридных пускателей нагрузок (ГП-1, ГП-2 и ГП-3), блока автоматического выключателя QF, блоков ДОН и обратной связи (БОС), блока ФУИ гибридных пускателей [17], модулей для вычисления коэффициента несинусоидальности напряжения питающей сети K_{Uc} , цехового трансформатора $K_{Uцт}$ и нагрузки $K_{Uн}$, модулей для вычисления коэффициента искажения синусоидальности тока питающей сети K_{Ic} , цехового трансформатора $K_{Iцт}$ и нагрузки K_{In} , измерительных датчиков токов и напряжений, блоков активно-индуктивных нагрузок ($Z_{н-1}$, $Z_{н-2}$ и $Z_{н-3}$), а также других вспомогательных элементов.

Как показано на рис. 2, для определения влияния устройства ДР-ТУРН на несинусои-

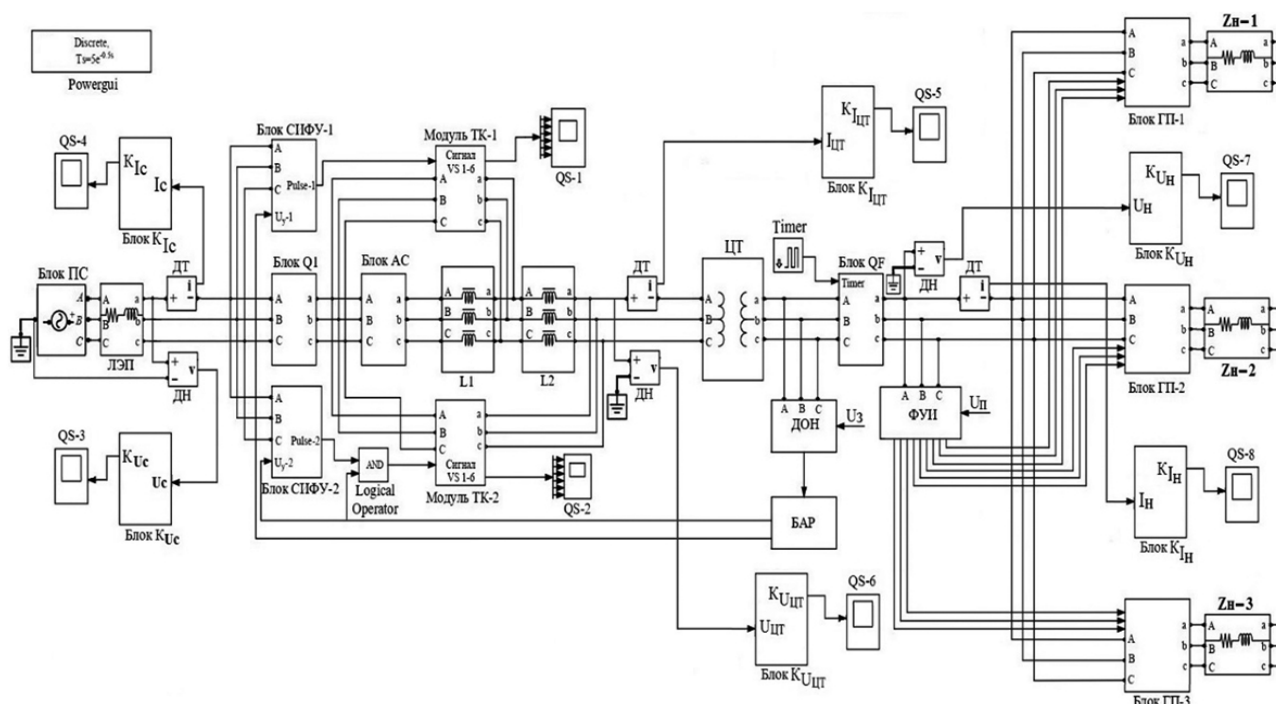


Рис. 2. Имитационная модель системы электроснабжения с устройством ДР-ТУРН и измерительными модулями для вычисления коэффициента несинусоидальности напряжения и коэффициента искажения синусоидальности тока

Fig. 2. A simulation model of an electric power supply system with a double-subrange reactor-thyristor controlled voltage regulator and measuring modules for calculating the voltage non-sinusoidal coefficient and current total harmonic distortion coefficient

⁸Бутырина П.А., Гафиятуллина Р.Х., Шестакова А.А. Электроприводы. Электроснабжение: учеб. пособ. для вузов. В 3-х кн. Кн. III. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. 639 с.

дальность тока и напряжения на отдельных участках систем электроснабжения измерительные модули подключены к питающей сети, цеховому трансформатору и к нагрузке.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ И ИСКАЖЕНИЯ СИНУСОИДАЛЬНОСТИ ТОКА ПРИ СТАБИЛИЗАЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ

Исследование коэффициента несинусоидальности напряжения и коэффициента искажения синусоидальности тока на разных участках СЭС проводилось при номинальном напряжении сети и номинальной нагрузке, а также при внезапном снижении напряжения сети на 5% и повышении нагрузки на 70% через две ступени по 35% относительно номинального уровня. Для большей наглядности иллюстрации физических процессов на нижеприведенных рисунках на интервалах времени T-1, T-2 и T-3 приводятся фрагменты из результатов исследований коэффициента несинусоидальности напряжения и коэффициента искажения синусоидальности тока при стабилизации напряжения у потребителей на номинальном уровне. Фрагменты, представленные на интервале времени T-1 рис. 3 а, а также рис. 4 и 5, иллюстрируют работу СЭС при номинальном напряжении питающей сети и номинальном токе активно-индуктивной нагрузки. Результаты исследования, приведенные на интервале времени T-2, иллюстрируют работу трансформаторной подстанции и потребителей электроэнергии при внезапном отклонении напряжения в питающей сети на -5% и повышении тока нагрузки на 35% относительно номинального уровня напряжения сети и тока активно-индуктивной нагрузки (интервала времени T-1). Результаты исследования, приведенные на интервале времени T-3, иллюстрируют работу трансформаторной подстанции и потребителей электроэнергии при пониженном напряжении сети на -5% и резком повышении тока активно-индуктивной нагрузки еще на 35% от тока нагрузки, который показан на интервале времени T-2, в результате чего цеховой трансформатор на этом интервале времени (интервал времени T-3) загружается на 140% и продолжает сохранять надежность питания потребителей электроэнергии.

Стоит прежде всего подчеркнуть, что на рис. 3 а и 4 а для более широкой интерпретации полученных результатов исследований влияния ДР-ТУРН на несинусоидальность тока и напряжения на разных участках СЭС при стабилизации напряжения у потребителей на заданном уровне приводятся осциллограммы токов и напряжений из ранее проведенных исследований [17] непрерывного регулирования напряжения на высокой стороне цехового трансформатора при неустойчивости напряжения питающей сети и тока нагрузки.

На осциллограмме рис. 3 а приведены действующие значения токов и напряжений питающей сети (I_c и U_c) и нагрузки (I_n и U_n) при работе трансформаторной подстанции с электрическими параметрами, иллюстрированными, соответственно, на интервалах времени T-1, T-2 и T-3, при регулировании напряжения на высокой стороне цехового трансформатора подстанции. Фрагментами, представленными на интервалах времени T-1, T-2 и T-3, иллюстрируется работа цехового трансформатора при неустойчивости напряжения в сети и тока на нагрузке, где продолжительность его работы в каждом интервале времени составляет не меньше 10 мин. Здесь кривая U_n иллюстрирует работоспособность устройства ДР-ТУРН при стабилизации напряжения у потребителей на заданном уровне в случае возникновения отклонения напряжения в питающей сети и тока нагрузки на шине распределительного устройства цехового трансформатора [17]. Полученные результаты этих численных экспериментов позволили построить интегральную характеристику стабилизации напряжения у потребителей. Она представлена на рис. 3 б и характеризует работоспособность предлагаемого управляемого регулятора напряжения.

Из интегральной характеристики стабилизации напряжения (рис. 3 б) хорошо заметно, что применение предлагаемого ДР-ТУРН взамен традиционного механического регулятора (сезонного регулятора) напряжения типа ПБВ в составе существующих трансформаторных подстанций позволяет сохранить номинальное напряжение на шинах распределительных устройств с хорошими технико-экономическими показателями, несмотря на неустойчивость на-

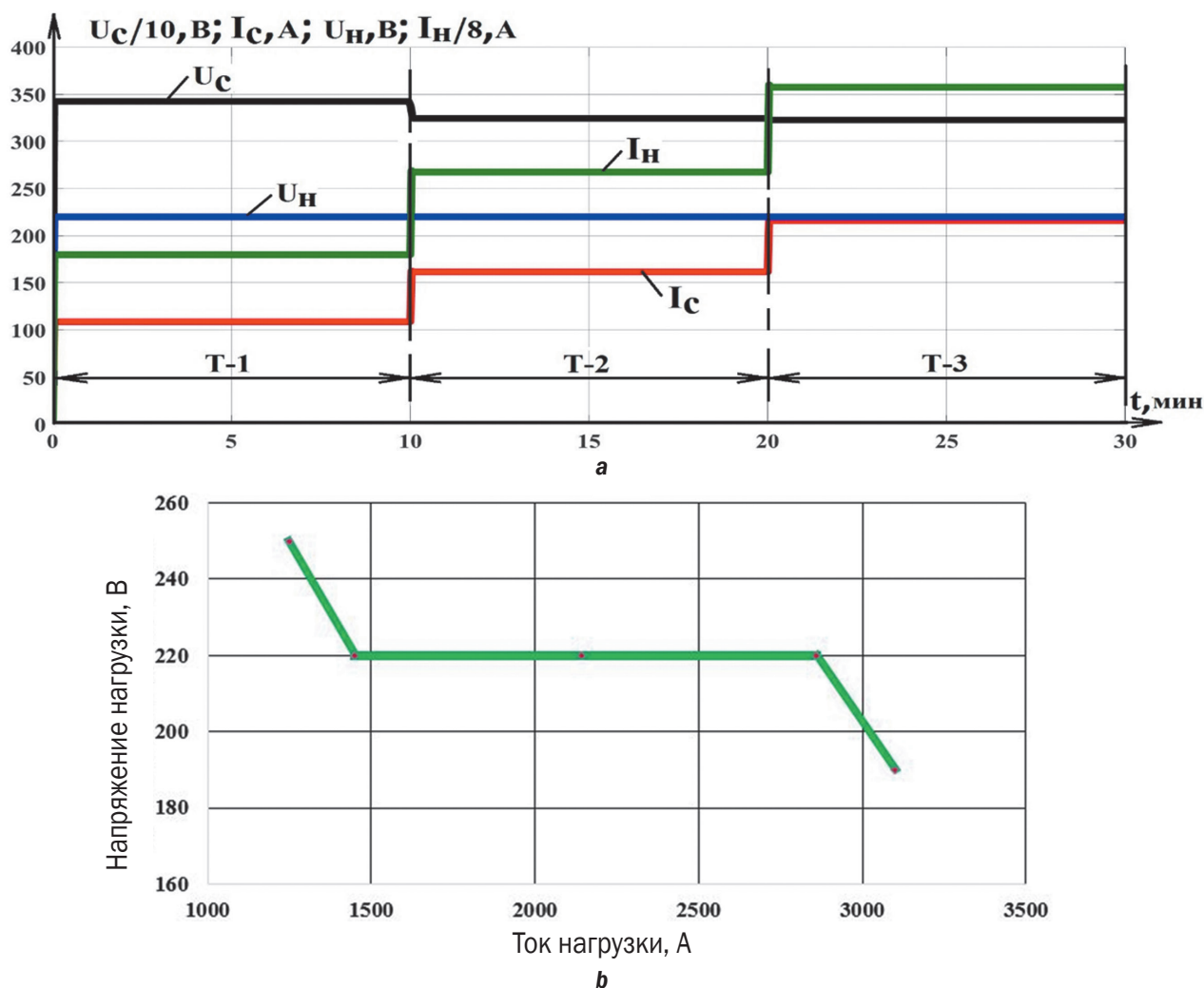


Рис. 3. Осциллограммы действующих значений токов и напряжений (а) и интегральная характеристика стабилизации напряжения потребителей электроэнергии (б)

Fig. 3. Oscillograms of effective current and voltage values (a) and integral characteristic of voltage stabilization of electric power consumers (b)

пряжения сети и тока нагрузки, благодаря расширению функциональных возможностей предлагаемого технического решения и специализированному способу управления им [16].

Ниже приведены результаты исследования коэффициентов несинусоидальности напряжения и искажения синусоидальности тока на разных участках СЭС при непрерывном регулировании напряжения на высокой стороне цехового трансформатора с устройством ДР-ТУРН, проведенного для оценки влияния управляемого регулятора напряжения на несинусоидальность тока и напряжения в системах электроснабжения.

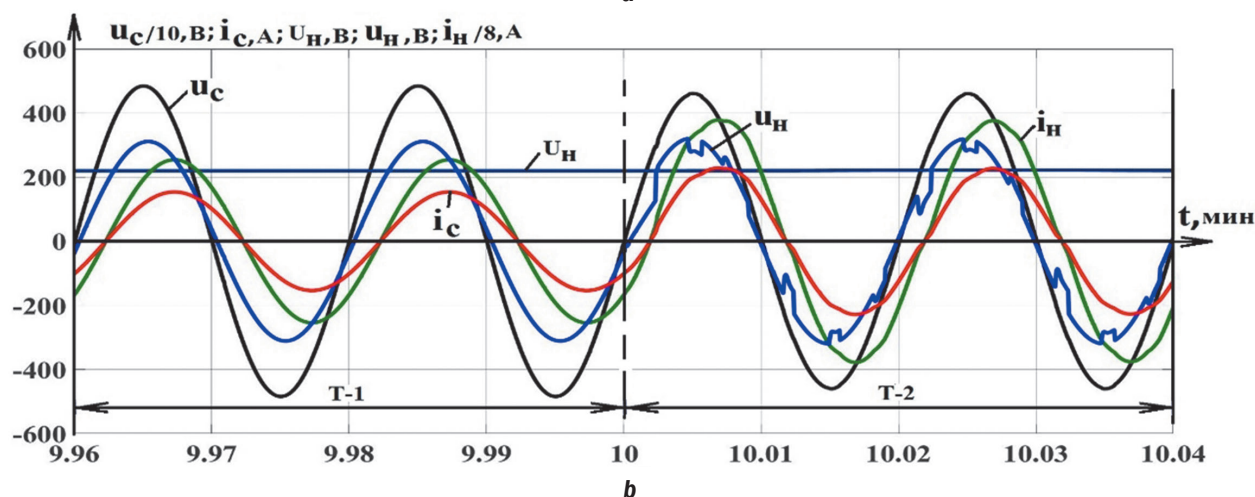
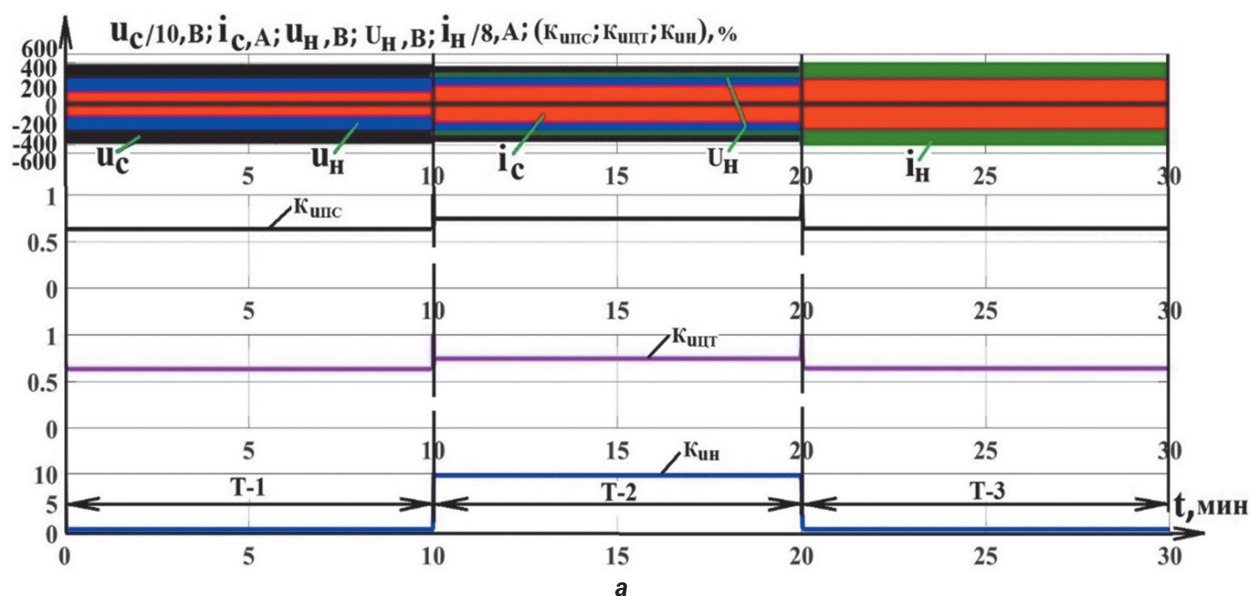
Полученные результаты исследования коэффициента несинусоидальности напряжения на разных участках СЭС при непре-

рывном регулировании напряжения на высокой стороне цехового трансформатора с предлагаемым ДР-ТУРН представлены на рис. 4 а, тогда как на рис. 4 б–д для более широкой интерпретации полученных результатов исследования влияния предлагаемого устройства на несинусоидальность тока и напряжения приводятся фрагменты из процесса стабилизации напряжения, где также дополнительно иллюстрируется ступенчатое повышение нагрузки. Важно отметить, что продолжительность исследования коэффициента несинусоидальности напряжения при разных углах управления тиристорных ключей в каждом интервале времени составила не менее 10 мин. Для оценки влияния ДР-ТУРН на несинусоидальность напряжения сети, цехового трансформатора и нагрузки на

интервалах времени Т-1, Т-2 и Т-3 на рис. 4 а приводятся фрагменты из полученных результатов исследования, где продолжительность исследования коэффициента несинусоидальности напряжения в каждом интервале времени составляет не меньше 10 мин. На осциллограммах рис. 4 приведенные надписи означают мгновенные значения токов и напряжений питающей сети (i_c и u_c) и нагрузки (i_n и u_n), действующие значения напряжения нагрузки (U_n), а также коэффициента несинусоидальности напряжения питающей сети $K_{u\text{пс}}$, цехового трансформатора $K_{u\text{цт}}$ и активно-индуктивной нагрузки $K_{u\text{ин}}$. Из результатов этого исследования видно, что предлагаемый управляемый регулятор напряжения при номинальном напряжении сети и токе активно-индуктивной нагрузки (интервал времени Т-1), а также при снижении напряжения в сети на 5% и повышении тока активно-индуктивной нагрузки на 70% (интервал времени

Т-3) относительно номинальных параметров не создает несинусоидальность напряжения на элементах СЭС. На интервале времени Т-2 устройство ДР-ТУРН, сохраняя номинальный уровень напряжения на шине распределительного устройства цехового трансформатора, вносит гармонические составляющие в напряжение сети и цехового трансформатора на 0,78%, а потребителя электроэнергии на 9,8%, что не превышает допустимые нормы, установленные ГОСТом³.

По результатам анализа исследования коэффициента несинусоидальности напряжения при непрерывном регулировании напряжения с устройством ДР-ТУРН можно заявить, что предлагаемое устройство, поддерживая напряжение у потребителей на заданном уровне (см. рис. 4, кривая U_n) при разных уровнях напряжения питающей сети и тока нагрузки, не вносит гармонических составляющих в напряжение всех элемен-



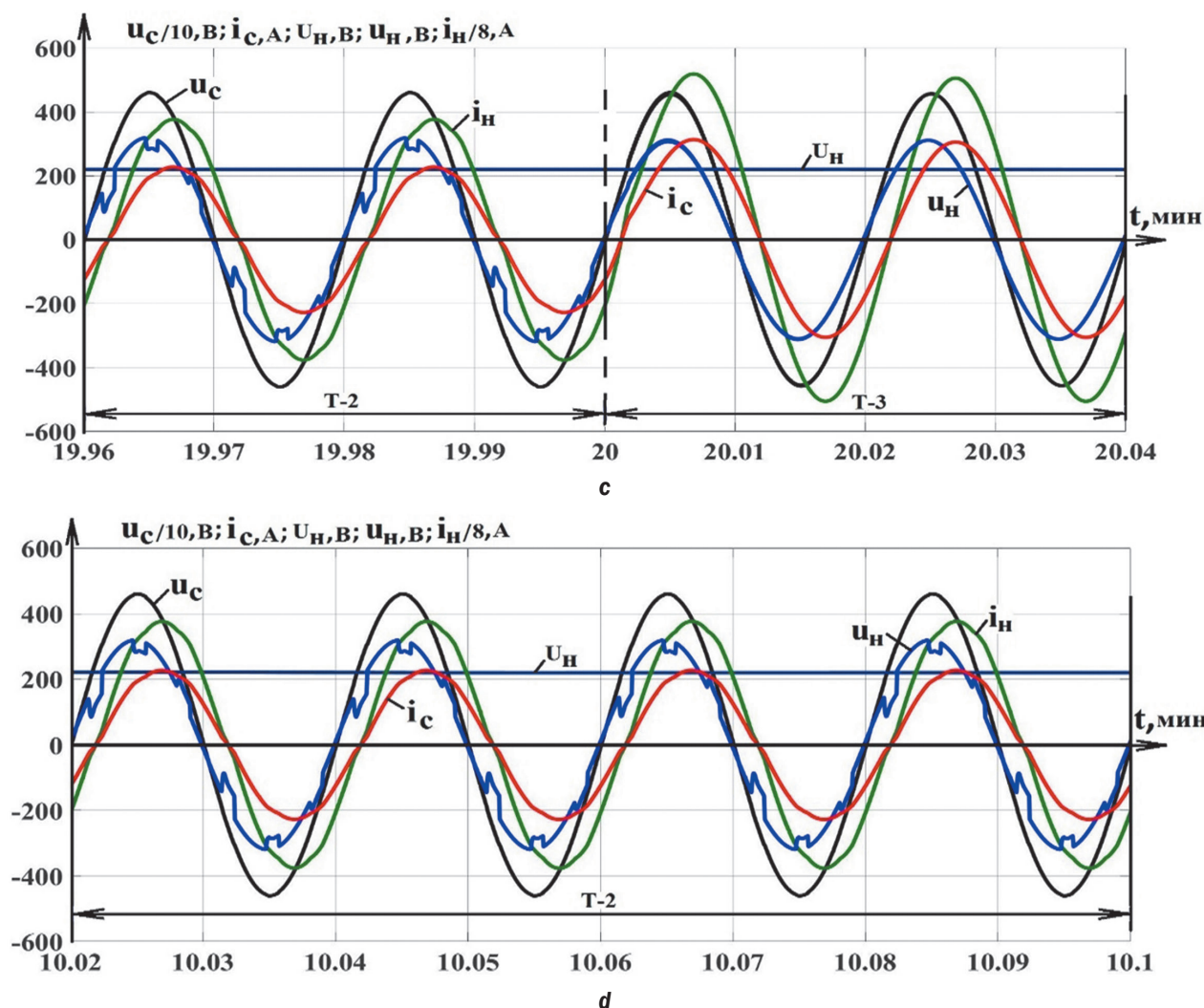


Рис. 4. Осциллограммы токов и напряжений и коэффициента несинусоидальности напряжения на разных участках системы электроснабжения с ДР-ТУРН (а-д)

Fig. 4. Oscillograms of currents and voltages and the voltage non-sinusoidal coefficient in the different sections of the power supply system with a double-subrange reactor-thyristor controlled voltage regulator (a-d)

тов СЭС на интервалах времени Т-1 и Т-3. Устройство ДР-ТУРН, поддерживая номинальное напряжение у потребителей на заданном уровне, искажает синусоидальность формы напряжения только на интервале времени Т-2, при этом величины искажений соответствуют предельно допустимым нормам и не повышаются до максимального значения нормы, установленной отечественным³ и международным⁴ стандартами. Это также показывает эффективность работы предлагаемого ДР-ТУРН и улучшение энергетических показателей СЭС в интервале времени Т-2.

Следующие осциллограммы (рис. 5) иллюстрируют коэффициент искажения синусоидальности тока на разных участках системы электроснабжения при стабилизации

напряжения у потребителей на номинальном уровне при разных углах управлений тиристорных ключей. Осциллограммы рис. 5 а иллюстрируют влияние ДР-ТУРН на синусоидальность формы токов сети, цехового трансформатора и нагрузки, а осциллограммы, представленные на рис. 5 б, с демонстрируют изменения физических процессов при разных углах управлений тиристорных ключей в процессе стабилизации напряжения у потребителей при нестабильности напряжения в сети и тока на нагрузке.

Стоит подчеркнуть, что коэффициент искажения тока исследовался в каждом интервале времени не меньше 10 мин. Для иллюстрации и оценки влияния ДР-ТУРН на искажение тока сети, цехового трансформатора и нагрузки на рис. 5 а на интервалах времени

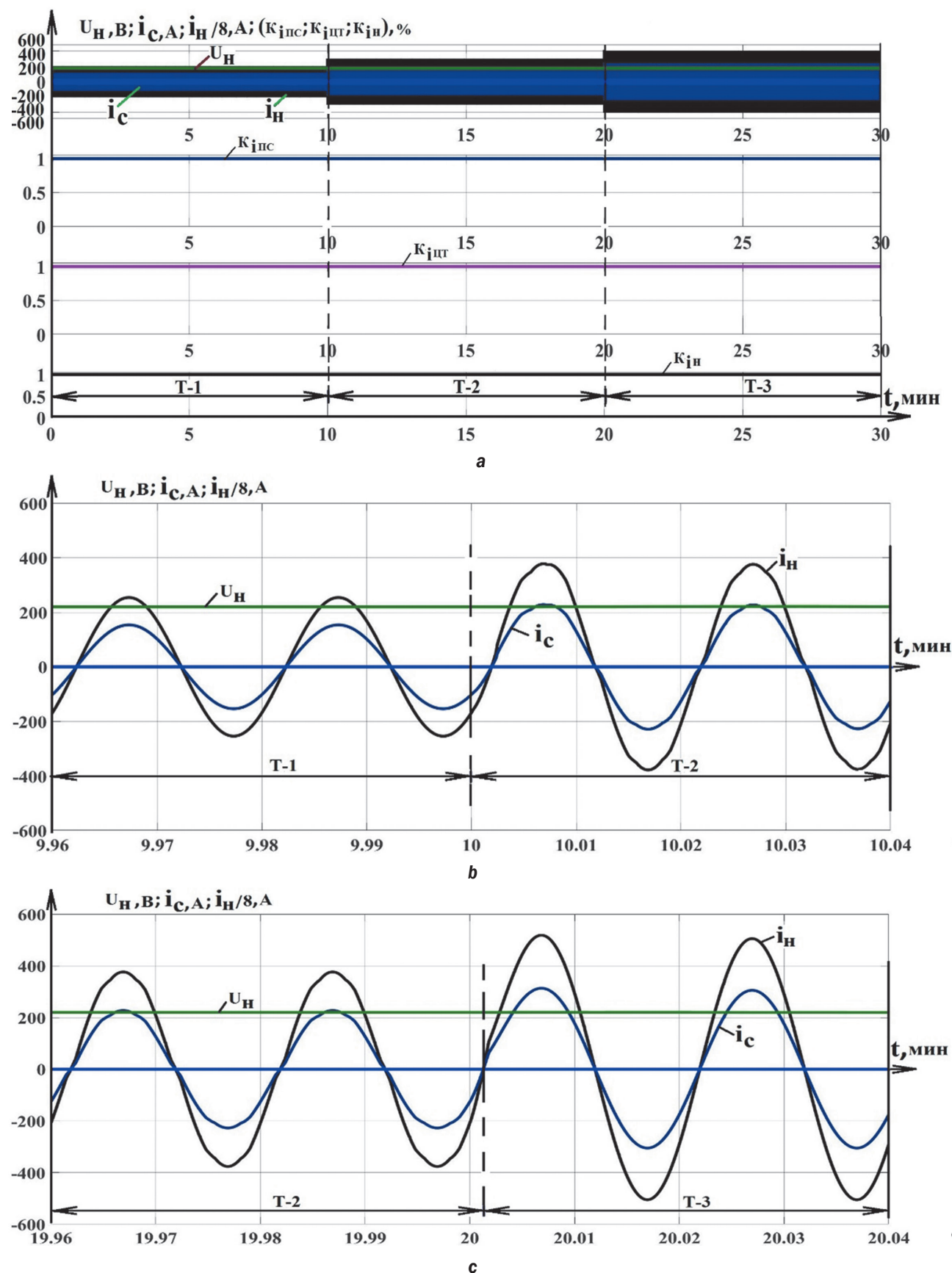


Рис. 5. Осциллограммы токов и напряжений и коэффициента искажения синусоидальности тока на разных участках системы электроснабжения с устройством ДР-ТУРН (а-с)

Fig. 5. Oscillograms of currents and voltages and a current total harmonic distortion coefficient in the different sections of the power supply system with a double-subrange reactor-thyristor controlled voltage regulator (a-c)

Т-1, Т-2 и Т-3 приводятся фрагменты из полученных результатов исследования, где продолжительность исследования в каждом интервале времени составляет не меньше 10 мин.

На этих осциллограммах приведены мгновенные значения токов сети i_c и нагрузки i_n , действующие значения напряжения нагрузки U_n , а также коэффициенты искажения синусоидальности тока сети $K_{ипс}$, цехового трансформатора $K_{цт}$ и активно-индуктивной нагрузки $K_{ин}$. Результаты этого исследования показывают, что устройство ДР-ТУРН не искажает синусоидальной формы токов всех элементов системы электрооборудования. Как известно, это позволяет не только поддерживать качество электроэнергии в отношении сохранения номинального напряжения и синусоидальной формы напряжения в СЭС, улучшать точность работы аппаратуры РЗА, сохранять срок службы электрооборудования, но и избегать дополнительных потерь электроэнергии при ее транспортировке.

Анализ результатов исследования стабилизации напряжения у потребителей и влияния нового управляемого регулятора напряжения на несинусоидальность тока и напряжения на разных участках при нестабильности тока и напряжения показал, что, несмотря на внешние и внутренние изменения электрических параметров, применение предлагаемого устройства и расширение его функциональных возможностей позволяет устранить недостатки широко распространенных механических и гибридных регуляторов напряжения, связанных с ухудшением качества электроэнергии и технико-экономических показателей.

Полученные результаты исследования стабилизации напряжения у потребителей и влияния нового управляемого регулятора напряжения на несинусоидальность тока и напряжения на разных участках СЭС при разных режимах работы подтверждают, что устройство ДР-ТУРН, поддерживая номинальное напряжение на шинах распределительного устройства, сохраняет также высокое значение технико-экономических показателей.

Стоит в первую очередь подчеркнуть, что для большего расширения функциональных возможностей устройства ДР-ТУРН с целью

сохранения высоких значений технико-экономических показателей электроустановки, учитывая величины отклонения и колебания напряжения, необходимо для каждого исследуемого объекта индивидуально разработать ДР-ТУРН с определенными индуктивными сопротивлениями реакторов и собственным способом управления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты исследования влияния нового управляемого регулятора напряжения на несинусоидальность тока и напряжения на разных участках СЭС при стабилизации напряжения у потребителей позволили сделать следующие выводы:

1. При анализе научных работ отечественных и зарубежных ученых, а также опыта эксплуатации систем электроснабжения выяснилось, что существующие трансформаторные подстанции нуждаются в применении нового автоматизированного технического решения для улучшения качества электроэнергии и технико-экономических показателей электроустановки.

2. Предлагаемый ДР-ТУРН, несмотря на снижение напряжения питающей сети и повышение тока нагрузки, одновременно с поддержанием номинального значения напряжения у потребителей на заданном уровне повышает технико-экономические показатели СЭС.

3. Полученными результатами исследования влияния нового управляемого регулятора напряжения на несинусоидальность тока и напряжения на разных участках СЭС в стационарных и динамических режимах работы цехового трансформатора показано, что предлагаемый ДР-ТУРН при снижении напряжения в сети на 5% и повышении тока активно-индуктивной нагрузки на 35% искажает синусоидальность формы напряжения питающей сети и цехового трансформатора на 0,78%, а потребителей электроэнергии на 9,8%, что не превышает предельно допустимые нормы, установленные ГОСТом.

4. Установлено, что предлагаемый ДР-ТУРН при нестабильности напряжения питающей сети и тока нагрузки, поддерживая номинальное значение напряжения у потребителей на заданном уровне, не создает несинусоидальность тока в системах электроснабжения. Кроме этого, благодаря

гибридным пускателям нагрузки, включение нагрузки производится без бросков токов и про падков напряжения, а выключение

нагрузки выполняется без возникновения электрической дуги, коммутационных потерь и перенапряжений.

Список источников

1. Климаш В.С., Константинов А.М. Устройство для повышения качества напряжения и энергетических показателей трансформаторных подстанций // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. Вып. 9. С. 570–581. EDN: LTKRSG.
2. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Суслов К.В., Кижин В.В. Согласованное управление накопителями электроэнергии и установкой распределенной генерации с прогностическими регуляторами в системе электроснабжения с пониженным качеством электроэнергии // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2023. Т. 25. № 6. С. 3–13. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-6-3-13>. EDN: HQLXTA.
3. Наумов А.А. Обеспечение требуемого качества электрической энергии // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 1. С. 85–92. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-1-85-92>. EDN: MTRTJG.
4. Фетисов Л.В., Роженова Н.В., Булатов О.А. Повышение качества электрической энергии в сетях низкого напряжения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. № 11-12. С. 99–106. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-99-106>. EDN: YXRTWH.
5. Виноградов А.В., Бородин М.В., Лансберг А.А. Анализ жалоб потребителей электрической энергии в электросетевых компаниях // Инновационные подходы образовательной деятельности в условиях цифровой трансформации отраслей АПК: матер. Всерос. (национальной) науч. конф. (г. Орел, 21 апреля 2022 г.). Орел: Орловский гос. аграрный ун-т им. Н.В. Парахина, 2022. С. 94–98. EDN: SHQIFU.
6. Лансберг А.А., Панфилов А.А., Виноградов А.В. Анализ возможных способов несанкционированной подачи напряжения в электрических сетях 0,4–10 кВ и последствий от этого // Научный журнал молодых ученых. Технические науки. 2022. № 2. С. 43–50. EDN: DZUNEE.
7. Al-Saedi W., Lachowicz S.W., Habibi D., Bass O. Power quality enhancement in autonomous microgrid operation using particle swarm optimization // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2012. Vol. 42. Iss. 1. P. 139–149. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.04.007>.
8. Montoya F.G., Banos R., Gil C., Espin A., Alcayde A., Gomez J. Minimization of voltage deviation and power losses in power networks using Pareto optimization methods // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2010. Vol. 23. Iss. 5. P. 695–703. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2010.01.011>.
9. Lumberras D., Gálvez E., Collado A., Zaragoza J. Trends in power quality, harmonic mitigation and standards for light and heavy industries: a review // Energies. 2020. Vol. 13. Iss. 21. P. 5792. <https://doi.org/10.3390/en13215792>.
10. Vinogradov A., Vinogradova A., Golikov I., Bolshov V. Adaptive automatic voltage regulation in rural 0.38 kV electrical networks // International Journal of Emerging Electric Power Systems. 2019. Vol. 20. Iss. 3. P. 2018–2026. <https://doi.org/10.1515/ijeeps2018-0269>.
11. Chernyshov M., Dovgun V., Temerbaev S., Shakurova Z. Hybrid power quality conditioner for three-phase four-wire power systems // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 178. P. 01009. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017801009>.
12. Popescu M., Bitoleanu A., Linca M. Improving power quality by a four-wire shunt active power filter: a case study // Energies. 2021. Vol. 14. Iss. 7. P. 1051. <https://doi.org/10.3390/en14071951>.
13. Haque M.H. Compensation of distribution system voltage sag by DVR and D-STATCOM in Proc // IEEE Porto Power Tech Proceedings. 2001. <https://doi.org/10.1109/PTC.2001.964609>.
14. Большев В.Е., Виноградов А.В. Разработка технических средств мониторинга отключений и отклонения напряжения на вводах сельских потребителей: монография. Саратов: Вузовское образование, 2021. 205 с.
15. Макашева С.И. Качество электрической энергии: мониторинг, прогноз, управление: монография. Хабаровск: ДВГУПС, 2020. 114 с.
16. Пат. № 2667095, Российская Федерация, Н02М 5/25, G05F1/30. Способ управления пускорегулирующим устройством силового трансформатора / В.С. Климаш, Б.Д. Табаров; заявитель и патентообладатель Климаш В.С., Табаров Б.Д. Заявл. 29.12.2017; опубл. 14.09.2018. Бюл. № 26.
17. Табаров Б.Д., Соловьев В.А., Сериков А.В. Система стабилизации напряжения потребителей при нестабильности питающего напряжения и колебаниях тока нагрузки // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2023. Т. 23. № 3. С. 41–50. <https://doi.org/10.14529/power230304>. EDN: TJZKZW.
18. Климаш С.В., Климаш В.С., Власьевский С.В. Специализированные модули для исследования энергетических показателей электротехнических устройств в среде MatLab // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 3. С. 11–16. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3\(36\)-11-16](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3(36)-11-16).
19. Климаш В.С., Константинов А.М. Преобразователи электроэнергии для систем электроснабжения промышленных предприятий: монография. Хабаровск: ДВГУПС, 2012. 106 с.

20. Файда Е.Л., Сивкова А.П. Трансформаторные стабилизаторы переменного напряжения с регулированием на первичной стороне // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2014. Т. 14. № 3. С. 41–45. EDN: SQUIST.

References

1. Klimash V.S., Konstantinov A.M. Device for increasing voltage quality and energy indicators of transformer substations. *Proceedings of the Tula State University*. 2019;9:570-581. (In Russ.). EDN: LTKRSG.
2. Bulatov Yu.N., Kryukov A.N., Suslov K.V., Kizhin V.V. Coordinated management of electricity storages and distributed generation plant with predictive controllers in a power supply system with reduced electricity quality. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2023;25(6):3-13. (In Russ.). <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-6-3-13>. EDN: HQLXTA.
3. Naumov A.A. The required quality of electrical energy provision. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(1):85-92. (In Russ.). <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-1-85-92>. EDN: MTRTJG.
4. Fetisov L.V., Rozhencova N.V., Bulatov O.A. Improving the quality of electric power in low voltage networks. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2018;20(11-12):99-106. (In Russ.). <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-99-106>. EDN: YXRTWH.
5. Vinogradov A.V., Borodin M.V., Lansberg A.A. Analysis of complaints of consumers of electric energy in electric grid companies. In: *Innovacionnye podhody obrazovatel'noj deyatel'nosti v usloviyah cifrovoj transformacii otraslej APK: materialy Vserossijskoj (nacional'noj) nauchnoj konferencii = Innovative approaches to educational activities in the context of digital transformation of the agro-industrial complex: Proceedings of All-Russian (national) scientific conference*. 21 April 2022, Orel. Orel: Orel State Agrarian University named after N.V. Parakhin; 2022, p. 94-98. (In Russ.). EDN: SHQIFU.
6. Lansberg A.A., Panfilov A.A., Vinogradov A.V. Analysis of possible methods of unauthorized voltage supply in 0.4-10 kV electrical networks and their consequences. *Nauchnyj zhurnal molodyh uchenyh. Tekhnicheskie nauki*. 2022;2:43-50. (In Russ.). EDN: DZUNEE.
7. Al-Saedi W., Lachowicz S.W., Habibi D., Bass O. Power quality enhancement in autonomous microgrid operation using particle swarm optimization. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2012;42(1):139-149. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.04.007>.
8. Montoya F.G., Banos R., Gil C., Espin A., Alcayde A., Gomez J. Minimization of voltage deviation and power losses in power networks using Pareto optimization methods. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2010;23(5):695-703. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2010.01.011>.
9. Lumbreras D., Gálvez E., Collado A., Zaragoza J. Trends in power quality, harmonic mitigation and standards for light and heavy industries: a review. *Energies*. 2020;13(21):5792. <https://doi.org/10.3390/en13215792>.
10. Vinogradov A., Vinogradova A., Golikov I., Bolshev V. Adaptive automatic voltage regulation in rural 0.38 kV electrical networks. *International Journal of Emerging Electric Power Systems*. 2019;20(3):2018-0269. <https://doi.org/10.1515/ijeeps2018-0269>.
11. Chernyshov M., Dovgun V., Temerbaev S., Shakurova Z. Hybrid power quality conditioner for three-phase four-wire power systems. In: *E3S Web of Conferences*. 2020;178:01009. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017801009>.
12. Popescu M., Bitoleanu A., Linca M. Improving power quality by a four-wire shunt active power filter: a case study. *Energies*. 2021;14(7):1051. <https://doi.org/10.3390/en14071951>.
13. Haque M.H. Compensation of distribution system voltage sag by DVR and D-STATCOM. In: *IEEE Porto Power Tech Proceedings*. 2001. <https://doi.org/10.1109/PTC.2001.964609>.
14. Bol'shev V.E., Vinogradov A.V. Development of technical means to monitor outages and voltage deviations at rural consumer inputs. Saratov: Vuzovskoe obrazovanie; 2021, 205 p. (In Russ.).
15. Makasheva S.I. *Electric energy quality: monitoring, forecast, control*. Khabarovsk: Far Eastern State Transport University; 2020, 114 p. (In Russ.).
16. Klimash V.S., Tabarov B.D. Power transformer starting device control method. Patent RF, no. 2667095; 2018. (In Russ.).
17. Tabarov B.D., Solovyev V.A., Serikov A.V. A voltage stabilization system for voltage supply instability and load current fluctuations. *Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2023;23(3):41-50. (In Russ.). <https://doi.org/10.14529/power230304>. EDN: TJZKZW.
18. Klimash S.V., Klimash V.S., Vlas'evskij S.V. Specialized modules for calculation of energy coefficients of electrical engineering devices in MatLab. *Electrotechnical Systems and Complexes*. 2017;3:11-16. (In Russ.). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3\(36\)-11-16](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3(36)-11-16).
19. Klimash V.S., Konstantinov A.M. *Electric power converters for power supply systems of industrial enterprises*. Khabarovsk: Far Eastern State Transport University; 2012, 106 p. (In Russ.).
20. Faida E.L., Sivkova A.P. Transformer stabilizers of alternating voltage with regulation on the primary side. *Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2014;14(3):41-45. (In Russ.). EDN: SQUIST.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Табаров Бехруз Довудходжаевич,
к.т.н.,
доцент кафедры «Электропривод и
автоматизация промышленных установок»,
Комсомольский-на-Амуре государственный
университет,
681013, г. Комсомольск-на-Амуре,
ул. Ленина, 27, Россия
✉ behruz.tabarov@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5878-3755>

Заявленный вклад автора

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

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 18.03.2024 г.; одобрена после рецензирования 22.04.2024 г.; принята к публикации 30.04.2024 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Bekhruz D. Tabarov,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of
Electric Drive and Automation
of Industrial installations,
Komsomolsk-na-Amure State University,
27, Lenin St., Komsomolsk-on-Amur 681013, Russia
✉ behruz.tabarov@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5878-3755>

Author contribution

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

Conflict of interests

The author declares no conflict of interests.

The author read and approved the final version of the manuscript.

Information about the article

The article was submitted 18.03.2024; approved after reviewing 22.04.2024; accepted for publication 30.04.2024.

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 621.314.26:621.316.91:621.311.1

EDN: XCUWWH

DOI: 10.21285/1814-3520-2024-3-489-503



Исследование влияния параметров элегазовых выключателей на величину коммутационных перенапряжений на основе анализа номинальных режимов преобразовательных трансформаторов

А.В. Тихонов¹✉¹Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия¹ООО ГК «Рутас», Красноярск, Россия

Резюме. Цель – выявление характера и степени влияния рабочих токов элегазовых выключателей на величину перенапряжений при коммутации преобразовательных трансформаторов. Проведен анализ опыта эксплуатации электрооборудования, включая изучение проблем, связанных с естественным старением изоляции, перегрузками и воздействием коммутационных перенапряжений. В работе использованы методы диагностики состояния оборудования. Согласно статистическим данным, в настоящее время около 37% коротких замыканий между фазами и 42% однофазных замыканий на землю в электрических сетях промышленных предприятий происходят из-за коммутационных перенапряжений. Отмечено в ходе испытаний, что возникающие перенапряжения при коммутации элегазовыми выключателями преобразовательных трансформаторов, используемых на алюминиевых заводах, могут достигать трехкратных значений номинального напряжения сети, что представляет опасность для изоляции обмоток трансформатора, кабельной линии и самого выключателя. Установлено, что увеличение рабочих токов элегазового выключателя марки LF2 до 27,8% от номинального тока выключателя приводит к росту перенапряжений при коммутации преобразовательных трансформаторов. При дальнейшем увеличении рабочих токов элегазового выключателя более 27,8% от номинального тока выключателя наблюдается резкое снижение величины коммутационных перенапряжений. Таким образом, установлено влияние воздействия рабочих токов элегазовых выключателей на уровень перенапряжений при переключении преобразовательных трансформаторов, а также обнаружены основные причины этого явления, которые следует учитывать для повышения надежности электроснабжения преобразовательных трансформаторов и алюминиевого производства в целом. Подтверждена целесообразность применения активно-емкостных гасителей как наиболее эффективного средства для ограничения перенапряжений при переключении преобразовательных трансформаторов.

Ключевые слова: элегазовый выключатель, срез тока, коммутационные перенапряжения, преобразовательные трансформаторы, RC-гасители

Для цитирования: Тихонов А.В. Исследование влияния параметров элегазовых выключателей на величину коммутационных перенапряжений на основе исследования номинальных режимов преобразовательных трансформаторов // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 3. С. 489–503. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-489-503>. EDN: XCUWWH.

POWER ENGINEERING

Original article

Effect of SF6 circuit breaker parameters on switching overvoltages evaluated based on nominal modes of converter transformers

Aleksey V. Tikhonov¹✉¹National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia¹LLC Research and Development Enterprise Rutas, Krasnoyarsk, Russia

Abstract. In this work, we set out to investigate the influence of operating currents of SF6 circuit breakers on the magnitude of overvoltages during switching of converter transformers. The experience of electrical equipment operation is analyzed with a focus on the problems associated with the natural aging of insulation, overloads, and switching overvoltages. The methods of equipment diagnostics were used. According to statistical data, at present, about 37% of

short circuits between phases and 42% of single-phase earth faults in electrical networks of industrial enterprises occur due to switching overvoltages. The conducted tests showed that the overvoltages emerging during switching by SF6 circuit breakers of converter transformers, which are used in aluminum smelters, may reach a three-fold rated voltage of the network. This threatens the insulation of transformer windings, cable line, and the switch itself. It was established that an increase in operating currents of an LF2 circuit breaker, not exceeding 27.8% of the rated current of the switch, leads to an increase in overvoltages during switching of converter transformers. At a further increase in the operating currents of the circuit breaker by more than 27.8% of the rated current of the circuit breaker, a sharp decrease in the value of switching overvoltages is observed. Therefore, the operating currents of SF6 circuit breakers were established to affect the level of switching overvoltages of converter transformers. The underlying mechanism of this phenomenon was determined, which should be taken into account when improving the reliability of power supply of converter transformers and, consequently, the reliability of aluminum production. The feasibility of resistive-capacitive dampers as the most effective means for limiting overvoltages during switching of converter transformers was confirmed.

Keywords: SF6 circuit breaker, current cut-off, switching overvoltages, converter transformers, RC-dampers

For citation: Tikhonov A.V. Effect of SF6 circuit breaker parameters on switching overvoltages evaluated based on nominal modes of converter transformers. *iPolytech Journal*. 2024;28(3):489-503. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-489-503>. EDN: XCUWWH.

ВВЕДЕНИЕ

Алюминиевые заводы являются мощными потребителями электроэнергии. Например, потребление на алюминиевых заводах Красноярска, Братска и Саяногорска составляет от 40 до 70% от выработки электроэнергии Красноярской, Братской и Саяно-Шушенской ГЭС соответственно. Электроснабжение заводов осуществляется по линиям электропередачи (ЛЭП) переменного тока с напряжением 220 кВ. Удельные затраты электрической энергии на производство 1 т алюминия на российских заводах варьируются от 14,5 до 18 МВт·ч [1, 2].

При передаче большой мощности на переменном токе в проводах ЛЭП возникают потери электрической энергии. Для снижения потерь в ЛЭП 220 кВ алюминиевые заводы располагаются как можно ближе к ГЭС. Это вызывает значительное увеличение токов короткого замыкания в сетях 10 кВ преобразовательных трансформаторов по сравнению с токами КЗ в системах электроснабжения 6–10 кВ горнодобывающих компаний, машиностроительных заводов, трубопроводного транспорта, нефтегазовой отрасли и других секторов.

При выборе коммутационных аппаратов для сетей 10 кВ на алюминиевых заводах особое внимание уделяется отключающей способности и электродинамической стойкости выключателей. Для современных технологий электролиза алюминия, использующих выпрямленный ток 350–500 кА, применяются выключатели с номинальным током от 2000 А и более, с номинальным током отключения 31,5 кА и выше. В качестве основных выключателей с указанными характери-

стиками используются аппараты марки LF2 и LF3 от компании Schneider Electric.

Опыт эксплуатации данных элегазовых выключателей на Саяногорском алюминиевом заводе показал, что при коммутации нагрузочных преобразовательных трансформаторов происходили неисправности как элегазовых выключателей, так и концевых муфт кабелей, проложенных между выключателем и трансформатором, а также самих трансформаторов. Главной причиной повреждения элегазовых выключателей является электрический пробой изоляции днища элегазовой камеры, тогда как для концевых муфт основной причиной выхода из строя является пробой изоляции одной из фаз, что приводит к однофазному замыканию на землю.

Выходы из строя преобразовательных трансформаторов обусловлены пробоем изоляции обмотки высшего напряжения из-за перенапряжений. На основании вышеизложенного целью исследования является оценка степени влияния рабочих токов элегазовых выключателей на величину перенапряжений при переключении преобразовательных трансформаторов.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- изучение ключевых закономерностей, связанных с возникновением перенапряжений при включении силовых трансформаторов с напряжением 6–10 кВ;
- исследование и анализ доли коммутационных перенапряжений в общей аварийности систем электроснабжения 6–10 кВ;
- выполнение натурных исследований коммутационных режимов преобразова-

тельных трансформаторов на Саяногорском алюминиевом заводе;

- сравнительный анализ полученных результатов с основными закономерностями возникновения перенапряжений при переключении трансформаторов;

- изучение и обоснование эффективных методов защиты преобразовательных трансформаторов от коммутационных перенапряжений.

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ПРИ КОММУТАЦИИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ 6–10 кВ

Существует множество публикаций, посвященных исследованию закономерностей перенапряжений при включении силовых трансформаторов и электродвигателей напряжением 6–10 кВ [3–9].

При применении вакуумных и элегазовых выключателей для включения силовых трансформаторов главной причиной возникновения коммутационных перенапряжений является эффект обрыва (среза) тока при отключении трансформатора, работающего на холостом ходу или при токах нагрузки, составляющих 10–15% от номинального тока трансформатора.

Использование масляных выключателей также может сопровождаться возникновением коммутационных перенапряжений при включении и отключении трансформаторов в режиме холостого хода или близких к нему рабочих режимов за счет «виртуального среза тока» [3]. Последний обусловлен тем, что во время горения дуги между контактами вы-

ключателя генерируются высокочастотные составляющие тока, которые замыкаются за счет межфазных емкостей кабельных линий и электрооборудования, в результате чего может наблюдаться наложение в противофазе высокочастотных составляющих на основную гармонику. Как следствие, кривая тока в точке наложения будет прерываться, и будет наблюдаться процесс, похожий на эффект среза тока.

Уровень перенапряжений оценивался с помощью коэффициента кратности перенапряжений, который составляет:

$$K_{\text{КП}} = \frac{u(t)}{u_{\text{H}}}, \quad (1)$$

где $u(t)$ – максимальное мгновенное напряжение в момент времени t , В; u_{H} – номинальное амплитудное напряжение сети, В.

В свою очередь:

$$u(t) = i_0 \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (2)$$

где i_0 – реальный или виртуальный ток в момент среза, А; L – индуктивность трансформатора, Гн; C – емкость обмоток фаза-корпус трансформатора, Ф.

Так как на практике все расчеты и высоковольтные испытания приводятся к номинальному линейному напряжению, то для расчета взяты линейные напряжения сети.

На рис. 1 представлены закономерности изменения коэффициента кратности коммутационных перенапряжений в зависимости от мощности и типа выключателя [10]:

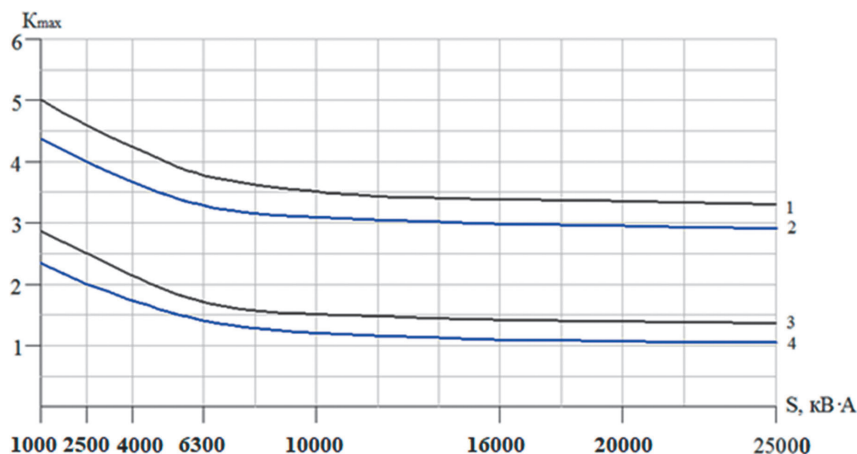


Рис. 1. Зависимость $K_{\text{КП}}$ от мощности трансформатора и типа выключателя: 1 – вакуумный; 2 – элегазовый; 3 – масляный; 4 – электромагнитный

Fig. 1. $K_{\text{КП}}$ vs transformer power and a breaker type: 1 – vacuum; 2 – gas-insulated; 3 – oil; 4 – electromagnetic

Зависимости показанных на рис. 1 графиков демонстрируют, что коэффициент кратности перенапряжений при включении силовых трансформаторов зависит от типа выключателя и мощности трансформатора, а при коммутации вакуумными выключателями имеет наибольшие величины.

При этом авторы [3, 4, 6] указывают на то, что с увеличением тока нагрузки трансформаторов коммутационные перенапряжения снижаются из-за уменьшения среза тока за счет более продолжительного горения дуги между контактами выключателя. Это обусловлено более интенсивной ионизацией межконтактного пространства выключателя и парами металла, что приводит к росту угла коммутации.

Данный процесс отображен на рис. 2.

Синусоиды 1, 2 и 3 соответствуют токам нагрузки, равным 25, 35 и 50% от номинального тока трансформатора. Угол отключения при нагрузке в 25% составляет 90–95°, следовательно, срез тока будет эквивалентен коэффициенту перенапряжений K1. При нагрузках в 35 и 50% угол отключения увеличивается до 170–180°, следовательно, срез тока будет эквивалентен коэффициентам перенапряжений K2 и K3. Как видно из рис. 2, величина коэффициента перенапряжений K1 превышает как K2, так и K3. Увеличение угла отключения в диапазоне 170–180° обусловлено процессом ионизации между контактами выключателя и металлическими парами, возникающими в результате более мощной электрической дуги.

Опыт эксплуатации преобразовательных трансформаторов показывает [11], что отключение этих трансформаторов при токах нагрузки в диапазоне 15–30% от номинального тока элегазового выключателя приводит к увеличению в пять раз аварийности кабельных муфт, элегазовых выключателей и самих преобразовательных трансформаторов в течение одного года эксплуатации.

Комплексный анализ аварийности систем электроснабжения на уровне 6–10 кВ показывает, что в настоящее время 37% коротких замыканий и 42% однофазных замыканий на землю вызваны коммутационными перенапряжениями [12–14].

Учитывая противоречивые данные о влиянии токов нагрузки на уровень перенапряжений при коммутации преобразовательных трансформаторов, проведены натурные исследования коммутационных перенапряжений при различных токах нагрузки на Саяногорском алюминиевом заводе в системе электроснабжения 10 кВ РП-2.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ПРИ КОММУТАЦИИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ТИПА ТДЦФУД-25000/10-У1 ЭЛЕГАЗОВЫМ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕМ Schneider Electric МАРКИ LF2

Объектом исследования выбрана схема электроснабжения РП-2 преобразователь-

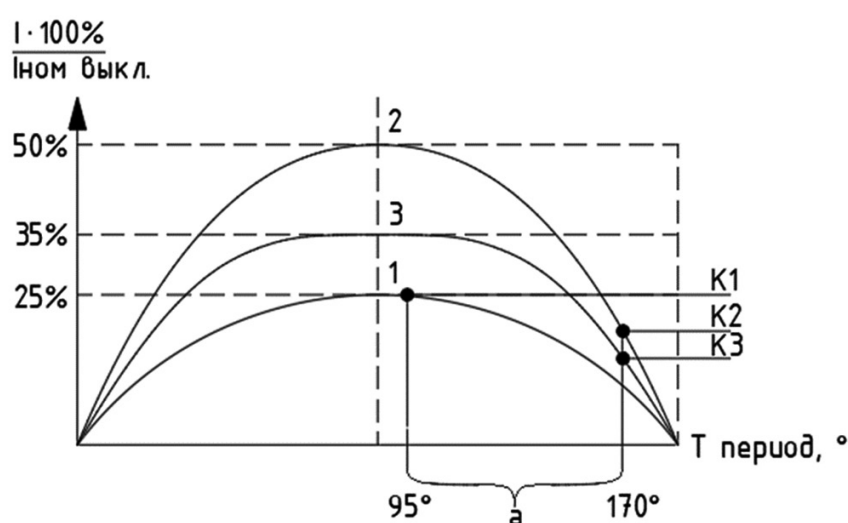


Рис. 2. Зависимость тока нагрузки выключателя от угла коммутации, приводящая к различной кратности коммутационных перенапряжений на секции шин

Fig. 2. Circuit breaker load current vs the switching angle at different ratios of switching overvoltages occurring on the busbar section

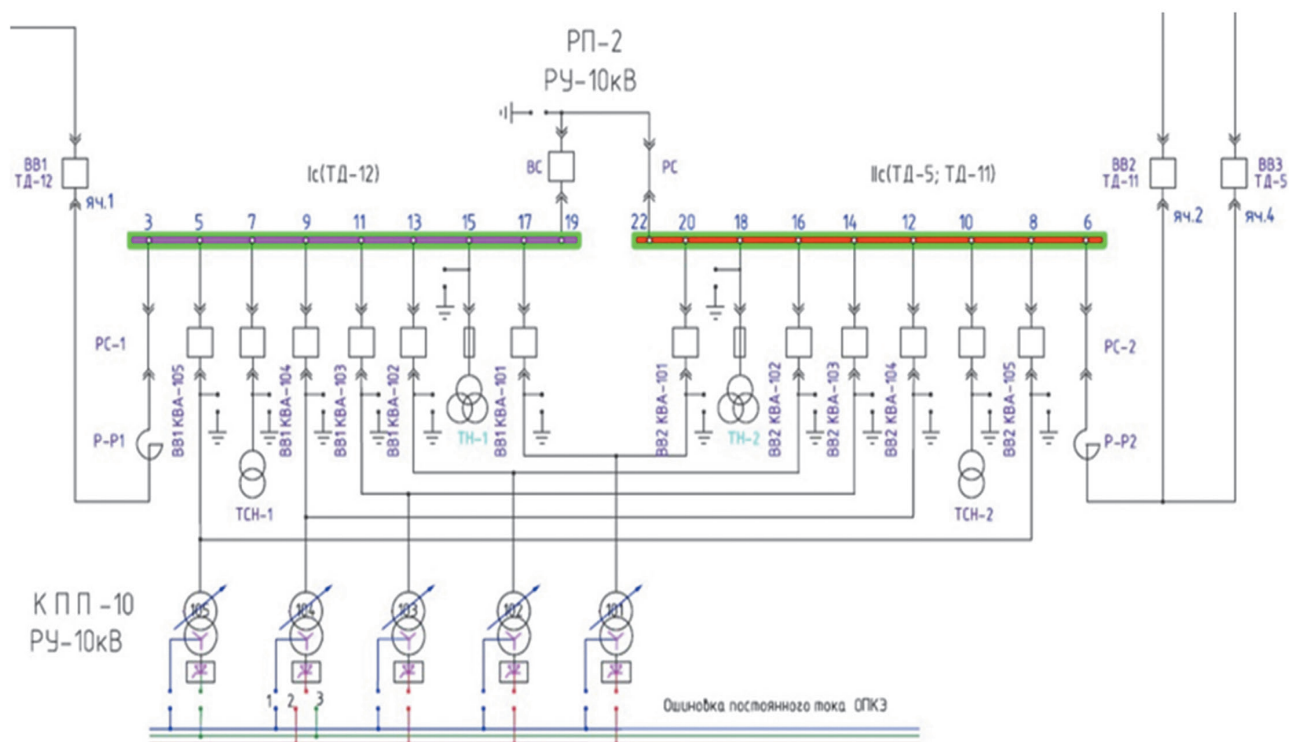


Рис. 3. Электрическая схема подключения преобразовательного трансформатора ТДЦФУД-25000/10-У1 через элегазовый выключатель Schneider Electric типа LF2

Fig. 3. Electrical connection diagram of the ТДЦФУД-25000/10-У1 converter transformer via Schneider Electric SF6-circuit breaker

ных трансформаторов Саяногорского алюминиевого завода, рис. 3.

Натурные исследования выполнялись на преобразовательном трансформаторе № 101 с использованием трехфазного активно-емкостного делителя ДНЕК-10 и четырехканального осциллографа Tektronix TDS 2024 В.

Схема подключения аппаратуры для измерения коммутационных перенапряжений приведена на рис. 4. Делитель напряжения подключался к вводу преобразовательного трансформатора.

В табл. 1 и 2 приведены основные технические характеристики преобразовательного трансформатора и элегазового выключателя.

Характерные осциллограммы коммутационных перенапряжений при включении преобразовательного трансформатора в режиме холостого хода (ХХ) приведены на рис. 5. На рис. 6–9 представлены осциллограммы включения и отключения преобразовательного трансформатора под нагрузкой.

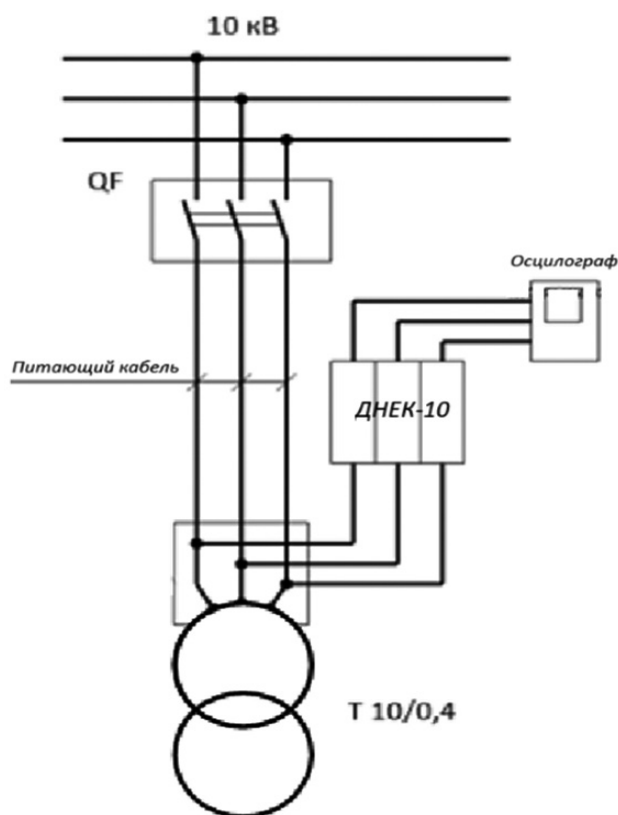


Рис. 4. Схема подключения аппаратуры для измерения коммутационных перенапряжений

Fig. 4. Connection diagram of switching overvoltage measuring equipment

Таблица 1. Основные технические характеристики преобразовательного трансформатора ТДЦПФУД-25000/10-У1 (25000 кВА – габаритная мощность трансформатора, 12860 кВА – номинальная мощность трансформатора)

Table 1. Main technical specifications of ТДЦПФУД-25000/10-У1 converter transformer (25000 kVA – transformer overall power, 12860 kVA – transformer rated power)

№	Параметр	Единица измерения	Значения
1	$U_{ном.}$	кВ	10,5
2	$S_{ном.}$	кВА	6430x2
3	$I_{ном.}$	А	740

Таблица 2. Основные технические характеристики элегазового выключателя LF2

Table 2. Main technical characteristic currents of the LF2 SF6 circuit breaker

№	Параметр	Единица измерения	Значения
1	$U_{наиб.ном.}$	кВ	10
2	$U_{наиб.раб.}$	кВ	12
3	$I_{ном.}$	А	2000
4	$I_{ном.откл.}$	кА	40
5	I_T	кА	40
6	I_A	кА	128

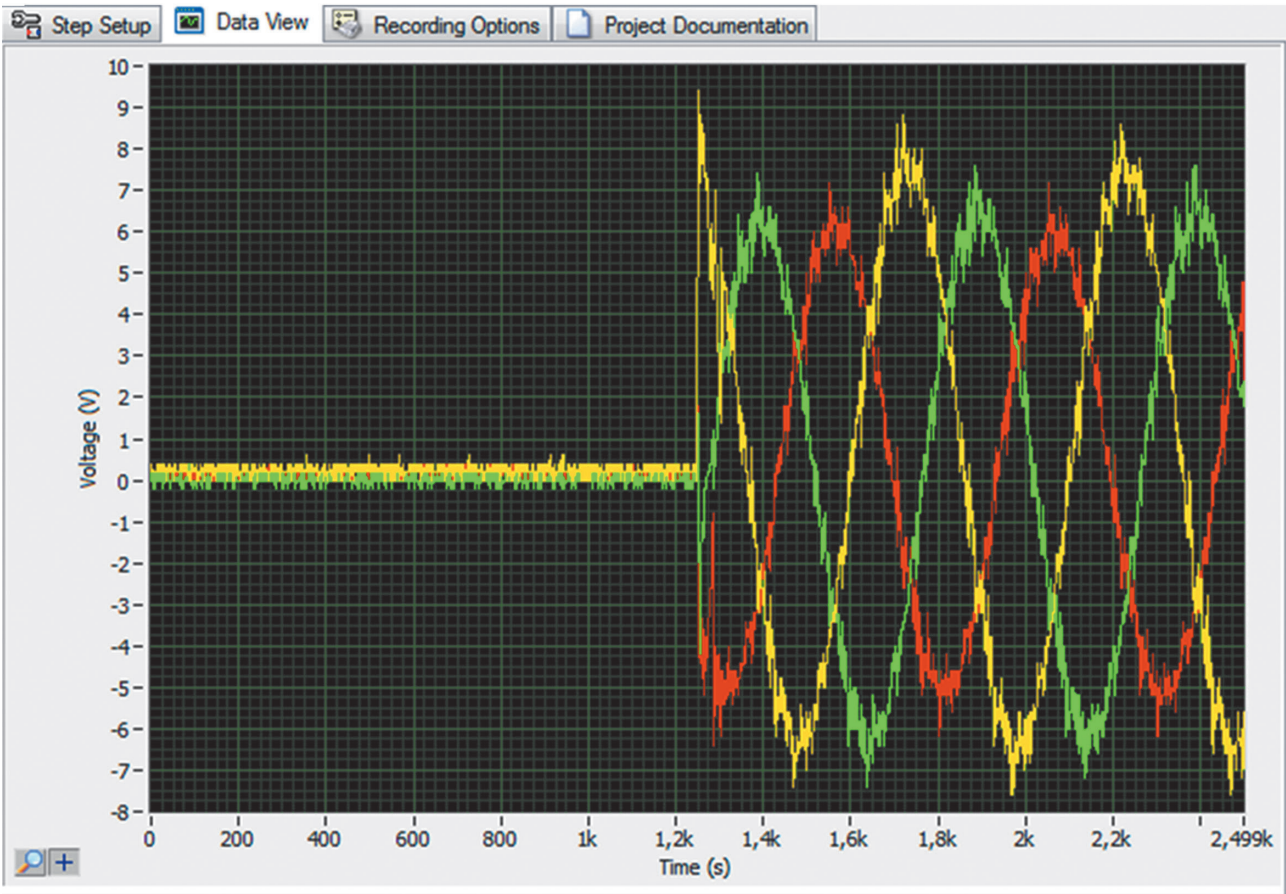


Рис. 5. Характерная осциллограмма напряжений при включении преобразовательного трансформатора в режиме холостого хода $I_{нагр} = 0,05I_{н тр.}$, $u(t)_{max} = 9500$ В, $K_{КП} = \frac{u(t)_{max}}{u_H} = 0,95$

Fig. 5. A typical voltage waveform when switching on the converter transformer in an idle mode $I_{нагр} = 0,05I_{н тр.}$, $u(t)_{max} = 9500$ В, $K_{КП} = \frac{u(t)_{max}}{u_H} = 0,95$

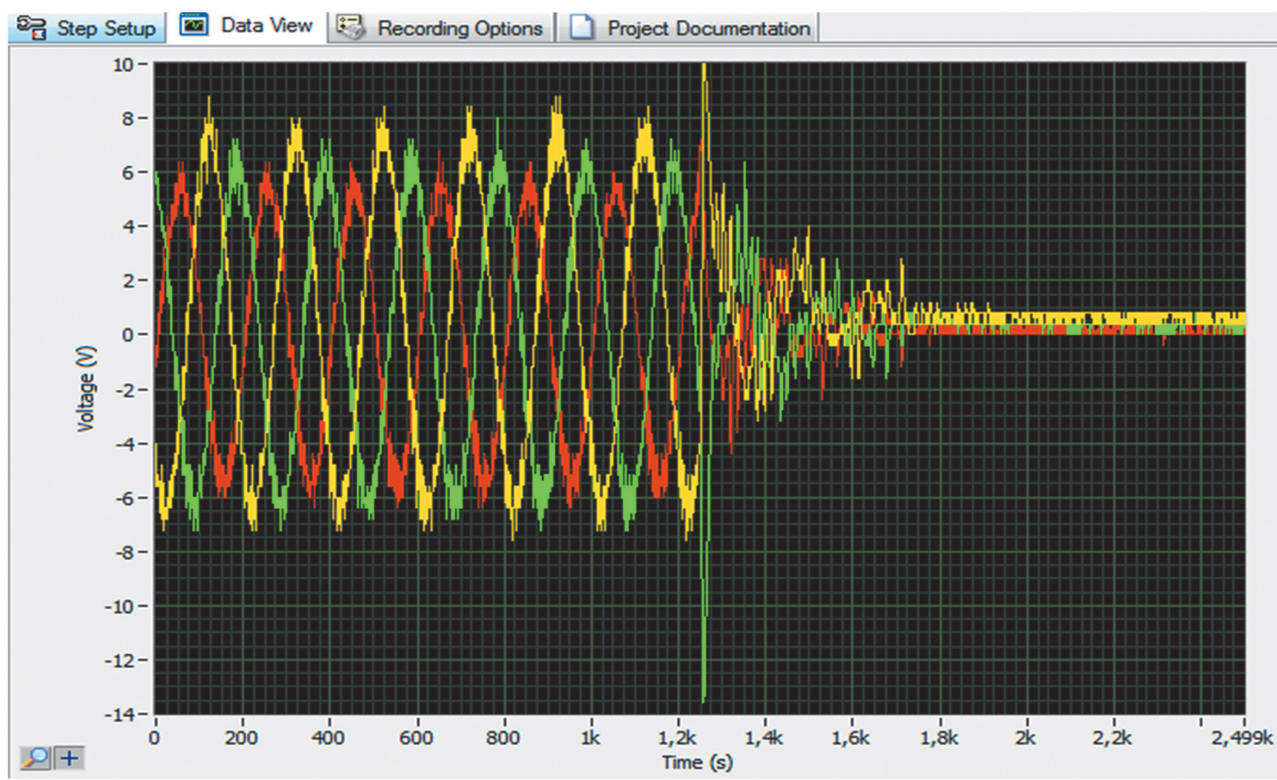


Рис. 6. Характерная осциллограмма напряжений при отключении преобразовательного трансформатора под нагрузкой
 $I_{\text{нагр}} = I, u(t)_{\text{max}} = 13500 \text{ В}, K_{\text{КП}} = 1,35$
Fig. 6. A typical voltage waveform when switching off the converter transformer under the load
 $I_{\text{нагр}} = I, u(t)_{\text{max}} = 13500 \text{ В}, K_{\text{КП}} = 1.35$

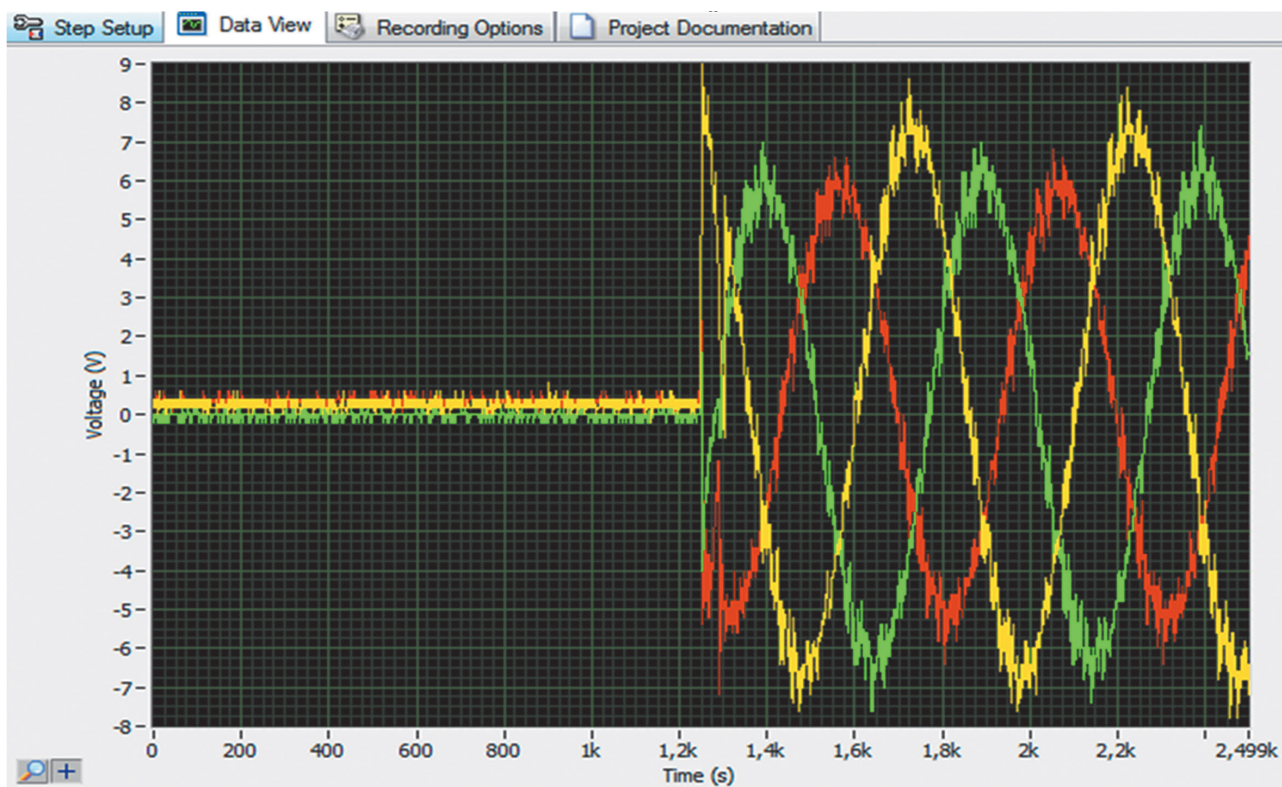


Рис. 7. Характерная осциллограмма напряжений при включении преобразовательного трансформатора под нагрузкой
 $I_{\text{нагр}} = 0,25 I_{\text{н тр}}, u(t)_{\text{max}} = 9000 \text{ В}, K_{\text{КП}} = 0,9$
Fig. 7. A typical voltage waveform when switching on the converter transformer under the load
 $I_{\text{нагр}} = 0.25 I_{\text{н тр}}, u(t)_{\text{max}} = 9000 \text{ В}, K_{\text{КП}} = 0.9$

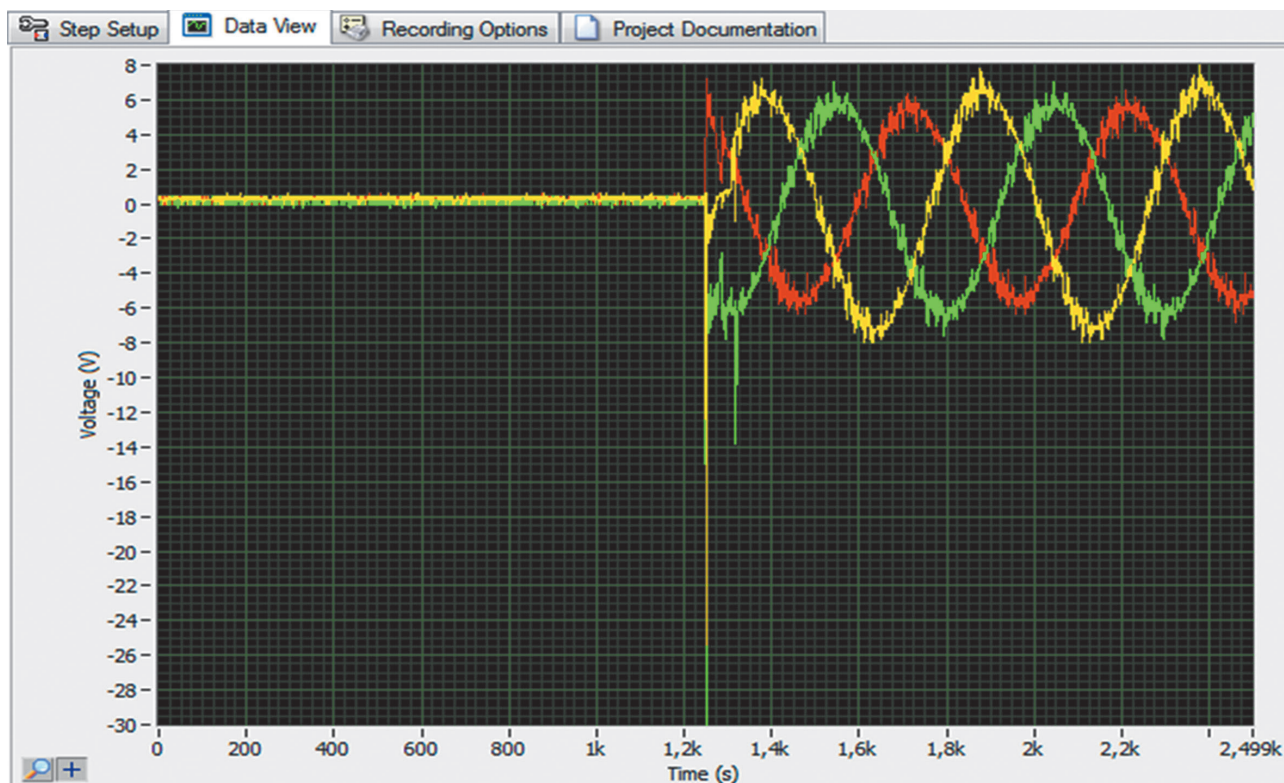


Рис. 8. Характерная осциллограмма напряжений при включении преобразовательного трансформатора под нагрузкой $I_{\text{нагр}} = 0,74I$, $u(t)_{\text{max}} = 30000$ В, $K_{\text{КП}} = 3,0$

Fig. 8. A typical voltage waveform when switching on the converter transformer under the load $I_{\text{нагр}} = 0,74I$, $u(t)_{\text{max}} = 30000$ В, $K_{\text{КП}} = 3.0$

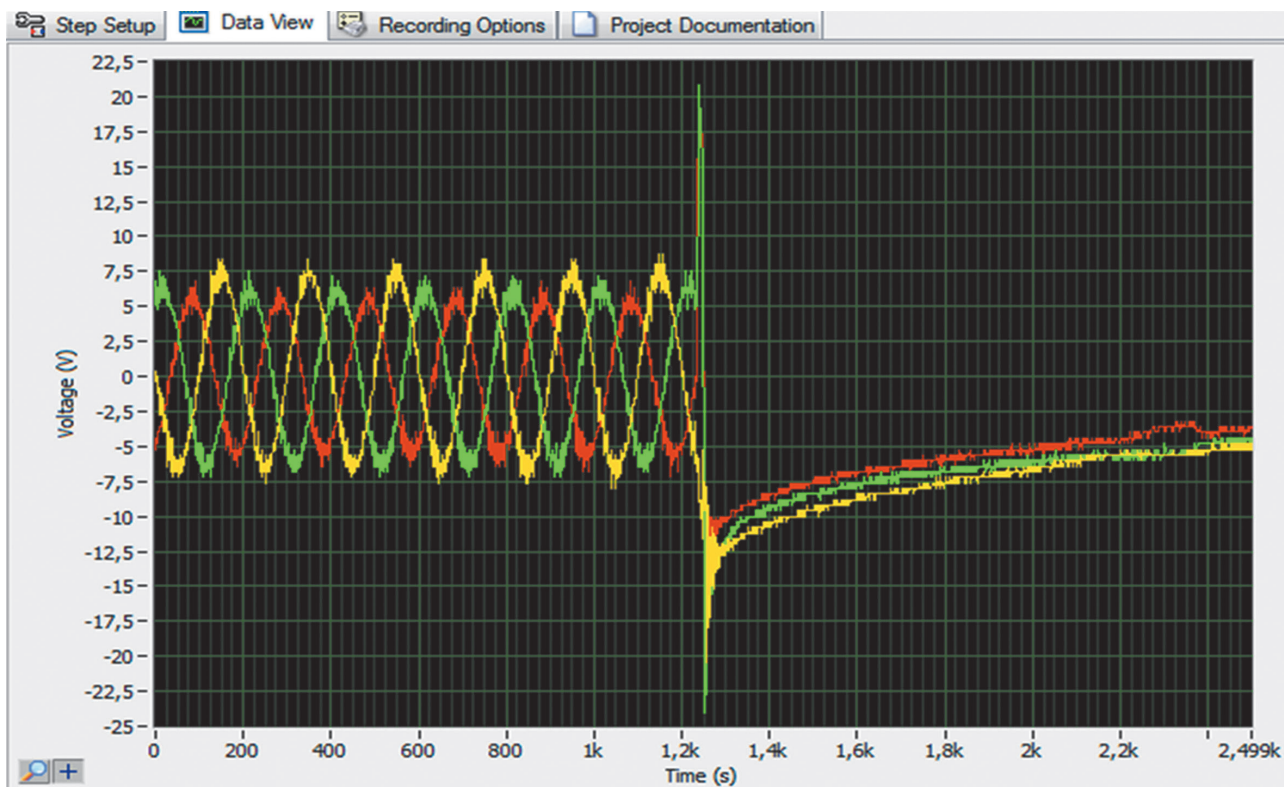


Рис. 9. Характерная осциллограмма напряжений при отключении преобразовательного трансформатора под нагрузкой $I_{\text{нагр}} = 0,74I_{\text{н тр,}}$, $u(t)_{\text{max}} = 25000$ В, $K_{\text{КП}} = 2,5$

Fig. 9. A typical voltage waveform when switching off the converter transformer under the load $I_{\text{нагр}} = 0,74I_{\text{н тр,}}$, $u(t)_{\text{max}} = 25000$ В, $K_{\text{КП}} = 2.5$

В табл. 3 приведены расширенные результаты натурных исследований коммутационных перенапряжений, а на рис. 10 – зависимости $K_{КП} = f(\gamma)$, где γ – отношение рабочего тока, протекающего через выключатель, к номинальному току выключателя. Анализ данных табл. 3 и зависимостей $K_{КП} = f(\gamma)$, представленных на рис. 7, показывает, что максимальная кратность коммутационных перенапряжений возникает при включении преобразовательного трансформатора, если γ находится в диапазоне 18,5–27,8% и может достигать 3,0, а при отключении максимальная кратность не превышает 2,5.

Если γ будет менее 10% и более 32,5%, тогда при коммутации преобразовательного трансформатора кратность перенапряжений не превысит 1,5.

Опыт эксплуатации преобразовательных трансформаторов показывает, что коммутация трансформаторов, применяемых в технологическом процессе производства алюминия, достаточно часто происходит при коэффициенте загрузки 0,4–0,7, что соответствует диапазону изменения коэффициента γ от 15 до 26%, т.е. создаются условия для возникновения максимальных перенапряжений.

Полученные результаты натурных исследований хорошо согласуются с данными, представленными на рис. 2, но отличаются от результатов, изложенных в [3, 4, 6]. Это обусловлено тем, что исследования проводились для выключателей с номинальным током 630–1000 А.

Очевидно, что прочих равных условиях применение выключателей с номинальным током 1000 А ($\gamma = I_{\text{ном}}/1000$ А) по сравнению с выключателями на 2000 А ($\gamma = I_{\text{ном}}/2000$ А) приводит к удвоению коэффициента γ . В этом случае значение коэффициента γ будет находиться в пределах от 30 до 52%. В этих условиях с ростом тока нагрузки кратность коммутационных перенапряжений будет снижаться.

Таким образом, необходимость использования элегазовых выключателей с номинальными токами от 2000 А и более для коммутации преобразовательных трансформаторов с увеличением токов нагрузки, приводящих к росту коэффициента γ до 28%, вызывает увеличение кратности коммутационных перенапряжений, а дальнейшее увеличение тока нагрузки сопровождается резким снижением кратности коммутационных перенапряжений, рис. 7.

Таблица 3. Расширенные результаты натурных исследований коммутационных перенапряжений
Table 3. Extended results of field studies of switching overvoltages

Вид коммутации	№ рисунка	Ток нагрузки, $I_{\text{нагр}}$		Ток выключателя		Наибольшее мгновенное значение напряжения $U(t)$, В	Кратность перенапряжения $K_{КП} = \frac{u(t)}{u_H}$
		значение, А	доля от номинального тока трансформатора	номинальное значение, А	доля от номинального значения: $\gamma = \frac{I_{\text{нагр}}}{I_H} \cdot 100\%$		
Включение	5	37	0,05	2000	1,85	9500	0,95
	7	185	0,25	2000	9,25	9000	0,9
	9	370	0,5	2000	18,5	29500	2,95
	11	555	0,74	2000	27,8	30000	3,0
	13	650	0,88	2000	32,5	10750	1,075
	15	740	1,0	2000	37	8500	0,85
Отключение	6	37	0,05	2000	1,85	12500	1,25
	8	185	0,25	2000	9,25	13000	1,3
	10	370	0,5	2000	18,5	15500	1,55
	12	555	0,74	2000	27,8	25000	2,5
	14	650	0,88	2000	32,5	14500	1,45
	16	740	1,0	2000	37	13500	1,35

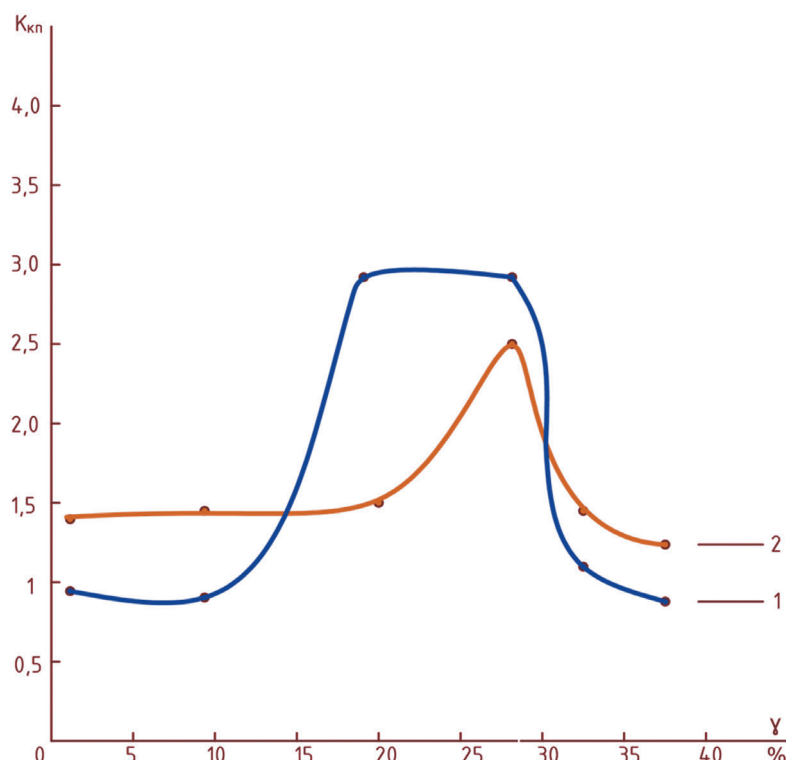


Рис. 10. Зависимость $K_{КП} = f(\gamma)$: 1 – включение; 2 – отключение

Fig. 10. Dependence $K_{КП} = f(\gamma)$: 1 – switching on; 2 – switching off

АНАЛИЗ И ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ЗАЩИТЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ОТ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Согласно исследованиям, приведенным в [15–17], допустимая кратность перенапряжений для изоляции обмоток силовых трансформаторов и кабелей напряжением 6–10 кВ со сроком эксплуатации более 5 лет составляет 2,8.

Результаты полевых исследований продемонстрировали, что при переключении преобразовательных трансформаторов могут возникать перенапряжения с кратностью до 3,0. Это создает риск для изоляции обмоток трансформатора, кабельных муфт и элегазовых выключателей, поскольку, согласно данным Schneider Electric, импульсная прочность элегазовой камеры составляет 30 кВ.

В настоящее время для снижения коммутационных перенапряжений активно применяются нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН) и активно-емкостные RC-гасители.

Анализ литературных источников [9, 19–28] показал, что наиболее эффективными являются RC-гасители, у которых отсутствуют недостатки, присущие ОПН:

- наличие зоны замирания в работе устройства при частоте коммутационного импульса 45 кГц и выше;

- низкая термическая устойчивость к длительным однофазным токам замыкания на землю.

Полевые исследования показали, что при значениях коэффициента γ , равных 18,5 и 27,8%, эквивалентная частота коммутационного импульса находилась в диапазоне от 58 до 63 кГц (см. рис. 8, 9).

Согласно технологическим условиям, при возникновении однофазного замыкания на землю в схеме 10 кВ выключатель–кабель–преобразовательный трансформатор защита от замыканий на землю реагирует на сигнал, что позволяет замыканию сохраняться до трех часов, создавая условия для термического повреждения ОПН.

Исходя из вышеизложенного, для защиты от коммутационных перенапряжений был использован RC-гаситель модели RC-10,5-0,25/30-УХЛ1, изготовленный ООО «НПП «Рутас».

Эффективность данного устройства подтверждается характерными осциллограммами, снятыми при значении $\gamma = 27,8\%$, где наблюдались максимальные коммутационные перенапряжения, приведенные на рис. 11 и 12.

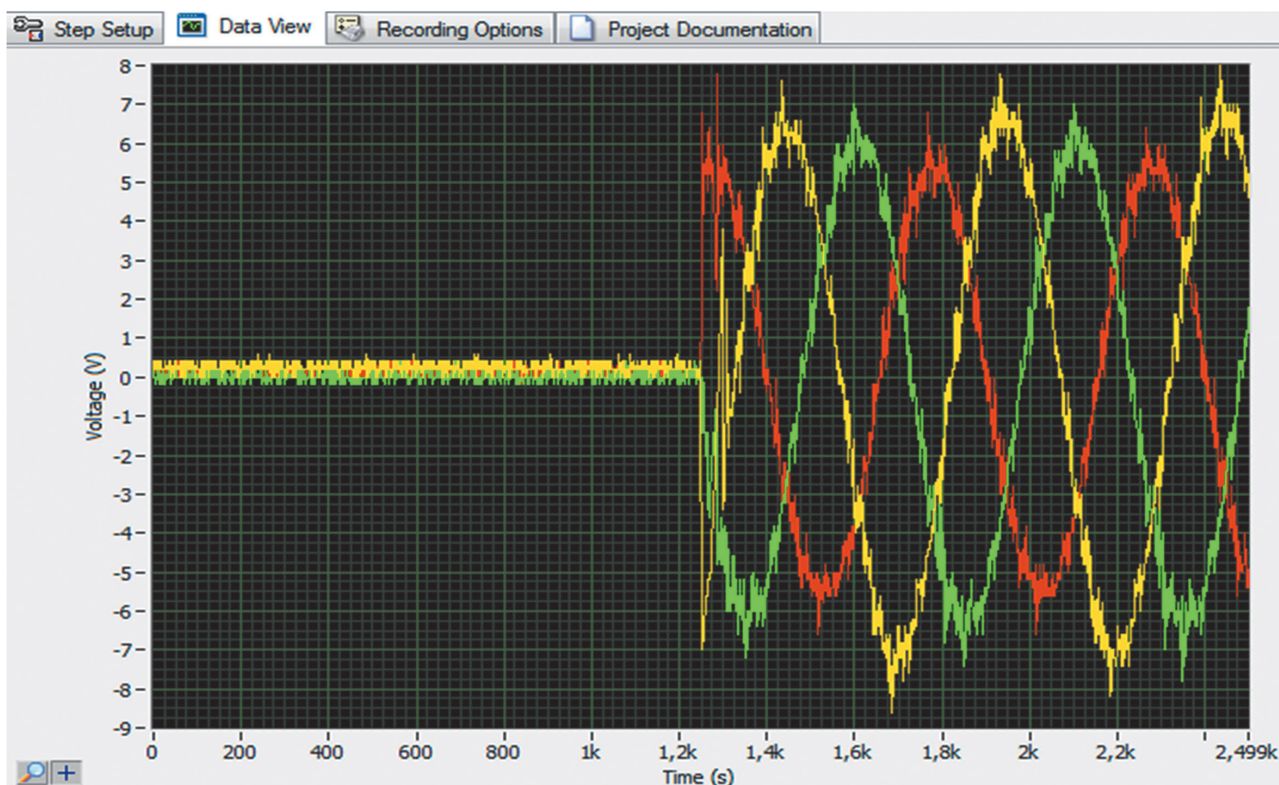


Рис. 11. Характерная осциллограмма напряжений при включении преобразовательного трансформатора с RC-гасителем под нагрузкой $I_{\text{нагр}} = 0,74I_{\text{н.тр.}}$, $u(t)_{\text{max}} = 9250 \text{ В}$, $K_{\text{КП}} = 0,925$

Fig. 11. A typical voltage waveform when switching on a converter transformer with an RC damper under the load $I_{\text{нагр}} = 0,74I_{\text{н.тр.}}$, $u(t)_{\text{max}} = 9250 \text{ В}$, $K_{\text{КП}} = 0,925$

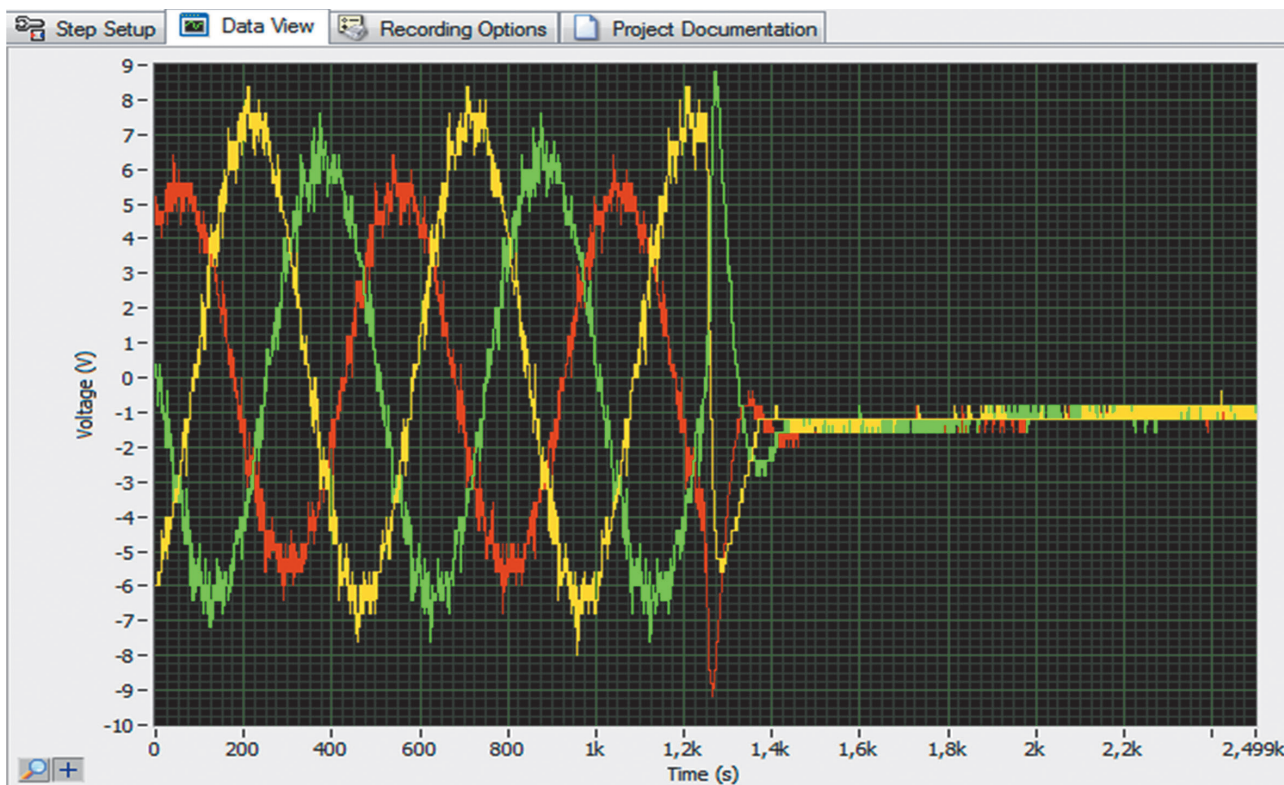


Рис. 12. Характерная осциллограмма напряжений при отключении преобразовательного трансформатора с RC-гасителем под нагрузкой $I = 0,74I_{\text{н.тр.}}$, $u(t)_{\text{max}} = 9250 \text{ В}$, $K_{\text{КП}} = 0,925$

Fig. 12. A typical voltage waveform when switching off a converter transformer with an RC damper under the load $I = 0,74I_{\text{н.тр.}}$, $u(t)_{\text{max}} = 9250 \text{ В}$, $K_{\text{КП}} = 0,925$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По мере увеличения отключающей способности коммутационных аппаратов возрастает и их номинальный ток. Это приводит к тому, что фактические рабочие токи выключателя редко превышают 40% от номинальных токов выключателей ($\gamma \leq 40\%$).

Исследования показали, что с увеличением рабочих токов элегазового выключателя LF2 до значения не более 27,8% от номинального тока выключателя (параметр γ) наблюдается рост кратности коммутационных перенапряжений до 3,0. При токах $\gamma \leq 27,8\%$ в элегазовых камерах выключателя LF2 практически не меняется угол коммутации, что приводит к росту среза тока и увеличению коммутационных перенапряжений.

Дальнейший рост рабочих токов элегазовых выключателей LF2, при которых $\gamma > 27,8\%$,

сопровождается резким снижением кратности коммутационных перенапряжений за счет уменьшения среза тока, обусловленного увеличением времени горения и мощности дуги. Это приводит к интенсивной ионизации межконтактного пространства и образованию паров металла, в данных условиях угол коммутации возрастает.

Кратность измеренных коммутационных перенапряжений составляет 3,0, что представляет риск для изоляции обмоток трансформатора, кабельных линий и элегазовых выключателей и требует выполнения надежной защиты от этих перенапряжений.

Исследования подтвердили [19, 20], что применение RC-гасителей предотвращает возникновение опасных для изоляции перенапряжений при коммутации преобразовательных трансформаторов.

Список источников

1. Бохмат И.С. Особенности энергопотребления предприятий алюминиевой промышленности // Алюминиевая промышленность и электроэнергетика: реальность и перспективы: материалы открытого семинара (г. Москва, 30 марта 2004 г.). М.: РАН Институт народнохозяйственного прогнозирования, 2004. С. 4–18.
2. Кугушева Н.Н., Семёнов А.С., Якушев И.А., Павлова С.Н. Техничко-экономические особенности выбора частотно-регулируемых электроприводов для технологических установок алмазодобывающих предприятий // Инновации и инвестиции. 2021. № 1. С. 145–149. EDN: NBMMNS.
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/10.18635/2071-2219-2020-5-10-18>. EDN: UYSLEK.
4. Семёнов А.С., Егоров А.Н., Харитонов Я.С., Бебихов Ю.В., Якушев И.А., Федоров А.В. Анализ работы систем частотно-регулируемого электропривода при влиянии высших гармоник // Электротехнические системы и комплексы: сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. (г. Уфа, 22–25 октября 2019 г.). Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2019. С. 178–184. EDN: CDLION.
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. EDN: YMIGZU.
6. 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: Красноярский государственный аграрный университет, 2020. С. 153–157. EDN: CQCWQD.
7. 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. EDN: XYUMDB.
8. Шевырёв Ю.В., Шевырева Н.Ю. Улучшение формы напряжения в системах электроснабжения предприятий минерально-сырьевого комплекса с активным выпрямителем // Горный журнал. 2019. № 1. С. 66–69. <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.01.14>. EDN: VTVWHN.
9. 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. <https://doi.org/10.3390/app11020538>.
10. 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>.
11. 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.
12. Скакунов Д.А. Влияние силовой электроники на качество электрической энергии и методы фильтрации высших гармоник // Всерос. науч.-техн. конф.: сб. науч. тр. (г. Новокузнецк, 18–20 мая 2004 г.). Новокузнецк: СибГИУ, 2004. С. 253–257.

13. Каганов В.И. Способ энергосбережения при производстве алюминия на основе импульсного метода электролиза // Энергосбережение и энергоэффективность. 2013. № 2. С. 20–24. EDN: QAOKGN.
14. Минцис М.Я., Поляков П.В., Сиразутдинов Г.А. Электрометаллургия алюминия: монография. Новосибирск: Наука, 2001. 368 с.
15. Воздвиженский В.А., Гончаров А.Ф., Козлов В.Б., Нагарёв С.В., Эпштейн И.Я. Вакуумные выключатели в схемах управления электродвигателями. М.: Энергоатомиздат, 1988. 200 с.
16. Гиндулин Ф.А., Гольдштейн В.Г., Дульзон А.А., Халилов Ф.Х. Перенапряжения в сетях 6–35 кВ. М.: Энергоатомиздат, 1989. 90 с.
17. Akagi H. Active Harmonic Filters // Proceedings of the IEEE. 2005. Vol. 93. Iss. 12. P. 2128–2141.
18. 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.
19. 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>. EDN: JCGATU.
20. 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. EDN: NRAJPZ.
21. Kuzmin S.V., Umetskaia E.V., Zavalov A.A. Influence of power quality on value of switching overvoltages in networks 6–10 kV // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies. 2020. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon50210.2020.9271527>.
22. 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>.
23. 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>.
24. Fritz N., Engelmann G., De Doncker R.W. RC snubber design procedure for enhanced oscillation damping in wide-bandgap switching cells // 21st European Conference on Power Electronics and Applications. 2019. <https://doi.org/10.23919/EPE.2019.8915541>.
25. De Paula dos Santos D., 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>.
26. 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. EDN: JWVZWF.
27. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004. 704 с.
28. Тихонов К.В. Исследование коммутационных перенапряжений в электрических сетях до 1000 В // iPolytech Journal. 2023. Vol. 27. № 2. С. 370–379. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-370-379>. EDN: LTHUGJ.

References

1. Bohmat I.S. Energy consumption features of aluminum industry enterprises. In: *Alyuminiyevaya promyshlennost' i elektroenergetika: real'nost' i perspektivy: materialy otkrytogo seminara = Aluminum industry and electric power industry: reality and promises: materials of the open seminar*. 30 March 2004, Moscow. Moscow: The Institute of Economic Forecasting of the RAS; 2004, p. 4–18. (In Russ.).
2. Kugusheva NN, Semenov AS, Yakushev IA, Pavlova SN. Technical and economic features of choice of frequency-controlled electric drives for technological units of diamond mining enterprises. *Innovation & Investment*. 2021;1:145–149. (In Russ.). EDN: NBMMNS.
3. Brykalov S.M., Balyberdin A.S., Trifonov V.Yu., Zasukhin R.V. Key approaches to energy efficiency improvement at large manufacturing companies. *Energy Safety and Energy Economy*. 2020;5:10–18. (In Russ.). <https://doi.org/10.18635/2071-2219-2020-5-10-18>. EDN: UYSLEK.
4. Semyonov A.S., Egorov A.N., Haritonov Ya.S., Bebihov Yu.V., Yakushev I.A., Fedorov A.V. Analysis of the operation of variable-frequency electric drive systems under the influence of high harmonics. In: *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы: sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii = Electrical engineering systems and complexes: Collected scientific works of the International scientific and practical conference*. 22–25 October 2019, Ufa. Ufa: Ufa University of Science and Technology; 2019, p. 178–184. (In Russ.). EDN: CDLION.
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. *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni R.E. Alekseeva*. 2017;4:86–93. (In Russ.). EDN: YMIGZU.

6. 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 konferencii = 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.). EDN: CQCWQD.
7. 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. *Natural and Technical Sciences*. 2018;8:228-234. (In Russ.). EDN: XYUMDB.
8. Shevyrev Yu.V., Shevyreva N.Yu. Improvement of voltage waveform in power supply systems with dynamic rectifier in mineral mining and processing industry. *Gornyi Zhurnal*. 2019;1:66-69. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.01.14>. EDN: VTVWHN.
9. 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). <https://doi.org/10.3390/app11020538>.
10. 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>.
11. Jyothi R., Sumitgupta, Rao K.U., Jayapal R. IoT application for real-time condition monitoring of voltage source inverter driven induction motor. In: *Innovative Data Communication Technologies and Application*. 2021;59:97-105. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9651-3_8.
12. Skakunov D.A. Influence of power electronics on electric power quality and methods of higher harmonics filtering. In: *Trudy vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii = Proceedings of All-Russian Scientific and Technical Conference*. 2004, Novokuznetsk. Novokuznetsk; 2004, vol. 1, p. 253-257. (In Russ.).
13. Kaganov V.I. A possible way of energy-savings with pulse method of an electrolysis process in aluminum production. *Energoberezhenie i energoeffektivnost'*. 2013;2:20-24. (In Russ.). EDN: QAOKGN.
14. Mintsis M.Ya., Polyakov P.V., Sirazutdinov G.A. *Electrometallurgy of aluminum*. Novosibirsk: Nauka; 2001, 368 p. (In Russ.).
15. Vozdvizhenskij V.A., Goncharov A.F., Kozlov V.B., Nagaryov S.V., Epshtejn I.Ya. *Vacuum switches in electric motor control circuits*. Moscow: Energoatomizdat; 1988, 200 p. (In Russ.).
16. Gindulin F.A., Gol'dshtejn V.G., Dul'zon A.A., Halilov F.H. *Overvoltage in 6-35 kV networks*. Moscow: Energoatomizdat; 1989, 90 p. (In Russ.).
17. Akagi H. Active harmonic filters. *Proceedings of the IEEE*. 2005;93(12):2128-2141.
18. Kuz'min S.V. Using power transformers for higher harmonics localization 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.).
19. 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>. EDN: JCGATU.
20. 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. *Mining equipment and electromechanics*. 2011;4:53-54. (In Russ.). EDN: NRAJPZ.
21. Kuzmin S.V., Umetskaia E.V., Zavalov A.A. Influence of power quality on value of switching overvoltages in networks 6–10 kV. In: *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies*. 2020. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon50210.2020.9271527>.
22. 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>.
23. 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>.
24. Fritz N., Engelmann G., De Doncker R.W. RC snubber design procedure for enhanced oscillation damping in wide-bandgap switching cells. In: *21st European Conference on Power Electronics and Applications*. 2019. <https://doi.org/10.23919/EPE.2019.8915541>.
25. De Paula dos Santos D., 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>.
26. 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. *Mining equipment and electromechanics*. 2009;2:41-44. (In Russ.). JWVZWF.
27. Mesyats G.A. *Pulsed power and electronics*. Moscow: Nauka; 2004, 704 p. (In Russ.).
28. Tikhonov K.V. Study of switching overvoltages in electrical networks up to 1000 V. *iPolytech Journal*. 2023;27(2):370-379. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-370-379>. EDN: LTHUGJ.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тихонов Алексей Валерьевич,
аспирант,
Национальный исследовательский технологический
университет «МИСиС»,
115419, г. Москва, ул. Орджоникидзе, 8/9, Россия;
инженер,
ООО «НПП «Рутас»,
660025, г. Красноярск, ул. Вавилова, 72, Россия
✉ tikhonovalexey@mail.ru; rutas2004@list.ru
<https://orcid.org/0009-0004-0103-7857>

Заявленный вклад автора

Автор выполнил аналитическую 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 01.08.2024 г.; одобрена после рецензирования 02.09.2024 г.; принята к публикации 10.09.2024 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Aleksey V. Tikhonov,
Postgraduate Student,
National University of Science and Technology MISIS,
8/9, Ordzhonikidze St., Moscow 115419, Russia;
Engineer,
LLC Research and Development Enterprise Rutas,
72, Vavilov St., Krasnoyarsk 660025, Russia;
✉ tikhonovalexey@mail.ru; rutas2004@list.ru
<https://orcid.org/0009-0004-0103-7857>

Author contribution

The author performed a comprehensive analysis, made a generalization on the basis of the results obtained and prepared the manuscript for publication.

Conflict of interests

The author declares no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 01.08.2024; approved after reviewing 02.09.2024; accepted for publication 10.09.2024.

МЕТАЛЛУРГИЯ

Обзорная статья

УДК 669.213.1:622.734

EDN: UAQWEC

DOI: 10.21285/1814-3520-2024-3-504-512



Агитируемые мельницы тонкого и сверхтонкого измельчения для последующих обогатительно-металлургических операций

Г.И. Войлошников^{1✉}, А.Ю. Чикин²¹Иркутский научно-исследовательский институт благородных и редких металлов и алмазов, Иркутск, Россия²Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

Резюме: Цель – провести краткий обзор конструкций, характеристик и параметров работы агитируемых мельниц зарубежных производителей, применяемых в настоящее время. Анализ информации об агитируемых мельницах, которые используются для повышения эффективности обогатительных и металлургических операций, проводился на основе обзора известных литературных и информационных источников. По результатам проведенного обзора опубликованных источников показано, что использование традиционных барабанных шаровых мельниц в схемах флотации руд и концентратов с тонким взаимным проращением минералов нецелесообразно. Также применение традиционных мельниц при вскрытии упорных к цианированию руд и концентратов, где золото тонко вкраплено в сульфиды, ограничено высоким расходом электроэнергии на измельчение и соответствующими эксплуатационными затратами. В работе рассмотрены различные типы агитируемых мельниц – вертикальные и горизонтальные. Отмечены преимущества агитируемых мельниц в сравнении с традиционными шаровыми мельницами, в частности по энергоэффективности. Представлены конструкции и основные характеристики агитируемых мельниц, получивших наибольшее применение. По данным зарубежных исследований приведены основные параметры, определяющие процесс измельчения в указанных мельницах (отношение размера бисера к крупности питания мельницы, плотность измельчающей среды, плотность пульпы в мельнице, объемная загрузка бисера, скорость перемешивания и т.п.). Анализ литературных данных свидетельствует о высокой эффективности мельниц с перемешиванием мелющей среды для тонкого и сверхтонкого измельчения руд и концентратов в сравнении с традиционными шаровыми мельницами. Учитывая, что объем руд и концентратов, упорных к переработке традиционными способами, увеличивается, применение указанного оборудования будет расширяться, повышая эффективность последующих обогатительных и металлургических операций.

Ключевые слова: тонкое и сверхтонкое измельчение, агитируемые мельницы, конструкция, расход электроэнергии, характеристики, параметры работы

Для цитирования: Войлошников Г.И., Чикин А.Ю. Агитируемые мельницы тонкого и сверхтонкого измельчения для последующих обогатительно-металлургических операций // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 3. С. 504–512. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-504-512>. EDN: UAQWEC.

METALLURGY

Review article

Stirred media mills of fine and ultrafine grinding for subsequent beneficiation operations

Grigory I. Voiloshnikov^{1✉}, Andrey Yu. Chikin²¹Irkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and Diamonds, Irkutsk, Russia²Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

Abstract. This paper presents a brief review of the designs, characteristics, and operating parameters of Stirred media mills supplied by foreign manufacturers. An analysis of information on Stirred media mills, which are used to improve the efficiency of beneficiation and metallurgical operations, is carried out using available publications. The obtained results indicate the inexpediency of using conventional drum ball mills for flotation separation of ores and concentrates with a fine interpenetration of minerals. The application of conventional mills in extraction of ores and concentrates resistant to cyanidation, where gold is finely disseminated in sulfides, is limited by their high power consumption and the corresponding operating costs. In this work, different types of Stirred media mills are

considered, including their vertical and horizontal types. The advantages of Stirred media mills over conventional ball mills, particularly in terms of energy efficiency, are noted. The designs and main characteristics of Stirred media mills, which have received wide application, are presented. According to the data presented in the reviewed publications, the main parameters determining the grinding process in such mills are outlined, including the ratio of bead size to mill feed size, density of grinding medium, density of pulp in the mill, volume loading of beads, stirring speed, etc. The conducted analysis of literature data indicated high efficiency of mills based on agitation of grinding media for fine and ultrafine grinding of ores and concentrates in comparison with conventional ball mills. Given that the volume of ores and concentrates resistant to processing by conventional methods is increasing, the application of Stirred media mills is expected become more widespread, thereby increasing the efficiency of subsequent beneficiation and metallurgical operations.

Keywords: fine and ultrafine grinding, stirred mills, mill designs, power consumption, characteristics, operating parameters

For citation: Voiloshnikov G.I., Chikin A.Yu. Stirred media mills of fine and ultrafine grinding for subsequent beneficiation operations. *iPolytech Journal*. 2024;28(3):504-512. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-504-512>. EDN: UAQWEC.

ВВЕДЕНИЕ

Вовлечение в производство сырья упорного к переработке традиционными способами требует постоянного совершенствования обогатительных и гидрометаллургических технологий извлечения ценных компонентов. При этом возрастает значение процессов тонкого и сверхтонкого измельчения, в частности, при флотации руд и концентратов с тонким взаимным прораствлением минералов, а также при вскрытии упорных к цианированию руд и концентратов, где золото тонко вкраплено в сульфиды. Указанные процессы позволяют существенно повысить эффективность разделения минералов при флотации, улучшить кинетику и полноту окисления сульфидных минералов в процессах атмосферного, автоклавного и бактериального вскрытия перед цианированием³ [1–4]. Однако использование для этих целей традиционных барабанных шаровых мельниц ограничено высоким расходом электроэнергии на измельчение и соответствующими эксплуатационными затратами. В связи с этим разработка и внедрение эффективного измельчительного оборудования представляется весьма актуальной задачей.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью исследования является краткий обзор характеристик и параметров работы агитируемых мельниц (от англ. stirred mills – мельницы с перемешиванием мелющей среды) зарубежных производителей, применяемых в настоящее время.

МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основным оборудованием, используемым в процессах измельчения, в течение долгого времени оставались шаровые мельницы. Однако возрастающая потребность в тонком и сверхтонком измельчении руд и концентратов показала их главный недостаток для этих целей – высокий расход электроэнергии. В связи с этим возрастает значение применения аппаратов, позволяющих снизить расход электроэнергии [5, 6]. Важным направлением снижения расхода энергии в процессе измельчения является использование правильной технологии и оборудования измельчения для конкретного применения, в частности применение агитируемых мельниц. Агитируемые мельницы более энергоэффективны, чем обычные технологии измельчения (рис. 1.) [7, 8]. Они не менее чем на 50% более энергоэффективны для таких применений, чем обычные шаровые мельницы [9].

В настоящее время существуют различные типы мельниц с перемешиваемой мелющей среды, как вертикальные, так и горизонтальные. Вертикальные мельницы включают в себя башенную мельницу Vertimill, мельницы HIGmill, SMD (Metso-Outotec) и VXPmill (FLSmith). Примерами горизонтальных мельниц с перемешиванием мелющей среды являются мельницы Netzsch/IsaMill и ALC (KHP). Мельницы оснащены штифтами или дисками, установленными на центральном вращающемся валу. Вал распределяет механическую энергию от двигателя к загрузке, когда диски или штифты вращаются вместе с валом. Дей-

³2020 Compendium of Technical Papers // IsaKidd™. Режим доступа: <https://www.glencoretechnology.com/.rest/api/v1/documents/41037d647e29db4dcb9932ac302a59d6/2020+ISAKIDD+Compendium+of+Papers.pdf> (дата обращения: 20.02.2024).

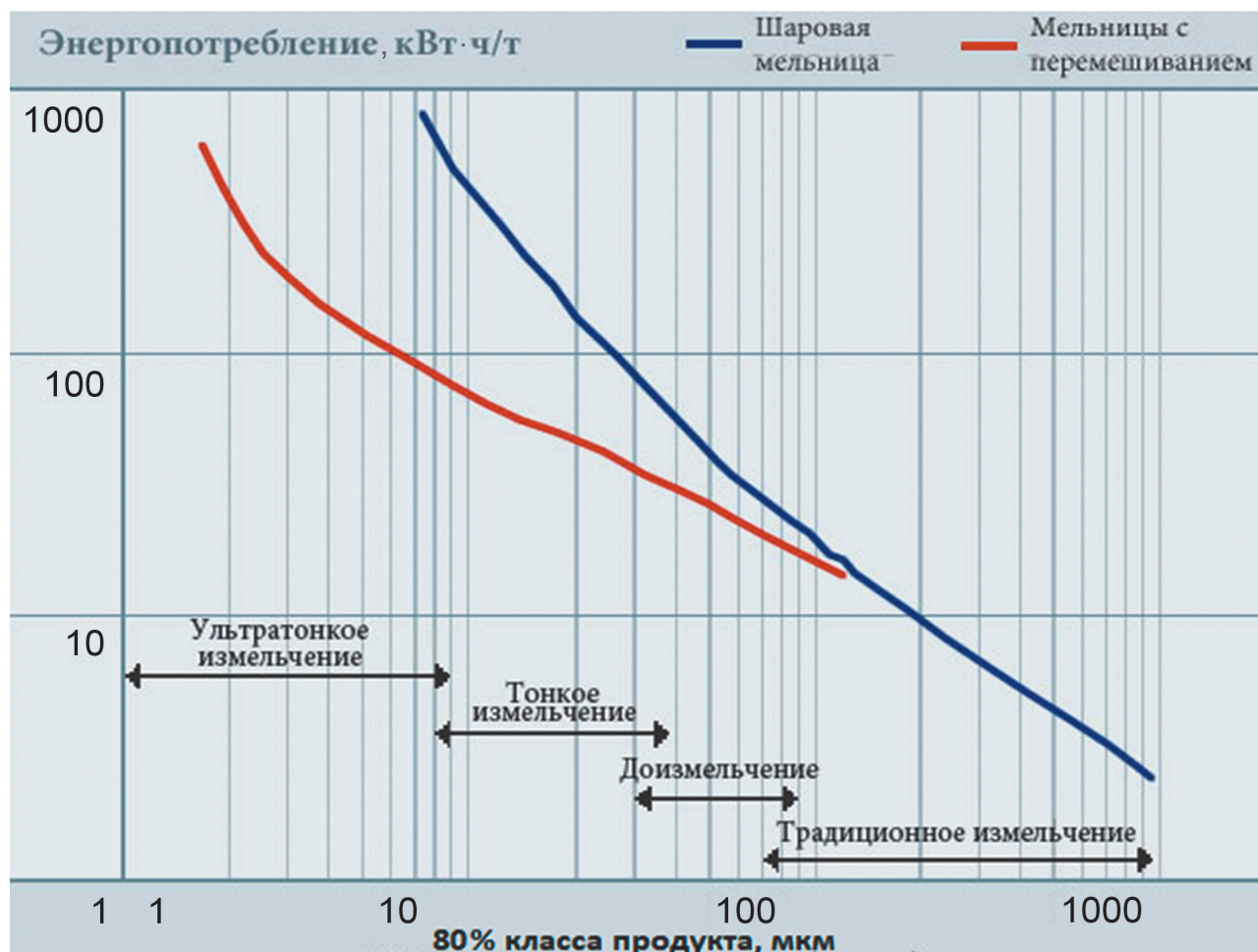


Рис. 1. Энергопотребление на измельчение в шаровой мельнице и мельницах с перемешиванием мелющей среды [8]

Fig. 1. Energy consumption for grinding in a ball mill and stirred media mills [8]

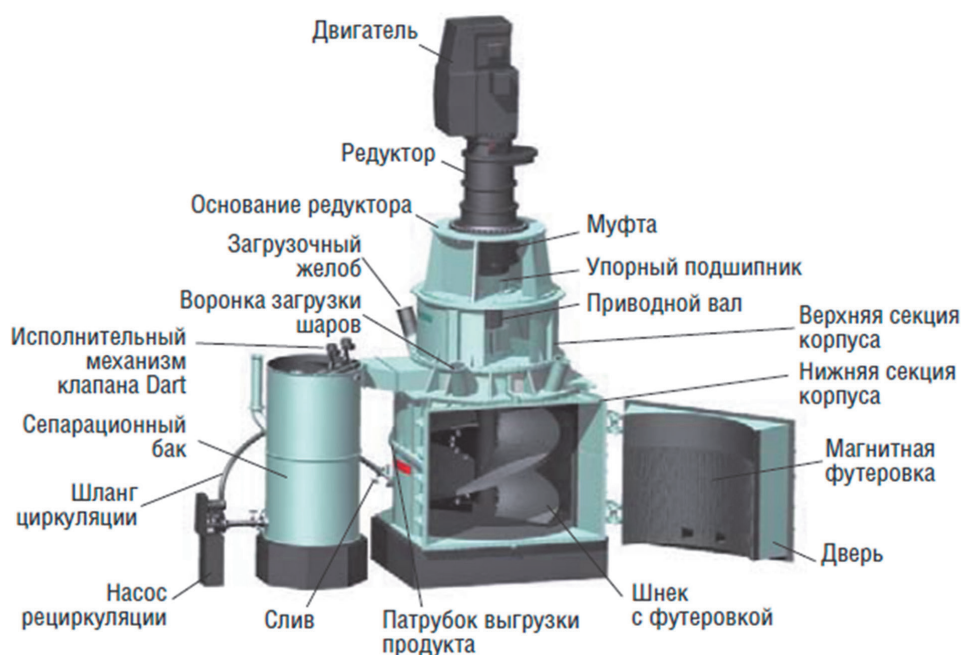


Рис. 2. Мельница Vertimill-Metso-Outotec (вертикальная, перемешиватель в виде шнека). Крупность питания до 6 мм, измельчает до 15–20 мкм. Мелющая среда – стальные шары 5–38 мм, скорость на конце перемешивателя 3 м/с. Мощность на единицу объема – 20–40 кВт/м³

Fig. 2. Vertimill-Metso-Outotec mill (vertical, screw-type agitator). Feed size is up to 6 mm, grinds up to 15–20 μm. Grinding medium is steel balls of 5–38 mm, agitator tip speed is 3 m/s. Power per unit volume is 20–40 kW/m³

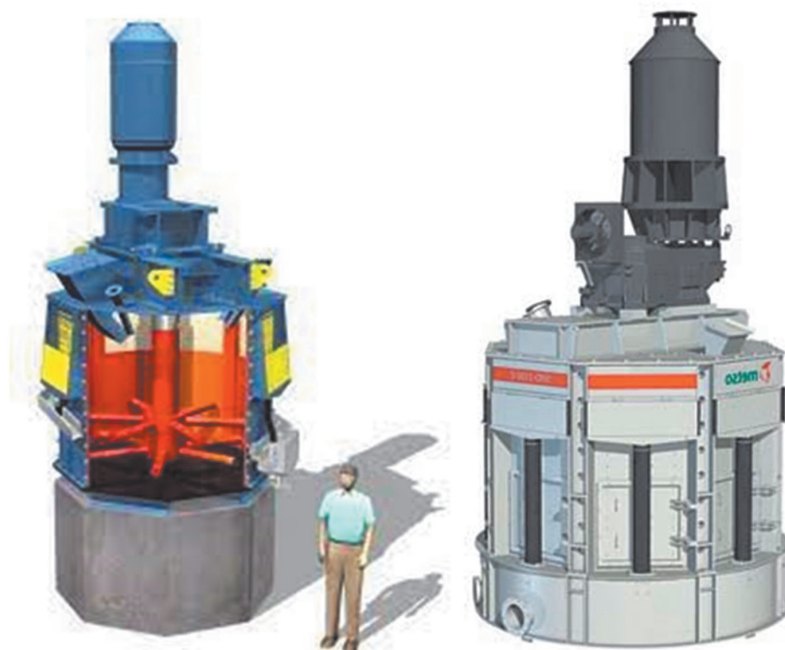


Рис. 3. Мельница SMD (Stirred Media Detritor) Metso-Outotec (вертикальная, перемешиватель – вал со штифтами). Крупность питания от 100 до 15 мкм, продукт до 98% – 2 мкм, стандартно 80% минус 6 мкм. Крупность бисера 1–3 мм. Мощность на единицу объема 50–100 кВт/м³

Fig. 3. SMD (Stirred Media Detritor) Metso-Outotec mill (vertical, a shaft with pins is an agitator). Feed size is from 100 to 15 μm , up to 98% product is 2 μm , usually 80% minus 6 μm . The bead size is 1–3 mm. Power per unit volume is 50–100 kW/m³

ствие измельчения происходит при столкновении измельчающих шариков и минеральных частиц. Ниже приведены конструкции и

основные характеристики применяемых в настоящее время (по данным производителей оборудования) мельниц (рис. 2–6).

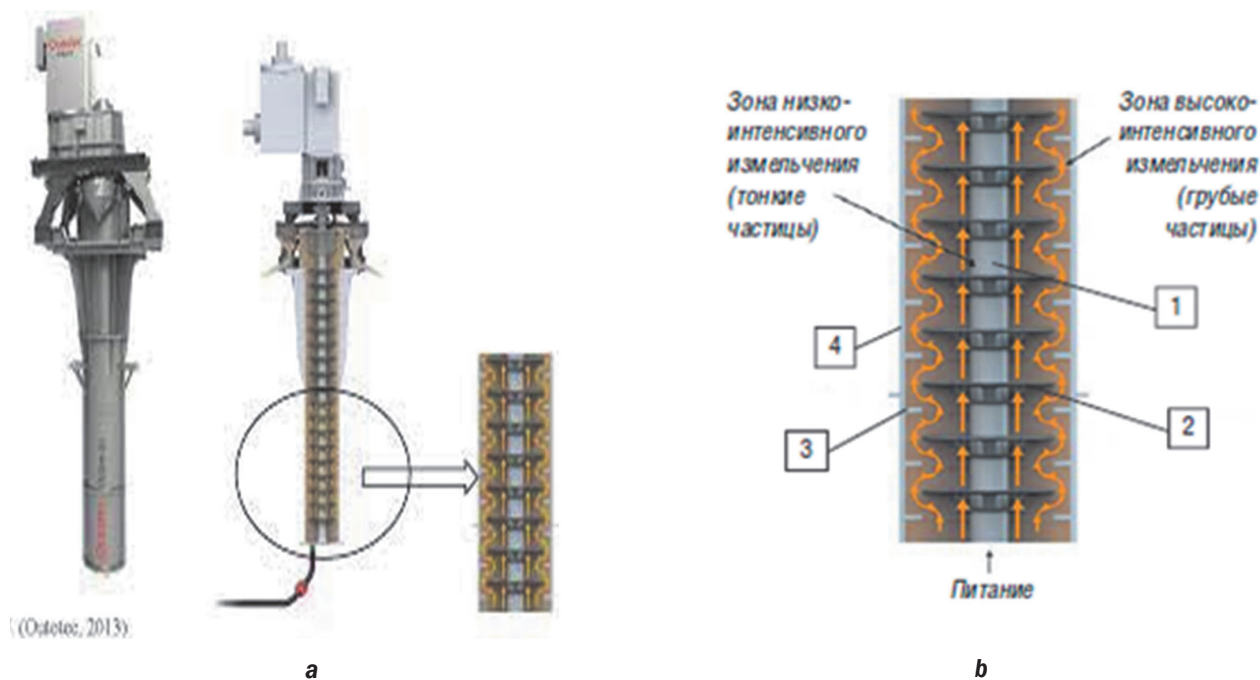


Рис. 4. Мельница (а) HIGmill Metso-Outotec (вертикальная, перемешиватель – вал с дисками); принцип работы мельницы (b) Outotec HIGmill (1 – вращающийся вал, 2 – измельчающие диски, 3 – неподвижные контрдиски, 4 – камера измельчения)

Fig. 4. (a) HIGmill Metso-Outotec mill (vertical, a shaft with discs is an agitator); (b) Outotec HIGmill operating principle (1 – rotating shaft, 2 – grinding discs, 3 – fixed counter discs, 4 – grinding chamber)



a



b

Рис. 5. Мельница VXPmill – FLSmith, ранее Deswik (вертикальная, перемешиватель – вал с дисками), скорость на конце перемешивателя 10–12 м/с. Мощность на единицу объема 240–765 кВт/м³: а – общий вид; б – вал с дисками при монтаже

Fig. 5. VXPmill – FLSmith mill, former Deswik (vertical, a shaft with discs is an agitator), agitator tip speed is 10–12 m/s. Power per unit volume is 240–765 kW/m³: a – general assembly; b – a shaft with discs under installation

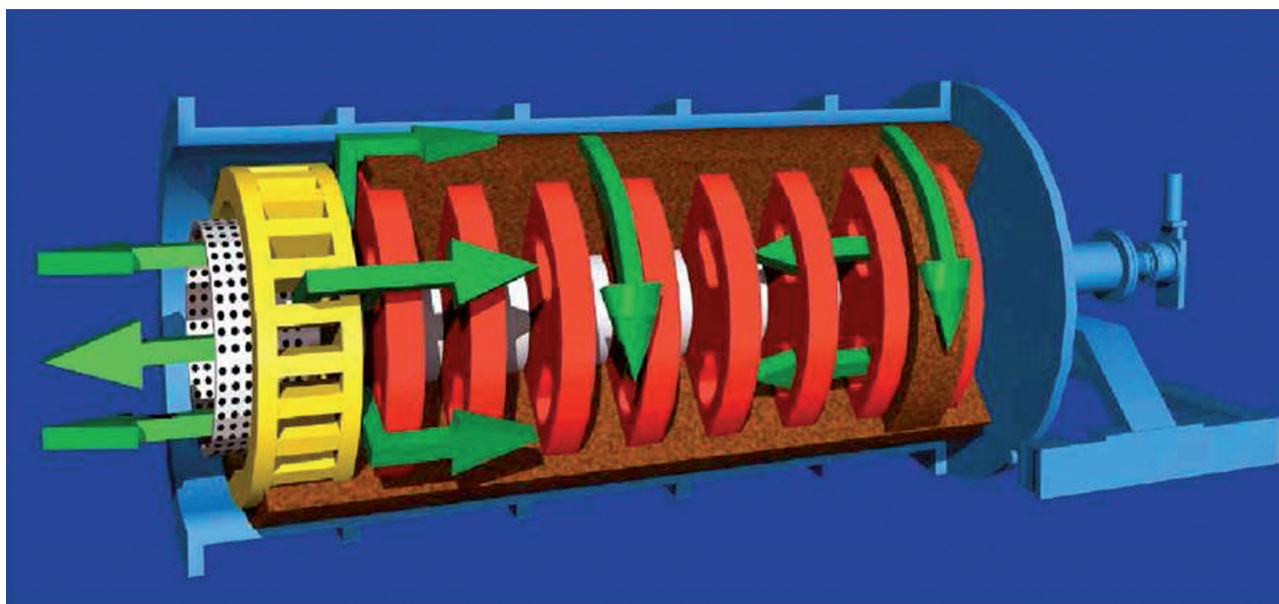


Рис. 6. Мельница Isamill – Glencore, ранее Netzsch/Isamill (горизонтальная, перемешиватель – вал с дисками) скорость на конце перемешивателя более 15 м/с. Мощность на единицу объема 300–1000 кВт/м³

Fig. 6. Isamill – Glencore mill, former Netzsch/Isamill (horizontal, a shaft with discs is an agitator), agitator tip speed is more than 15 m/s. Power per unit volume is 300–1000 kW/m³

Кроме энергоэффективности, мельницы с перемешиваемыми средами в виде бисера производят измельченный продукт, который не содержит железа благодаря использованию инертных керамических измельчающих сред тел [10]. Среда измельчения в отсутствие железа подразумевает меньше эксплуатационных проблем из-за меньшего потребления цианида и флотационных реагентов при последующей обработке.

Мельницы VXPmill и Isamill используют тонкую измельчающую среду и работают на высоких скоростях перемешивателей, что делает их пригодными для сверхтонкого измельчения [11]. В работе [12] приведены основные преимущества VXPmill перед Isamill: нет необходимости уплотнения подшипника вала (пульпа не контактирует с подшипником), отсутствие конструктивных сложностей из-за внутренних механизмов разделения продукта (переполнение продукта через экран удержания среды) и меньшую занимаемую площадь. Однако мельница Isamill более энергонасыщенная.

Анализ специализированной литературы позволил определить основные параметры, влияющие на показатели измельчения в мельницах с перемешиванием мелющей среды. К ним относятся:

Отношение размера бисера к крупности питания: для тонкого питания (менее 40 мкм) – 20:1; для более крупного питания ($F_{50} = 166$ мкм) – 12:1.

Плотность измельчающей среды (бисера) должна быть более чем в три раза выше ожидаемой плотности пульпы измельчаемого продукта, которая составляет от 1,2 до 1,5 кг/дм³ [12].

Помимо плотности бисера, другие соображения, которые следует учитывать, включают твердость, прочность и форму измельчающей среды. Прочные измельчающие среды должны быть хорошо округлены и свободны от дефектов и трещин; носители с дефектами и трещинами легко ломаются, что приводит к неприемлемо высокому износу измельчающей среды [6]. Для эффективного измельчения измельчающая среда должна быть тверже, чем измельчаемый минерал, [13, 14].

Объемная загрузка бисера. Увеличение загрузки бисера увеличивает частоту столкновений, т.е. стрессовые события в камере измельчения при заданной скорости мельницы. Это явление увеличивает площадь мест разрушения частиц в камере измельчения, но рабочий крутящий момент и мощность также увеличиваются [7]. Однако загрузка бисера не должна быть выше 90%, иначе сжатие среды приведет к неприемлемо высокому износу среды и футеровки из-за чрезмерного трения в измельчительной камере [15]. Диапазон загрузки бисера в мельницу составляет от 50 до 83%.

Скорость перемешивания. В специализированных источниках приводится или линейная скорость на конце перемешивателя, или число его оборотов. Наименьшая интенсивность перемешивания наблюдается у мельницы Vertimill. Типичные диапазоны скоростей перемешивания вертикальных мельниц с использованием штифтовых импеллеров: 200–330 об/мин [16], 200–1350 об/мин [17], 260–1000 об/мин [18] и 450, 1000–1500 об/мин [19]. Диапазоны скоростей горизонтальных мельниц с перфорированными дисковыми импеллерами выше, чем у вертикальных мельниц. Типичные скорости горизонтальной перемешиваемой мельницы: 2130–4370 об/мин [14] и 1500–2500 об/мин [20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ литературных данных свидетельствует о высокой эффективности применения мельниц с перемешиванием мелющей среды для тонкого и сверхтонкого измельчения руд и концентратов. К преимуществам указанных мельниц относится существенное снижение расхода электроэнергии на измельчение в сравнении с традиционными шаровыми мельницами. Проведен краткий обзор конструкций и характеристик промышленных агитируемых мельниц, а также параметров, влияющих на показатели измельчения. Учитывая, что объем руд и концентратов, упорных к переработке традиционными способами, увеличивается, применение указанного оборудования будет расширяться, повышая эффективность последующих обогатительных и металлургических операций.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Аксенов А.В., Васильев А.А., Охотин В.Н., Шве́ц А.А. Применение ультратонкого измельчения при переработке минерального сырья // Известия вузов. Цветная металлургия. 2014. № 2. С. 20–25. EDN: SCETUV.
2. Комогорцев Б.В., Вареничев А.А. Совершенствование технологий флотационного обогащения тонкодисперсных сульфидных золотосодержащих руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 10. С. 180–190. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-10-0180-190>.
3. Thomas K.G., Pearson M.S. Pressure oxidation overview // *Gold Ore Processing*. 2016. Chapt. 21. P. 341–358. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63658-4.00021-9>.
4. Miller P., Brown A.R.G. Bacterial oxidation of refractory gold concentrates // *Developments in Mineral Processing*. 2005. Vol. 15. P. 371–402. [https://doi.org/10.1016/S0167-4528\(05\)15016-9](https://doi.org/10.1016/S0167-4528(05)15016-9).
5. El-Shall H., Somasundaran P. Physico-chemical aspects of grinding: a review of use of additives // *Powder Technology*. 1984. Vol. 38. Iss. 3. P. 275–293. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(84\)85009-3](https://doi.org/10.1016/0032-5910(84)85009-3).
6. Ларсон М., Андерсон Г., Моррисон Р., Янг М. Мельницы доизмельчения: проблемы масштабирования. Режим доступа: <https://www.glencoretechnology.com/.rest/api/v1/documents/7ee61fe4c646aa008a2f9a3ad32c6d66/Regrind%20Mills-%20Challenges%20of%20Scaleup%20-%20RUS.pdf> (дата обращения: 25.02.2024).
7. Kwade A., Stender H.H. Constant grinding results at scale-up of stirred media mills // *Aufbereitungs Technik*. 1998. Vol. 39. Iss. 8. P. 373–382.
8. Jankovic A. Variables affecting the fine grinding of minerals using stirred mills // *Minerals Engineering*. 2003. Vol. 16. Iss. 4. P. 337–345. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(03\)00007-4](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(03)00007-4).
9. Stief D.E., Lawruk W.A., Wilson L.J. Tower mill and its application to fine grinding // *Minerals and metallurgical processing*. 1987. Vol. 4. Iss. 1. P. 45–50. <https://doi.org/10.1007/BF03402674>.
10. Burford B.D., Clark L.W. IsaMill™ technology used in efficient grinding circuits // VIII International Conference on Non-ferrous Ore Processing. 2007. Режим доступа: https://www.glencoretechnology.com/.rest/api/v1/documents/0b7155afb9ff65031120a9cfe530e86e/IsaMill_Technology_Used_in_Efficient_Grinding_Circuits.pdf (дата обращения: 25.02.2024).
11. Lichter J., Davey G. Selection and sizing of ultrafine and stirred grinding mills // *Advances in comminution - kowatra* (1). Denver: Society for Mining, 2006. P. 69–86.
12. Rahal D., Erasmus D., Major K.J. Knelson-Deswik milling technology: bridging the gap between low and high speed stirred mills // 43rd Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors (Ottawa, 18–20 January 2011). Ottawa, 2018. Vol. 35. P. 557–584.
13. Krause C., Pickering M. Evaluation of ultrafine wet mineral milling using carboceramics proppant products for attrition grinding media. Colorado Springs: Metso Minerals Optimization Services, 1998.
14. Becker M., Kwade A., Schwedes J. Stress intensity in stirred media mills and its effect on specific energy requirement // *International Journal of Mineral Process*. 2001. Vol. 61. Iss. 3. P. 189–208.
15. Gao M.W., Weller K.R. Fine grinding in mineral processing using stirred ball mills // *Chemical Engineering in Australia*. 1993. Vol. 18. Iss. 2. P. 8–12.
16. Mankosa M.J., Adel G.T., Yoon R.H. Effect of media size in stirred ball mill grinding of coal // *Powder technology*. 1986. Vol. 49. Iss. 1. P. 75–82. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(86\)85008-2](https://doi.org/10.1016/0032-5910(86)85008-2).
17. Mankosa M.J., Adel G.T., Yoon R.H. Effect of operating parameters in Stirred Ball Mill Grinding of Coal // *Powder technology*. 1989. Vol. 59. Iss. 4. P. 255–260.
18. Zheng Jie, Harris C.C., Somasundaran P. A study on grinding and energy input in stirred media mills // *Powder Technology*. 1996. Vol. 86. Iss. 2. P. 171–178. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(95\)03051-4](https://doi.org/10.1016/0032-5910(95)03051-4).
19. Fadhel H.B., Frances C. Wet batch grinding of alumina hydrate in a stirred bead mill // *Powder Technology*. 2001. Vol. 119. Iss. 2. P. 257–268. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(01\)00266-2](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(01)00266-2).
20. Ouattara S., Frances C. Grinding of calcite suspensions in a stirred media mill: effect of operational parameters on the product quality and the specific energy // *Powder Technology*. 2014. Vol. 255. P. 89–97. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.11.025>.

References

1. Aksekov A.V., Vasiliev A.A., Okhotin V.N., Shvetz A.A. Using ultrafine grinding in mineral raw material processing. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2014;2:20-25. (In Russ.). EDN: SCETUV.
2. Komogortsev B.V. Varenichev A.A. Improvement of flotation technologies for finely dispersed gold-bearing sulfide ore. *Mining informational and analytical bulletin*. 2018;10:180-190. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-10-0180-190>.
3. Thomas K.G., Pearson M.S. Pressure oxidation overview. In: *Gold Ore Processing*. 2016;21:341-358. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-63658-4.00021-9>.
4. Miller P., Brown A.R.G. Bacterial oxidation of refractory gold concentrates. In: *Developments in Mineral Processing*. 2005;15:371-402. [https://doi.org/10.1016/S0167-4528\(05\)15016-9](https://doi.org/10.1016/S0167-4528(05)15016-9).

5. El-Shall H., Somasundaran P. Physico-chemical aspects of grinding: a review of use of additives. *Powder Technology*. 1984;38(3):275-293. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(84\)85009-3](https://doi.org/10.1016/0032-5910(84)85009-3).
6. Larson M.G., Anderson G., Morrison R.D., Young M.F. Regrind mills – Challenges of Scaleup. Available from: <https://www.glencoretechnology.com/.rest/api/v1/documents/7ee61fe4c646aa008a2f9a3ad32c6d66/Regrind%20Mills-%20Challenges%20of%20Scaleup%20-%20RUS.pdf> [Accessed 25th February 2024]. (In Russ.).
7. Kwade A., Stender H.H. Constant grinding results at scale-up of stirred media mills. *Aufbereitungs Technik*. 1998;39(8):373-382.
8. Jankovic A. Variables affecting the fine grinding of minerals using stirred mills. *Minerals Engineering*. 2003;16(4):337-345. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(03\)00007-4](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(03)00007-4).
9. Stief D.E., Lawruk W.A., Wilson L.J. Tower mill and its application to fine grinding. *Minerals and metallurgical processing*. 1987;4(1):45-50. <https://doi.org/10.1007/BF03402674>.
10. Burford B.D., Clark L.W. IsaMill™ technology used in efficient grinding circuits. In: *VIII International Conference on Non-ferrous Ore Processing*. 2007. Available from: https://www.glencoretechnology.com/.rest/api/v1/documents/Ob7155afb9ff65031120a9cfe530e86e/IsaMill_Technology_Used_in_Efficient_Grinding_Circuits.pdf [Accessed 25th October 2024].
11. Lichter J., Davey G. Selection and sizing of ultrafine and stirred grinding mills. In: *Advances in comminution - kowatra (1)*. Denver: Society for Mining; 2006, p. 69-86.
12. Rahal D., Erasmus D., Major K.J. Knelson-Deswik milling technology: bridging the gap between low and high speed stirred mills. In: *43rd Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors*. 18–20 January 2011, Ottawa. Ottawa; 2018, vol. 35, p. 557-584.
13. Krause C., Pickering M. *Evaluation of ultrafine wet mineral milling using carboceramics proppant products for attrition grinding media*. Colorado Springs: Metso Minerals Optimization Services; 1998.
14. Becker M., Kwade A., Schwedes J. Stress intensity in stirred media mills and its effect on specific energy requirement. *International Journal of Mineral Process*. 2001;61(3):189-208.
15. Gao M.W., Weller K.R. Fine grinding in mineral processing using stirred ball mills. *Chemical Engineering in Australia*. 1993;18(2):8-12.
16. Mankosa M.J., Adel G.T., Yoon R.H. Effect of media size in stirred ball mill grinding of coal. *Powder technology*. 1986;49(1):75-82. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(86\)85008-2](https://doi.org/10.1016/0032-5910(86)85008-2).
17. Mankosa M.J., Adel G.T., Yoon R.H. Effect of operating parameters in stirred ball mill grinding of coal. *Powder technology*. 1989;59(4):255-260.
18. Zheng Jie, Harris C.C., Somasundaran P. A study on grinding and energy input in stirred media mills. *Powder Technology*. 1996;86(2):171-178. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(95\)03051-4](https://doi.org/10.1016/0032-5910(95)03051-4).
19. Fadhel H.B., Frances C. Wet batch grinding of alumina hydrate in a stirred bead mill. *Powder Technology*. 2001;119(2):257-268. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(01\)00266-2](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(01)00266-2).
20. Ouattara S., Frances C. Grinding of calcite suspensions in a stirred media mill: effect of operational parameters on the product quality and the specific energy. *Powder Technology*. 2014;255:89-97. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.11.025>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Войлошников Григорий Иванович,

д.т.н., профессор,
заместитель генерального директора
по научно-методической и инновационной деятельности,
Иркутский научно-исследовательский институт
благородных и редких металлов и алмазов,
664025, г. Иркутск, ул. Бульвар Гагарина, 38, Россия
✉ greg@irgiredmet.ru

Grigory I. Voiloshnikov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Deputy Director for Science, Methodology and
Innovations,
Irkutsk Research Institute of Precious
and Rare Metals and Diamonds,
38, Gagarin Blvd., Irkutsk 664025, Russia
✉ greg@irgiredmet.ru

Чикин Андрей Юрьевич,

д.т.н., профессор,
профессор кафедры технологий,
предпринимательства и методик их преподавания,
Иркутский государственный университет,
664011, г. Иркутск, ул. Нижняя Набережная, 6, Россия
anchik53@mail.ru
<https://orcid.org/0000-003-1489-5581>

Andrey Yu. Chikin,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Technology,
Entrepreneurship and Training Methods,
Irkutsk State University,
6 Nizhnyaya Naberezhnaya, Irkutsk 664011, Russia
anchik53@mail.ru
<https://orcid.org/0000-003-1489-5581>

Заявленный вклад авторов

Authors' contribution

Войлошников Г.И. – формирование концепции статьи,
анализ литературных источников, подготовка текста.
Чикин А.Ю. – общее редактирование текста статьи.

Grigoriy I. Voiloshnikov formed the concept of the
article, analysed the literature on the research problem,
prepared the text of the article. Andrey Yu. Chikin
performed general editing of the text of the article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 20.06.2024 г.; одобрена после рецензирования 13.07.2024 г.; принята к публикации 20.07.2024 г.

Information about the article

The article was submitted 20.06.2024; approved after reviewing 13.07.2024; accepted for publication 20.07.2024



Problems and solutions to protection of carbon-graphite electrodes

Evgeniy S. Gorlanov^{1✉}, Viktor M. Sizyakov², Felix Yu. Sharikov³,
Aleksy A. Spektoruk⁴, Tatiana V. Butakova⁵

¹⁻³Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

^{4,5}LLC «El6», Novosibirsk region, Linevo workers' settlement, Russia

Abstract. This paper presents literature review of the existing problems and solutions in protecting carbon-graphite electrodes from the destructive environment of arc steel-making furnaces, magnesium and aluminum cells. The most significant publications on the corrosion resistance of cathodes and anodes in relation to physical, chemical, and electrochemical wear, to oxidizing environments, to active components of the introduction and destruction of the carbon structure are discussed. An analysis of various proposals and engineering solutions for reducing or eliminating the impact of aggressive environments on electrodes under specific operating conditions of metallurgical units is carried out. It was established that losses from lateral oxidation of the electrode surface of arc steel-making furnaces, when passing the temperature zone of 600–800 °C, may reach 40–60% of the total consumption. Carbon-graphite products are subject to a significant destructive effect of the specific interaction of carbon with elements and compounds of the working environment, which can be introduced (intercalate) into the interlayer structure of carbon. The existing engineering and technological solutions mainly apply to the protection of the product surface; moreover, they perform their functions for a short time, rather than during the entire service life of the metallurgical unit. In this connection, it is proposed to focus on ensuring volumetric protection of electrodes from the effects of an aggressive environment. Intermediate results obtained in the field of synthesis of carbon-based composite materials adapted to the conditions of electrode production at existing enterprises are presented, along with the results of studies into the oxidizability of these composites. The existing and proposed engineering solutions for protecting the surface of carbon products have not received wide recognition or are not used in the metallurgical industry. Among the most probable reasons are the limited period of electrode surface protection, the complexity of reproduction, or the lack of profitability due to the high cost of protective components. In this regard, synthesis of C – TiC/TiB₂ composite electrodes based on petroleum coke and graphite seems to be a promising research direction.

Keywords: carbon-graphite electrode, material destruction, oxidation, wear, intercalation, protective coatings, composite materials

For citation: Gorlanov E.S., Sizyakov V.M., Sharikov F.Yu., Spektoruk A.A., Butakova T.V. Problems and solutions to protection of carbon-graphite electrodes. *iPolytech Journal*. 2024;28(3):513-00. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-513-537>. EDN: AEDFQP.

МЕТАЛЛУРГИЯ

Научная статья

УДК 669.2/.8:541.49:549.3

Проблемы и решения защиты углеграфитовых электродов

Е.С. Горланов^{1✉}, В.М. Сизяков², Ф.Ю. Шариков³, А.А. Спекторук⁴, Т.В. Бутакова⁵

¹⁻³Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

^{4,5}ООО «Эл6», Новосибирская область, р.п. Линево, Россия

Резюме. Цель – литературный обзор существующих проблем и решений по защите углеграфитовых электродов от деструктивного воздействия агрессивной среды дуговых сталеплавильных печей, магниевых и алюминиевых электролизеров. В работе приведено обсуждение наиболее значимых результатов исследований коррозионной стойкости катодов и анодов по отношению к физическому, химическому и электрохимическому износу, окислительной среде, а также к активным компонентам внедрения и разрушения углеродной структуры. Проведен анализ предложений и технических решений по уменьшению или исключению воздействия агрессивной среды на электроды в конкретных условиях работы металлургических агрегатов. Установлено, что потери от бокового окисления поверхности электродов дуговых сталеплавильных печей при прохождении температурной зоны 600–800 °C достигают 40–60% от общего расхода. Значительное разрушающее воздействие

на углеграфитовые изделия оказывает специфическое взаимодействие углерода с элементами и соединениями рабочей среды, способными внедряться (интеркалировать) в межслойную структуру углерода. Существующие технические и технологические решения распространяются на защиту поверхности изделий и выполняют свои функции в течение короткого времени, но не в течение срока службы металлургического агрегата. Предложено сконцентрироваться на обеспечении объемной защиты электродов от воздействия агрессивной среды. Представлены промежуточные результаты перспективного направления синтеза композитных материалов на основе углерода, адаптированного к условиям производства электродов на действующих предприятиях, а также результаты исследования окисляемости этих композитов. Существующие и предлагаемые технические решения по защите поверхности углеродных изделий не получили широкого признания, либо не используются в металлургической отрасли. Вероятная причина – ограниченный период защиты поверхности электродов, сложность воспроизведения или отсутствие рентабельности из-за высокой стоимости защитных компонентов. В этой связи для обсуждения предложено перспективное направление создания коррозионно-стойких материалов – синтез композитных электродов C – TiC/TiB₂ на основе нефтяного кокса и графита в стандартных условиях промышленного производства.

Ключевые слова: углеграфитовый электрод, деструкция материала, окисление, износ, интеркаляция, защитные покрытия, композитные материалы

Для цитирования: Горланов Е.С., Сизяков В.М., Шариков Ф.Ю., Спекторук А.А., Бутакова Т.В. Проблемы и решения защиты углеграфитовых электродов. *iPolytech Journal*. 2024. Т. 28. № 3. (In Eng.). С. 513–537. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-513-537>. EDN: AEDFQP.

INTRODUCTION

One of the most recent problems in up-to-date technologies of structural materials production is an increase of their stability in aggressive environment, a prolongation of service life of heavy-duty pieces and metallurgical units in the whole. To the full extent this relates to carbon-graphite materials that are widely used in the production of ferrous and non-ferrous metals. They have to retain in a continuous and reliable manner their functional properties in conditions of high temperatures and pressures, oxidizing environment, high dynamic and static loads. In this regard, the initial materials [1, 2], combinations of fractional size distributions [3, 4], binding components and modifying additives are subject to special requirements in terms of composition [5–7], emissions of gaseous and solid components [8–10].

The offered overview discusses most important results of multiple investigations concerning the conditions of carbon and graphite products use in electric arc steel-making furnaces, magnesium and aluminium cells. In this respect the overview shall emphasize special methods and measures for the protection of carbon-graphite materials against gas and electrochemical corrosions, erosion wear and degradation at the formation of inter-layer (lamellar) compounds. In this regard we shall preliminarily note some particular features of graphite structure and its interaction with aggressive environment.

GRAPHITE STRUCTURE

Theoretical density of graphite is 2265 kg/m³ [11, 12]. Under ordinary conditions it is resistant to the action of acids and salt solutions; it does not interact with nitrogen, chlorine and other elements. The graphite structure is one of the first to be studied using methods of X-ray crystal structure analysis [13–15]; moreover, with the development of experimental technologies, the accuracy of such measurements increased [16–18]. According to these data the carbon atoms are located in graphite in parallel layers, the distance between which under room temperature is $d_0 = 3.3538 \text{ \AA}$ (Fig. 1). In each flat layer carbon atoms form the lattice of regular hexagons with C-C distance of $a_0 = 1.415 \text{ \AA}$. Carbon atoms within the layer are bound by strong covalent bonds having a binding energy of 167.6 kJ/mole. The interaction between layers is carried out by weak Van der Waals forces having a binding energy of 16.75 kJ/mole at the temperature of 15°C [12]. Thus, individual layers can separate easily from the crystal, which is widely used while fabricating any antifriction and sealing products but substantiates their considerable physical wear.

Three main types of graphite have a nearly ideal structure: natural graphite, Kish-graphite and highly oriented pyrolytic graphite (HOPG) [20, 21]. Real structures of graphites and materials having a graphite-like structures differ from ideal ones by presence of different defects. Artificial graphites with less ordered structures are usually produced

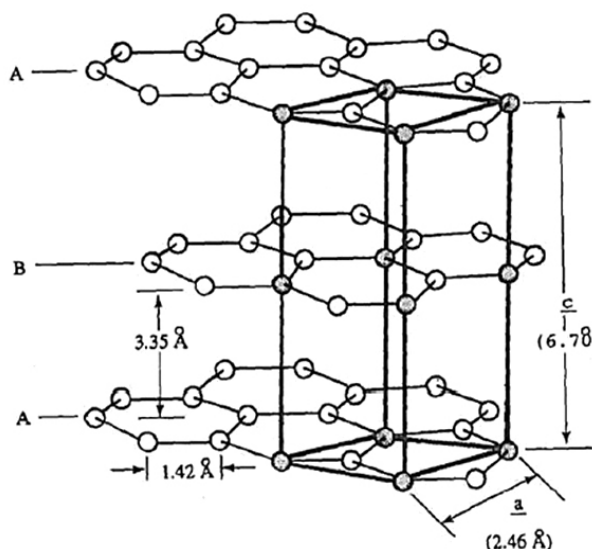


Fig. 1. Crystal structure of hexagonal graphite [19]

Рис. 1. Кристаллическая структура гексагонального графита [19]

from petroleum coke and coal tar pitch⁶ [22, 23]. Billets are molded by method of extrusion or pressing. Produced billets are exposed to the step-wise thermal treatment without air access (up to 1300–1500°C) and then to the graphitization (up to 2400–2700°C).

AGGRESSIVE ENVIRONMENT IMPACT

Along with unique operation properties of carbon-graphite products (acceptable strength, high heat resistance, electrical and heat conductivities) there are some particular features that require the protection of this material against any aggressive environment impact.

Oxidation. Air oxidation of carbon graphites starts already at 400–500°C, and under temperatures exceeding 1200°C it takes a catastrophic form, including their complete burn-out [24, 25]. Kinetic parameters of oxidation are well known [26, 27]. It is considered that under low temperatures the limiting stage is a chemical reaction, under high temperatures this is an external diffusion, and in the interval between them – internal diffusion. It is supposed that the reactive capability of carbon material to the large extent depends

on the perfection of crystalline structure being characterized by inter-planar distance and by size of crystallites [28, 29]. With the growth of the first parameter the reactive capability falls, and the growth of the second parameter causes its increase. In addition, the oxidizability of graphite is significantly influenced by presence of impurities, which could serve as catalysts for the process. The impurities of some metals, like iron, copper, vanadium, sodium have an especially strong influence.

Intercalation of graphite. Practically all carbon and graphite products in different operation conditions are exposed to the degradation at the specific interaction with alkaline and alkali-earth metals, their fluorides, chlorides and bromides, with acids and halogens. It concerns the penetration (intercalation) of the atoms or molecules of above mentioned components between structural planes of graphite. Material that was formed at this area is called «graphite intercalation compounds GIC» [30, 31]. This specific phenomenon is interesting for us in that during the interaction of carbon-graphite materials with components, penetrated into the host crystalline lattice, the expansion and swelling of carbon product takes place, which has sometimes catastrophic destructive consequences.

Relatively weak forces acting between graphite layers predetermine the possible penetration of different substance matters into the graphite matrix and the formation of interlayer carbon compounds. Currently, GIC with various substance matters have been well studied, which, according to the type of interaction of penetrated components (intercalants) with the graphite crystalline lattice, can be split into two main groups [32] (Fig. 2):

1. *Acceptor GIC*, in which polyarene lattices bear a positive charge and represent macro-cations C_n^+ . This group includes compounds with (sulphuric, nitric and other) acids [33], with fluorides, chlorides and bromides of metals⁷ and with halogens [34]. It also includes covalent laminar compounds

⁶Marmer E.N. Carbon-graphite materials: reference manual. Moscow: Metallurgy, 1973. 135 p. / Мармер Э.Н. Углеграфитовые материалы: справочник. М.: Metallurgy, 1973. 135 с.

⁷Novikov Yu.N. Synthesis and study of layered compounds of graphite with transition metals and their salts: author's abstract of Cand. Sci. (Chem.) Dissertation. Moscow, 1971. 19 p. /Новиков Ю.Н. Синтез и исследование слоистых соединений графита с переходными металлами и их солями: автореф. дис. ... канд. хим. наук. М., 1971. 19 с.

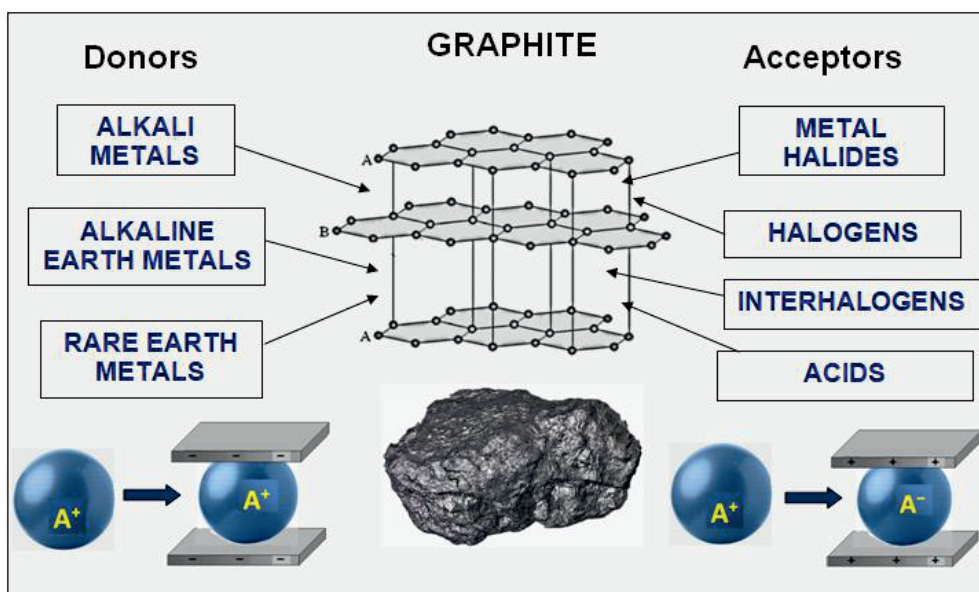


Fig. 2. Graphite intercalation reactions⁸

Рис. 2. Реакции интеркалирования графита⁸

with oxygen and fluorine, in which as opposed to all other GIC the bonds of intercalant with polyarene fragments are covalent [35].

2. *Donor GIC*, where the intercalant acts as donor of electrons, and graphite layers are macro-anions C_n^- . This group includes GIC with alkaline and alkali-earth metals [36].

The GIC composition is usually given by formulas of C_nM type, where n – number of carbon atoms per molecule M of intercalant. The GIC structure is characterized by number of carbon layers that are between the layers of penetrated intercalant [33, 37].

Besides the gas corrosion and destruction under the GIS influence, the carbon-graphite electrodes in electrolytic processes are exposed to physical, chemical and electro-chemical wear, which rate is also determined by perfection degree of carbon crystalline structure. It will be more convenient for us to discuss this type of corrosion wear when considering specific conditions of electrode application.

ELECTRODES FOR ELECTRIC ARC STEEL-MAKING FURNACES

Steel-making processes mostly use graphitized electrodes that possess higher physical-chemical and electrical properties

than carbon electrodes. To produce such electrodes, needle petroleum coke is mostly used as well as returns of this production process. Coal tar pitch for electrodes is used as binding agent. Graphitized electrodes are characterized by low specific electrical resistance of 8–13 $\mu\Omega$ m and by porosity of about 20%, by high thermal resistance and strength of 20–40 MPa; they contain little ash. The admissible current density in these electrodes makes 28, 16 and 14 A/cm² with diameters of 150, 400 and 550 mm respectively. In special graphitized electrodes it achieves 50 A/cm².

Main criteria for the evaluation of electrode operation is its specific consumption. With a gradual progressive movement in the temperature zone of 600–800°C the side surface of electrodes is exposed to oxidative attack of gas environment. Losses from side oxidation make 40–60% from total amount of losses [38–40]. Thus, the diameter of electrode reduces, i.e. in working zone the current density increases.

Ways to reduce the consumption of electrodes. In the cost price of the output the share of electrodes makes 8–12% [40], which stimulates the investigations on their

⁸Ionov S.G. Electron transport and physicochemical properties of intercalated compounds of graphite and carbon materials based on them. Moscow, 2016. /Ионов С.Г. Электронный транспорт и физико-химические свойства интеркалированных соединений графита и углеродных материалов на их основе: автореф. дис. ... д-ра ф.-м. наук: 01.04.2016. М., 2016.

consumption reduction. One of this work directions consists in applying the corrosion and erosion resistant coating on the side surface of electrode for its protection against the oxidation. If use coated electrodes with diameter of 610mm in electric arc furnaces with capacity of 140–180 tons and current intensity of 35–68 kA, savings shall make 16–23%, for electrodes with diameter of 508mm savings shall make 27% (in comparison with non-coated electrodes) [41]. In the work of reference, the specimens of laboratory graphite were investigated with protective coating and without it. Initial graphitized specimens were produced based on needle and ordinary petroleum cokes, which oxidizability made 51.4% and 54.6% respectively. When coatings based on Al_2O_3 , SiO_2 , SiC and silicomanganese (MnC-17) in form of 50% liquid glass suspension were applied, the oxidizability reduced at 850°C on 18.7 (Al_2O_3) – 63.8% (SiC) in comparison with specimens without coating.

Similar coatings were used for graphite in works of other researchers. In many patents protective coatings are proposed to be formed from refractory oxides and carbides of aluminium, boron, titanium, zirconium [42, 43], tantalum, chromium and silicon [44–46] using slip painting or pulverization, after preliminary vacuum degassing or under pressure with subsequent drying and reactive sintering [47, 48]. In all cases the efficiency of the methods was registered during the operation of electrodes.

In order to optimize protective compositions known coating methods were analyzed. Paper [49] noted that aluminium-based coatings reduce the specific consumption of electrodes on 10–12%, and those based on ferrosilicon of FS45 grade – on 20% in comparison with electrodes without coating. The research paper [50] proposes two-layer coating, which first layer consists of aluminium or its alloy, the second one – of copper. Coated electrode is treated with electric arc or plasma burner. According to the electrode protection method [51], tested in semi-industrial conditions in

order to reduce the oxidizability, the composite coating, based on silicon and tungsten shall be applied onto graphite by electrical precipitation; in order to reduce the electric resistance the protective coating based on electrolytic copper shall be applied. To protect graphite electrodes against oxidation LLC «BBCT» proposes two-layer coating based on iron aluminide with total thickness of 0.1–2.0 mm [52, 53]. The first layer is applied by method of arc metal coating, using solid wire made of aluminium or its alloy, containing 5–10% of silicon. The second layer is done using flux-cored wire consisted of steel shell and core made of the charge, containing (% wt.): aluminium (15.0–20.0), chromium (2.0–6.0), yttrium (0.5–3.0), iron – matrix. Inventions allow to increase the resistance of graphitized electrodes operating in conditions of high-temperature corrosion, and to reduce their oxidation and consumption.

In papers [54, 55] the $\text{ZrB}_2\text{-SiC-TaSi}_2\text{-Si}$ coating was synthesized on the support of siliconized graphite using the combined process of applying the suspension with the brush and infiltration of silicon vapors. It was found out that oxidation kinetics at 1500°C in static air atmosphere complies with parabolic law having a relatively low constant of oxidation rate down to 0.27 $\text{mg}/(\text{cm}^2\cdot\text{h}^{0.5})$. Determining factor was a high strength of transition SiC layer adhesion to the graphite support and external $\text{ZrB}_2\text{-SiC-TaSi}_2\text{-Si}$ layer.

According to other common method for the protection of carbon and graphite electrodes against oxidation, electrodes are treated with water solution of sodium polyphosphate with concentration of 18–20% wt. and maleinic acid with concentration of 0.05–0.1% wt. at the temperature of 90–100°C⁹. According to the description [56] the method supposes to increase the oxidation resistance of graphitized electrodes by treating the surface of electrodes with penetrating salt solution, based on phosphoric acid: water – 20–25% wt.; H_3PO_4 – 30–35% wt.; $\text{MnHPO}_4 \cdot 1.6 \text{H}_2\text{O}$ – 0–15% wt.; $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$ – 2–15% wt.; B_2O_3 – 0.5–2.0% wt.; $\text{Zn}_3(\text{PO})_2$ – 1–7% wt.

⁹Kuzmenkov M.I., Shishko N.Ya., Surovtseva I.B., Kabanenko S.N. A method to protect carbon and graphite electrodes from oxidation. A. s. USSR, no. 1699909; 1991. Bulletin no. 47. /А. с. № 1699909, СССР, СО1 В 31/02. Способ защиты угольных и графитовых электродов от окисления / М.И. Кузьменков, Н.Я. Шишко, И.Б. Суровцева, С.Н. Кабаненко; Белорусский технологический институт им. С.М. Кирова. № 4766489/26. Заявл. 09.11.1989; опубл. 23.12.91. Бюл. № 47.

and mono-, di- or triple-base phosphate of alkaline metal (10–20%wt.) According to joint patent of Belorussian metallurgical plant and Novochoerkassk electrode plant the optimal results were obtained when applying protective coating by spraying water solution of nitride-boron-phosphate composition (ammonium salt of phosphoric acid and boron acid: $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ – 5–15% wt., H_3BO_3 – 3–10% wt., water – the rest) on graphite [57]. The destructibility of treated specimens in CO_2 atmosphere at 1000°C for one hour made 11–13%, while check test pieces shown mass losses of 25–27%. In patent of JSC «Energoprom-NEZ» dated 2013 [58] the impregnation of heated graphitized products with solution that protects against the oxidation, is done gradually with preliminary vacuum degassing and subsequent supply of solution under pressure of compressed gas.

ELECTRODES OF MAGNESIUM CELLS

Main process units in the production of crude magnesium are diaphragm-less electrolytic cells with top and bottom input of graphite anodes [59]. Graphite materials suffer destructive changes in electrolytic bath and in gas phase of chlorine-containing media within various temperature zones, which limits the service life of the whole unit. The time between repairs of electrolytic cells with top and bottom input of graphite anodes makes 39–40 and 45–48 months respectively.

Protection of magnesium cell anodes against the oxidation

Work has been undertaken and is continuing to reduce the effects of the gas oxidizing environment on graphite anodes. During the period of 1969–1980 these efforts purposed the limitation of air access to anodes

and the improvement of working zone ecology. Magnesium cells with top input of anodes were proposed to be protected by pouring the anode block with heat-resistant low-porous concrete around the entire perimeter¹⁰; by sealing the contact of concrete floor with anodes with corundum-containing material [60] or its mixture with structure-sealing powder material at the ratio of 3:1¹¹. During the period of cell start-up and achievement of the temperature of 480°C this material melts and seals hermetically the space between the anode and the floor.

The other direction in the protection of anodes against the oxidation consists in the impregnation of their surface with protective inhibitor solutions. Solutions, based on phosphoric acid with boron containing additives are most often used [56–58]. In papers [61–69] the possibility to use water solution of the mixture of zinc ($\text{Zn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) and aluminium ($\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) dihydrophosphates in orthophosphoric acid was studied. The oxidation resistance of impregnated and non-impregnated graphite specimens was evaluated in laboratory conditions according to the results of holding process at the temperature of 700°C in dynamic air current for 200 min. It was defined that the oxidation rate of non-impregnated and impregnated graphite specimens made 27.2 and 5.52 g/cm²·h.

Oxidation and wear within the electrolytic bath. Along with the oxidation of anodes over the electrolytic bath surface their oxidation and wear takes place within the bath volume by virtue of oxygen precipitation on the anode. Patent of Novochoerkassk electrode plant dated 1973 presents¹² the method for treatment of graphite anodes with oxyethylated amide of

¹⁰Burdakov Yu.M., Kolomiitsev A.V., Tretyak S.D., Chalabaev I.A. Method to protect anodes of a magnesium electrolyzer with top anode input. A. s. USSR, no. 259397; 1969. /A. c. № 259397, СССР, С 25С 3/04. Способ защиты анодов магниевого электролизера с верхним вводом анодов / Ю.М. Бурдаков, А.В. Коломийцев, С.Д. Третьяк, И.А. Чалабаев; № 1233784/22-1. Заявл. 15.04.1968; опубли. 12.12.1969.

¹¹Verbitsky V.G., Kolesnik M.I., Rudakov V.A., Vasil'ev A.V., Oshlapov A.N., Petrov V.I. Compacting method for a graphitized anode impregnated with orthophosphoric acid in the ceiling of a magnesium electrolyzer. A. s. USSR, no. 767236; 1980. /A. c. № 767236, СССР, С 25С 3/04. Способ уплотнения пропитанного ортофосфорной кислотой графитированного анода в перекрытии магниевого электролизера / В.Г. Вербицкий, М.И. Колесник, В.А. Рудаков, А.В. Васильев, А.Н. Ошлапов, В.И. Петров. № 2665731. Заявл. 31.07.1978; опубли. 30.09.1980.

¹²Fokin V.P., Kralin L.A., Zarechenskij E.T., Hentov V.Ya., Semin E.G., Petrova N.I. Graphite anode processing method. A. s. USSR, no. 384542; 1973. Bulletin no. 25. /A. c. № 384542 СССР. В01к 3/08. Способ обработки графитовых анодов / В.П. Фокин, Л.А. Кралин, Е.Т. Зареченский, В.Я. Хентов, Е.Г. Семин, Н.И. Петрова; Новочеркасский электродный завод. № 1496168/23-26. Заявл. 01.12.1970; опубли. 29.05.1973. Бюл. № 25.

synthetic fatty acid followed by impregnation with emulsion of lenseed oil. The total wear of anodes reduces from 74.3 to 62 mg/a.h.

In the description of the method, developed by author's collective from JSC "AVISMA titanium-magnesium complex" in 1999, it is proposed to treat electrodes in two stages successively: first, the impregnation in the melt of metaphosphates with subsequent drying in drying chamber at 300°C, and then the treatment in the electrolytic bath of magnesium cells at the current density of 0.20–0.45 A/cm² and melt temperature of 670–700°C, applying the anode potential [63]. After such treatment the rate of oxidation-wear of the bottom anodes reduces from 1.5 to 1.14–1.20 mm per month, their serviceability being increased from 24 to 37 months respectively.

The interesting method for the reduction of bipolar graphite anode wear rate is presented in patent [64]. Authors propose to protect bipolar electrodes of magnesium cell by using cataphoretic precipitation of magnesium oxide film onto the cathode surface in the electrolytic bath with temperature of 500–630°C and magnesium oxide and magnesium chloride content of 0.21–5% wt. and 25.1–70% wt. respectively.

Authors [65] confirm the problem of anode wear in the electrolytic bath, which causes the increase in voltage, energy consumption and process temperature, resulting in metal losses, i.e. decline in production and finally shutdown of the cell. Due to this, the wear of graphite anodes was studied by method of confocal profilometry of the surface in laboratory magnesium cell with vertical electrodes. Specimens of 4 types of graphite anodes were exposed to the electrolytic process for 24 hours at the temperature of 690–710°C and current density of 1 A/cm² in the melts having high content of oxides (MgO and MgOHCl). The influence of following parameters: oxide concentration, type of oxide

and type of graphite on the anode wear was studied. It was supposed that the wear of anodes in electrolytic bath, based on MgCl₂ occurs according to the following mechanism:



In addition, it was admitted that at the same time the physical erosion of anode surface takes place due to the circulation of electrolyte, which composition comprises suspended particles of oxides. At the initial level of oxides in the melt, making 1400 and 9000 ppm, the wear losses for 24 hours made 17 and 47 mcm respectively. The study of the influence of oxide type shown that the wear of graphite anodes is two times lower when the melt contains MgO than when it contains MgOHCl (Table 1).

From data obtained it follows that the grain size of graphite, the density and strength of products have a decisive influence on the wear resistance of anodes in chloride melts.

Intercalation of the anodes of magnesium cells. Results of the study on the behavior of carbon anodes in the melts of chlorides, containing 61 mol. % AlCl₃ and 39 mol. % NaCl, show that carbon anodes decompose easily at 200°C by intercalation compounds that are formed at the considerable volume expansion of carbon material [66]. The temperature increase, exceeding 600°C makes GIC less stable and, consequently, slows down the decay of material. In chloride melts without AlCl₃ the rate of electrode wear with chlorine emission is significantly lower. In these technical conditions anodes rather destroy under the oxygen effect than as a result of anode chlorine corrosion. This may serve as an explanation of observed carbon anode stability in magnesium cells.

Paper [67] studied the erosion-corrosion decomposition of some technical carbons, including glass carbons, under chlorine effect

Graphite anode wear after 24-hour electrolysis [65]
Износ графитовых анодов за 24 ч электролиза [65]

Grade of SGL graphite	Grain size, μm	Apparent density, g/cm ³	Flexural strength, MPa	Open porosity, %	Ash content, ppm	Wear μm
R8710	3	1.9	85	10	200	7
EK20	30	1.7	55	11	75	10
R4180	40	1.7	25	16	2000	30
SGL standard	220	1.69	29	25	290	24

at the temperature range from 600 to 800 °C. It is found out that chloride corrosion is a very slow process: the loss of carbon mass in chlorine atmosphere has a rate of about 0,5 mm/year at the temperature of 800 °C. It is noted that the combustion in oxygen atmosphere takes place by five orders of magnitude faster than the chloride impact on carbon.

Article [68] describes the study of anode chlorine corrosion of the technical carbon under two different conditions:

1. Medium-temperature (from 200 to 300 °C) carbon corrosion of anode in mixed chloride-alkali melts (LiCl/NaCl, LiCl/KCl), to which aluminium chloride is added at the ratio of $AlCl_3/MeCl > 1$. Authors came to the conclusion that in these conditions intercalation compounds $C_{10}(AlCl_3)_xCl_{0.136}$ are formed at the anode polarization of graphite specimens. The destruction of graphite anode occurs, the degree of carbon conversion into intercalation carbon is close to 40%.

2. High-temperature (from 600 to 800 °C) chloride corrosion of anode in main smelts of alkali metal chlorides ($MeCl_2$) with addition of 10 mol. % aluminium chloride and without it. Main task is to study high-temperature stability of chlorine-emitting anodes. It was found out that with increase of temperature within the range of 600–800 °C Acheson graphites become more stable; considerable wear was not observed in chloride melts, including in the presence of $AlCl_3$. However, at the current densities exceeding 0,2 A/cm² the consumption rate of carbon anodes increases in the presence of tetra-chloro-aluminate anions, i.e. in main mixed melts of alkaline chlorides and aluminium chloride. At the technical current density of 0,4 A/cm² and at the temperature of 700 °C the corrosion rate is estimated to be equal to several centimeters per year, which makes carbon anodes unstable in size.

Paper [69] used methods of cyclic voltammetry (CV) and electronic microscopy, for the investigation of the impact of NaCl-KCl-MgCl₂ electrolyte at 700 °C and that of chlorine intercalation on anode specimens made of three different types of graphite – needle coke (NC), fine petroleum coke (FPC) and common petroleum coke (CPC) respectively. It was found out that the specimens of graphite

anodes from NC have the best resistance to chlorine intercalation and to electrolyte impact. Specimens of common CPC were subject to the highest chlorine intercalation and electrolyte impact. To the authors mind, this is related to the presence of impurities in that coke, which could act as catalysts of chlorine intercalation and electrolytic corrosion.

In other words, the presence of impurities in graphite anode (for example, Fe, Al and others), or the penetration of these impurities into the anode during the operation can initiate their chlorination to metal chlorides ($FeCl_3$, $AlCl_3$) with subsequent destructive processes for anode in low-temperature zone.

ELECTRODES OF ALUMINIUM CELLS

Wear of cathode blocks (bottom). The main cause of premature failure of up-to-date cells is wear of graphite cathodes [70–72]. Observations over electrochemical and physical wear of the bottom can be systematized as follows:

- The wear rate increases with increase of current density and smelt circulation speed, with decrease of metal level and cryolite ratio;
- Local wear increases with increase of block graphitization level.

According to data of [73, 74] the wear rate of cathode blocks in industrial cells makes:

- 0.5–1.5 cm/year – for anthracite blocks,
- 1.5–2.5 cm/year – for graphite and graphitized blocks.

According to results of other investigations, presented in patent [75], following wear rates for different materials were registered:

- 1.0–2.0 cm/year – for semi-graphitized material,
- 2.0–4.0 cm/year – for graphitized material,
- 4.0–8.0 cm/year – for graphite material.

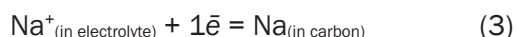
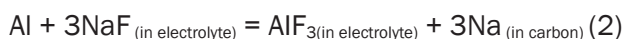
This means that the intensification of electrolytic reduction process, the increase of cell capacity and the change-over to graphite cathode blocks require new approaches to material composition of electrodes.

Intercalation of aluminium cell cathodes.

The fundamental work of Michael B. Rapoport underlines that after sodium penetration the distance between layers increases from 3.35 Å to 4.6 Å, after potassium penetration it increases to 5.4 Å, after that of cesium – to 5.95 Å [76]. This phenomenon is behind the

swelling of carbon substance and in some cases its complete destruction. It is deemed that in descending order of resistance to sodium influence carbon materials are arranged in following sequence: graphite, anthracite, foundry coke, pitch coke, petroleum coke.

The penetration process takes place within a certain range of temperatures, that likely depends on reagent vapor pressure. It is generally accepted that the following reaction is the main source of sodium [77]:



From these equations and polarization conditions it is evident that the activity of sodium and its transfer within the volume of carbon products is intensified with increase of cryolite ratio, current density and temperature; being accumulated on the borders of temperature isotherms. Under appropriate temperature and concentration conditions the interaction occurs between carbon and intercalate to form compounds between them ($C_n^-K^+ \cdot 2K$, $C_n^-Na^+ \cdot 2Na$), with subsequent volume expansion of carbon material and potentially complete or local destruction of electrodes. When conditions change (slight increase of the temperature, changes in gas environment, humidity and others) the reaction reversibility can occur, producing carbon substance in form of graphite. This process is called low-temperature or "abnormal" graphitization of amorphous carbon. It is found out that at the cryolite ratio of 2.3–2.7 and industrial current densities the expansion of blocks from amorphous carbon makes 4.0–4.5% [78].

Investigations of M.B. Rapoport, carried out in 50-60-s intensified investigations related to the electrolytic reduction of molten salts and to the interaction of electrolyte components with carbon-graphite materials. These investigations were evidenced in extensive reviews and books of foreign and Russian scientists [59, 79, 80]. All of them come to that in practice various types of carbons have completely different structures possessing different susceptibility to the interlayer penetration of sodium [81, 82]. Deviations in moving force to interactions between intercalate and carbon are explained

by changes in Fermi characteristic energy level that has an influence on π – carbon bonds. The low Fermi characteristic energy level was observed for low-ordered carbons, which is favorable for the transfer of electrons, for example, from sodium to carbon. Graphites with high Fermi characteristic energy level show the tendency towards the bonding with acceptors of electrons, and therefore they are less reactively active with regard to alkaline metals. However, they are susceptible to the penetration of aluminium chlorides AlCl_3 and iron chlorides FeCl_3 , for example.

It is evident that any method, used for the reduction of intercalate penetration rate and also for the increase of electrode material strength, shall be of importance to increase the service life of metallurgical units.

Protection of aluminium cell electrodes against oxidation and wear

Protection of carbon anodes. Carbon anode of aluminium cell is formed from anode paste, consisted of petroleum coke and binding material (coal tar pitch).

The protection of carbon anode surface is mostly associated with additives and impregnating solutions, based on boron-containing compounds. Paper dated 1968 [83] defined optimum concentrations of boron oxide in anode based on changes in oxidizability and friability characteristics, anode consumption and back electro-motive force during the electrolytic reduction process. While studying oxidizability and friability characteristics under CO_2 at the temperature of 950°C it was found out that the most profitable B_2O_3 concentration is 1% (per mass of binding agent), as it is possible to expect a decrease in oxidizability by about 2 times two-times (from 0.22 to 0.1 $\text{g}/\text{cm}^2\cdot\text{h}$) and in friability by more than 10 times (from 0.19 to 0.01 $\text{g}/\text{cm}^2\cdot\text{h}$). It is noted that the inevitable consequence of reactive anode capability decrease is the increase of anodic overvoltage, which takes the form of back electro-motive force increase from 1.6 V for anode without additives to 1.7 V for anode with 1% wt. B_2O_3 additive.

In 1972 the batch of anode paste with additive of 0.6% H_3BO_3 (1% to pitch) was produced at Novocherkassk electrode plant [84]. The pilot paste in amount of 300 tons was tested in three Soderberg cells of VgAZ (Volgograd Aluminium Smelter) during the

period of five months. The application of pilot paste did not affect any parameters of anodes, but resulted in their consumption reduction on approx. 8% (40 kg/t), and the rate of pilot anode combustion reduced on 6% in comparison with ordinary paste. Measurements of voltage drop in anodes demonstrate that ΔU_a of anodes from pilot cells is on approx. 40 mV lower than on the cells with standard anodes.

In patents of 2000 and 2010 [85, 86] boron oxide B_2O_3 and orthoboric acid H_3BO_3 were also chosen as basic material for the protective coating of anode surface. The mixture of boron-containing compounds was applied onto the surface in form of slurry – concentrated suspension or paste that solidified at the temperatures exceeding 300°C. The protective properties were tested under CO_2 and good protective properties of the composition were discovered in the $CO_2 + AlF_3$ mixture.

Paper [87] gives results of studies on the impregnation of specimens of finished prebake anodes, promising for aluminium cells, with organic compounds. 5, 10 and 20% solutions of bitumen in hexane and compositions of «Silor-Ultra» grade were used as organic liquids. The process of anode impregnation was carried out after preliminary vacuum degassing of the reservoir. It follows from the results of the corrosion resistance tests of laboratory specimens in cryolite-alumina melts under electrolytic that the most stable specimens were specimens with specific consumption of 0.217–0.278 g/(Ah), impregnated with «Silor-Ultra» composition. Specimens, impregnated with 5% solutions of bitumen in hexane demonstrated the highest consumption of anode material.

Patent of 2010 [88] presents an original method of the impregnation of carbon-graphite anode with molten electrolyte. To do this, during the electrolytic reduction process, the polarity of the anode is changed for 10–15 min during the day, then the anode and cathode are polarized with working current under normal conditions. Preliminary experiments in the laboratory environment shown that the impregnation with melts achieves the depth of 30–40 mm over the period of 10 min. Such depth of impregnation is less than the burnout thickness of carbon anode bottom part (20–25 mm) per day of

cell work. This method provides the increase of the cell service life and the improvement of technological process.

Protection of carbon cathodes. As it was discussed earlier, the graphite block is proof against the action of alkali metals, but these stable forms of carbon are expensive and subjected to significant wear. From the other side less expensive amorphous blocks are excessively subjected to the attack of sodium but not lithium. Therefore, researchers had an idea of preliminary carbon material saturation with lithium or its compounds. To increase the resistance of the cell to the aggressive environment impact they propose the treatment of cathode carbon products at the temperature of 950°C with lithium vapors [89], with lithium fluoride [90] or other lithium-containing compounds (for example, with water solution of lithium acetate) [91]. In all cases the mitigation of sodium impact on cathode materials was observed during their subsequent tests in sodium-containing melts.

Due to high level of wear the authors of patent dated 2005 [75] proposed the impregnated graphite cathode for aluminium reduction process and the method of its fabrication. The method comprises the block graphitization at the temperatures exceeding 2400°C, its impregnation by immersing in a vacuum into coal tar or petroleum pitches and subsequent thermal treatment at the temperature less than 1600°C. Measurements of apparent density and flexural strength shown their increase on 9.5% and 63.5% respectively in comparison with non-impregnated blocks. Technical result was an increase of service life of graphite cathode.

Another popular direction in carbon cathode protection is an application of refractory metal compounds, wetted with aluminium (for example, with titanium carbide or diboride – TiC or TiB_2). In some cases these refractory metal compounds are applied by any method onto the cathode surface before the cell startup [92–94], in other cases they are electrically precipitated during the electrolytic reduction process [95]. The detailed study and discussion of these directions, carried out from 1930-s to 2022, are given in monography [96] and review [97].

In most cases researchers confirm the effectiveness of cathode protection with

refractory compounds in laboratory conditions or at pilot tests on industrial sites. However, no one of world corporative scientific research centers solved these problems completely and finally. Available alternatives were not accorded wide recognition or they are not used in metallurgical branch. The answer on the question «Why?» is clear: these proposed solutions are efficient in laboratory or short pilot tests. These solutions cover the surface of the products and fulfil their functions during a short period of time but not during the whole service life of a metallurgical unit. Surface and near-surface protective impregnation is taken away with gases and it crumbles; and coatings peel off as a result of cyclic thermal expansion and shrinkage processes. In addition, the scaling in industrial conditions of production and operation demonstrates the complexity of their implementation or lack of profitability due to the high cost of protective components.

In other words, as it is clear from previous review, carbon products as electrodes for metallurgical units require extensive and long-term protection. Due to this and based on the analyses of the results of previous investigations and practical works the synthesis of composite carbon-based materials shall be considered as promising direction for the creation of electrodes, corrosion-resistant in aggressive environment. The solution of these tasks, separately or in the whole, shall allow starting the design and construction of metallurgical units of new generation.

COMPOSITE ELECTRODES

In scientific center of «Problems of mineral and anthropogenic resources processing», Saint-Petersburg Mining University, the possibility in principle to synthesize composite materials of carbon – carbide /titanium diboride (C – TiC/TiB₂), based on petroleum coke and graphite, was explored. The synthesis technology was adapted to existing conditions of carbon-graphite goods production at electrode plants. Following initial titanium- and boron-containing components were used for the development of the electrodes:

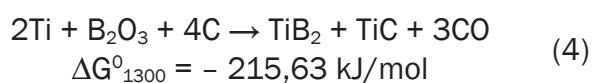
- Based on petroleum coke – titanium metal Ti and boron oxide B₂O₃.

- Based on natural graphite – solutions of titanium sulphate Ti₂(SO₄)₃ and boron acid H₃BO₃.

Synthesized components were studied in terms of their behavior in oxidizing environment.

Composite electrodes, based on petroleum coke. To develop C_{petroleum.coke} – TiC/TiB₂ electrodes in laboratory conditions, the standard procedure of mixing initial materials, their pressing and baking was used. Calcined petroleum coke with particle size of not more than 2 mm, titanium metal powder, boron oxide and coal tar pitch (13–15% wt.) were mixed in the mixer at the temperature of 135±5 °C for 15–20 min. After molding on the static press at the pressure of 15–20 MPa “green” specimens were subjected to the baking in muffle furnace at the temperature of 1050±10 °C under the layer of petroleum coke within the space of 3 hours. In such way the conditions for baking carbon-graphite products in industrial furnaces were to some extent simulated; and the partial oxidation of synthesized TiC/TiB₂ compounds within the carbon body was admitted.

Fig. 3 presents results of X-ray phase analysis of C_{petroleum.coke} – TiC/TiB₂ composite, synthesized at 1050 °C with initial composition¹³ of C+26(Ti+B₂O₃). As expected, the main phase with maximum intensity represents carbon. Target phases with less intensity are represented by titanium and boron compounds, synthesized by titanium borides and carbides TiB₂, TiB, TiC_x according to overall reaction (4):



The detected titanium borate TiBO₃ and titanium oxide TiO₂ are products of partial oxidation of titanium borides during the process of electrodes synthesis.

The definition of relative electrodes stability in air atmosphere was carried out in muffle furnace with possibility of automatic heating with the rate of 300 °/h and holding time of 5 hours at 520, 710, 820, 920 and 1050 °C. The duration of cyclic tests was up to 30 hours (heating – holding during 5 hours – cooling).

¹³Here and further compositions of initial composite charge are given in mass percentage.

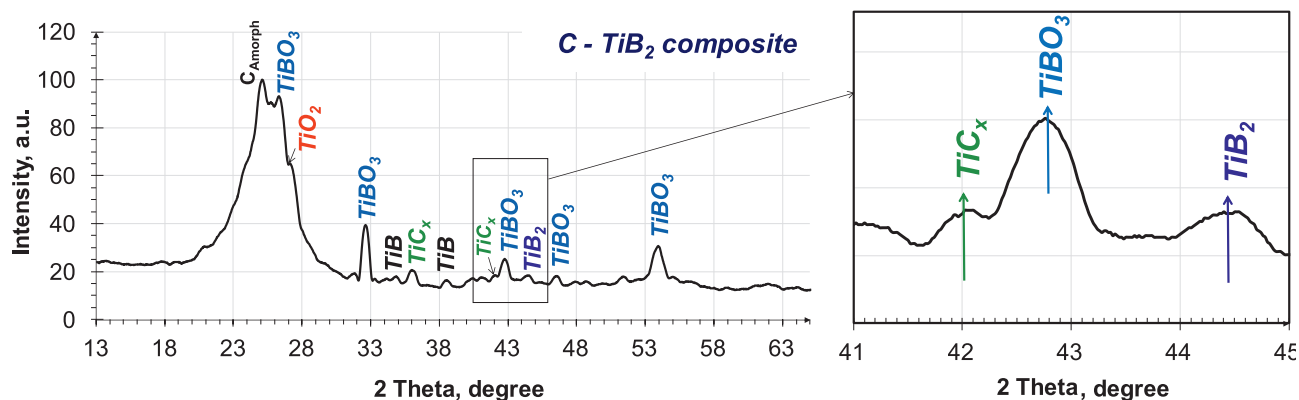


Fig. 3. Results of X-ray phase analysis of the composite after the synthesis with initial composition of C+26%(Ti+B₂O₃)

Рис. 3. Результаты РФА композита после синтеза с исходным составом C+26%(Ti+B₂O₃)

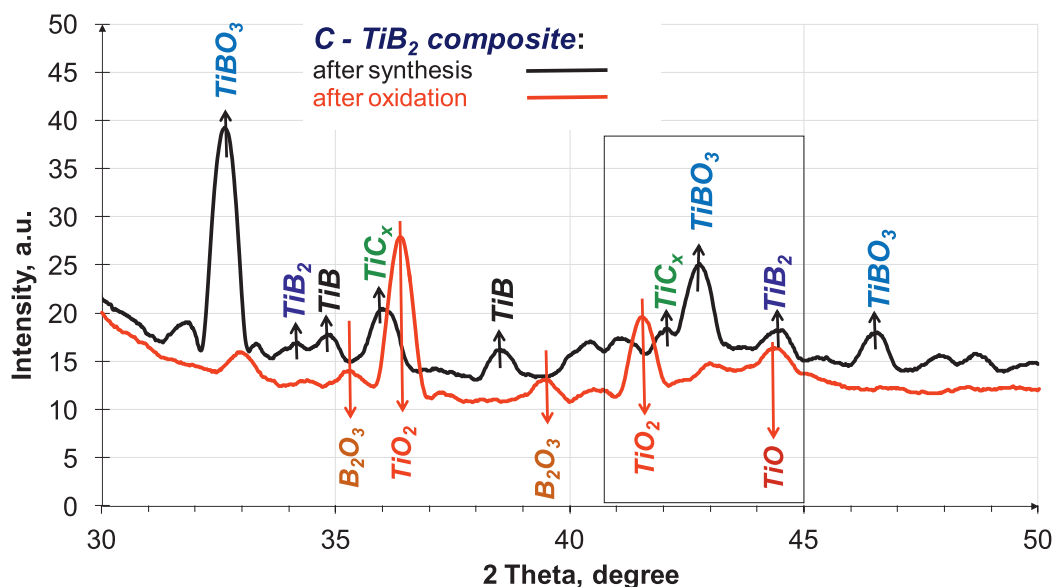


Fig. 4. X-ray phase analysis results of C + 26(Ti+B₂O₃) composite after synthesis and consequent 30-hour oxidation at 710°C in air atmosphere

Рис. 4. Результаты РФА композита C + 26(Ti+B₂O₃) после синтеза и окисления в течение 30 ч при 710°C в атмосфере воздуха

During this period of oxidation carbide and boride phases of titanium are transformed on the surface into its oxides TiO and TiO₂ forming glass phase B₂O₃ (Fig. 4 and 5). It means, liquid boron oxide forms a continuous layer, wetting a composite base of material, partially oxidized, and an initial carbo-boride structure of polycrystalline product.

Till 1000°C the oxidation rate of composite specimens keeps the downward dynamics with passive character of oxidation, and it is described by equations of power dependence (Fig. 6). This could mean that the process depends not only on the stability of oxi-carbo-boride bond of the composite, but also on the supply (diffusion) of oxygen through the increasing layer of boron oxide glass phase on the surface of pore space

through the growing layer of titanium oxides. It means in this mode the losses of electrode mass depend on mixed mode of diffusion and interaction of oxygen with electrode base.

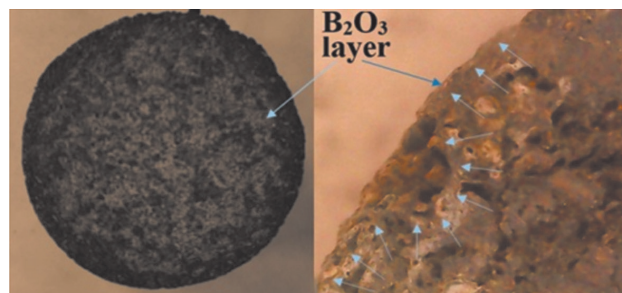


Fig. 5. B₂O₃ glass phase layer on the composite specimen surface after its oxidation at 710°C

Рис. 5. Слой стеклофазы B₂O₃ на поверхности композита после окисления при 710°C

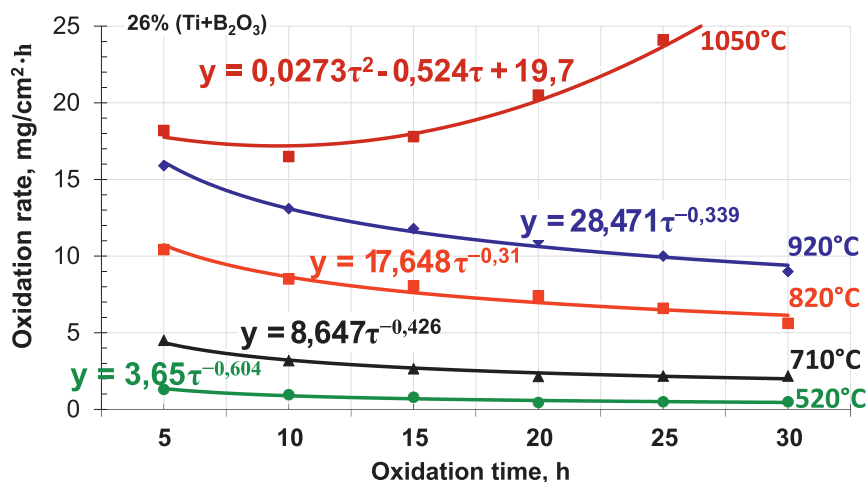


Fig. 6. Oxidation rate of composite electrodes with initial composition of C+26%(Ti+B₂O₃) in the temperature range from 520°C to 1050°C in air atmosphere

Рис. 6. Скорость окисления композитных электродов с исходным составом C+26%(Ti+B₂O₃) в температурном интервале 520–1050°C в атмосфере воздуха

If exceeding 1000°C, in our case at 1050°C, the initial oxidation rate reduction is changed to active oxidation character because of B₂O₃ evaporation. Under these conditions the oxidation rate increases with every subsequent cycle and it is described by polynomial equation (Fig. 6). This means that in steady-state mode the material oxidation depends on direct interaction of oxygen with carbon.

So, with simplicity of adapting the C_{petrocoke} – TiC/TiB₂ technology to industrial conditions of mixing, pressing, and baking at 1000–1100°C the enhanced resistance of electrodes to the oxidizability with atmospheric oxygen is achieved. The presence of refractory compounds in carbon composites supposes their less susceptibility to different types of wear and to the impact of alkali metals and acquisition of the property of wettability with liquid metals. These potential operating properties shall be defined during further investigations.

Composite electrodes, based on natural graphite¹⁴. The development of the material for specimens of C_{graph} – TiC/TiB₂ electrodes, based on natural graphite GL-2 was carried out by its preliminary oxidation and intercalation

with oleum in the presence of nitric acid or potassium permanganate according to well-known methods [102, 103]. Modification of graphite intercalation compounds was fulfilled by introducing titanium and boron ions, being part of the composition of titanium sulphate Ti₂(SO₄)₃ and boric acid H₃BO₃ solutions directly into the oxidizing composition.

After washing and drying oxidized and modified graphite was exposed to the thermal shock at the temperature of 850°C for 5–15 min. Parameters of graphite oxidation, modification and thermal treatment were selected in such a way to minimize the degree of thermal expansion in order to provide an workable specimen compacting. The shape and structure of thermally expanded graphite (TEG) particles changed from initial laminar to foam-dendritic thermally treated material (Fig. 7). At the same time the particle size distribution remained in the range of 50–250 μm, but the bulk density of material changed considerably from 0.45–0.47 to 0.040–0.042 g/cm³.

The specific electrical resistivity of the powders of initial (~66000 μΩ·m) and thermally expanded (~6700 μΩ·m) graphites differed by an order of magnitude¹⁵, but with the increase

¹⁴Perspectives of using natural graphite for the production of electrodes are opened due to the plans of LLC “Dalgraphite” (being part of LLC “Magnesite Group”) to produce annually 40.5 thousand tons of graphite concentrate. Available from: <https://dalgraphite.ru/> [Accessed 7th June 2024].

¹⁵The measurement of specific electrical resistivity of powders and compact carbon materials was carried out in accordance with GOST 23776-79 “Methods for the measurement of specific electrical resistivity”.

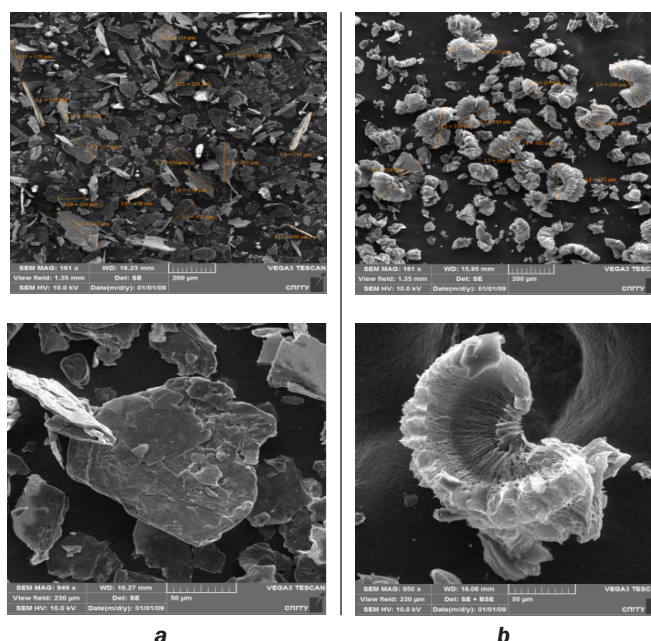


Fig. 7. Microstructure of initial (a) and thermally expanded (b) natural graphite
Рис. 7. Микроструктура природного графита исходного (a) и терморасширенного (b)

of powder compaction degree this difference reduced¹⁶.

However, at the compaction degree of 1.9 the difference in electrical resistivity of graphites remained significant – 7 times higher (Fig. 8). In that respect it should be assumed that this trend in the ratio of electrical resistivity for graphite compact specimens would be sustained, i.e. the electrical conductivity of graphite products made of TEG powders, would increase.

To develop $C_{graph} - TiC/TiB_2$ electrodes the standard laboratory procedure of mixing initial materials, their pressing and baking was used, similar to the fabrication of $C_{petrocoke} - TiC/TiB_2$ electrodes. At the same time components of graphite oxidation-intercalation, concentration of modifying liquors ($Ti_2(SO_4)_3 + H_3BO_3$) and thermal shock parameters were varied for different specimens.

The definition of relative $C_{graph} - TiC/TiB_2$ electrodes stability in air atmosphere was

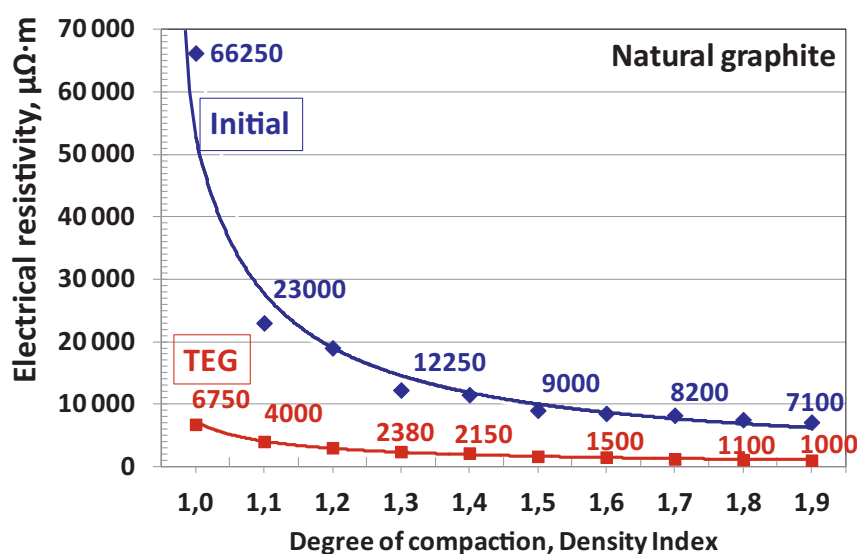


Fig. 8. Specific electrical resistivity of the initial and thermally expanded graphite
Рис. 8. Удельное электросопротивление исходного и терморасширенного графита

¹⁶Compaction degree is the ratio of current density of the powder to its initial bulk density.

carried out at 710°C in comparison with the definition of oxidizability of electrodes made of initial natural graphite. Electrode specimens of 1–4 differ from each other by conditions of their preliminary treatment for baking process – synthesis (Fig. 9). The duration of cyclic tests was up to 30 hours (heating – holding during 5 hours – cooling).

Obtained results give evidence of high potential development of composite $C_{graph} - TiC/TiB_2$ electrodes for ore thermal furnaces, magnesium and aluminium cells that would

have a high stability in oxidizing environment. Preliminary intercalation of the structure and modification of natural graphite composition with subsequent destruction of the material at the thermal shock supposes the production of the goods with high electrical conductivity, resistance to wear and penetrated components (Na, K, $FeCl_3$, $AlCl_3$, Cl_2 , F...). Particular features of the $C_{graph} - TiC/TiB_2$ technology, besides the preliminary procedure of initial graphite structure destruction, are minimization of binding agent for the compaction, no need for

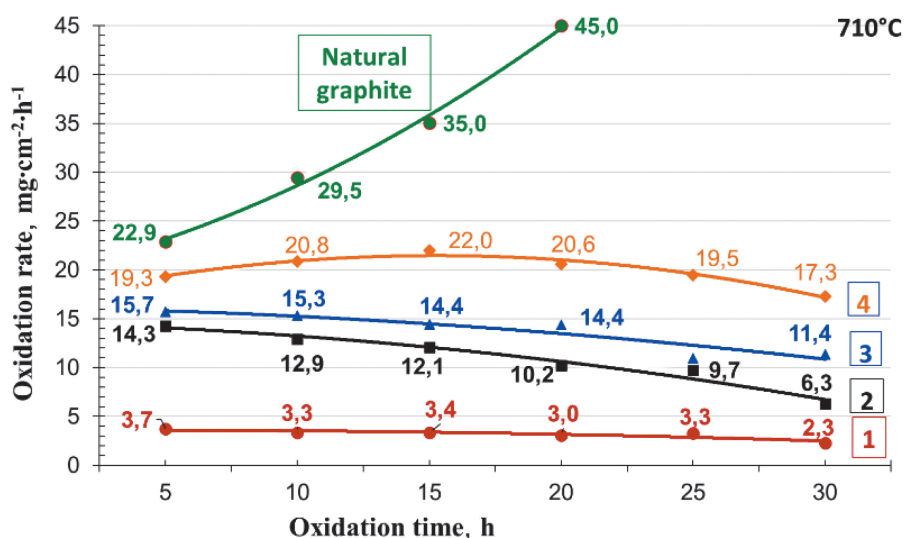


Fig. 9. Oxidation rate of $C_{graph} - TiC/TiB_2$ composite electrodes of various compositions 1–4 at the temperature of 710°C in air atmosphere

Рис. 9. Скорость окисления композитных электродов $C_{graph} - TiC/TiB_2$ различных составов 1–4 при температуре 710°C в атмосфере воздуха

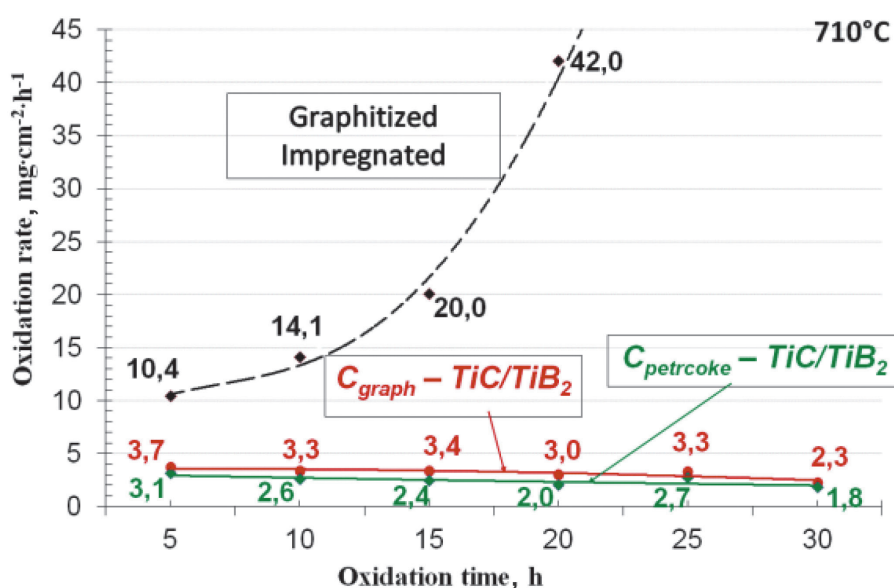


Fig. 10. Comparative oxidation rate of composite and graphitized electrodes at the temperature of 710°C in air atmosphere

Рис. 10. Сравнительная скорость окисления композитных и графитированных электродов при температуре 710°C в атмосфере воздуха

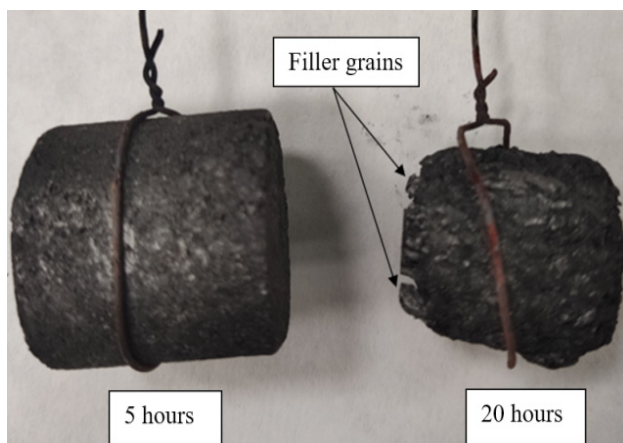


Fig. 11. Graphitized specimens impregnated with a protective composition after 20-hour oxidation at the temperature of 710°C in air atmosphere

Рис. 11. Внешний вид графитированных образцов, пропитанных защитным составом, после 20 ч окисления при температуре 710°C в атмосфере воздуха

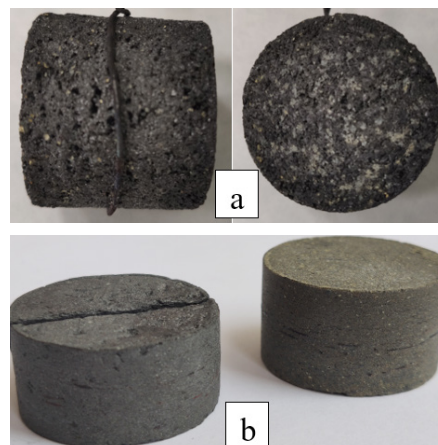


Fig. 12. $C_{\text{petrcoke}} - \text{TiC/TiB}_2$ (a) and $C_{\text{graph}} - \text{TiC/TiB}_2$ (b) composite specimens after 30-hour oxidation at the temperature of 710°C in air atmosphere

Рис. 12. Внешний вид композитных образцов $C_{\text{petrcoke}} - \text{TiC/TiB}_2$ (a) и $C_{\text{graph}} - \text{TiC/TiB}_2$ (b) после 30 ч окисления при температуре 710°C в атмосфере воздуха

needle coke application and its graphitization for the production of electrodes of specific quality.

Advantages of composite $C_{\text{petrcoke}} - \text{TiC/TiB}_2$ and $C_{\text{graph}} - \text{TiC/TiB}_2$ electrodes vs electrodes of natural graphite and graphitized electrodes impregnated with protective solutions are evident. And this is evident not only in graphs of the rate of mass loss (Fig. 9 and 10), but also in appearance (Fig. 11 and 12).

Results, obtained in laboratory conditions, are intermediate in current investigations and these investigations shall continue during the tests in conditions of electrolytic reduction of fluoride and chloride melts.

CONCLUSIONS

1. Based on literature review it is established that carbon-graphite products for ore thermal furnaces, magnesium and aluminium cells are subjected to the high-temperature oxidation, wear and influence of interlayer compounds.

2. Reactive capability of poly-crystalline carbon material in regards to gas oxidizing agents depends on structure perfection degree, size of crystallites and presence of impurities.

3. Losses of the electrodes due to the oxidation of their side surface in electrical arc furnaces, when they pass through the temperature zone of 600–800°C, achieve 40–60% from their total consumption.

4. Significant destructive effect is exerted on carbon-graphite electrodes by specific interaction of carbon with elements and compounds from working environment, which are capable to penetrate (intercalate) into the interlayer carbon structure. The destructive interaction with sodium and potassium occurs in carbon-graphite cathodes of aluminium cells at the temperatures lower than 850°C forming $C_n^- K^+ \cdot 2K$, $C_n^- Na^+ \cdot 2Na$. Under cyclic changes in temperature field the interaction carbon – Na/K results in abnormal (low-temperature) graphitization of cathode block material.

- Graphite anodes of magnesium cells are subjected to the destruction at the interaction with chlorides of copper, iron, manganese, aluminium and at the formation of interlayer compounds like $C_n^+ Cl^- \cdot 3AlCl_3$, $C_n^+ Cl^- \cdot FeCl_2 \cdot 3FeCl_3$ under temperatures of 200–300°C. Under temperatures, exceeding 600°C graphite anodes are stable.

5. The protection of electrodes for electric arc furnaces and anodes for magnesium and aluminium cells is carried out by thorough sealing, by applying to the side surface the solutions, inhibiting the oxidation, or coatings with physical and chemical nature of action:

- Water solutions of orthophosphoric and boron acids.
- Mixtures of zinc ($Zn(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O$) and aluminium ($Al(H_2PO_4)_3 \cdot 2H_2O$) phosphates in orthophosphoric acid.

- Ceramic coatings based on oxides Al_2O_3 , SiO_2 , B_2O_3 , TiO_2 , carbides SiC and B_4C , or on complex compounds like $\text{ZrB}_2\text{-SiC-TaSi}_2\text{-Si}$.

6. Proposed and available technical solutions for the protection of the surface of carbon products have not been widely recognized or are not in use in metallurgical branch. The probable cause consists in the

limited electrode protection period, complexity of their implementation or lack of profitability due to the high cost of protective components.

7. The promising direction to produce corrosion resistant materials is proposed – synthesis of composite C – TiC/TiB_2 electrodes, based on petroleum coke and graphite in standard conditions of industrial production.

References

1. Nasifullina A.I., Starkov M.K., Gabdulkhakov R.R., Rudko V.A. Petroleum coking additive – raw material component for metallurgical coke production. Part 2. Experimental studies of obtaining a petroleum coking additive. *CIS Iron and Steel Review*. 2022;2:9-16. <https://doi.org/10.17580/cisr.2022.02.02>.
2. Rudko V.A., Gabdulkhakov R.R., Pyagai I.N. Scientific and technical substantiation of the possibility for the organization of needle coke production in Russia. *Journal of Mining Institute*. 2023;263:795-809. (In Russ.). EDN: KYNHWL.
3. Sharikov Yu.V., Sharikov F.Yu., Krylov K.A. Mathematical model of optimum control for petroleum coke production in a rotary tube kiln. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2021;55(4):711-719. <https://doi.org/10.1134/S0040579521030192>.
4. Chukaeva M., Matveeva V., Sverchkov I. Complex processing of high-carbon ash and slag waste. *Journal of Mining Institute*. 2022;253:97-104. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.5>. EDN: LCQAXS.
5. Tsareva A.A., Litvinova T.E., Gapanyuk D.I., Rode L.S., Poltoratskaya M.E. Kinetic calculation of sorption of ethyl alcohol on carbon materials. *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2024;98:421-430. <https://doi.org/10.1134/S0036024424030312>.
6. Zubkova O., Pyagai I., Pankratieva K., Toropchina M. Development of composition and study of sorbent properties based on saponite. *Journal of Mining Institute*. 2023;259:21-29. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.1>. EDN: ICCFLN.
7. Bolobov V., Popov G. Methodology for testing pipeline steels for grooving corrosion resistance. *Journal of Mining Institute*. 2021;252:854-860. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.6.7>.
8. Bazhin V.Yu., Masko O.N., Nikitina L.N. Decarbonization of exhaust gases of industrial metallurgical furnaces // *Metallurgist*. 2024. Vol. 67. No. 9-10. P. 1407–1417. <https://doi.org/10.1007/s11015-024-01632-6>.
9. Piirainen V.Yu., Barinkova A.A. Development of composite materials based on red mud. *Obogashchenie rud*. 2023;3:35-41. <https://doi.org/10.17580/or.2023.03.06>. EDN: GFHYA.
10. Nemchinova N.V., Konovalov N.P., Konovalov P.N., Doshlov I.O. Reducing the environmental impact of aluminum production through the use of petroleum pitch. *iPolytech Journal*. 2023;27(4):800-808. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-800-808>. EDN: YRJB RD.
11. Fialkov A.S. *Carbon, interlayer compounds and composites based on it*. Moscow: Aspekt press; 1997. 717 p. (In Russ.).
12. Shulepov S.V. *Physics of carbon-graphite materials*. Moscow: Metallurgiya; 1972, 256 p. (In Russ.).
13. Hull A.W. A new method of x-ray crystal analysis. *Physical Review*. 1917;10(6):661-696. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.10.661>.
14. Bernal J.D. The structure of graphite. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*. 1924;106(740):749-773. <https://doi.org/10.1098/rspa.1924.0101>.
15. Baskin Y., Meyer L. Lattice constants of graphite at low temperatures. *Physical Review*. 1955;100(2):544-544. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.100.544>.
16. Bacon G.E. The interlayer spacing of graphite. *Acta Crystallographica*. 1951;4(6):558-561. <https://doi.org/10.1107/S0365110X51001781>.
17. Franklin R.E. The structure of graphitic carbons. *Acta Crystallographica*. 1951;4(3):253-261. <https://doi.org/10.1107/S0365110X51000842>.
18. Ruland W. X-ray studies on the structure of graphitic carbons. *Acta Crystallographica*. 1965;18(6):992-996. <https://doi.org/10.1107/S0365110X65002414>.
19. Redmount M.B., Heintz E.A. Manufacture of graphite electrodes. *Introduction to carbon technologies*. Alicante: University of Alicante; 1997, p. 519-536.
20. Ubbelohde A.R. Graphite and its crystal compounds, 1965, 256 p. (Russ. ed.: *Grafit i ego kristallicheskie soedineniya*. Moscow: Mir; 1965, 256 p.)
21. Ostrovskij V.S., Virgil'ev Yu.S., Kostikov V.I., Syskov K.I. *Artificial graphite*. Moscow: Metallurgiya; 1986, 272 p. (In Russ.).
22. Vyatkin S.E., Deev A.N., Nagorniy V.G., Ostrovskij V.S., Sigareev A.M., Sokker T.A. *Nuclear graphite*. Moscow: Atomizdat; 1967, 180 p. (In Russ.).
23. Tarabanov A.S., Kostikov V.I. *Siliconized graphite*. Moscow: Metallurgiya; 1977, 208 p. (In Russ.).

24. Terentieva V.S., Leipunsky I.O., Eremina A.I., Pshechenkov P.A., Astapov A.N. On the effect of architecture, components and chemical composition to structure and properties of carbon-bearing composites. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii*. 2011;17(1):30-52. (In Russ.). EDN: NYDRST.
25. Astapov A.N., Terentieva V.S. Review of home-grown technologies in the field of protection of carbon-bearing materials from gaseous corrosion and erosion in plasma's high-speed flow. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2014;(4):50-70. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2014-4-50-70>. EDN: TFSAL.
26. Theodosiou A., Jones A.N., Marsden B.J. Thermal oxidation of nuclear graphite: a large scale waste treatment option. *PLOS ONE*. 2017;12(8):e0182860. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182860>.
27. Paul R.M. Application of a three-dimensional random pore model for thermal oxidation of synthetic graphite. *Journal of Nuclear Materials*. 2021;543:152589. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2020.152589>.
28. Muzyka R., Kwoka M., Smędowski Ł., Díez N., Gryglewicz G. Oxidation of graphite by different modified Hummers methods: 1. *New Carbon Materials*. 2017;32(1):15-20. [https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(17\)60102-1](https://doi.org/10.1016/S1872-5805(17)60102-1).
29. Smith R.E., Kane J.J., Windes W.E. Determining the acute oxidation behavior of several nuclear graphite grades. *Journal of Nuclear Materials*. 2021;545:152648. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2020.152648>.
30. Setton R. The graphite intercalation compounds: their uses in industry and chemistry. *Synthetic Metals*. 1988;23(1-4):467-473. [https://doi.org/10.1016/0379-6779\(88\)90523-1](https://doi.org/10.1016/0379-6779(88)90523-1).
31. Boehm H.P., Setton R., Stumpp E. Nomenclature and terminology of graphite intercalation compounds (IUPAC Recommendations 1994). *Pure and Applied Chemistry*. 1994;66(9):1893-1901. <https://doi.org/10.1351/pac199466091893>.
32. Vol'pin M.E., Novikov Yu.N. To the catalytic action mechanism of layered graphite compounds. In: *Mechanism of catalysis. Part 2. Research methods of catalytic reactions*. Novosibirsk: Nauka; 1984, p. 100-112. (In Russ.).
33. Goikhman A.Sh., Solomko V.P. *High-molecular inclusion compounds*. Kiev: Naukova dumka; 1982, 192 p. (In Russ.).
34. Ebert L.B. Intercalation compounds of graphite. *Annual Review of Materials Science*. 1976;6(1):181-211. <https://doi.org/10.1146/annurev.ms.06.080176.001145>.
35. Rudorff W. Graphite intercalation compounds. *Advances in Inorganic Chemistry and Radiochemistry*. 1959;1:223-266. [https://doi.org/10.1016/S0065-2792\(08\)60255-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2792(08)60255-1).
36. Novikov Y.N., Vol'pin M.E. Lamellar compounds of graphite with alkali metals. *Russian Chemical Reviews*. 1971;40(9):733-746. <https://doi.org/10.1070/RC1971v040n09ABEH001966>.
37. Rudorff W., Hofmann U. Über graphitsalze. *Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie*. 1938;238(1):1-50. <https://doi.org/10.1002/zaac.19382380102>.
38. Apal'kova G.D. To electrode operation in electric arc furnaces under modern conditions of the engineering industry. *Electrical Metallurgy*. 2015;5:3-11. (In Russ.). EDN: TTNNOL.
39. Grudnitskij O.M., Ishakov R.A.R., Korobov V.K. Ways of reduction of graphitized electrodes at electroarc steel-smelting furnaces. *Foundry Production and Metallurgy*. 2011;1:100-101. (In Russ.). EDN: TJXFMB.
40. Grudnitskij O.M., Korobov V.M., Iskhakov R.A.R. Operation features of graphitized electrodes in electric arc steel-making furnaces. In: *Teplo- i massoobmennyye processy v metallurgicheskikh sistemah: materialy VII Mezhdunarodnoy konferencii = Heat and mass transfer processes in metallurgical systems: Proceedings of the 7th International Conference*. 6–8 September 2006, Mariupol'. Mariupol'; 2006, p. 36-37. (In Russ.).
41. Dyskina B.Sh., Lesyuk V.S., Kabanova T.V. Optimization of protective coating composition for graphitized electrode high-temperature oxidation. *ChemChemTech*. 2015;58(7):53-55. (In Russ.). EDN: UHLLQJ.
42. Chao Shangkui, Li Lixiang, Xiao Xiaoshuai. *Oxidation resisting coating material for graphite electrode in electric furnace smelting*. Patent CN, no. 110002839; 2019.
43. Yang Xiaozhi, Gu Yuqi, Li Zhihong, Su Yucheng, Liu Ming, You Xiaoyong, Xie Chunba, Chen Xin. *Processing method for dipping graphite carbon envelope with oxide solution*. Patent CN, no. 1994967; 2007.
44. Huang Jiaxu, Cheng Xiaozhe, Wang Tanglin, Wang Dongsheng. *Graphite electrode protection method*. Patent CN, no. 107043276; 2017.
45. Sinani I.L., Bushuev V.M., Bushuev M.V. *A method to produce protective coatings on products with a carbon-containing base*. Patent RF, no. 2560461; 2015. (In Russ.).
46. Erokhina O.O., Feshchenko R.Yu., Pirogova N.A., Eremin R.N. *Method for protecting graphite electrodes from high-temperature oxidation*. Patent RF, no. 2788294; 2023. (In Russ.).
47. Fekri M., Jafarzadeh K., Khalife Soltani S.A., Valefi Z., Mazhari Abbasi H. Improvement of oxidation resistance of graphite by aluminosilicate coating with aluminum metaphosphate interlayer. *Carbon Letters*. 2023;33(7):2095-2108. <https://doi.org/10.1007/s42823-023-00536-w>.
48. Zaykoski J.A., Talmy I.G., Ashkenazi K.J. *Oxidation resistant coating for carbon*. Patent US, no. 6632762; 2003.
49. Vavilova A.T., Konovalova E.A., Yuzikhov U.D., Polovoy B.V. Efficiency of application of protection against oxidation of graphite electrodes. In: *Formation of properties of electrode graphite: Collection of Scientific papers*. Moscow: Nilgrait; 1991, p. 74-77. (In Russ.).
50. Rusev G.M., Kiselev S.M., Ovsyanikov V.V., Galyuk N.F. *Graphitized electrode with a protective coating*. Patent RF, no. 2193294; 2002. (In Russ.).
51. Vodennikov S.A. Studying possibility to reduce electrical resistance of graphitized electrodes. In: *Metallurgiya. Zaporozh'e: Zaporizhzhia State Engineering Academy*; 2001, Iss. 5, p. 33-134. (In Russ.).

52. Balin A.N., Vishnevskij A.A., Nevezhin S.V., Gerasimov A.S., Kashfullin A.M. Method to apply a heat-resistant coating based on iron aluminide to the surface of products operating in high-temperature gas corrosion conditions. Patent RF, no. 2772342; 2022. (In Russ.).
53. Nevezhin S.V., Gerasimov A.S. Graphitized electrode with iron aluminide coating and high heat resistance. Patent RF, no. 2805543; 2023. (In Russ.).
54. Ren Yan, Qian Yuhai, Xu Jingjun, Jiang Yan, Zuo Jun, Li Meishuan. Oxidation and cracking/spallation resistance of ZrB₂-SiC-TaSi₂-Si coating on siliconized graphite at 1500 °C in air. *Ceramics International*. 2020;46(5):6254-6261. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.11.095>.
55. Ren Yan, Qian Yuhai, Xu Jingjun, Jiang Yan, Zuo Jun, Li Meishuan. Ultra-high temperature oxidation resistance of ZrB₂-20SiC coating with TaSi₂ addition on siliconized graphite. *Ceramics International*. 2019;45(12):15366-15374. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.05.030>.
56. Uolker T.B., Buker L.A. Carbon-carbon composite material and method to increase its oxidation resistance. Patent RF, no. 2240991; 2004. (In Russ.).
57. Fokin V.P., Matochkin V.A., Iskhakov R.A.-R., Korobov V.K., D'yachenko V.I., Grudnickij O.M., Lependin N.A., Obydennaya N.P. Method to increase graphite electrode oxidation resistance at high temperatures. Patent RB, no. 11708; 2009. (In Russ.).
58. Naumov N.A., Rybyanets I.V., Naprasnik M.M., Bogatyrev S.S. Manufacturing method of graphitized products and device for its implementation. Patent RF, no. 2522011; 2014. (In Russ.).
59. Vetyukov M.M., Tsyplakov A.M., Shkolnikov S.N. Metallurgy of aluminum and magnesium. Moscow: Metallurgiya; 1987, 320 p. (In Russ.).
60. Kolesnikov M.I., Egorov A.P., Zhurov V.V., Bujnenko S.A., Ryabukhin Yu.M. Sealing method for a graphite anode impregnated with orthophosphoric acid in the ceiling of a magnesium electrolyzer. Patent RF, no. 492593; 1975. (In Russ.).
61. Feshchenko R.Yu., Eremin R.N., Erokhina O.O., Dydin V.M. Increasing oxidation resistance of graphitized blocks for the electrolytic production of magnesium by impregnation with phosphate solutions. Part 1. *Tsvetnye metally*. 2020;10:49-55. <https://doi.org/10.17580/tsm.2020.10.07>.
62. Feshchenko R.Yu., Eremin R.N., Erokhina O.O., Povarov V.G. Increasing oxidation resistance of graphitized blocks for the electrolytic production of magnesium by impregnation with phosphate solutions. Part 2. *Tsvetnye metally*. 2022;1:24-29. <https://doi.org/10.17580/tsm.2022.01.02>.
63. Kolesnikov V.A., Donskih P.A., Kashkarov I.A. Processing method for magnesium electrolyzer graphite electrodes. Patent RF, no. 2128242; 1999. (In Russ.).
64. Kirilenko I.S., Baraboshkin A.N., Dement'ev A.S., Solyakov S.P., Babincev Yu.B., Hajrulin S.R., Ushakov V.D., Kiselev A.V. Method to protect magnesium electrolyzer electrodes from destruction. Patent RF, no. 712460; 1980. (In Russ.).
65. Rubenstein J., Davis B. Wear testing of inert anodes for magnesium electrolyzers. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2007;38(2):193-201. <https://doi.org/10.1007/s11663-007-9025-6>.
66. Wendt H., Reuhl K. Investigations for the cathodic precipitation of aluminum from chloride smelts. I. *Aluminium*. 1985;31(7):518-521.
67. Wendt H., Dermeik S., Ziogas A. Chlorine corrosion of graphites and technical carbons – I. Reaction with gaseous chlorine at elevated temperatures. *Materials and Corrosion*. 1990;41(8):457-463. <https://doi.org/10.1002/maco.19900410803>.
68. Wendt H., Khalil A., Padberg C.E. High-temperature chlorine corrosion of technical carbons Part II. Anodic corrosion in chloride melt. *Journal of Applied Electrochemistry*. 1991;21(10):929-934. <https://doi.org/10.1007/BF01042461>.
69. Li Bing, Lou Jingwer, Yan Mangffn, Yu Jianguo. Electrochemical investigation on chlorine and electrolyte intercalation into graphite anodes during magnesium electrolysis process. In: Mathaudhu S.N., Sillekens W.H., Neelameggham N.R., Hort N. (eds.). *Magnesium Technology*. Cham: Springer; 2012, p. 71-73. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48203-3_14.
70. Skybakmoen E., Rørvik S., Solheim A., Holm K.R., Tiefenbach P., Østrem Ø. Measurement of cathode surface wear profiles by laser scanning. In: Lindsay S.J. (ed.). *Light Metals*. Cham: Springer; 2011, p. 1061-1066. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48160-9_180.
71. Li Tao, Johansen S.T., Solheim A. Uneven cathode wear in aluminium reduction cells. In: Williams E. (ed.). *Light Metals*. Cham: Springer; 2016, p. 927-932. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48251-4_156.
72. Senanu S., Schønning C., Rørvik S., Wang Zhaohui, Ratvik A.P., Grande T. Cathode wear based on autopsy of a shutdown aluminium electrolysis cell. In: Ratvik A.P. (ed.). *Light Metals: The Minerals, Metals & Materials Series*. Cham: Springer; 2017, p. 561-570. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51541-0_70.
73. Sorlie M., Øye H.A. *Cathodes in aluminum electrolysis: 2nd edition*. Dusseldorf: Aluminum-Verlag GmbH; 1994, 406 p.
74. Øye H.A., Welch B.J. Cathode performance: the influence of design, operations, and operating conditions. *JOM*. 1998;50(2):18-23. <https://doi.org/10.1007/s11837-998-0243-4>.
75. Polyus R., Drejfus Zh.-M. Impregnated graphite cathode for aluminum electrolysis. Patent RF, no. 2245396; 2005. (In Russ.).
76. Rapoport M.B. Carbon-graphite interlayer compounds and their significance in aluminum metallurgy. Moscow: CNIIcvetmetinformaciya; 1967, 67 p. (In Russ.).

77. Dewing E.W. The reaction of sodium with nongraphitic carbon: reactions occurring in the linings of aluminum reduction cells. *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*. 1963;227(12):1328-1334.
78. Brilloit P., Lossius L.P., Øye H.A. Penetration and chemical reactions in carbon cathodes during aluminum electrolysis: Part I. Laboratory experiments. *Metallurgical Transactions B. Penetration and chemical reactions in carbon cathodes during aluminum electrolysis*. 1993;24(1):75-89. <https://doi.org/10.1007/BF02657874>.
79. Grjotheim K. *Introduction to aluminium electrolysis: understanding the Hall-Héroult process*. Introduction to aluminium electrolysis. Düsseldorf: Aluminium-Verlag; 1993, 260 p.
80. Thonstad J. *Aluminium electrolysis: fundamentals of the Hall Héroult process*. Aluminium electrolysis. Düsseldorf: Aluminium-Verlag; 2001, 359 p.
81. Zolochovsky A., Hop J.G., Servant G., Foosnæs T., Øye H.A. Rapoport-Samoilenko test for cathode carbon materials: I. Experimental results and constitutive modelling. *Carbon*. 2003;41(3):497-505. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(02\)00346-9](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(02)00346-9).
82. Ge P., Fouletier M. Electrochemical intercalation of sodium in graphite. *Solid State Ionics*. 1988;28-30(2):1172-1175. [https://doi.org/10.1016/0167-2738\(88\)90351-7](https://doi.org/10.1016/0167-2738(88)90351-7).
83. Robozarov V.V., Vetyukov M.M. Improving the properties of self-baking anodes with the addition of B₂O₃. *Tsvetnye metally*. 1968;6:55-57. (In Russ.).
84. Vetyukov M.M. Testing anode paste with the addition of boric acid on industrial aluminum electrolyzers. *Trudy Vsesoyuznogo alyuminievo-magnievolgo instituta*. 1972;80:53-58. (In Russ.).
85. Korolev V.I. *Process of protection of anodes of aluminum electrolyzer against oxidation*. Patent RF, no. 2155826; 2000. (In Russ.).
86. Hildebrandt E.M., Vershinina E.P., Frizorger V.K. Protection of the anode surface of the aluminum electrolyzer from oxidation. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2010;3(3):272-283.
87. Merkov S.M., Alekseev A.V., Kinshpont E.R., Milinchuk V.K., Lainer Yu.A., Samoilov E.N. Investigation into the impregnation of roasted anodes of aluminum electrolyzers. *Izvestiya Non-Ferrous Metallurgy*. 2015;1(3):16-21. <https://doi.org/0021-3438-2015-3-16-21>.
88. Leonov V.V. *Method to protect a carbon-graphite anode of an aluminum electrolyzer*. Patent RF, no. 2389827; 2010. (In Russ.).
89. Newman D.S., Justnes H., Øye H.A. The effect of Li on graphitic cathodes used in aluminum electrolysis. *Metallurgy*. 1986;6:582-584.
90. Richards E.N. Aspects of interaction of LiF/modified bath with cathodes. In: *The International Harald A. Øye Symposium*. 1–5 March 1992, San Diego. San Diego; 1995, p. 143-157.
91. Sekhar J.A., Zheng T., Duruz J.J. *Treated carbon cathodes for aluminum production, the process of making thereof and the process of using thereof*. Patent US, no. 5378327; 1995.
92. Lewis R.A., Hildebrandt R.D. *Electrolytic cell for production of aluminum and method of making the same*. Patent US, no. 3400061; 1968.
93. Sekhar J.A. *Bonding of bodies of refractory hard materials to carbonaceous supports*. Patent US, no. 5320717; 1994.
94. Sbitnev A.G., Arhipov G.V., Pingin V.V. *Manufacturing method of combined hearth blocks*. Patent RF, no. 2510822; 2014. (In Russ.).
95. Bullough V.L. *Method of treating cathode surfaces in alumina reduction cells*. Patent US, no. 3471380; 1969.
96. Gorlanov E.S., Bazhin V.Yu. *Titanium diboride for aluminum electrolysis cells*. Review. St. Petersburg: Politekhpress; 2019. 439 p. (In Russ.).
97. Padamata S.K., Singh K., Haarberg G.M., Saevardsdottir G. Wettable TiB₂ cathode for aluminum electrolysis: a review. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2022;8(2):613-624. <https://doi.org/10.1007/s40831-022-00526-8>.
98. Wang Gang, Yu Minghao, Feng Xinliang. Carbon materials for ion-intercalation involved rechargeable battery technologies. *Chemical Society Reviews*. 2021;50(4):2388-2443. <https://doi.org/10.1039/D0CS00187B>.
99. Tereshchenko M.D., Yaburov M.I., Lukoyanov V.Yu., Himenko L.L. Review of the existing methods for intercalating graphite. *Bulletin of the Perm national research polytechnic university. Aerospace engineering*. 2022;71:174-181. (In Russ.). <https://doi.org/10.15593/2224-9982/2022.71.19>. EDN: YQWCY.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Nasifullina A.I., Starkov M.K., Gabdulkhakov R.R., Rudko V.A. Petroleum coking additive - raw material component for metallurgical coke production. Part 2. Experimental studies of obtaining a petroleum coking additive // *CIS Iron and Steel Review*. 2022. № 2. С. 9–16. <https://doi.org/10.17580/cisisr.2022.02.02>.
2. Рудко В.А., Габдулхаков Р.Р., Пягай И.Н. Научно-техническое обоснование возможности организации производства игольчатого кокса в России // *Записки Горного института*. 2023. Т. 263. С. 795-809. EDN: KYNHWW.
3. Sharikov Yu.V., Sharikov F.Yu., Krylov K.A. Mathematical model of optimum control for petroleum coke production in a rotary tube kiln // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2021. Vol. 55. No. 4. P. 711–719. <https://doi.org/10.1134/S0040579521030192>.
4. Чукаева М.А., Матвеева В.А., Сверчков И.П. Комплексная переработка высокоуглеродистых золошлаковых отходов // *Записки Горного института*. 2022. Т. 253. С. 97–104. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.5>. EDN: LCQAXS.

5. Tsareva A.A., Litvinova T.E., Gapanyuk D.I., Rode L.S., Poltoratskaya M.E. Kinetic calculation of sorption of ethyl alcohol on carbon materials // Russian Journal of Physical Chemistry A. 2024. Vol. 98. P. 421–430. <https://doi.org/10.1134/S0036024424030312>.
6. Зубкова О.С., Пягай И.Н., Панкратьева К.А., Торопчина М.А. Разработка состава и исследование свойств сорбента на основе сапонита // Записки Горного института. 2023. Т. 259. С. 21–29. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.1>. EDN: ICCFLN.
7. Болобов В.И., Попов Г.Г. Методика испытаний трубопроводных сталей на стойкость к «ручейковой» коррозии // Записки Горного института. 2021. Т. 252. С. 854–860. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.6.7>.
8. Bazhin V.Yu., Masko O.N., Nikitina L.N. Decarbonization of exhaust gases of industrial metallurgical furnaces // Metallurgist. 2024. Vol. 67. No. 9–10. P. 1407–1417. <https://doi.org/10.1007/s11015-024-01632-6>.
9. Пириайнен В.Ю., Баринкова А.А. Разработка композиционных материалов на основе красного шлама // Обогащение руд. 2023. № 3. С. 35–41. <https://doi.org/10.17580/or.2023.03.06>. EDN: GFHYA.
10. Немчинова Н.В., Коновалов Н.П., Коновалов П.Н., Дошлов И.О. Снижение экологической нагрузки на окружающую среду при производстве алюминия за счёт применения нефтяного пека // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 4. С. 800–808. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-800-808>. EDN: YRJB RD.
11. Фиалков А.С. Углерод, межслоевые соединения и композиты на его основе. М.: Аспект-Пресс, 1997. 718 с.
12. Шулепов С.В. Физика углеграфитовых материалов. М.: Металлургия, 1972. 256 с.
13. Hull A.W. A new method of x-ray crystal analysis // Physical Review. 1917. Vol. 10. Iss. 6. P. 661–696. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.10.661>.
14. Bernal J.D. The structure of graphite // Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character. 1924. Vol. 106. Iss. 740. P. 749–773. <https://doi.org/10.1098/rspa.1924.0101>.
15. Baskin Y., Meyer L. Lattice constants of graphite at low temperatures // Physical Review. 1955. Vol. 100. Iss. 2. P. 544–544. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.100.544>.
16. Bacon G.E. The interlayer spacing of graphite // Acta Crystallographica. 1951. Vol. 4. Iss. 6. P. 558–561. <https://doi.org/10.1107/S0365110X51001781>.
17. Franklin R.E. The structure of graphitic carbons // Acta Crystallographica. 1951. Vol. 4. Iss. 3. P. 253–261. <https://doi.org/10.1107/S0365110X51000842>.
18. Ruland W. X-ray studies on the structure of graphitic carbons // Acta Crystallographica. 1965. Vol. 18. Iss. 6. P. 992–996. <https://doi.org/10.1107/S0365110X65002414>.
19. Redmount M.B., Heintz E.A. Manufacture of graphite electrodes // Introduction to carbon technologies. Alicante: University of Alicante, 1997. P. 519–536.
20. Уббелоде А.Р. Графит и его кристаллические соединения / пер. с англ.; под ред. Е.С. Головиной и О.А. Цухановой. М.: Мир, 1965. 256 с.
21. Островский В.С., Виргильев Ю.С., Костиков В.И., Сысков К.И. Искусственный графит. М.: Металлургия, 1986. 272 с.
22. Вяткин С.Е., Деев А.Н., Нагорный В.Г., Островский В.С., Сигареев А.М., Соккер Т.А. Ядерный графит. М.: Атомиздат, 1967. 180 с.
23. Тарабанов А.С., Костиков В.И. Силицированный графит. М.: Металлургия, 1977. 208 с.
24. Терентьева В.С., Лейпунский И.О., Еремина А.И., Пшеченков П.А., Астапов А.Н. Влияние архитектуры и компонентно-химического состава на структуру и свойства углеродсодержащих композиционных материалов // Механика композиционных материалов и конструкций. 2011. Т. 17. № 1. С. 30–52. EDN: NYDRST.
25. Астапов А.Н., Терентьева В.С. Обзор отечественных разработок в области защиты углеродсодержащих материалов от газовой коррозии и эрозии в скоростных потоках плазмы // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2014. № 4. С. 50–70. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2014-4-50-70>. EDN: TFSAL.
26. Theodosiou A., Jones A.N., Marsden B.J. Thermal oxidation of nuclear graphite: a large scale waste treatment option // PLOS ONE. 2017. Vol. 12. Iss. 8. P. e0182860. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182860>.
27. Paul R.M. Application of a three-dimensional random pore model for thermal oxidation of synthetic graphite // Journal of Nuclear Materials. 2021. Vol. 543. P. 152589. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2020.152589>.
28. Muzyka R., Kwoka M., Smędowski Ł., Díez N., Gryglewicz G. Oxidation of graphite by different modified Hummers methods: 1 // New Carbon Materials. 2017. Vol. 32. Iss. 1. P. 15–20. [https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(17\)60102-1](https://doi.org/10.1016/S1872-5805(17)60102-1).
29. Smith R.E., Kane J.J., Windes W.E. Determining the acute oxidation behavior of several nuclear graphite grades // Journal of Nuclear Materials. 2021. Vol. 545. P. 152648. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2020.152648>.
30. Setton R. The graphite intercalation compounds: their uses in industry and chemistry // Synthetic Metals. 1988. Vol. 23. Iss. 1–4. P. 467–473. [https://doi.org/10.1016/0379-6779\(88\)90523-1](https://doi.org/10.1016/0379-6779(88)90523-1).
31. Boehm H.P., Setton R., Stumpp E. Nomenclature and terminology of graphite intercalation compounds (IUPAC Recommendations 1994) // Pure and Applied Chemistry. 1994. Vol. 66. No. 9. P. 1893–1901. <https://doi.org/10.1351/pac199466091893>.
32. Вольпин М.Е., Новиков Ю.Н. Вопросы механизма каталитического действия слоистых соединений графита // Механизм катализа. Ч.2. Методы исследования каталитических реакций. Новосибирск: Наука, 1984. С. 100–112.

33. Гойхман А.Ш., Соломко В.П. Высокомолекулярные соединения включения. Киев: Наукова думка, 1982. 192 с.
34. Ebert L.B. Intercalation compounds of graphite // *Annual Review of Materials Science*. 1976. Vol. 6. No. 1. P. 181–211. <https://doi.org/10.1146/annurev.ms.06.080176.001145>.
35. Rudorff W. Graphite intercalation compounds // *Advances in Inorganic Chemistry and Radiochemistry*. Elsevier, 1959. Vol. 1. P. 223–266. [https://doi.org/10.1016/S0065-2792\(08\)60255-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2792(08)60255-1).
36. Novikov Y.N., Vol'pin M.E. Lamellar compounds of graphite with alkali metals // *Russian Chemical Reviews*. 1971. Vol. 40. Iss. 9. P. 733–746. <https://doi.org/10.1070/RC1971v04n09ABEH001966>.
37. Rudorff W., Hofmann U. Über graphitsalze // *Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie*. 1938. Vol. 238. No. 1. P. 1–50. <https://doi.org/10.1002/zaac.19382380102>.
38. Апалькова Г.Д. К вопросу эксплуатации электродов в электродуговых печах в современных условиях индустрии инжиниринга // *Электрометаллургия*. 2015. № 5. С. 3–11. EDN: TTNOL.
39. Грудницкий О.М., Исхаков Р.А.-Р., Коробов В.К. Пути снижения удельного расхода графитированных электродов на электросталеплавильных печах // *Литье и металлургия*. 2011. № 1. С. 100–101. EDN: TJXFMB.
40. Грудницкий О.М., Коробов В.М., Исхаков Р.А.-Р. Особенности эксплуатации графитированных электродов на электродуговых сталеплавильных печах // Тепло- и массообменные процессы в металлургических системах: материалы VII Междунар. конф. (г. Мариуполь, 6–8 сентября 2006 г.). Мариуполь, 2006. С. 36–37.
41. Дыскина Б.Ш., Лесюк В.С., Кабанова Т.В. Оптимизация состава защитного покрытия от высокотемпературного окисления графитированных электродов // *Известия вузов. Серия: Химия и химическая технология*. 2015. Т. 58. № 7. С. 53–55. EDN: UHLLQJ.
42. Patent no. 110002839, China, C1 C04B 28/34. Oxidation resisting coating material for graphite electrode in electric furnace smelting / Shangkui Chao, Lixiang Li, Xiaoshuai Xiao; Rewell Refractory (Zhengzhou) Co., Ltd. No. 20191041429.X. Filed: 17.05.2019; publ. 07.07.2019.
43. Patent no. 1994967, China, C1 C04B 35/52. Processing method for dipping graphite carbon envelope with oxide solution / Xiaozhi Yang, Yuqi Gu, Zhihong Li, Yucheng Su, Ming Liu, Xiaoyong You, Chunba Xie, Xin Chen; Nantong Qingtian Industrial Co., Ltd. No. 200610037629.9. Filed: 06.01.2006; publ. 11.07.2007.
44. Patent no. 107043276, China, C1 C04B 41/87. Graphite electrode protection method / Jiaxu Huang, Xiaozhe Cheng, Tanglin Wang, Dongsheng Wang; Pangang group research institute Co., Ltd. No. 201710276386.2. Filed: 25.04.2017; publ. 15.08.2017.
45. Пат. № 2560461, Российская Федерация, C04B 41/87. Способ получения защитных покрытий на изделиях с углеродсодержащей основой / И.А. Синани, В.М. Бушуев, М.В. Бушуев; заявитель и патентообладатель Пермский национальный исследовательский политехнический университет. № 2014124889/03. Заявл. 18.06.2014; опубл. 20.08.2015. Бюл. № 23.
46. Пат. № 2788294, Российская Федерация, C25B 11/04. Способ защиты графитированных электродов от высокотемпературного окисления / О.О. Ерохина, Р.Ю. Фещенко, Н.А. Пирогова, Р.Н. Еремин; заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский горный университет. № 2022117444. Заявл. 28.06.2022; опубл. 17.01.2023. Бюл. № 2.
47. Fekri M., Jafarzadeh K., Khalife Soltani S.A., Valefi Z., Mazhari Abbasi H. Improvement of oxidation resistance of graphite by aluminosilicate coating with aluminum metaphosphate interlayer // *Carbon Letters*. 2023. Vol. 33. No. 7. P. 2095–2108. <https://doi.org/10.1007/s42823-023-00536-w>.
48. Patent no. 6632762, United States of America, C1 C04B 35/565. Oxidation resistant coating for carbon / J.A. Zaykoski, I.G. Talmy, K.J. Ashkenazi; The United States of America as represented by the Secretary of the Navy. No. 09/987,493. Filed: 15.11.2001; publ. 14.10.2003.
49. Вавилова А.Т., Коновалова Е.А., Юзихов Ю.Д., Половой Б.В. Эффективность применения защиты от окисления графитированных электродов // *Формирование свойств электродного графита: сб. науч. тр. М.: НИИграфит*. 1991. С. 74–77.
50. Пат. № 2193294, Российская Федерация, C1 C23C 4/00 H05B 7/00. Графитированный электрод с защитным покрытием / Г.М. Русев, С.М. Киселев, В.В. Овсяников, Н.Ф. Галюк. № 2001129111/06. Заявл. 30.10.2001; опубл. 20.11.2002.
51. Воденников С.А. Изучение возможности снижения электросопротивления графитированных электродов // *Металлургия. Запорожье: Запорожская государственная инженерная академия*, 2001. Вып. 5. С. 33–134.
52. Пат. № 2772342, Российская Федерация, C23C 4/073. Способ нанесения жаростойкого покрытия на основе алюминиды железа на поверхность изделий, работающих в условиях высокотемпературной газовой коррозии / А.Н. Балин, А.А. Вишневский, С.В. Невежин, А.С. Герасимов, А.М. Кашфуллин; ООО «ВВСТ». № 2021126865. Заявл. 10.09.2021; опубл. 18.05.2022. Бюл. № 14.
53. Пат. № 2805543, Российская Федерация, H05B 7/085. Графитированный электрод с покрытием на основе алюминиды железа и высокой жаростойкостью / С.В. Невежин, А.С. Герасимов. № 2023106192. Заявл. 16.03.2023; опубл. 18.10.2023. Бюл. № 29.
54. Ren Yan, Qian Yuhai, Xu Jingjun, Jiang Yan, Zuo Jun, Li Meishuan. Oxidation and cracking/spallation resistance of ZrB₂-SiC-TaSi₂-Si coating on siliconized graphite at 1500 °C in air // *Ceramics International*. 2020. Vol. 46. Iss. 5. P. 6254–6261. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.11.095>.
55. Ren Yan, Qian Yuhai, Xu Jingjun, Jiang Yan, Zuo Jun, Li Meishuan. Ultra-high temperature oxidation resistance of ZrB₂-20SiC coating with TaSi₂ addition on siliconized graphite // *Ceramics International*. 2019. Vol. 45. Iss. 12. P. 15366–15374. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.05.030>.

56. Пат. № 2240991, Российская Федерация, С04В 41/86. Углерод-углеродный композиционный материал и способ повышения его стойкости к окислению / Т.Б. Уолкер, Л.А. Букер; Хонейвелл интернэшнл инк. № 2002123225/03. Заявл. 14.02.2001; опубл. 27.11.2004.
57. Пат. № 11708, Республика Беларусь, Способ повышения стойкости графитированных электродов к окислению при высоких температурах / В.П. Фокин, В.А. Маточкин, Р.А.-Р. Исхаков, В.К. Коробов, В.И. Дьяченко, О.М. Грудницкий, Н.А. Лепендин, Н.П. Обыденная; заявитель и патентообладатель Белорусский металлургический завод и Новочеркасский электродный завод. № 20071171. Заявл. 27.09.2007; опубл. 30.04.2009.
58. Пат. № 2522011, Российская Федерация, С25В 11/14. Способ изготовления графитированных изделий и устройство для его осуществления / Н.А. Наумов, И.В. Рыбьянец, М.М. Напрасник, С.С. Богатырев; ОАО «Энергопром-НЭЗ». № 2013100507/05. Заявл. 09.01.2013; опубл. 10.07.2014. Бюл. № 19.
59. Ветюков М.М., Цыплаков А.М., Школьников С.Н. Металлургия алюминия и магния. М.: Металлургия, 1987. 320 с.
60. Пат. № 492593, Российская Федерация, С25D 3/08. Способ уплотнения пропитанного ортофосфорной кислотой графитированного анода в перекрытии магниевого электролизера / М.И. Колесников, А.П. Егоров, В.В. Журов, С.А. Буйненко, Ю.М. Рябухин; заявитель и патентообладатель Всесоюзный научно-исследовательский и проектный институт титана и Запорожский титано-магниевый комбинат. № 2027221/22-1. Заявл. 22.05.1974; опубл. 25.11.1975. Бюл. № 43.
61. Фещенко Р.Ю., Еремин Р.Н., Ерохина О.О., Дыдин В.М. Повышение окислительной стойкости графитированных блоков для электролитического производства магния методом пропитки фосфатными растворами. Часть 1 // Цветные металлы. 2020. № 10. С. 49–55. <https://doi.org/10.17580/tsm.2020.10.07>.
62. Фещенко Р.Ю., Еремин Р.Н., Ерохина О.О., Поваров В.Г. Повышение окислительной стойкости графитированных блоков для электролитического производства магния методом пропитки фосфатными растворами. Часть 2 // Цветные металлы. 2022. № 1. С. 24–29. <https://doi.org/10.17580/tsm.2022.01.02>.
63. Пат. № 2128242, Российская Федерация, С25В 11/11. Способ обработки графитовых электродов магниевого электролизера / В.А. Колесников, П.А. Донских, И.А. Кашкаров; заявитель и патентообладатель ОАО «АВИСМА титано-магниевый комбинат». № 96109729/15. Заявл. 14.05.1996; опубл. 27.03.1999.
64. Пат. № 712460, Российская Федерация, С25С 3/04. Способ защиты электродов магниевого электролизера от разрушения / И.С. Кириленко, А.Н. Барабошкин, А.С. Дементьев, С.П. Соляков, Ю.Б. Бабинцев, С.Р. Хайрулин, В.Д. Ушаков, А.В. Киселев; заявитель и патентообладатель Березниковский титано-магниевый комбинат и институт электрохимии Уральского НЦ АН СССР. № 236614/22-02. Заявл. 20.05.1976; опубл. 30.01.1980. Бюл. № 4.
65. Rubenstein J., Davis B. Wear testing of inert anodes for magnesium electrolyzers // Metallurgical and Materials Transactions B. 2007. Vol. 38. No. 2. P. 193–201. <https://doi.org/10.1007/s11663-007-9025-6>.
66. Wendt H., Reuhl K. Investigations for the cathodic precipitation of aluminum from chloride smelts. I // Aluminium. 1985. T. Vol. 31. No. 7. P. 518–521.
67. Wendt H., Dermeik S., Ziogas A. Chlorine corrosion of graphites and technical carbons – I. Reaction with gaseous chlorine at elevated temperatures // Materials and Corrosion. 1990. Vol. 41. No. 8. P. 457–463. <https://doi.org/10.1002/maco.19900410803>.
68. Wendt H., Khalil A., Padberg C.E. High-temperature chlorine corrosion of technical carbons Part II. Anodic corrosion in chloride melt // Journal of Applied Electrochemistry. 1991. Vol. 21. No. 10. P. 929–934. <https://doi.org/10.1007/BF01042461>.
69. Li Bing, Lou Jingwer, Yan Mangffn, Yu Jianguo. Electrochemical investigation on chlorine and electrolyte intercalation into graphite anodes during magnesium electrolysis process // Magnesium Technology / eds. S.N. Mathaudhu, W.H. Sillekens, N.R. Neelameggham, N. Hort. Cham: Springer, 2012. P. 71–73. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48203-3_14.
70. Skybakmoen E., Rørvik S., Solheim A., Holm K.R., Tiefenbach P., Østrem Ø. Measurement of cathode surface wear profiles by laser scanning // Light Metals / ed. S.J. Lindsay. Cham: Springer, 2011. P. 1061–1066. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48160-9_180.
71. Li Tao, Johansen S.T., Solheim A. Uneven cathode wear in aluminium reduction cells // Light Metals / ed. E. Williams. Cham: Springer, 2016. P. 927–932. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48251-4_156.
72. Senanu S., Schønning C., Rørvik S., Wang Zhaohui, Ratvik A.P., Grande T. Cathode wear based on autopsy of a shutdown aluminium electrolysis cell // Light Metals: The Minerals, Metals & Materials Series / ed. A.P. Ratvik. Cham: Springer, 2017. P. 561–570. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51541-0_70.
73. Sorlie M., Øye H.A. Cathodes in aluminum electrolysis: 2nd edition. Dusseldorf: Aluminum-Verlag GmbH, 1994. 406 с.
74. Øye H.A., Welch B.J. Cathode performance: the influence of design, operations, and operating conditions // JOM. 1998. Vol. 50. No. 2. P. 18–23. <https://doi.org/10.1007/s11837-998-0243-4>.
75. Пат. № 2245396, Российская Федерация, С25С 3/08. Пропитанный графитовый катод для электролиза алюминия / Р. Полус, Ж.-М. Дрейфус; заявитель и патентообладатель Карбон Савуа. № 2001124345/02. Заявл. 27.01.2003; опубл. 27.01.2005. Бюл. № 3.
76. Рапопорт М.Б. Углеграфитовые межслойные соединения и их значение в металлургии алюминия. М.: ЦНИИцветметинформация, 1967. 67 с.
77. Dewing E.W. The reaction of sodium with nongraphitic carbon: reactions occurring in the linings of aluminum reduction cells // Transactions of the Metallurgical Society of AIME. 1963. Vol. 227. No. 12. P. 1328–1334.

78. Brilloit P., Lossius L.P., Øye H.A. Penetration and chemical reactions in carbon cathodes during aluminum electrolysis: Part I. Laboratory experiments // *Metallurgical Transactions B. Penetration and chemical reactions in carbon cathodes during aluminum electrolysis*. 1993. Vol. 24. No. 1. P. 75–89. <https://doi.org/10.1007/BF02657874>.
79. Grjotheim K. Introduction to aluminium electrolysis: understanding the Hall-Héroult process. Introduction to aluminium electrolysis. Düsseldorf: Aluminium-Verlag, 1993. 260 c.
80. Thonstad J. Aluminium electrolysis: fundamentals of the Hall Héroult process. Aluminium electrolysis. Düsseldorf: Aluminium-Verlag, 2001. 359 c.
81. Zolochovsky A., Hop J.G., Servant G., Foosnæs T., Øye H.A. Rapoport-Samoilenko test for cathode carbon materials: I. Experimental results and constitutive modelling // *Carbon*. 2003. Vol. 41. Iss. 3. P. 497–505. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(02\)00346-9](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(02)00346-9).
82. Ge P., Fouletier M. Electrochemical intercalation of sodium in graphite // *Solid State Ionics*. 1988. Vol. 28-30. Part. 2. P. 1172–1175. [https://doi.org/10.1016/0167-2738\(88\)90351-7](https://doi.org/10.1016/0167-2738(88)90351-7).
83. Робозеров В.В., Ветюков М.М. Улучшение свойств самообжигающегося анода добавкой B_2O_3 // *Цветные металлы*. 1968. № 6. С. 55–57.
84. Ветюков М.М. Испытание анодной массы с добавкой борной кислоты на промышленных алюминиевых электролизёрах // *Труды Всесоюзного алюминиево-магниевого института*. 1972. № 80. С. 53–58.
85. Пат. № 2155826, Российская Федерация, C25C 3/12. Process of protection of anodes of aluminum electrolyzer against oxidation / V.I. Korolev. № 97121060/02. Заявл. 16.12.1997; опублик. 10.09.2000.
86. Hildebrandt E.M., Vershinina E.P., Frizorger V.K. Protection of the anode surface of the aluminum electrolyzer from oxidation // *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2010. Vol. 3. No. 3. P. 272–283.
87. Merkov S.M., Alekseev A.V., Kinshpont E.R., Milinchuk V.K., Lainer Yu.A., Samoilov E.N. Investigation into the impregnation of roasted anodes of aluminum electrolyzers // *Izvestiya Non-Ferrous Metallurgy*. 2015. Vol. 1. Iss. 3. P. 16–21. <https://doi.org/0021-3438-2015-3-16-21>.
88. Пат. № 2389827, Российская Федерация, C25C 3/12. Способ защиты углеграфитового анода алюминиевого электролизера / В.В. Леонов; заявитель и патентообладатель Сибирский федеральный университет. № 2009107814/02. Заявл. 04.03.2009; опублик. 20.05.2010. Бюл. № 14.
89. Newman D.S., Justnes H., Øye H.A. The effect of Li on graphitic cathodes used in aluminum electrolysis // *Metallurgy*. 1986. Vol. 6. P. 582–584.
90. Richards E.N. Aspects of Interaction of LiF/modified bath with cathodes // *The International Harald A. Øye Symposium (San Diego, 1–5 March 1992)*. San Diego, 1995. P. 143–157.
91. Patent no. 5378327, United States of America, A. Treated carbon cathodes for aluminum production, the process of making thereof and the process of using thereof / J.A. Sekhar, T. Zheng, J.J. Duruz. Publ. 03.01.1995.
92. Patent no. 3400061, United States of America, Cl. 204-67. Electrolytic cell for production of aluminum and method of making the same / R.A. Lewis, R.D. Hildebrandt; Kaiser Aluminum & Chemical Corporation. No. 325228. Filed: 21.11.1963; publ. 03.09.1968.
93. Patent no. 5320717, United States of America, Cl. C25C 3/06. Bonding of bodies of refractory hard materials to carbonaceous supports / J.A. Sekhar; Moltech Invent S.A. No. 28359. Filed: 09.03.1993; publ. 14.05. 1994.
94. Пат. № 2510822, Российская Федерация, C25C 3/08. Способ изготовления комбинированных подовых блоков / А.Г. Сбитнев, Г.В. Архипов, В.В. Пингин; заявитель и патентообладатель ООО «ОК РУСАЛ ИТЦ». № 2012158364/02. Заявл. 29.12.2012; опублик. 10.04.2014. Бюл. № 10.
95. Patent no. 3471380, United States of America. Cl. 204-67. Method of treating cathode surfaces in alumina reduction cells / V.L. Bullough; Reynolds Metals Company. No. 589215. Filed: 25.10.1966; publ. 07.10.1969.
96. Горланов Е.С., Бажин В.Ю. Диборид титана для катодов алюминиевых электролизеров. Обзор. СПб.: Политех-пресс, 2019. 439 с.
97. Padamata S.K., Singh K., Haarberg G.M., Saevarsdottir G. Wettable TiB_2 Cathode for aluminum electrolysis: a review // *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2022. Vol. 8. No. 2. P. 613–624. <https://doi.org/10.1007/s40831-022-00526-8>.
98. Wang Gang, Yu Minghao, Feng Xinliang. Carbon materials for ion-intercalation involved rechargeable battery technologies // *Chemical Society Reviews*. 2021. Vol. 50. Iss. 4. P. 2388–2443. <https://doi.org/10.1039/DOCS00187B>.
99. Терещенко М.Д., Ябуров М.И., Лукоянов В.Ю., Хименко Л.А. Обзор существующих методов получения интеркалированного графита // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника*. 2022. № 71. С. 174–181. <https://doi.org/10.15593/2224-9982/2022.71.19>. EDN: YQWCiY.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Evgeniy S. Gorlanov,

Dr. Sci. (Eng.),

Deputy Director of the Scientific Centre for Problems of Mineral and Anthropogenic Resources Processing, Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, 2, 21st line, Saint-Petersburg 199106, Russia

✉ Gorlanov_ES@pers.spmi.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2990-3601>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Горланов Евгений Сергеевич,

Д.Т.Н.,

заместитель директора Научного центра Проблем переработки минеральных и техногенных ресурсов, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2, Россия

✉ Gorlanov_ES@pers.spmi.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2990-3601>

Viktor M. Sizyakov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Scientific Director of the Scientific Centre for Problems
of Mineral and
Anthropogenic Resources Processing,
Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,
2, 21st line, Saint-Petersburg 199106, Russia
Sizyakov_VM@pers.spmi.ru
<https://orcid.org/0009-0006-6531-6331>

Felix Yu. Sharikov,

Dr. Sci. (Eng.),
Senior Researcher of the Scientific Centre
for Problems of Mineral and
Anthropogenic Resources Processing,
Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,
2, 21st line, Saint-Petersburg 199106, Russia
Sharikov_FYu@pers.spmi.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1139-3968>

Aleksey A. Spektoruk,

Deputy General Director – Chief Operating Officer,
LLC «El6»,
Linevo workers' settlement, Novosibirsk region,
633216, Russia
ASpektoruk@el6.ru

Tatiana V. Butakova,

Chief Process Engineer,
LLC «El6»,
Linevo workers' settlement, Novosibirsk region,
633216, Russia
TButakowa@el6.ru

Сизяков Виктор Михайлович,

д.т.н., профессор,
научный руководитель Научного центра
Проблем переработки минеральных
и техногенных ресурсов,
Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II,
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2, Россия
Sizyakov_VM@pers.spmi.ru
<https://orcid.org/0009-0006-6531-6331>

Шариков Феликс Юрьевич,

д.т.н.,
старший научный сотрудник Научного центра
Проблем переработки минеральных
и техногенных ресурсов,
Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II,
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2, Россия
Sharikov_FYu@pers.spmi.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1139-3968>

Спекторук Алексей Александрович,

заместитель генерального директора –
операционный директор,
ООО «Эл6»,
633216, р.п. Линево, Новосибирская обл., Россия
ASpektoruk@el6.ru

Бутакова Татьяна Валерьевна,

главный технолог,
ООО «Эл6»,
633216, р.п. Линево, Новосибирская обл., Россия
TButakowa@el6.ru

Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 10.01.2024; approved after reviewing 09.02.2024; accepted for publication 15.02.2024.

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 10.01.2024 г.; одобрена после рецензирования 09.02.2024 г.; принята к публикации 15.02.2024 г.

МЕТАЛЛУРГИЯ

Научная статья

УДК 669.2/.8:541.49:549.3

EDN: LMRIUH

DOI: 10.21285/1814-3520-2024-3-538-546



Поведение основных элементов при автоклавном окислении полиметаллического сульфидного флотоконцентрата, содержащего вольфрам и молибден

А.В. Епифоров^{1✉}, С.В. Баликов², А.А. Шипнигов³¹⁻³Иркутский научно-исследовательский институт благородных и редких металлов и алмазов, Иркутск, Россия

Резюме. Цель – изучить поведение попутных элементов (вольфрам, молибден, висмут), содержащихся в сульфидном золотосодержащем концентрате, в процессе автоклавного окисления. Исследования по автоклавному окислению проведены на сульфидном флотоконцентрате, измельченном до крупности частиц -0,045 мм, с содержанием золота 22,1 г/т, серебра 133,2 г/т, вольфрама 2,7%, молибдена 13%, висмута 0,7%. Процесс проводили при температуре 220°C и парциальном давлении кислорода 0,7 МПа в автоклаве объемом 2 дм³. Концентрации серной кислоты, ионов железа в растворе определяли титриметрическим методом анализа; для определения концентраций висмута, вольфрама, молибдена, меди, серебра, мышьяка в растворе, а также содержание висмута, вольфрама, молибдена, меди, мышьяка, свинца и формы железа и серы в кеке – атомно-эмиссионной спектроскопией с индуктивно связанной плазмой. Также проведен дифрактометрический анализ кека. Эксперименты по цианированию окисленного кека проводили при pH 10,0–10,5, концентрации NaCN 1 г/дм³ с ионитом «PuroliteS992» в течение 24 ч. В результате проведенных экспериментов по автоклавному окислению степень окисления сульфидов составила более 99%. Извлечение молибдена в раствор в форме $[\text{MoO}_2(\text{SO}_4)_n]^{-(2n-2)}$ и MoO_2^{2+} составило 95%. За счет сокращения массы твердого происходило концентрирование висмута и вольфрама в кеке, где их содержание составило 1,66% и 12,7% соответственно. Установлено, что основными фазами кека являются шеелит, ангидрит, плюмбоярозит, бедантит. Извлечение драгоценных металлов при последующем цианировании составило: золота – 97,5%, серебра – 91,6%. Таким образом, при переработке сульфидного золотосодержащего концентрата по автоклавно-цианистой схеме молибден на 95% извлекается в раствор автоклавного окисления. При цианировании извлекается более 90% золота и серебра. Полученный кек не является отвальным, поскольку содержит значительное количество вольфрама (17%), висмута (0,9%), свинца (5,3%), молибдена (3,3%).

Ключевые слова: автоклавное окисление, сульфидные концентраты, золото, вольфрам, молибден, цветные металлы, цианирование

Для цитирования: Епифоров А.В., Баликов С.В., Шипнигов А.А. Поведение основных элементов при автоклавном окислении полиметаллического сульфидного флотоконцентрата, содержащего вольфрам и молибден // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 3. С. 538–546. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-538-546>. EDN: LMRIUH.

METALLURGY

Original article

Element behavior during autoclave oxidation of polymetallic sulfide flotation concentrate containing tungsten and molybdenum

Alexander V. Epiforov^{1✉}, Stanislav V. Balikov², Anton A. Shipnigov³¹⁻³Irkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and Diamonds, Irkutsk, Russia

Abstract. In this paper, we investigate the behavior of associated elements (tungsten, molybdenum, and bismuth) contained in a sulfide gold-bearing concentrate during its autoclave oxidation. The process is studied using a sulfide flotation concentrate, crushed to a particle sieve mesh size of minus 0.045 mm and containing 22.1 g/t of gold, 133.2 g/t of silver, 2.7% of tungsten, 13% of molybdenum, and 0.7% of bismuth. The process was carried out in a 2 dm³ autoclave at a temperature of 220°C and an oxygen partial pressure of 0.7 MPa. The concentrations of sulfuric acid and iron ions in the solution were determined by titrimetric analysis. Inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy was used to determine the concentrations of bismuth, tungsten, molybdenum, copper, silver, and arsenic

in the solution, as well as the content of bismuth, tungsten, molybdenum, copper, arsenic, lead, and iron and sulfur forms in the cake. The cake was also examined using diffraction analysis. Experiments on cyanidation of oxidized cake were carried out in the pH range of 10.0–10.5 and a NaCN concentration of 1 g/dm³ with a PuroliteS992 ion exchange resin for 24 h. Autoclave oxidation experiments showed the sulfide oxidation degree to be higher than 99%. Extraction of molybdenum into solution in the form of $[\text{MoO}_2(\text{SO}_4)_n]^{-(2n-2)}$ and MoO_2^{2+} amounted to 95%. The decrease in the solid mass led to an increase in the concentration of bismuth and tungsten in the cake, with their contents reaching 1.66% and 12.7%, respectively. The main phases in the cake were established to be scheelite, anhydrite, plumbogargosite, and bedanite. The extraction of precious metals at the subsequent cyanidation stage amounted to 97.5% of gold and 91.6% of silver. Therefore, autoclave cyanide processing of sulfide gold-containing concentrates leads to a molybdenum extraction in the autoclave oxidation solution at the level of 95%. During cyanidation, more than 90% of gold and silver are extracted. Due to the significant amount of tungsten (17%), bismuth (0.9%), lead (5.3%), and molybdenum (3.3%), the obtained cake cannot be considered a waste product.

Keywords: pressure oxidation, sulfide concentrates, gold, tungsten, molybdenum, non-ferrous metals, cyanidation

For citation: Epiforov A.V., Balikov S.V., Shipnigov A.A. Element behavior during autoclave oxidation of polymetallic sulfide flotation concentrate containing tungsten and molybdenum. *iPolytech Journal*. 2024;28(3):538-546. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-538-546>. EDN: LMRIUH.

ВВЕДЕНИЕ

Автоклавное окисление упорных сульфидных золотосодержащих концентратов является одним из наиболее эффективных методов переработки данного типа сырья. Этот процесс является высокопроизводительным и высокотехнологичным, что позволяет окислить любые сульфиды и вскрыть «упорное» золото за короткий промежуток времени, не прибегая к экстремально высоким температурам и исключая выбросы токсичных газов и пылей в окружающую среду [1].

Традиционные схемы автоклавной переработки золотосодержащих руд и концентратов включают их автоклавное окисление, сгущение окисленной пульпы, отмывку и защелачивание твердого окисленного остатка с последующим его цианированием для извлечения драгоценных металлов [2, 3]. В настоящее время в мире функционирует 21 предприятие, использующее процесс автоклавного окисления для переработки упорных золотосодержащих продуктов, основными сульфидами в которых являются пирит и арсенопирит. Однако существует множество месторождений первичных золотосодержащих руд, где помимо основных сульфидов железа и мышьяка содержатся различные минералы, которые зачастую представляют промышленную ценность и влекут необходимость в поиске технологических решений для их попутного и/или совместного извлечения [4, 5]. К таким попутным компонентам чаще всего относятся цветные металлы: медь, цинк, никель, кобальт и др. [6], реже

свинец, сурьма, олово⁴ [7, 8]. Существуют и более «экзотические» рудные продукты, которые содержат редкие и весьма ценные компоненты, например вольфрам, молибден, висмут, рений, уран, ванадий и др. [9, 10]. Данных о поведении этих элементов при автоклавном окислении сульфидных концентратов в информационном пространстве практически нет. Ввиду вышесказанного возникает необходимость в изучении этого вопроса и его научной проработке.

Целью настоящей работы являлось изучение поведения редких элементов (вольфрам, молибден, висмут), содержащихся в сульфидном золотосодержащем концентрате, в процессе автоклавного окисления. Данный концентрат является потенциальным сырьем для получения золота по автоклавной технологии, однако существует необходимость в определении возможности попутного извлечения сопутствующих ценных компонентов в товарную продукцию, что может принести дополнительную выгоду недропользователю и способствовать более рациональному использованию минерального сырья.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследований. Исследования по автоклавному окислению проведены на сульфидном флотационном концентрате, полученном из полиметаллической руды одного из месторождений РФ. Основным ценным компонентом в концентрате являлось золото, попутными – серебро, вольфрам, молибден, медь, висмут и свинец. Содержание основ-

⁴Дзгоев Ч.Т. Автоклавно-пирометаллургическая технология переработки золотосодержащих и свинцово-цинковых флотконцентратов: дис. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2016. 147 с.

Таблица 1. Содержание основных компонентов в концентрате**Table 1.** Content of main components in concentrate

г/т		Массовая доля элементов, %									
Au	Ag	W	Mo	Cu	Bi	Pb	As	S _(общ)	S _(сульфид)	Fe _(общ)	Fe _(сульфид)
22,1	133,2	2,7	13,0	0,5	0,7	1,1	3,4	30,2	30,0	25,2	20,25

ных компонентов концентрата представлено в табл. 1.

Качественный дифрактометрический XRD-анализ (от англ. X-ray diffraction analysis) показал, что в исследуемом концентрате вольфрам представлен шеелитом и молибдошеелитом, молибден – молибденитом, медь – халькопиритом, висмут – висмутином. Из сульфидов существенно преобладает пирит. Отмечается значимое содержание галенита и арсенопирита. Из нерудных минералов в незначительных количествах присутствуют карбонаты, флюорит, кварц, пироксены, гранаты.

Золото в исследуемом концентрате ассоциировано с сульфидами (пиритом, арсенопиритом), серебро – с галенитом. Ввиду этого концентрат являлся упорным к цианированию сырьем.

Методика экспериментов. Перед автоклавным окислением концентрат доизмельчали до $R_{95} = 0,045$ мм в шаровой мельнице. Столь тонкий помол был необходим для более полного окисления галенита, зерна которого могут пассивироваться в процессе автоклавного окисления пленкой нерастворимого сульфата свинца, которая препятствует доступу кислорода к поверхности непрореагировавшего сульфида.

Измельченный концентрат подвергали кислотной обработке раствором серной кислоты в лабораторном агитаторе до достижения pH пульпы 2. Пульпу после кислотной обработки переносили в лабораторный автоклав с рабочим объемом 2 дм³ и доводили до необходимого соотношения Ж:Т, рассчитанного из теплового баланса окисления сульфидов (9:1).

Автоклавное окисление проводили при температуре 220°C при парциальном давлении кислорода 0,7 МПа. Измерение давления внутри автоклава осуществляли при помощи цифрового и аналогового манометров. Для непрерывного измерения расхода кислорода и поддержания давления на заданном уровне автоклав оснащен системой «Bronkhorst» (Нидерланды).

Момент начала подачи кислорода принимали за начало опыта. Окончанием опыта по автоклавному окислению считали момент прекращения подачи кислорода. В ходе эксперимента с помощью системы непрерывного измерения расхода кислорода фиксировали общее давление в автоклаве и определяли расход кислорода (суммарный и текущий). По характеру зависимости расхода кислорода от времени определяли продолжительность и степень завершенности процесса окисления сульфидов. В начальный период окисления избыточное тепло отводили подачей охлаждающей воды во внутренний теплообменник автоклава.

После завершения процесса окисления пульпу в автоклаве остужали до 95°C и кондиционировали при атмосферном давлении в течение двух часов для разрушения основных сульфатов и перевода сульфатного железа в раствор (процесс «HotCure» [11]).

После кондиционирования окисленную пульпу фильтровали и промывали водой на фильтре. Кек сушили при комнатной температуре и взвешивали. В маточном растворе определяли концентрации серной кислоты, ионов двух- и трехвалентного железа титриметрическим методом, концентрации висмута, вольфрама, молибдена, меди, серебра и мышьяка – методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-AES от англ. inductively coupled plasma atomic emission spectrometry). Содержание в кек висмута, вольфрама, молибдена, меди, мышьяка и свинца, а также железа и серы (общую и окисленную формы) определяли ICP-AES анализом. Кроме того, фазовый состав кека определяли XRD-анализом.

По результатам анализов рассчитывали извлечение (распределение) ценных компонентов, а также степень окисления сульфидов, по которой оценивали эффективность автоклавного окисления.

Отмытый от серной кислоты и сульфатов кек после сушки подвергали нейтрализации и защелачиванию. Кек распульповывали во-

дой и в полученную пульпу подавали известь до достижения pH пульпы 10,0–10,5. После защелачивания в пульпу подавали цианид натрия до концентрации 1 г/дм³, ионообменную смолу «PuroliteS992» (7% об.) и проводили сорбционное цианирование в течение 24 ч. После окончания цианирования пульпу фильтровали, кек сушили, взвешивали и анализировали на содержание в ней ионов висмута, вольфрама, молибдена, свинца и меди ICP-AES анализом, на золото и серебро – пробирным анализом с ААС-окончанием. По результатам анализов рассчитывали извлечение ценных компонентов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Автоклавное окисление. На рис. 1 представлены кривые расхода кислорода в процессе автоклавного окисления.

Показано, что продолжительность окисления исследуемого концентрата составляет 20–21 мин. Расход кислорода – около 600 кг/т.

В табл. 2 представлены результаты анализа кек автоклавного окисления, в табл. 3 – результаты анализа полученного раствора. Результаты автоклавного окисления концентрата представлены в табл. 4.

Показано, что степень окисления флотоконцентрата составила более 99%. Извлечение молибдена в раствор составило 95% при его концентрации в маточном растворе 14,4 г/дм³. Остаточное содержание молибдена в кеке составило 3,8% при выходе кек лишь 19,5%.

Возможно, окисление молибденита в процессе сернокислотного автоклавного окисления протекает по реакции (1).

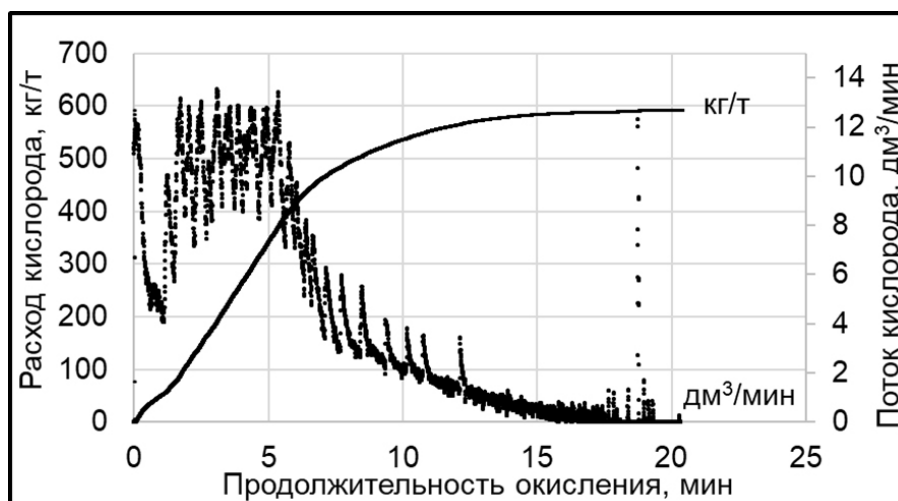


Рис. 1. Кривые расхода кислорода в процессе автоклавного окисления исследуемого концентрата

Fig. 1. Curves of oxygen consumption during studied concentrate pressure oxidation

Таблица 2. Содержание основных компонентов в кек автоклавного окисления

Table 2. Content of main components in pressure oxidation cake

Выход кек, %	Массовая доля в кек, %									
	Mo	W	Bi	Cu	Pb	As	Fe _(общ)	Fe _(сульфидн)	S _(общ)	S _(сульфидн)
19,5	3,8	12,7	1,7	0,01	3,4	2,4	17,1	0,9	5,7	0,7

Таблица 3. Содержание основных компонентов в растворе автоклавного окисления

Table 3. Content of main components in pressure oxidation solution

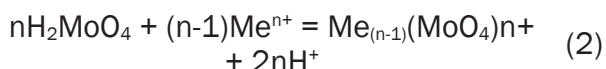
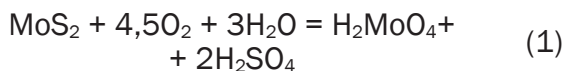
Концентрация в растворе, г/дм ³									Eh, мВ	pH
Mo	W	Cu	Bi	As	Ag, мг/дм ³	H ₂ SO ₄	Fe ³⁺	Fe ²⁺		
14,4	0,26	0,6	0,39	4,1	0,77	122,5	21,3	1,4	484	0,93

Таблица 4. Результаты автоклавного окисления концентрата

Table 4. Concentrate pressure oxidation results

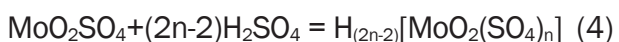
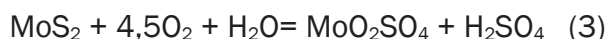
Степень окисления, %	Извлечение в раствор, %				
	Mo	W	Cu	Bi	Ag
99,6	95	0,14	99,3	45,1	5

Однако образующаяся молибденовая кислота обычно нестабильна в сернокислых растворах, содержащих ионы металлов, таких как Fe^{3+} , Fe^{2+} , Cu^{2+} и др. При этом молибден выпадает в осадок в виде молибдатов соответствующих металлов (Me), по уравнению (2):



Поэтому наиболее вероятными формами молибдена в растворе в данном случае будут комплексы молибденил-сульфата $[\text{MoO}_2(\text{SO}_4)_n]^{-(2n-2)}$ и молибденил-ион MoO_2^{2+} в составе MoO_2SO_4 [12, 13].

Молибденил-сульфат при автоклавном окислении молибденита может образовываться в соответствии с уравнением (3). При этом состояние молибдена в растворе характеризуется равновесием (4) и зависит от концентрации серной кислоты:



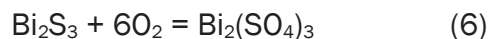
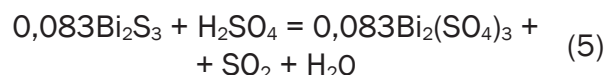
Дальнейшее извлечение молибдена из сернокислых растворов можно проводить ионным обменом [12].

Также при автоклавном окислении концентрата в раствор извлекается медь. Извлечение меди составило 99,3%. Концентрация меди в растворе – 600 мг/дм³. Для извлечения меди из автоклавных растворов можно использовать известные методы [14–16], в частности, сульфидное осаждение, жидкостную экстракцию и др.

Висмут также частично переходит в раствор автоклавного окисления (45%). При этом концентрация висмута в растворе составляет 390 мг/дм³. В то же время за счет сокращения массы твердой фазы происходило концентрирование висмута в кеках, где его содержание достигало 1,66%.

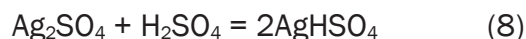
Наиболее вероятной формой висмута в сернокислых автоклавных растворах является сульфат висмута, который образуется при взаимодействии висмута с серной кислотой при температурах выше 100°C в соответствии с реакцией (5), а также при автоклав-

ном окислении висмута кислородом по реакции (6):



Для извлечения висмута из раствора можно применять сорбцию и, возможно, экстракцию [16, 17].

Кроме того, установлено, что в процессе автоклавного окисления в сернокислый раствор может переходить часть серебра (до 5%, 0,77 мг/дм³). Серебро в сильноокислых средах может образовывать сульфатные соединения в соответствии с реакциями (7) и (8) [18]:



Серебро, содержащееся в этой форме, можно извлечь химическим осаждением в виде хлорида серебра, цементацией или иным методом.

Следует отметить, что концентрация вольфрама в растворе автоклавного окисления составляла 0,26 мг/дм³, что соответствовало его извлечению в раствор 0,14%. Так как стандартные соединения вольфрама (вольфраматы, вольфрамовая кислота) являются нерастворимыми в сернокислых растворах, вероятно, в данном случае имело место образование более сложных комплексных соединений. Данный вопрос, а также вопрос извлечения вольфрама из растворов автоклавного окисления требует дальнейшей проработки.

По данным химического анализа содержание вольфрама в кеке автоклавного окисления составило 12,7%.

На рис. 2 представлен качественный состав кека по данным XRD-анализа (фрагмент дифрактограммы).

Показано, что основными фазами кека автоклавного окисления, имеющими кристаллическое строение, являются шеелит и ангидрит (сульфат кальция). По-видимому, ангидрит образовался при частичном растворении (выщелачивании) вольфрама из шеелита в процессе автоклавного окисления, при этом вольфрамат-ион заместился

⁵Марченко Н.В., Вершинина Е.П., Гильдебрандт Э.М. Металлургия тяжелых цветных: учеб. пособ. Красноярск: СФУ, 2009. 394 с.

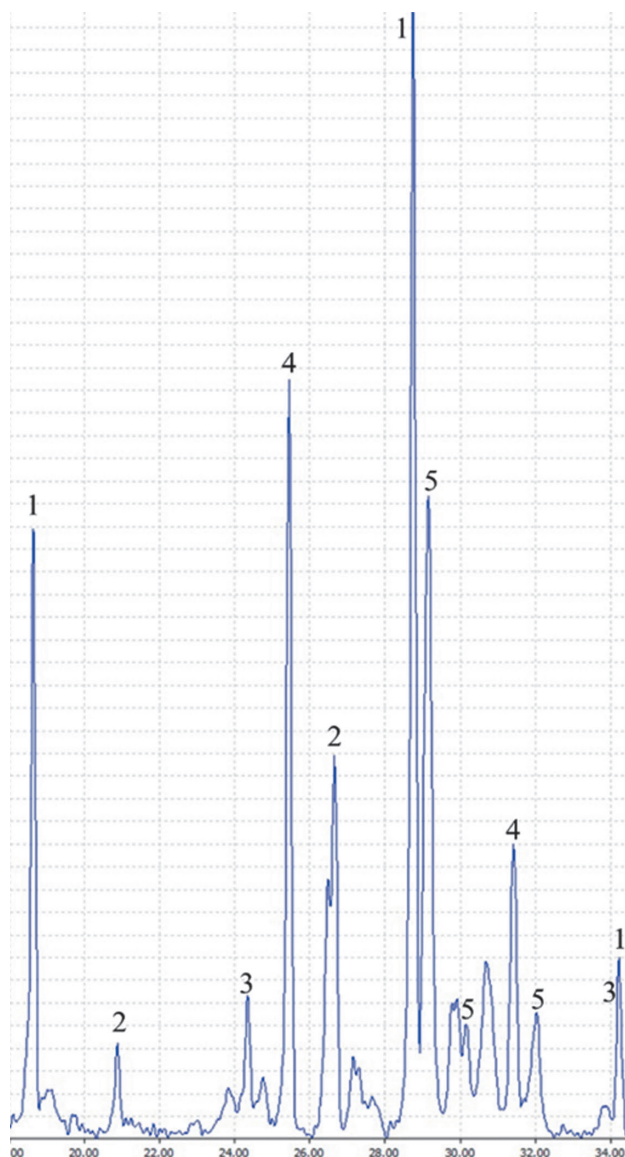


Рис. 2. Фрагмент дифрактограммы кека автоклавного окисления: 1 – CaWO_4 – шеелит; 2 – SiO_2 – кварц;

3 – $\text{Pb}(\text{Fe}_{2,54}\text{Al}_{0,46})(\text{As}_{1,07}\text{O}_4)(\text{S}_{0,93}\text{O}_4)(\text{OH})_6$ – бедантит; 4 – CaSO_4 – ангидрит; 5 – $\text{PbFe}_6(\text{SO}_4)_4(\text{OH})_{12}$ – плюмбоярозит

Fig. 2. A fragment of the X-ray diffraction pattern of pressure oxidation cake: 1 – CaWO_4 – scheelite; 2 – SiO_2 – quartz; 3 – $\text{Pb}(\text{Fe}_{2,54}\text{Al}_{0,46})(\text{As}_{1,07}\text{O}_4)(\text{S}_{0,93}\text{O}_4)(\text{OH})_6$ – beudantite; 4 – CaSO_4 – anhydrite; 5 – $\text{PbFe}_6(\text{SO}_4)_4(\text{OH})_{12}$ – plumbojarosite

на сульфат-ион с образованием малорастворимого сульфата кальция по реакции (9). Также наличие ангидрита можно объяснить разложением карбонатов кальция в сернокислой среде:



Кроме того, в кеке идентифицирован плюмбоярозит и мышьяковый плюмбоярозит (бедантит), которые образуются при взаимодействии сульфата свинца при гидролизе

сульфата железа (III) в процессе автоклавного окисления галенита и пирита, а также при гидролизе мышьяковой кислоты, полученной при окислении арсенопирита. Подробнее механизм образования данных продуктов описан в работе [19].

Содержание золота и серебра в кеке автоклавного окисления с учетом сокращения составляло 113,3 и 650,1 г/т соответственно. Извлечение драгоценных металлов сорбционным цианированием по технологии RIL («смола в выщелачивании») составило: Au – 97,5%, Ag – 91,6%.

Следует отметить, что данный уровень извлечения серебра является достаточно высоким для автоклавной технологии, так как серебро в процессе автоклавного окисления склонно взаимодействовать с сульфатом железа (III) с образованием упорного к цианированию аргентоярозита. Для извлечения серебра, связанного в ярозитную форму, необходимо использование специальных методов, например горячей известковой обработки кеков и др. [20].

По данным химического анализа кеков при цианировании в раствор может извлекаться до 46% Mo, 17% W, 66% Bi, 95% Cu. Затем эти компоненты могут частично сорбироваться на смолу, а также выпадать в осадок из раствора. Проанализировать данные продукты с приемлемой точностью на стадии лабораторных испытаний не представляется возможным ввиду малого количества материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованиями показано, что при переработке сульфидного золотосодержащего концентрата по автоклавно-цианистой схеме основная масса меди (99%) и молибдена (95%) извлекается в сернокислый раствор автоклавного окисления, основная масса золота и серебра (более 90%) – при цианировании.

Висмут и вольфрам практически «размываются» по технологическим продуктам, при этом за счет сокращения массы твердого в процессе переработки концентрата происходит концентрирование данных элементов в кеках цианирования. Также в кеках концентрируется свинец.

Таким образом, показано, что полученный в результате исследований продукт (кек RIL)

не является отвальным, так как содержит значительное количество ценных компонентов, основными из которых является вольфрам (17%), а также висмут (0,9%),

свинец (5,3%), молибден (3,3%). Для переработки данного продукта необходимо проводить дополнительные укрупненные исследования.

Список источников

1. Thomas K.G. Pressure oxidation overview // Developments in Mineral Processing. 2005. Vol. 15. P. 346–369. [https://doi.org/10.1016/S0167-4528\(05\)15015-7](https://doi.org/10.1016/S0167-4528(05)15015-7).
2. Баликов С.В., Гудков С.С., Емельянов Ю.Е., Богородский А.В., Епифоров А.В., Болдырев А.В., Дзгоев Ч.Т. Автоклавное окисление золотосодержащих руд и концентратов: монография. Иркутск: ОАО «Иргиредмет», 2016. 471 с.
3. Набойченко С.С., Шнеерсон Я.М., Калашникова М.И., Чугаев А.В. Автоклавно-гидрометаллургия цветных металлов. Екатеринбург: УПИ им. Б.Н. Ельцина, 2009. Т. 2. 612 с.
4. Ferron C.J. Recovery of gold as by-product from the base-metals industries // Gold Ore Processing. 2016. Chapt. 46. P. 831–856. [https://doi.org/10.1016/S0167-4528\(05\)15035-2](https://doi.org/10.1016/S0167-4528(05)15035-2).
5. Dreisinger D.B. Case study flowsheets: copper gold concentrate treatment // Gold Ore Processing. 2016. Chapt. 44. P. 803–820. [https://doi.org/10.1016/S0167-4528\(05\)15033-9](https://doi.org/10.1016/S0167-4528(05)15033-9).
6. Епифоров А.В., Богородский А.В., Баликов С.В., Емельянов Ю.Е., Копылова Н.В. Лабораторные исследования высокотемпературного автоклавного окисления полиметаллических золотосодержащих сульфидных концентратов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2012. № 1. С. 116–119. EDN: OOVJBZ.
7. Dzgoyev C.T., Yevtushevich I.I., Schtoick S.G., Yepiforov A.V., Gudkov S.S., Yemilianov Y.E., Balikov S.V. Pressure oxidation pyrometallurgical technology of gold-bearing and lead and zinc sulfide concentrates undergoing combined treatment // IMPC 2016 - 28TH International Mineral Processing Congress (Québec, 11–15 September 2016). Québec: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 2016. Paper № 801. EDN: YCALZJ.
8. Евтушевич И.И., Дзгоев Ч.Т., Епифоров А.В., Гудков С.С., Емельянов Ю.Е., Баликов С.В. Автоклавно-пирометаллургический способ переработки золотосодержащих и свинцово-цинковых концентратов // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Химия. 2017. Т. 10. № 1. С. 110–124. <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0011>. EDN: YMRZVZ.
9. Смирнов К.М., Молчанова Т.В., Ананьев А.В., Акимов И.Д., Овчаренко Е.В., Крылова О.К. Перспективная технология переработки комплексных урановых руд Эльконского месторождения // Атомная энергия. 2017. Т. 122. № 6. С. 309–314. EDN: YTDGZH.
10. Шаталов В.В., Пирковский С.А., Смирнов К.М. Окисление пирита кислородом и совместное выщелачивание урана из руды в условиях автогенного автоклавного процесса // Атомная энергия. 2007. Т. 102. № 2. С. 120–124. EDN: IWDRHX.
11. Fleming C.A. Basic iron sulphate – a potential killer for pressure oxidation processing of refractory gold concentrates if not handled appropriately // SGS Minerals Services. Technical Paper. 2009. № 6. Режим доступа: <https://www.sgs.ca/-/media/global/documents/technical-documents/sgs-technical-papers/sgs-min-tp2009-06-basic-iron-sulphate-in-pox-processing-of-refractory-gold.pdf> (дата обращения: 28.02.2024).
12. Бекбутаева Н.Н., Шарипов Х.Т., Лукомская Г.А., Бекбутаев А.Н., Ташалиев Ф.У., Сапаров А.Р. Извлечение молибдена из сернокислых маточных растворов после сорбции рения // Universum: технические науки. 2021. № 12. Режим доступа: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/12816> (дата обращения: 28.02.2024).
13. Бекбутаева Н.Н., Шарипов Х.Т., Лукомская Г.А., Бекбутаев А.Н., Ташалиев Ф.У. Извлечение молибдена из сернокислых маточных растворов после сорбции рения // Композитные материалы на основе техногенных отходов и местного сырья: состав, свойства и применение: материалы Междунар. науч.-техн. конф. (г. Ташкент, 16–17 сентября 2021 г.). Ташкент: Saydana-print, 2021. С. 84–86.
14. Епифоров А.В., Емельянов Ю.Е., Копылова Н.В., Шкетова Л.Е., Селезнев А.Н., Михайлова А.Н. [и др.]. Современные методы извлечения цветных металлов из технологических растворов // Анализ, добыча и переработка полезных ископаемых: сб. науч. тр. (посвящен 150-летию института Иргиредмет). Иркутск: АО «Иргиредмет», 2021. С. 185–212.
15. Михайлова А.Н., Файберг А.А., Дементьев В.Е., Минеев Г.Г., Бонч-Осмоловская Е.А. Получение биогенного сероводорода // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 1. С. 124–128. EDN: THNDUR.
16. Иванов В.М., Полянсков Р.А. Сорбция висмута (III) на силикагеле, модифицированном висмутолом I // Вестник Московского университета. Серия 2: Химия. 2006. Т. 47. № 6. С. 402–408.
17. Афзалетдинова Н.Г., Муринов Ю.И. Экстракция висмута дигексилсульфоксидом из азотнокислых растворов // Вестник Башкирского университета. 2018. № 3. С. 710–715. EDN: YOOWYX.
18. Епифоров А.В. Поведение золота и серебра в процессе автоклавного окисления сульфидных концентратов // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: материалы XXVIII Междунар. науч.-техн. конф. (г. Екатеринбург, 3–12 апреля 2023 г.). Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2023. С. 194–199.
19. Епифоров А.В. Химия высокотемпературного автоклавного окисления сульфидных концентратов // Современные технологии производства цветных металлов: материалы Междунар. науч. конф., посвящ. 80-летию

С.С. Набойченко (г. Екатеринбург, 24–25 марта 2022 г.). Екатеринбург: Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2022. С. 51–58.

20 Patent no. 6641642, United States of America, B2 C22B 3/08. High temperature pressure oxidation of ore and ore concentrates containing silver using controlled precipitation of sulfate species / J.C. Gathje, G.L. Simmons; Newmont USA Limited; no. 10/032,118. Filed 21.12.2001; publ. 04.11.2003.

References

1. Thomas K.G. Pressure oxidation overview. *Developments in Mineral Processing*. 2005;15:346-369. [https://doi.org/10.1016/S0167-4528\(05\)15015-7](https://doi.org/10.1016/S0167-4528(05)15015-7).
2. Balikov S.V., Gudkov S.S., Emel'yanov Yu.E., Bogorodskij A.V., Epiforov A.V., Boldyrev A.V., Dzgoev Ch.T. *Pressure oxidation of gold ores and concentrates*. Irkutsk: OAO «Irgiredmet»; 2016, 471 p. (In Russ.).
3. Nabojchenko S.S., Shneerson Ya.M., Kalashnikova M.I., Chugaev L.V. *Pressure hydrometallurgy of non-ferrous metals*. Ekaterinburg: *Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin*; 2009, vol. 2, 612 p. (In Russ.).
4. Ferron C.J. Recovery of gold as by-product from the base-metals industries. In: *Gold Ore Processing*. 2016;46:831-856. [https://doi.org/10.1016/S0167-4528\(05\)15035-2](https://doi.org/10.1016/S0167-4528(05)15035-2).
5. Dreisinger D.B. Case study flowsheets: copper gold concentrate treatment. In: *Gold Ore Processing*. 2016;44:803-820. [https://doi.org/10.1016/S0167-4528\(05\)15033-9](https://doi.org/10.1016/S0167-4528(05)15033-9).
6. Epiforov A.V., Bogorodskij A.V., Balikov S.V., Emel'yanov Yu.E., Kopylova N.V. Laboratory studies of high-temperature autoclave oxidation of polymetallic gold-bearing sulfide concentrates. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2012;1:116-119. (In Russ.). EDN: OOVJBZ.
7. Dzgoev C.T., Yevtushevich I.I., Schtoick S.G., Yepiforov A.V., Gudkov S.S., Yemilianov Y.E., Balikov S.V. Pressure oxidation pyrometallurgical technology of gold-bearing and lead and zinc sulfide concentrates undergoing combined treatment. In: *IMPC 2016 – 28TH International Mineral Processing Congress*. 11–15 September 2016, Québec. Québec: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum; 2016. Paper № 801. EDN: YCALZJ.
8. Evtushevich I.I., Dzgoev Ch.T., Epiforov A.V., Gudkov S.S., Emel'yanov Yu.E., Balikov S.V. Pox-pirometallurgical processing method for gold-bearing and lead-zinc concentrates. *Journal of Siberian Federal University. Chemistry*. 2017;10(1):110-124. <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0011>. EDN: YMRZVZ.
9. Smirnov K.M., Molchanova T.V., Anan'ev A.V., Akimova I.D., Ovcharenko E.V., Krylova O.K. Promising technology for reprocessing complex uranium ores from the Elkon deposit. *Atomic Energy*. 2017;122(6):309-314. (In Russ.). EDN: YTDGZH.
10. Shatalov V.V., Pirkovskij S.A., Smirnov K.M. Oxidation of pyrite by oxygen and concurrent leaching of uranium from ore under the conditions of an autogenous autoclave process. *Atomic Energy*. 2007;102(2):120-124. (In Russ.). EDN: IWDRHX.
11. Fleming C.A. Basic iron sulphate – a potential killer for pressure oxidation processing of refractory gold concentrates if not handled appropriately. *SGS Minerals Services. Technical Paper*. 2009;6. Available from: <https://www.sgs.ca/-/media/global/documents/technical-documents/sgs-technical-papers/sgs-min-tp2009-06-basic-iron-sulphate-in-pox-processing-of-refractory-gold.pdf> [Accessed 28th February 2024].
12. Bekbutaeva N.N., Sharipov H.T., Lukomskaya G.A., Bekbutaev A.N., Tashaliev F.U., Saparov A.R. Molybdenum extraction from sulfuric acid mother liquors after rhenium sorption. *Universum: tekhnicheskie nauki*. 2021;12. Available from: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/12816> [Accessed 28th February 2024]. (In Russ.).
13. Bekbutaeva N.N., Sharipov H.T., Lukomskaya G.A., Bekbutaev A.N., Tashaliev F.U. Molybdenum extraction from sulfuric acid mother liquors after rhenium sorption. In: *Kompozitnye materialy na osnove tekhnogennykh othodov i mestnogo syr'ya: sostav, svoystva i primeneniye: materialy mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii = Composite materials based on technogenic waste and local raw materials: composition, properties and application: materials of the International scientific and technical conference*. Tashkent, 16–17 September 2021. Tashkent: Saydana-print; 2021, p. 84-86. (In Russ.).
14. Epiforov A.V., Emelianov Yu.E., Kopylova N.V., Shketova L.E., Seleznev A.N., Mikhailova A.N., et al. Modern methods of non-ferrous metal extraction from technological solutions. *Analiz, dobycha i pererabotka poleznykh iskopayemykh: sbornik nauchnykh trudov (posvyashchen 150-letiyu instituta Irgiredmet) = Analysis, mining and processing of mineral resources: collected scientific papers (dedicated to the 150th anniversary of the Irgiredmet Institute)*. Irkutsk: "Irgiredmet"; 2021, p. 185-212. (In Russ.).
15. Mikhailova A.N., Faiberg A.A., Dementiev V.E., Mineev G.G., Bonch-Osmolovskaya E.A. Biogenic hydrogen sulfide production. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2015;1:124-128. (In Russ.). EDN: THNDUR.
16. Ivanov V.M., Polyanskov R.A. Sorption of bismuth(III) ions by bismuthol I immobilized on silica gel. *Moscow University Chemistry Bulletin*. 2006;47(6):402-408. (In Russ.).
17. Afzaletdinova N.G., Murinov Yu.I. Extraction of bismuth by digexilsulphoxide from nitric acid solutions. *Vestnik Bashkirskogo universiteta*. 2018;23(3):710-715. (In Russ.). EDN: YOOWYX.
18. Epiforov A.V. Behavior of gold and silver during pressure oxidation of sulfide concentrates/. In: *Nauchnye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogennogo syr'ya: materialy XXVIII Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii = Scientific principles and ore and technogenic raw material processing practice: materials of the 28th International scientific and technical conference*. 3–12 April 2023, Ekaterinburg. Ekaterinburg: Ural State Mining University; 2023, p. 194-199. (In Russ.).

19. Epiforov A.V. Chemistry of high-temperature autoclave oxidation of sulfide concentrates. In: *Sovremennye tekhnologii proizvodstva cvetnyh metallov: materialy Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii, posvyashchennoj 80-letiyu S.S. Nabojchenko = Modern technologies of non-ferrous metals production: materials of the International scientific conference dedicated to 80th anniversary of S.S. Nabojchenko*. 24–25 March 2022, Ekaterinburg: Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin; 2022, p. 51-58. (In Russ.).
20. Gathje J.C., Simmons G.L. *High temperature pressure oxidation of ore and ore concentrates containing silver using controlled precipitation of sulfate species*. Patent USA, no. 6641642; 2003.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**Епифоров Александр Владимирович,**

к.т.н.,
старший научный сотрудник лаборатории металлургии,
Иркутский научно-исследовательский институт
благородных и редких металлов и алмазов,
664025, г. Иркутск, Бульвар Гагарина, 38, Россия
✉ epiforov@irgiredmet.ru

Баликов Станислав Васильевич,

д.т.н.,
директор бизнес-центра,
главный научный сотрудник Иркутского
научно-исследовательского института
благородных и редких металлов и алмазов,
664025, г. Иркутск, бульвар Гагарина, 38, Россия
balikov@irgiredmet.ru

Шипнигов Антон Андреевич,

младший научный сотрудник лаборатории металлургии,
Иркутский научно-исследовательский институт
благородных и редких металлов и алмазов,
664025, г. Иркутск, Бульвар Гагарина, 38, Россия
shipn.anton@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**Alexander V. Epiforov,**

Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher of the Metallurgy Laboratory,
Irkutsk Research Institute of Precious
and Rare Metals and Diamonds,
38 Gagarin Blvd, Irkutsk 664025, Russia
✉ epiforov@irgiredmet.ru

Stanislav V. Balikov,

Dr. Sci. (Eng.),
Director of the Business Center,
Chief Researcher of Irkutsk Research Institute
of Precious and Rare Metals and Diamonds,
38 Gagarin Blvd, Irkutsk 664025, Russia
balikov@irgiredmet.ru

Anton A. Shipnigov,

Junior Researcher at the Metallurgy Laboratory,
Irkutsk Research Institute of Precious
and Rare Metals and Diamonds,
38 Gagarin Blvd, Irkutsk 664025, Russia
shipn.anton@yandex.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготов-
ку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный
вариант рукописи.*

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 02.07.2024 г.; одобрена
после рецензирования 30.07.2024 г.; принята к пу-
бликации 10.08.2024 г.

Authors' contribution

The authors contributed equally to the article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 02.07.2024; approved
after reviewing 30.07.2024; accepted for publication
10.08.2024.

МЕТАЛЛУРГИЯ

Научная статья

УДК 669.33:669.213.63:669.054.83

EDN: UYMDXG

DOI: 10.21285/1814-3520-2024-3-547-561



Гидротермальное осаждение меди из растворов выщелачивания металлургических пылей

А.А. Ковязин^{1✉}, К.Л. Тимофеев², Г.И. Мальцев³, С.А. Краюхин⁴

^{1,2}Акционерное общество «Уралэлектромедь», Верхняя Пышма, Россия

^{2,4}Технический университет Уральской горно-металлургической компании, Верхняя Пышма, Россия

³Институт металлургии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Резюме. Цель – выявление основных закономерностей гидротермального осаждения меди из ранее неизученных серно-азотнокислых и сульфатных растворов атмосферной и автоклавной переработки металлургических пылей. В качестве сульфидизатора использован пирит. Химический элементный состав продуктов определяли методами рентгенофлуоресцентной, атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой, а также атомно-абсорбционным анализом. Установлено, что осаждение меди по предлагаемой технологии позволяет достичь более 95%-го ее извлечения. Для сульфатных растворов с высокой концентрацией мышьяка предложена двухстадийная схема окислительно-гидротермальной обработки со следующими параметрами: температура 180°C, продолжительность 2 ч, расход кислорода 0,026 дм³/г пирита (для 1-й стадии), 200°C и 2 ч (для 2-й). Извлечение в кек составило 95,4% меди (в виде Cu₂S) и 91,4% мышьяка (в виде FeAsO₄), что позволило в дальнейшем разделить данные металлы флотацией. При автоклавной обработке Cu-Zn-Fe-As-NO₃⁻ раствора в присутствии пирита при 180–220°C получены значения энергии активации (кДж/моль), отвечающие кинетическому режиму, рассчитанные по двум методикам: 64,6 (по классической), 60,5 (по модели сжимающегося ядра). Также определены кинетические параметры систем CuSO₄-H₂SO₄-FeS₂-H₂O и CuNO₃-H₂SO₄-FeS₂-H₂O. Показано, что при флотационном обогащении кеков автоклавного осаждения меди достигается высокая степень разделения Cu и As; извлечение, %, составило: Cu > 95%, As – < 5. Драгоценные металлы из пирита переходят во флотоконцентрат на 92,7% (Au) и 96,5% (Ag). Определен состав получаемого флотоконцентрата, %: 12 Cu; 37 Fe; 38 S; 13 прочие. Показано, что получение более кондиционного по меди продукта возможно при разделении флотоконцентрата на пиритный и медный концентраты и проведении дополнительной флотации первичного медного концентрата в щелочной среде с добавлением извести. Таким образом, выявлены основные закономерности гидротермального осаждения меди из серно-азотнокислых и сульфатных растворов атмосферной и автоклавной переработки металлургических пылей.

Ключевые слова: гидрометаллургия меди, раствор, кек, автоклав, осаждение, мышьяк, концентрат

Для цитирования: Ковязин А.А., Тимофеев К.Л., Мальцев Г.И., Краюхин С.А. Гидротермальное осаждение меди из растворов выщелачивания металлургических пылей // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 3. С. 547–561. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-547-561>. EDN: UYMDXG

METALLURGY

Original article

Hydrothermal precipitation of copper from leaching solutions of metallurgical dusts

Anton A. Kovyazin^{1✉}, Konstantin L. Timofeev², Gennady I. Maltsev³,
Sergey A. Krayukhin⁴

^{1,2}Joint Stock Company Uralelectromed, Verkhnyaya Pyshma, Russia

^{2,4}Technical University of the Ural Mining and Metallurgical Company, Verkhnyaya Pyshma, Russia

³Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the RAS, Yekaterinburg, Russia

Abstract. In this work, we aim to establish the main regularities of hydrothermal precipitation of copper from the previously unstudied sulfuric-nitric acid and sulfate solutions of atmospheric and autoclave processing of metallurgical dusts. Pyrite was used as a sulfidizer. The elemental composition of the products was determined by X-ray fluorescence, inductively coupled plasma atomic emission spectrometry, and atomic absorption analysis.

It was found that copper precipitation by the proposed technology enables its recovery at a level of more than 95%. For sulfate solutions with a high arsenic concentration, a two-stage scheme of oxidation-hydrothermal treatment with the following parameters was proposed: temperature 180°C, duration 2 h, oxygen consumption 0.026 dm³/g pyrite (for the 1st stage), and 200°C and 2 h (for the 2nd stage). Extraction in the cake amounted to 95.4% of copper (in the form of Cu₂S) and 91.4% of arsenic (in the form of FeAsO₄), which allowed further separation of these metals by flotation. An autoclave treatment of a Cu–Zn–Fe–As–NO₃ solution in the presence of pyrite at 180–220°C produced the activation energy values (kJ/mol) corresponding to the kinetic regime calculated by the two methods: 64.6 by the conventional method and 60.5 by the shrinking core model. The kinetic parameters of CuSO₄–H₂SO₄–FeS₂–H₂O and CuNO₃–H₂SO₄–FeS₂–H₂O systems were also determined. Flotation enrichment of copper autoclave precipitation cake was shown to result in a high degree of Cu and As separation, with the recovery amounting to Cu > 95% and As < 5%. Precious metals contained in pyrite are transferred to a flotation concentrate by 92.7% (Au) and 96.5% (Ag). The composition of the resulting flotation concentrate comprised (%): 12 Cu; 37 Fe; 38 S; 13 other elements. It is shown that, in order to obtain a product with the required content of copper, flotation concentrate should be separated into pyrite and copper concentrates followed by an additional flotation of primary copper concentrate in an alkaline medium in the presence of lime. Hence, our study has established the main regularities of hydrothermal precipitation of copper from the sulfuric-nitric acid and sulfate solutions of atmospheric and autoclave processing of metallurgical dusts.

Keywords: copper hydrometallurgy, solution, cake, autoclave, deposition, arsenic, concentrate

For citation: Kovyazin A.A., Timofeev K.L., Maltsev G.I., Krayukhin S.A. Hydrothermal precipitation of copper from leaching solutions of metallurgical dusts. *iPolytech Journal*. 2024;28(2):547-561. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-547-561>. EDN: UYMDXG.

ВВЕДЕНИЕ

При работе медеплавильных печей образуется большое количество тонкодисперсной пыли, улавливаемой специальными аппаратами, работающими по схемам сухой или мокрой газоочистки [1–3]. Высокая экологическая опасность полиметаллических отходов требует специальной и дорогостоящей их дезактивации, что удорожает процесс захоронения [4–6]. Целесообразным решением проблемы утилизации металлургических отходов представляется их комплексная переработка, чему посвящены многочисленные поиски направлений, методов и конструктивных решений на специализированных предприятиях [7–9]. В состав тонкой пыли медеплавильных предприятий входят цинк, медь, свинец, представляющие практический интерес для последующего их использования в металлургических переделах, и мышьяк, требующий извлечения и перевода в малотоксичные формы [10–12]. Для переработки полиметаллических промпродуктов используют различные физико-химические процессы – пирометаллургические (плавка в шахтных, отражательных, вращающихся и электропечах) [13–15], гидрометаллургические (кислотное, солевое, щелочное, бактериальное выщелачивание, использование органических растворителей) [16–18], электрохимические (электролиз) [19–21], обладающие кроме достоинств еще и недостатками: ограничениями по исходному составу сырья; сравнительно большим рас-

ходом топлива и электроэнергии; высокой запыленностью газов, требующей применения сложной системы пылеулавливания; необходимостью утилизации сульфат-ионов из больших объемов растворов выщелачивания; потерями дорогостоящих реагентов при регенерации растворов; выделением газообразных продуктов реакции.

Авторами настоящей работы [16, 22] разработаны технологические схемы переработки пылей различного состава, %: 10–12 Zn; 11–13 Pb; 8–15 Cu; 12–14 Fe; 5–10 As, позволяющие количественно (92–95%) извлечь цинк и медь в раствор, а свинец оставить в нерастворимом остатке. Для переработки пылей предлагаются технологии автоклавного и атмосферного выщелачивания, в том числе в смешанных сульфатно-нитратных растворах. Предложена технологическая схема переработки металлургической пыли серно-азотнокислым раствором с получением свинцового концентрата и растворов сложного состава (рис. 1), в которых присутствуют медь, цинк, мышьяк, а также сульфат- и нитрат-ионы. Селективное извлечение меди из данных растворов с последующим переводом мышьяка в малотоксичный продукт представляет научный и технологический интерес.

Технологии электрохимического [23, 24], сорбционного [25, 26] и экстракционного [27, 28] извлечения чистой меди из растворов обладают рядом недостатков, среди которых:

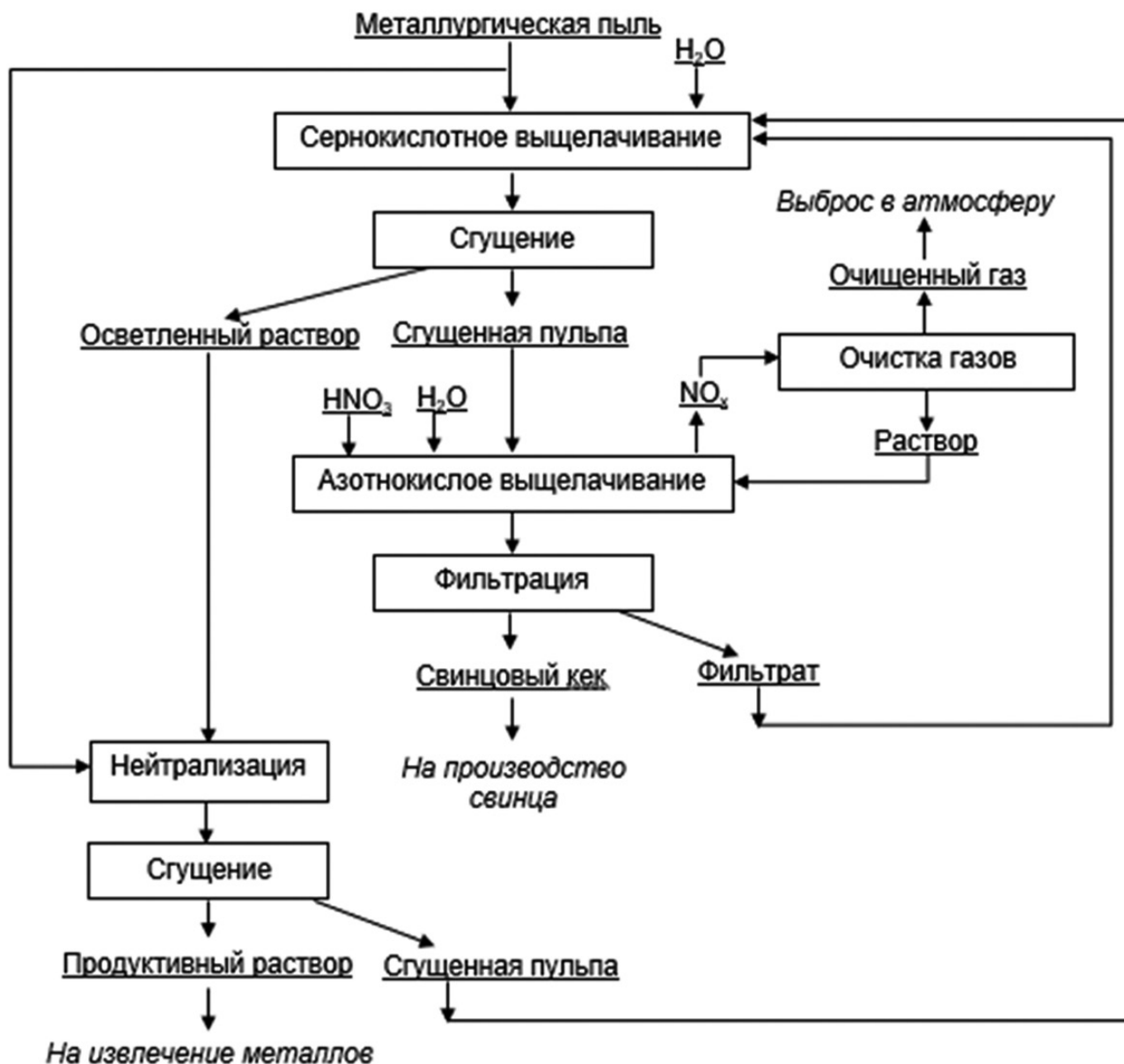


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема серно-азотнокислого выщелачивания металлургических пылей
Fig. 1. Process flow diagram of sulphuric-nitric acid leaching of metallurgical dusts

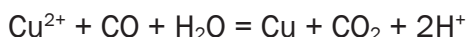
- низкая селективность;
- внесение с реагентами дополнительных примесей;
- многостадийность и сложность аппаратного оформления отдельных переделов.

Альтернативой указанных методов являются различные способы ее химического восстановления из растворов с последующим осаждением.

Цементация меди. Осаждение на железе – наиболее распространенный и простой способ [29, 30]. На практике используют железный лом, обезлуженную консервную жесть, жестяную обрезь, губчатое железо. Тяжелый скрап (рельсы, плиты, трубы, отлив-

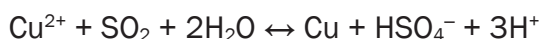
ки и другое), несмотря на низкую стоимость, практически не применяется в связи с малой реакционной поверхностью. При достаточной технологичности и рентабельности не получается товарная по чистоте медь, что требует ее дальнейшей переработки. Получение качественного осадка (90% Cu) с приемлемыми технико-экономическими показателями возможно только из чистых и богатых по меди растворов высокосортным осадителем при тщательном технологическом контроле процесса. Цементация на железосодержащих осадителях практически неприемлема для богатых мышьяком растворов из-за выделения ядовитого арсина (H_2As).

Автоклавное осаждение меди газообразными восстановителями (водород, монооксид углерода, сернистый газ). $T \geq 150^\circ\text{C}$ и избыточное давление ($P \geq 0,7$ МПа) газов-восстановителей обеспечивают высокую скорость селективного выделения меди с весьма высокой скоростью. Повышение производительности позволяет сократить производственные площади, снизить трудовые затраты, регулировать качество конечного продукта (порошка). Водород применяется в широком диапазоне pH, не загрязняет раствор примесями. К недостаткам следует отнести повышенную взрыво- и пожароопасность. Для регулирования размера частиц осадка в раствор добавляют медный порошок или полиакриламид: с увеличением количества «затравки» дисперсность порошка металла возрастает [31, 32]. Осаждение меди из серноокислых растворов при восстановлении монооксидом углерода:



Скорость восстановления ионов Cu^{2+} оксидом углерода ниже, чем водородом. Недостатком восстановителя является его токсичность; преимущество метода – в малом материально- и энергоемкости процесса, высокой селективности, позволяющей отделить медь от никеля, кобальта, железа и серы в одном технологическом цикле [33, 34].

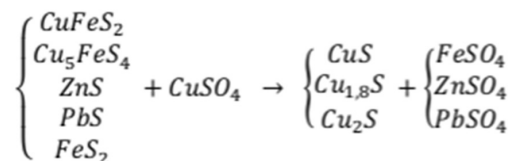
Восстановление меди сернистым ангидридом протекает по реакции:



При наличии сернистого ангидрида термодинамически устойчивой фазой является только металлическая медь, за исключением случаев низкого парциального давления SO_2 и высокой концентрации ионов HSO_4^- или SO_4^{2-} . Восстановление возможно при $\text{pH} = 0-2$. В интервале $\text{pH} = 3-5$, наряду с медью, может осажаться закись меди, восстановление которой затруднительно вследствие низких кинетических характеристик [35, 36].

Перспективным представляется гидротермальное осаждение (ГТО), позволяющее получать медьсодержащий продукт, пригодный к переработке в плавке на штейн. Гидротермальное осаждение осуществляется посредством комплекса обменных реакций

с участием Cu^{2+} и сульфидов, которые происходят в автоклавных условиях при температурах выше 150°C и давлении выше 0,6 МПа:



В результате исходные минералы, первичные сульфиды (халькопирит, борнит) переходят в форму вторичных сульфидов (ковеллин, дигенит, халькозин) в составе кека, а в растворе концентрируются железо и цинк. К достоинствам ГТО относится использование пиритных хвостов, получаемых в процессе флотационного обогащения медных и медно-цинковых сульфидных руд. Вовлечение последних позволяет, наряду с эффективным осаждением меди, доизвлекать из них ассоциированные драгоценные металлы [37, 38].

Цель выполненного исследования – выявление основных закономерностей гидротермального осаждения меди из растворов атмосферного и автоклавного серноокислотного выщелачивания металлургических пылей и ранее не изучавшихся серно-азотнокислых растворов с последующим выделением медного концентрата, пригодного для пирометаллургической переработки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования служили:

– растворы выщелачивания металлургических пылей состава с содержанием г/дм³ после:

а) автоклавного выщелачивания: 10 Cu; 15 Zn; 3 Fe;

б) серноокислотного выщелачивания: 8,2 Cu; 21,8 Zn; 3,1 Fe; 16,3 As; 50 H₂SO₄;

в) серно-азотнокислого выщелачивания: 10 Cu; 15 As; 50 H₂SO₄; 5 HNO₃;

– сульфидизатор – пирит фракции – 0,071 мм с содержанием 98% основного вещества следующего состава, %: 47–57 S; 39,9–50,3 Fe; 2,1–7,7 O; 0,5–0,6 Si; 0,2–0,3 Mg; 0,3–0,5 Al.

Эксперименты проводили в автоклаве: температура составляла 180–220 °C; давление кислорода $P(\text{O}_2) = 0-0,8$ МПа; без пирита и с пиритом при Ж:Т = 6:12; без добавки поверхностно-активных веществ (ПАВ)

и с лигносульфонатом; продолжительность $\tau = 1-2$ ч; интенсивность перемешивания $V = 70$ рад·с⁻¹. Растворы автоклавного выщелачивания практически не содержали мышьяк ($< 0,5$ г/дм³).

Полученные после автоклавного выщелачивания и осаждения растворы и кеки анализировали на элементный и фазовый составы. Использованы аттестованные физико-химические методы: рентгеновской спектроскопии (рентгеновский дифрактометр EDX-7000, Shimadzu), атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (Agilent 5800), атомно-абсорбционного анализа (анализатор novAA 300).

Для анализа скорости и константы скорости процесса осаждения меди использовали:

- классическое уравнение:

$$dC/d\tau = k(C_{исх} - C_{\tau}), \quad (1)$$

где $dC/d\tau$ – скорость осаждения меди; k – константа скорости, с⁻¹; $C_{исх}$, C_{τ} – концентрация меди исходная и на момент времени τ ;

- уравнение модели сжимающегося ядра:

$$k \cdot \tau = 1 - (1 - \alpha)^{1/3}, \quad (2)$$

где α – степень осаждения меди.

Энергию активации (E , Дж/моль) определяли по уравнению Аррениуса:

$$E = [R \cdot \ln(k_2/k_1) \cdot T_1 \cdot T_2] / (T_2 - T_1), \quad (3)$$

где k_1 и k_2 – константы скорости при температуре T_1 и T_2 ; R – газовая постоянная.

При графическом способе определения энергии активации в координатах « $\ln k - 1/T$ » получается прямая линия, тангенс угла наклона которой, рассчитанный по отношению катетов треугольника, равен:

$$\text{tg} \gamma = E/R. \quad (4)$$

Количественно процесс осаждения меди описывали по методу начальных скоростей следующими уравнениями:

$$\omega_c = d\alpha/d\tau = K_c \cdot S \cdot C_o^n; \quad (5)$$

$$\omega_v = d\alpha/d\tau = K_v \cdot S \cdot V^p, \quad (6)$$

где скорость осаждения меди ($\omega_{c,v}$, с⁻¹) при τ (с), концентрации реагента (C_o , моль/дм³), скорости перемешивания пульпы (V , рад·с⁻¹); константе скорости реакции ($K_{c,v}$) при изменении соответствующего параметра; поверхность дисперсной фазы (S , дм²); порядок реакции по концентрации реагента (n_c); кажущийся «порядок реакции» (p_v).

Значения n_c , p_v определяют по уравнениям:

$$n_c = \Delta \lg \omega / \Delta \lg C_{o(V,T)}; \quad (7)$$

$$p_v = \Delta \lg \omega / \Delta \lg V. \quad (8)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Осаждение меди из раствора автоклавной переработки металлургической пыли.

При обработке раствора автоклавного выщелачивания без добавления пирита получили осадок красного цвета, содержащего гидролизованное железо. Для оценки степени соосаждения меди с осадком железа и эффективности использования сульфидизатора при ГТО проведены эксперименты с добавлением пирита и без него при базовых значениях параметров: $T = 180^\circ\text{C}$; Ж:Т = 12 (пирит/медь = 8,3 г/г); $V = 70$ рад·с⁻¹, $\tau = 1$ ч (табл. 1).

Установлено, что в интервале температур $150-220^\circ\text{C}$ введение в систему пирита повысило степень осаждения меди с 1,5–4,5% до 7,3–82,3%. В растворе без сульфидизатора железо осаждается на 13,5–25,8% в виде гидроксида и основного сульфата, при наличии пирита извлечение железа в раствор составило до 8%.

Показано, что уменьшение Ж:Т до 6 (пирит/медь = 16,6 г/г), добавление ПАВ для удаления с поверхности частиц дисперсной фазы элементной серы, механическая активация поверхности пирита и увеличение продолжительности процесса при $T = 180^\circ\text{C}$

Таблица 1. Показатели процесса осаждения металлов без сульфидизатора и с пиритом
Table 1. Indicators of the sulphidizer-free metal deposition process with pyrite

T, °C	Осаждения металлов без сульфидизатора/с пиритом, %		
	Cu	Fe	Содержание Cu в кеке, %
150	1,5/7,3	13,5/–	6,3/0,87
180	2,3/26,3	15,4/–	10,7/3,06
200	3,3/56,1	17,8/–	15,3/6,31
220	4,5/82,3	25,8/–	20,4/8,99

увеличивают степень осаждения меди на 1,8–22,7% и снижают содержание меди в кеке до 1,39% по сравнению с базовым вариантом (табл. 2).

В результате установлено, что для растворов автоклавного выщелачивания при отсутствии мышьяка в растворах (содержание As до 0,5 г/дм³) оптимальным является проведение операции осаждения меди при температуре 220 °С, Ж:Т = 6:1, в течение 2 ч, при данных параметрах осаждение меди из раствора составило 96% при содержании меди в кеке 5,2%. Анализ фазового состава кека после автоклавного осаждения меди без использования ПАВ выявил присутствие CuS, Cu₂S, Cu_{1,84}S, Fe₂O₃, SiO₂. Значимого количества серы элементной не обнаружено; медь представлена сульфидами меди (I), (II); железо присутствует в виде непрореагировавшего пирита, часть – в виде гидролизованного или окисленного железа (III).

Осаждение меди из раствора автоклавной переработки металлургической пыли. Растворы сернокислотного выщелачивания с высоким содержанием мышьяка (16,3 г/дм³ As), в отличие от автоклавного, обрабатывали пиритом при $T = 200\text{--}220\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P(\text{O}_2) = 0\text{--}0,8\text{ МПа}$, пирит/медь = 12,5–25 г/г (табл. 3).

Увеличение соотношения пирит/медь, г/г: 12,5–25 ($T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$); 12,5–25 ($T = 220\text{ }^{\circ}\text{C}$), повышает степень осаждения меди, %: 31,9–55,7; 32,1–92,4 соответственно. Мышьяк осаждается пропорционально извлечению

меди из раствора. Концентрация меди в растворе снизилась с 8,2 до 0,5 г/дм³, содержание меди в осадке возросло с 0,6 до 4,5%. При добавлении кислорода в диапазоне 0,3–0,8 МПа степень осаждения меди снижается в интервале 32,1–8,9%, в то время как извлечение мышьяка в форме арсената железа (III) увеличивается в диапазоне 3,9–27,8%.

Для разделения меди и мышьяка предложено двухстадийное осаждение в режимах автоклавного окислительного выщелачивания и гидротермальной обработки в одном аппарате, что значительно снижает расходы на охлаждение и нагрев автоклава и исключает промежуточную фильтрацию. На первой стадии предусмотрено окисление пирита с переводом железа в раствор, для осаждения мышьяка в виде арсената железа FeAsO₄ при молярном соотношении Fe:As = 4:1. На второй стадии при гидротермальной обработке осаждают медь в виде сульфида на поверхности пирита.

Параметры первой стадии – окислительное выщелачивание: $T = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$; $P(\text{O}_2) = 1,0\text{ МПа}$; FeS₂/Cu = 12,5 г/г. После окончания первой стадии избыток давления удаляется из автоклава. Параметры второй стадии – гидротермальное осаждение: $T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\tau = 120\text{ мин}$. Проведены эксперименты с продолжительностью первой стадии 15 и 120 мин. Пробы отбирали по окончании первой стадии и через 60 мин после начала второй (табл. 4).

Таблица 2. Показатели процесса осаждения меди с пиритом

Table 2. Indicators of the copper deposition process with pyrite

Показатель процесса	Параметр процесса				
	Базовый (180 °С)	Ж:Т = 6:1	Добавка ПАВ	Механическая активация	$\tau = 2\text{ ч}$
Осаждение Cu, %	26,3	49,0	32,8	28,1	29,5
Содержание Cu в кеке, %	3,06	1,39	2,42	2,78	2,64

Таблица 3. Результаты гидротермального осаждения и автоклавной обработки

Table 3. Results of hydrothermal deposition and pressure treatment

Параметры			Осаждение Cu/As, %	Извлечение Fe в раствор, %
T, °C	P(O ₂), МПа	FeS ₂ /Cu, г/г		
200	0	12,5	31,9/33,1	10,2
		20	51,4/41,1	3,5
		25	55,7/44,9	2,4
220	0,3	12,5	32,1/3,9	44,4
	0,8		8,9/27,8	40,2
	0		76,3/10,6	16,5
		15,0	92,4/25,3	13,6

Таблица 4. Состав растворов при двухстадийной обработке
Table 4. Solution composition under two-stage treatment

1 стадия – 15 мин	Содержание, г/дм ³				1 стадия – 120 мин	Содержание, г/дм ³			
	Cu	Fe	Zn	As		Cu	Fe	Zn	As
Исходный раствор	8,2	3,1	21,8	16,3	Исходный раствор	8,2	3,1	21,8	16,3
Проба 15 мин	8,0	7,4	20,9	9,5	Проба 120 мин	8,5	21,7	21,1	3,1
2 стадия (ГТО)					2 стадия (ГТО)				
Проба 60 мин	6,7	18,1	21,2	4,5	Проба 60 мин	7,1	25,6	21,6	2,9
Фильтрат 120 мин	3,5	19,7	21,1	1,4	Фильтрат 120 мин	5,1	23,8	21,3	0,8

На первой стадии выщелачивания окисляется основная масса пирита, создавая дефицит сульфидного реагента для гидротермального осаждения меди. Продолжительность выщелачивания практически не влияет на концентрацию меди в растворе (8,0–8,5 г/дм³), но значительно снижает концентрацию мышьяка: с 16,3 г/дм³ до 9,5–3,1 г/дм³.

При последующей гидротермальной обработке концентрация мышьяка продолжает снижаться с 9,5 г/дм³ до 4,5–1,4 г/дм³ (τ = 15 мин) и с 3,1 г/дм³ до 2,9–0,8 г/дм³ (τ = 120 мин) через 60 и 120 мин соответственно. Осаждение мышьяка на стадии ГТО, вероятно, связано с продолжением реакции образования арсената железа в растворе из окисленных соединений железа (III) и мышьяка (V).

Высокая остаточная концентрация меди (3,5–5,1 г/дм³) после ГТО обусловлена недостатком сульфидов и пассивацией их поверхности, на которой происходит осаждение. Для количественного двухстадийного выделения меди на непрореагировавшем пирите и мышьяка использовали кислород в количестве 0,025–0,045 дм³/г от загружаемого пирита (FeS₂/Cu = 12,5 г/г). Параметры проведения первой/второй стадий: T = 180/200 °C; P(O₂) = 0,5/0 МПа; τ = 120/120 мин приведены в табл. 5, на рис. 2 кривые 1, 3.

При повышении удельного расхода кислорода в интервале 0,025–0,045 дм³/г степень осаждения меди/мышьяка изменяется в диапазоне, %: 95,4–79,5 и 91,4–98,6 соответственно. При увеличении удельной загрузки пирита FeS₂/Cu = 15 г/г при расходе кислорода 0,025–0,03 дм³/г степень извлечения

(%) меди/мышьяка повышается до 95,7–92,9/96,5–97,4 (рис. 2, кривые 2, 4). За счет увеличения количества загружаемого пирита снижается содержание меди в кеке и ее концентрация в пенном продукте, что сокращает варианты вовлечения флотационного продукта в существующие технологии переработки.

Состав кека, полученного при двухстадийном осаждении меди, %, следующий: 39,6–46,2 Fe; 3,9–8,3 Cu; 5,7–8,1 As. Фазовый состав кека представлен пиритом, сульфидами меди, арсенатом железа. Присутствуют частицы пирита с высоким содержанием примесей, %: 26,9 Cu; 9,0 As,

Извлечение, %

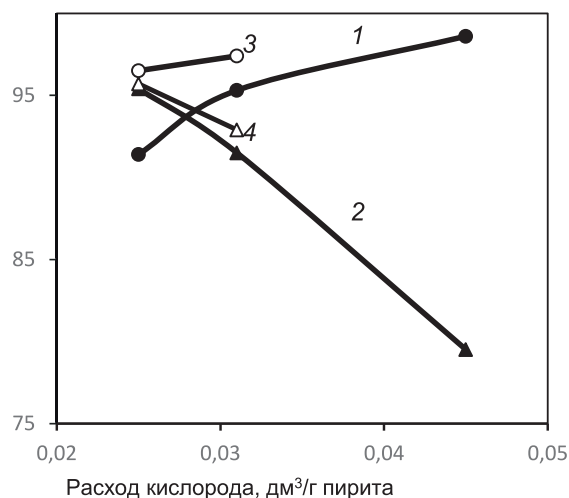


Рис. 2. Зависимость извлечения в кек мышьяка (1, 3) и меди (2, 4) от удельного расхода кислорода при FeS₂/Cu, г/г: 12,5 (1, 2); 15 (3, 4)

Fig. 2. Dependence of arsenic (1, 3) and copper (2, 4) extraction into cake on specific oxygen consumption at FeS₂/Cu, g/g: 12.5 (1, 2); 15 (3, 4)

Таблица 5. Результаты двухстадийной обработки раствора после ГТО
Table 5. Solution two-stage treatment results after hydrothermal deposition

Расход O ₂ , дм ³ /г	Осаждение Cu/As, %	Выход кека, %	Состав кека/фильтрата, % / г/дм ³		
			Cu	Fe	As
0,025	95,4/91,4	117,6	5,2/0,3	17,1/10,2	5,7/1,2
0,031	91,5/95,3	119,6	5,1/0,6	17,6/9,0	7,9/0,7
0,045	79,5/98,6	112,8	3,9/1,4	18,0/7,8	8,1/0,2

образующиеся при соосаждении мышьяка, что ухудшает качество получаемого медного продукта и снижает степень разделения меди и мышьяка из металлургической пыли.

Осаждение меди из раствора автоклавной переработки металлургической пыли.

Для получения кондиционного медного концентрата металлургические пыли перерабатывают в серно-азотнокислых растворах, в которые переходят медь, мышьяк, цинк с их последующим разделением ГТО в автоклаве. В растворах выщелачивания часть мышьяка (V) и железа (III) уже окислены, а присутствие нитрат-ионов позволит получить необходимый избыток железа в растворе при окислении пирита для осаждения мышьяка в форме FeAsO_4 , с максимальным разделением мышьяка и меди, ранее перешедшими в раствор.

Различают две стадии процесса, связанные с окислением пирита, интенсивным осаждением меди как на поверхности пирита, так и на поверхности образующихся соединений (9), (10), продолжением взаимодействия меди с сульфидными минералами и осаждением сульфида меди (I) (11):

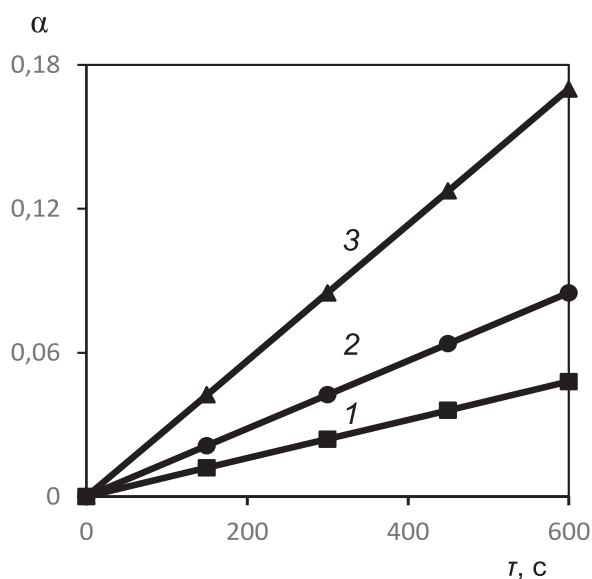
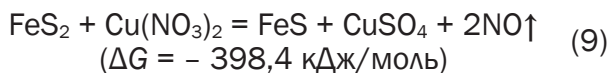
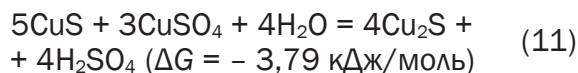


Рис. 3. Зависимость степени осаждения меди от продолжительности при температуре, °C: 180 (1); 200 (2); 220 (3)

Fig. 3. Dependence of the copper deposition degree on duration at temperature, °C: 180° (1); 200° (2); 220° (3)



Для системы состава, г/дм³: 10 Cu; 50 H₂SO₄; 5 NO₃⁻, с параметрами $V = 70 \text{ рад}\cdot\text{с}^{-1}$, $T = 180\text{--}220^\circ\text{C}$, загрузка пирита 15 г/г меди изучена зависимость степени осаждения меди от продолжительности процесса (рис. 3).

Энергия активации (кДж/моль), рассчитанная по различным методикам, составила 64,6 (по классической) и 60,5 (по методике сжимающегося ядра), см. рис. 4. Это соответствует кинетическому режиму осаждения меди.

При базовом варианте системы ($V = 70 \text{ рад}\cdot\text{с}^{-1}$, $T = 220^\circ\text{C}$) использовался раствор следующего состава, г/дм³: 10 Cu; 50 H₂SO₄; 5 NO₃⁻; изучена зависимость степени осаждения меди во времени от концентрации кислот и интенсивности перемешивания с соответствующими кинетическими параметрами (табл. 6).

Увеличение концентрации минеральных кислот в растворах выщелачивания снижает скорость осаждения меди, вследствие чего значения порядка реакции по H₂SO₄/HNO₃ отрицательные: $-n_c = 0,113/0,377$. Вероятная причина – интенсификация окисления пирита, что приводит к недостатку сульфидизатора для осаждения сульфида меди. Исходя из абсолютной величины порядка реакции, негативное воздействие азотной кислоты на скорость осаждения меди ($d\alpha/dt = 3,36 \cdot 10^{-4}$

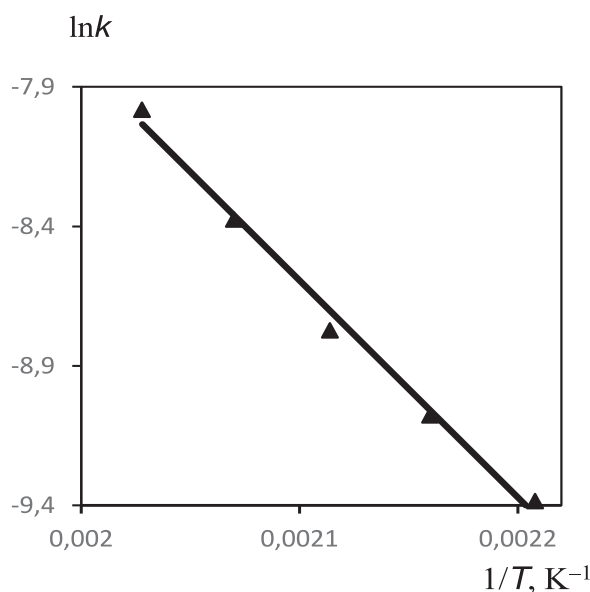


Рис. 4. Зависимость константы скорости осаждения меди от температуры по классической модели

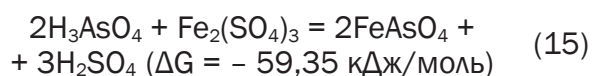
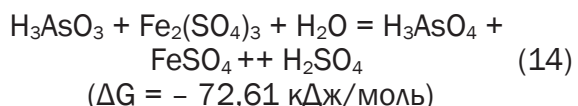
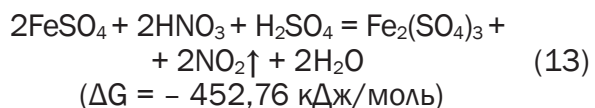
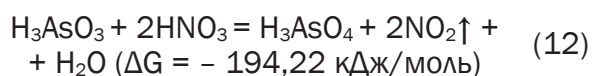
Fig. 4. Dependence of the copper deposition rate constant on temperature according to the classical model

Таблица 6. Показатели процесса осаждения меди при различных параметрах
Table 6. Indicators of the copper deposition process at various parameters

H ₂ SO ₄ , моль/дм ³	dα/dt, с ⁻¹	S, дм ²	n _c	C _o ⁿ	K _c , дм/моль·с
1,2	2,872·10 ⁻⁴	16,8	-0,113	0,98	1,745·10 ⁻⁵
0,8	3,007·10 ⁻⁴			1,026	
0,3	3,359·10 ⁻⁴			1,146	
HNO ₃ , моль/дм ³	dα/dt, с ⁻¹		n _c	C _o ⁿ	K _c , дм/моль·с
0,32	1,993·10 ⁻⁴		-0,377	1,537	7,72·10 ⁻⁶
0,16	2,589·10 ⁻⁴			1,995	
0,08	3,359·10 ⁻⁴			2,591	
V, рад·с ⁻¹	dα/dt, с ⁻¹		p _v	V ^p	K _v , 1/рад·дм ²
30	2,999·10 ⁻⁴		0,134	1,577	1,132·10 ⁻⁵
50	3,211·10 ⁻⁴			1,689	
70	3,359·10 ⁻⁴			1,767	

– 1,99·10⁻⁴ с⁻¹) превалирует над серной кислотой (dα/dt = 3,36·10⁻⁴ – 2,87·10⁻⁴ с⁻¹). Положительное влияние скорости перемешивания пульпы при V = 30–70 рад·с⁻¹ по количественным показателям (p_v = 0,134; dα/dt = 1,99·10⁻⁴ – 3,36·10⁻⁴ с⁻¹) соизмеримо с воздействием концентрации электролитов в растворах осаждения меди.

При автоклавном осаждении меди из растворов серной и азотной кислот возможно протекание попутных реакций:



Реакции с участием нитрат-иона происходят в начальный период с образованием NO (9), (10), что подтверждается низким содержанием азота в растворах (N < 100 мг/дм³) при T = 220 °С, поскольку NO имеет низкую растворимость в воде (0,01 г/100 г H₂O), в отличие от NO₂, который в ней растворяется.

Состав кека автоклавного осаждения меди (99,8%) и мышьяка (98,5%) из серно-азотнокислых растворов, %: 5,2–6,0 Cu; 39,9–43,2 Fe; 4,8–6,2 As. Сульфиды меди осаждаются на поверхности частиц пирита, мышьяк входит в состав сульфидов и арсената железа.

Для извлечения меди предложена флотация коллективного сульфидного концентрата из пульпы автоклавного осаждения меди со следующими параметрами: pH пульпы 0,5–2; расход реагентов, г/т: 250 – бутиловый ксантогенат калия; 80 – масло сосновое флотационное (табл. 7).

Пенный продукт разделяют на концентраты – медный и оборотный пиритный, что позволяет максимально использовать сульфидную серу и улучшить качество медного концентрата. Извлечение мышьяка в коллективный концентрат составило не более 5%; переход драгоценных металлов из пирита во флотоконцентрат, %: 92,7 Au; 96,5 Ag. Для разделения концентратов (медного и пиритного) проводят флотацию в щелочной области (pH = 11) с добавлением извести в качестве регулятора среды. Предварительно материал обрабатывают в шаровой мельнице для разрушения сростков сульфида меди и пирита. В результате флотационного разделения получен медный концентрат следующего состава, %: 22–27 Cu; 30–35 Fe. Данный продукт является сортовым концентратом (КМЗ-4) для пирометаллургической пере-

Таблица 7. Результаты флотационного обогащения
Table 7. Flotation concentration results

Выход пенного продукта, %	Извлечение в пенный продукт, %			Состав концентрата, %		
	Cu	Fe	S	Cu	Fe	S
65,8	96	70	85	12	37,4	38,9

работки. Обратный пиритный концентрат содержит сульфат кальция, увеличивающий массу продукта, однако на стадии флотационного обогащения в кислой среде данная примесь выводится с хвостами флотации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Гидротермальное осаждение меди в автоклавах является эффективным методом извлечения ценного компонента из поликомпонентных растворов выщелачивания металлургических пылей.

Осаждение меди гидротермальным взаимодействием с пиритом при оптимальных параметрах ($T = 220^\circ\text{C}$; $\tau = 2$ ч, соотношение пирит/медь = 15 г/г) позволяет извлекать более 95% меди из различных по составу растворов.

Для растворов сернокислотного выщелачивания с высокой концентрацией мышьяка предложена двухстадийная схема окислительно-гидротермальной обработки с параметрами: 1 стадия – $T = 180^\circ\text{C}$, $\tau = 2$ ч; расход кислород/пирит = 0,026 дм³/г; 2 стадия – $T = 200^\circ\text{C}$, $\tau = 2$ ч. Извлечение в раствор (%) медь/мышьяк составило 95,4/91,4. Осаждение меди и мышьяка происходит в форме сульфида меди (I) и арсената железа, соответственно, что позволяет разделить Cu и As при последующей флотации.

Растворы серно-азотнокислого выщелачивания представлены сложной системой с арсенат-, арсенит- и нитрат-ионами. Гидротермальная обработка с добавлением пирита сопровождается реакцией восстановления нитрат-ионов до NO и NO₂. При автоклавной обработке многокомпонентного Cu-Zn-Fe-As-NO₃⁻ раствора в присутствии пи-

рита при $T = 180\text{--}220^\circ\text{C}$ по двум методикам проведен расчет энергии активации, значения которой (кДж/моль) составили: 64,6 (при классической) и 60,5 (по методике сжимающегося ядра), что соответствует кинетическому режиму осаждения меди.

Впервые определены кинетические параметры систем CuSO₄-H₂SO₄-FeS₂-H₂O и CuNO₃-H₂SO₄-FeS₂-H₂O. Установлено, что увеличение концентрации минеральных кислот в растворах выщелачивания снижает скорость осаждения меди, вследствие чего значения порядка реакции по H₂SO₄/HNO₃ отрицательные: $-n_c = 0,113/0,377$. Исходя из абсолютной величины порядка реакции, негативное воздействие азотной кислоты на скорость осаждения меди ($d\alpha/dt = 3,36 \cdot 10^{-4} - 1,99 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$) превалирует над действием серной кислоты ($d\alpha/dt = 3,36 \cdot 10^{-4} - 2,87 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$). Положительное влияние скорости перемешивания пульпы при $V = 30\text{--}70 \text{ рад c}^{-1}$ по количественным показателям ($p_v = 0,134$; $d\alpha/dt = 1,99 \cdot 10^{-4} - 3,36 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$) соизмеримо с воздействием концентрации электролитов в Cu-растворах.

При флотационном обогащении кеков автоклавного осаждения меди получена высокая селективность Cu/As при флотации в кислой области (pH = 0,5–2,0) непосредственно после выгрузки из автоклава. Извлечение составило, %: > 95 Cu; < 5 As; 70 Fe. Драгоценные металлы из пирита переходят во флотоконцентрат, %: 92,7 Au, 96,5 Ag. Состав первичного концентрата, %: 12 Cu; 35 Fe, 37 S. При дополнительной флотации данного концентрата возможно получение сортового медного концентрата (KM-3,4) состава, %: 22–27 Cu; 30–35 Fe, 34–36 S.

Список источников

1. Lee Ji-Hyeon, Han Kyu-Sung, Hwang Kwang-Taek, Kim Jin-Ho. Recycling of steelmaking electric arc furnace dust into aqueous cyan ceramic ink for inkjet printing process and its printability // *Ceramics International*. 2021. Vol. 47. Iss. 12. P. 16964–16971. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.03.005>.
2. Omran M., Fabritius T. Effect of steelmaking dust characteristics on suitable recycling process determining: Ferrochrome converter (CRC) and electric arc furnace (EAF) dusts // *Powder Technology*. 2017. Vol. 308. P. 47–60. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.11.049>.
3. Yang Lingzhi, Hu Hang, Wang Mengxian, Chen Feng, Wang Shuai, Guo Yufeng, et al. Comparative life cycle assessment and techno-economic analysis of electric arc furnace steelmaking processes integrated with solar energy system // *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 425. P. 138868. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138868>.
4. Elkribi-Boukhris S., Boughattas I., Sappin-Didier V., Helaoui S., Coriou C., Bussiere S., et al. Exposure to polymetallic contaminated sites induced toxicological effects on chicken lungs: a multi-level analysis // *Chemosphere*. 2024. Vol. 354. P. 141574. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141574>.
5. Chen Zhen-yu, Zhao Yuan-yi, Chen Dan-li, Huang Hai-tao, Zhao Yu, Wu Yu-jing. Ecological risk assessment and early warning of heavy metal cumulation in the soils near the Luanchuan molybdenum polymetallic mine concentration

- area, Henan Province, central China // *China Geology*. 2023. Vol. 6. Iss. 1. P. 15–26. <https://doi.org/10.31035/cg2023003>.
6. Xiaohui Zhang, Kang Tian, Yimin Wang, Wenyu Hu, Benle Liu, Xuyin Yuan, et al. Identification of sources and their potential health risk of potential toxic elements in soils from a mercury-thallium polymetallic mining area in Southwest China: Insight from mercury isotopes and PMF model // *Science of The Total Environment*. 2023. Vol. 869. P. 161774. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161774>.
7. Xu Xianqing, Guo Zhengqi, Zhu Deqing, Pan Jian, Yang Congcong, Li Siwei. Application of coal-based direct reduction-magnetic separation process for recycling of high-iron-content non-ferrous metallurgical wastes: challenges and opportunities // *Process Safety and Environmental Protection*. 2024. Vol. 183. P. 59–76. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.12.057>.
8. Wang Xuchao, Ding Chengyi, Long Hongming, Wu Yuxi, Jiang Feng, Chang Rende, et al. A novel approach to treating nickel-containing electroplating sludge by solidification with basic metallurgical solid waste // *Journal of Materials Research and Technology*. 2023. Vol. 27. P. 3644–3654. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.10.132>.
9. Ray A.R., Mishra S. Hydro metallurgical technique as better option for the recovery of rare earths from mine tailings and industrial wastes // *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. 2023. Vol. 36. P. 101311. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101311>.
10. Li Qingzhu, Lai Xinting, Liu Zhenxing, Chai Fei, Zhao Feiping, Peng Cong, et al. Thiourea-assisted selective removal of arsenic from copper smelting flue dusts in NaOH solution // *Hydrometallurgy*. 2024. Vol. 224. P. 106246. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106246>.
11. Che Jianyong, Zhang Wenjuan, Ma Baozhong, Chen Yongqiang, Wang Ling, Wang Chengyan. A shortcut approach for cooperative disposal of flue dust and waste acid from copper smelting: decontamination of arsenic-bearing waste and recovery of metals // *Science of The Total Environment*. 2022. Vol. 843. P. 157063. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157063>.
12. Shi Tengfeng, Xu Baoqiang, He Jilin, Liu Xinyang, Zuo Zibin. Arsenic release pathway and the interaction principle among major species in vacuum sulfide reduction roasting of copper smelting flue dust // *Environmental Pollution*. 2023. Vol. 330. P. 121809. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121809>.
13. Niu Wenquan, Li Yan, Li Qiang, Wang Jingsong, Wang Guang, Zuo Haibin, et al. Physical and chemical properties of metallurgical coke and its evolution in the blast furnace ironmaking process // *Fuel*. 2024. Vol. 366. P. 131277. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131277>.
14. Hongjie Yan, Huanyu Xie, Wenyan Zheng, Liu Liu. Numerical simulation of combustion and melting process in an aluminum melting furnace: A study on optimizing stacking mode // *Applied Thermal Engineering*. 2024. Vol. 245. P. 122840. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4524736>.
15. Pashchenko D., Karpilov I., Polyakov M., Popov S.K. Techno-economic evaluation of a thermochemical waste-heat recuperation system for industrial furnace application: operating cost analysis // *Energy*. 2024. Vol. 295. P. 131040. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131040>.
16. Набойченко С.С., Ковязин А.А., Тимофеев К.Л., Краюхин С.А. Переработка металлургических пылей в сульфатно-азотнокислых средах // *Цветные металлы*. 2020. № 11. С. 19–23. <https://doi.org/10.17580/tsm.2020.11.03>. EDN: TSBAOP.
17. Zhang Jiarun, Liu Zhiyong, Liu Zhihong. An efficient and affordable hydrometallurgical process for co-treatment of copper smelting dust and arsenic sulfide residue // *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 419. 137955. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137955>.
18. Ettler V., Raus K., Mihaljevič M., Křibek B., Vaněk A., Penížek V., et al. Bioaccessible metals in dust materials from non-sulfide Zn deposit and related hydrometallurgical operation // *Chemosphere*. 2023. Vol. 345. P. 140498. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140498>.
19. Rong Tao, Yuan Yaqiang, Yang Haoqing, Yu Huafang, Zuo Haibin, Wang Jingsong, et al. Investigation of the enrichment-purification process and electrochemical performance of kish graphite in dust from blast furnace tapping yard // *Waste Management*. 2024. Vol. 175. P. 121–132. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.12.055>.
20. Wu Xiao-bin, Zhu Zeng-li, Kong Hui, Fan You-qi, Cheng Si-wei, Hua Zhong-sheng. Electrochemical reduction mechanism of Zn^{2+} in molten NaCl–KCl eutectic // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2022. Vol. 32. Iss. 9. P. 3088–3098. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(22\)66005-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(22)66005-9).
21. Liu Xinxin, Wu Fenghui, Qu Guangfei, Zhang Ting, He Minjie. Recycling and reutilization of smelting dust as a secondary resource: a review // *Journal of Environmental Management*. 2023. Vol. 347. P. 119228. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119228>.
22. Kovyazin A., Timofeev K., Krauhin S. Copper smelting fine dust autoclave leaching // *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 946. P. 615–620. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.946.615>.
23. Song Qingming, Xia Qinyi, Yuan Xuehong, Xu Zhenming. Multi-metal electrochemical response mechanism for direct copper recovery from waste printed circuit boards via sulfate- and chloride-system electrolysis // *Resources, Conservation and Recycling*. 2023. Vol. 190. P. 106804. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106804>.
24. Zhou Yongfang, Yi Shen, Li Hongying. Electro-oxidation of 5-hydroxymethylfurfural by a catalyst containing copper nanoparticles and single copper atoms // *Materials Today Catalysis*. 2024. Vol. 4. P. 100041. <https://doi.org/10.1016/j.mtcata.2024.100041>.
25. Kalita N., Baruah P.P. Copper removal efficacy and stress tolerance potential of *Leptolyngbya* sp. GUEco1015 // *Heliyon*. 2024. Vol. 10. Iss. 8. P. e29131. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29131>.

26. Padilla J.T., Watts D.W., Szogi A.A., Johnson M.G. Evaluation of a pH- and time-dependent model for the sorption of heavy metal cations by poultry litter-derived biochar // *Chemosphere*. 2024. Vol. 347. P. 140688. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140688>.
27. Youcef M.H., Reffas H., Benabdallah T. Comparative study on extraction of copper(II) cations from highly saline media using 2-((phenylimino)methyl)phenol chelating mono-Schiff base /kerosene as novel extractant system // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021. Vol. 9. Iss. 6. P. 106351. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106351>.
28. Pouyan M., Rounaghi G.H., Deiminiat B. Development of a fabric phase sorptive extraction method using ethylenediamine tetra-acetic acid modifier for quantitative determination and elimination of Pb^{2+} , Cu^{2+} and Zn^{2+} cations in real sample solutions // *Microchemical Journal*. 2024. Vol. 198. P. 110119. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.110119>.
29. Максимов В.В., Логинова А.Ю. Обзор основных химических методов извлечения в гидрометаллургии меди // Приоритетные научные направления: от теории к практике. 2013. № 7. С. 123–129. EDN: R DYQUT.
30. Granata G., Tsendorj U., Liu Wenying, Tokoro C. Direct recovery of copper nanoparticles from leach pad drainage by surfactant-assisted cementation with iron powder // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2019. Vol. 580. P. 123719. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.123719>.
31. Sun Kai, Shao Yuewen, Ming Cong, Fan Mengjiao, Fan Huailin, Zhang Lijun, et al. Copper-based catalysts synthesized during hydrogenation // *Chemical Engineering Science*. 2023. Vol. 276. P. 118819. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.118819>.
32. Sadou M., Saadi A., Meliani M.H., Suleiman R.K., Saleh T.A. Facile preparation of supported copper-modified SBA-15 catalysts for efficient benzaldehyde hydrogenation // *Surfaces and Interfaces*. 2022. Vol. 30. P. 101955. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2022.101955>.
33. Ji Yali, Guan Anxiang, Zheng Gengfeng. Copper-based catalysts for electrochemical carbon monoxide reduction // *Cell Reports Physical Science*. 2022. Vol. 3. Iss. 10. P. 101072. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2022.101072>.
34. Cao Guoqiang, Deskins N.A., Yi Nan. Carbon monoxide oxidation over copper and nitrogen modified titanium dioxide // *Applied Catalysis B: Environmental*. 2021. Vol. 285. P. 119748. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2020.119748>.
35. Chang Jie, Li Dong, Zhang Lei, Qin Hong, Ren Xingting, Feng Demao, et al. Efficient reductive leaching of valuable elements from oxygen pressure leaching residue of high-grade nickel matte within sulfur dioxide // *Chemical Engineering Journal*. 2024. Vol. 483. P. 149295. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.149295>.
36. Ding Ran, Zhang Bing, Yang Le, Ma Tao, Gang Dong, Mao Yue-Yuan, et al. Copper catalyst-promoted regioselective multicomponent cascade cyclization of 3-aza-1,5-enynes with sulfur dioxide and cycloketone oxime esters to access cyanoalkylsulfonated 1,2-dihydropyridines // *The Journal of Organic Chemistry*. 2024. Vol. 89. Iss. 3. P. 1515–1523. <https://doi.org/10.1021/acs.joc.3c02117>.
37. Teli A.M., Beknalkar S.A., Mane S.M., Chaudhary L.S., Patil D.S., Pawar S.A., et al. Facile hydrothermal deposition of copper-nickel sulfide nanostructures on nickel foam for enhanced electrochemical performance and kinetics of charge storage // *Applied Surface Science*. 2022. Vol. 571. P. 151336. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.151336>.
38. Rodríguez-Hernández P.E., Quiñones Galván J.G., Meléndez-Lira M., Santos-Cruz J., Contreras-Puente G., Guillén-Cervantes A., et al. Amorphous copper sulfide films deposited by pulsed laser deposition using pellets as target // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2021. Vol. 555. P. 120532. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.120532>.

References

1. Lee Ji-Hyeon, Han Kyu-Sung, Hwang Kwang-Taek, Kim Jin-Ho. Recycling of steelmaking electric arc furnace dust into aqueous cyan ceramic ink for inkjet printing process and its printability. *Ceramics International*. 2021;47(12):16964-16971. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.03.005>.
2. Omran M., Fabritius T. Effect of steelmaking dust characteristics on suitable recycling process determining: Ferrochrome converter (CRC) and electric arc furnace (EAF) dusts. *Powder Technology*. 2017;308:47-60. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.11.049>.
3. Yang Lingzhi, Hu Hang, Wang Mengxian, Chen Feng, Wang Shuai, Guo Yufeng, et al. Comparative life cycle assessment and techno-economic analysis of electric arc furnace steelmaking processes integrated with solar energy system. *Journal of Cleaner Production*. 2023;425:138868. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138868>.
4. Elkribi-Boukhris S., Boughattas I., Sappin-Didier V., Helaoui S., Coriou C., Bussiere S., et al. Exposure to polymetallic contaminated sites induced toxicological effects on chicken lungs: a multi-level analysis. *Chemosphere*. 2024;354:141574. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141574>.
5. Chen Zhen-yu, Zhao Yuan-yi, Chen Dan-li, Huang Hai-tao, Zhao Yu, Wu Yu-jing. Ecological risk assessment and early warning of heavy metal cumulation in the soils near the Luanchuan molybdenum polymetallic mine concentration area, Henan Province, central China. *China Geology*. 2023;6(1):15-26. <https://doi.org/10.31035/cg2023003>.
6. Xiaohui Zhang, Kang Tian, Yimin Wang, Wenyou Hu, Benle Liu, Xuyin Yuan, et al. Identification of sources and their potential health risk of potential toxic elements in soils from a mercury-thallium polymetallic mining area in Southwest China: Insight from mercury isotopes and PMF model. *Science of The Total Environment*. 2023;869:161774. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161774>.

7. Xu Xianqing, Guo Zhengqi, Zhu Deqing, Pan Jian, Yang Congcong, Li Siwei. Application of coal-based direct reduction-magnetic separation process for recycling of high-iron-content non-ferrous metallurgical wastes: challenges and opportunities // *Process Safety and Environmental Protection*. 2024;183:59-76. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.12.057>.
8. Wang Xuchao, Ding Chengyi, Long Hongming, Wu Yuxi, Jiang Feng, Chang Rende, et al. A novel approach to treating nickel-containing electroplating sludge by solidification with basic metallurgical solid waste. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;27:3644-3654. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.10.132>.
9. Ray A.R., Mishra S. Hydro metallurgical technique as better option for the recovery of rare earths from mine tailings and industrial wastes. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. 2023;36:101311. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101311>.
10. Li Qingzhu, Lai Xinting, Liu Zhenxing, Chai Fei, Zhao Feiping, Peng Cong, et al. Thiourea-assisted selective removal of arsenic from copper smelting flue dusts in NaOH solution. *Hydrometallurgy*. 2024;224:106246. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106246>.
11. Che Jianyong, Zhang Wenjuan, Ma Baozhong, Chen Yongqiang, Wang Ling, Wang Chengyan. A shortcut approach for cooperative disposal of flue dust and waste acid from copper smelting: decontamination of arsenic-bearing waste and recovery of metals. *Science of The Total Environment*. 2022;843:157063. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157063>.
12. Shi Tengting, Xu Baoqiang, He Jilin, Liu Xinyang, Zuo Zibin. Arsenic release pathway and the interaction principle among major species in vacuum sulfide reduction roasting of copper smelting flue dust. *Environmental Pollution*. 2023;330:121809. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121809>.
13. Niu Wenquan, Li Yan, Li Qiang, Wang Jingsong, Wang Guang, Zuo Haibin, et al. Physical and chemical properties of metallurgical coke and its evolution in the blast furnace ironmaking process. *Fuel*. 2024;366:131277. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131277>.
14. Hongjie Yan, Huanyu Xie, Wenyan Zheng, Liu Liu. Numerical simulation of combustion and melting process in an aluminum melting furnace: A study on optimizing stacking mode. *Applied Thermal Engineering*. 2024;245:122840. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4524736>.
15. Pashchenko D., Karpilov I., Polyakov M., Popov S.K. Techno-economic evaluation of a thermochemical waste-heat recuperation system for industrial furnace application: operating cost analysis. *Energy*. 2024;295:131040. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131040>.
16. Naboychenko S.S., Kovyazin A.A., Timofeev K.L., Krayukhin S.A. Processing of metallurgical dusts in sulfate-nitrate solutions. *Tsvetnye Metally*. 2020;11:19-23. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2020.11.03>. EDN: TSBAOP.
17. Zhang Jiarun, Liu Zhiyong, Liu Zhihong. An efficient and affordable hydrometallurgical process for co-treatment of copper smelting dust and arsenic sulfide residue. *Journal of Cleaner Production*. 2023;419:137955. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137955>.
18. Ettler V., Raus K., Mihaljevič M., Kříbek B., Vaněk A., Penížek V., et al. Bioaccessible metals in dust materials from non-sulfide Zn deposit and related hydrometallurgical operation. *Chemosphere*. 2023;345:140498. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140498>.
19. Rong Tao, Yuan Yaqiang, Yang Haoqing, Yu Huafang, Zuo Haibin, Wang Jingsong, et al. Investigation of the enrichment-purification process and electrochemical performance of kish graphite in dust from blast furnace tapping yard. *Waste Management*. 2024;175:121-132. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.12.055>.
20. Wu Xiao-bin, Zhu Zeng-li, Kong Hui, Fan You-qi, Cheng Si-wei, Hua Zhong-sheng. Electrochemical reduction mechanism of Zn^{2+} in molten NaCl-KCl eutectic. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2022;32(9):3088-3098. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(22\)66005-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(22)66005-9).
21. Liu Xinxin, Wu Fenghui, Qu Guangfei, Zhang Ting, He Minjie. Recycling and reutilization of smelting dust as a secondary resource: a review. *Journal of Environmental Management*. 2023;347:119228. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119228>.
22. Kovyazin A., Timofeev K., Krauhin S. Copper smelting fine dust autoclave leaching. *Materials Science Forum*. 2019;946:615-620. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.946.615>.
23. Song Qingming, Xia Qinyi, Yuan Xuehong, Xu Zhenming. Multi-metal electrochemical response mechanism for direct copper recovery from waste printed circuit boards via sulfate- and chloride-system electrolysis. *Resources, Conservation and Recycling*. 2023;190:106804. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106804>.
24. Zhou Yongfang, Yi Shen, Li Hongying. Electro-oxidation of 5-hydroxymethylfurfural by a catalyst containing copper nanoparticles and single copper atoms. *Materials Today Catalysis*. 2024;4:100041. <https://doi.org/10.1016/j.mtcata.2024.100041>.
25. Kalita N., Baruah P.P. Copper removal efficacy and stress tolerance potential of *Leptolyngbya* sp. GUeco1015. *Heliyon*. 2024;10(8):e29131. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29131>.
26. Padilla J.T., Watts D.W., Szogi A.A., Johnson M.G. Evaluation of a pH- and time-dependent model for the sorption of heavy metal cations by poultry litter-derived biochar. *Chemosphere*. 2024;347:140688. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140688>.
27. Youcef M.H., Reffas H., Benabdallah T. Comparative study on extraction of copper (II) cations from highly saline media using 2-((phenylimino)methyl) phenol chelating mono-Schiff base /kerosene as novel extractant system. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021;9(6):106351. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106351>.

28. Pouyan M., Rounaghi G.H., Deiminat B. Development of a fabric phase sorptive extraction method using ethylenediamine tetra-acetic acid modifier for quantitative determination and elimination of Pb^{2+} , Cu^{2+} and Zn^{2+} cations in real sample solutions. *Microchemical Journal*. 2024;198:110119. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.110119>.
29. Maksimov V.V., Loginova A.Yu. Review of the main chemical methods of copper extraction in hydrometallurgy. *Prioritetnye nauchnye napravleniya: ot teorii k praktike*. 2013;7:123-129. (In Russ.). EDN: RDYQUT.
30. Granata G., Tsendorj U., Liu Wenying, Tokoro C. Direct recovery of copper nanoparticles from leach pad drainage by surfactant-assisted cementation with iron powder. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2019;580:123719. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.123719>.
31. Sun Kai, Shao Yuewen, Ming Cong, Fan Mengjiao, Fan Huailin, Zhang Lijun, et al. Copper-based catalysts synthesized during hydrogenation. *Chemical Engineering Science*. 2023;276:118819. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.118819>.
32. Sadou M., Saadi A., Meliani M.H., Suleiman R.K., Saleh T.A. Facile preparation of supported copper-modified SBA-15 catalysts for efficient benzaldehyde hydrogenation. *Surfaces and Interfaces*. 2022;30:101955. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2022.101955>.
33. Ji Yali, Guan Anxiang, Zheng Gengfeng. Copper-based catalysts for electrochemical carbon monoxide reduction. *Cell Reports Physical Science*. 2022;3(10):101072. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2022.101072>.
34. Cao Guoqiang, Deskins N.A., Yi Nan. Carbon monoxide oxidation over copper and nitrogen modified titanium dioxide. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2021;285:119748. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2020.119748>.
35. Chang Jie, Li Dong, Zhang Lei, Qin Hong, Ren Xingting, Feng Demao, et al. Efficient reductive leaching of valuable elements from oxygen pressure leaching residue of high-grade nickel matte within sulfur dioxide. *Chemical Engineering Journal*. 2024;483:149295. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.149295>.
36. Ding Ran, Zhang Bing, Yang Le, Ma Tao, Gang Dong, Mao Yue-Yuan, et al. Copper catalyst-promoted regioselective multicomponent cascade cyclization of 3-aza-1,5-enynes with sulfur dioxide and cycloketone oxime esters to access cyanoalkylsulfonated 1,2-dihydropyridines. *The Journal of Organic Chemistry*. 2024;89(3):1515-1523. <https://doi.org/10.1021/acs.joc.3c02117>.
37. Teli A.M., Beknalkar S.A., Mane S.M., Chaudhary L.S., Patil D.S., Pawar S.A., et al. Facile hydrothermal deposition of copper-nickel sulfide nanostructures on nickel foam for enhanced electrochemical performance and kinetics of charge storage. *Applied Surface Science*. 2022;571:151336. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.151336>.
38. Rodríguez-Hernández P.E., Quiñones Galván J.G., Meléndez-Lira M., Santos-Cruz J., Contreras-Puente G., Guillén-Cervantes A., et al. Amorphous copper sulfide films deposited by pulsed laser deposition using pellets as target. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2021;555:120532. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.120532>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ковязин Антон Андреевич,

заместитель начальника цеха,
АО «Уралэлектромедь»,
624091, г. Верхняя Пышма,
пр. Успенский, 1, Россия
✉ A.Kovyazin@uralcopper.com
<https://orcid.org/0009-0003-8218-7867>

Тимофеев Константин Леонидович,

Д.Т.Н.,
начальник отдела АО «Уралэлектромедь»,
624091, г. Верхняя Пышма,
пр. Успенский, 1, Россия;
научный руководитель кафедры металлургии,
Технический университет Уральской
горно-металлургической компании,
624091, г. Верхняя Пышма, пр. Успенский, 3, Россия
K.Timofeev@uralcopper.com
<https://orcid.org/0000-0002-9525-6476>

Мальцев Геннадий Иванович,

Д.Т.Н.,
старший научный сотрудник лаборатории
пирометаллургии цветных металлов,
Институт металлургии УрО РАН,
620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 101, Россия
maltsewg@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0750-0070>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anton A. Kovyazin,

Deputy Head of the Workshop,
JSC Uralelectromed,
1 Uspensky pr., Verkhnyaya Pyshma 624091, Russia
✉ A.Kovyazin@uralcopper.com
<https://orcid.org/0009-0003-8218-7867>

Konstantin L. Timofeev,

Dr. Sci. (Eng.),
Head of the Department,
JSC Uralelectromed,
1 Uspensky pr., Verkhnyaya Pyshma 624091, Russia;
Scientific Supervisor of the Metallurgy Department,
Technical University of the Ural Mining and
Metallurgical Company,
3 Uspensky pr., Verkhnyaya Pyshma 624091, Russia
K.Timofeev@uralcopper.com
<https://orcid.org/0000-0002-9525-6476>

Gennady I. Maltsev,

Dr. Sci. (Eng.),
Senior Researcher of the Laboratory of Non-ferrous
Metals Pyrometallurgy,
Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the RAS,
101 Amundsen St., Yekaterinburg 620016, Russia
maltsewg@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0750-0070>

Краюхин Сергей Александрович,
к.т.н.,
директор по науке,
Технический университет Уральской
горно-металлургической компании,
624091, г. Верхняя Пышма, пр. Успенский, 3, Россия
university@tu-ugmk.com
<https://orcid.org/0009-0003-7753-1467>

Sergey A. Krayukhin,
Cand. Sci. (Eng.),
Director of Research,
Technical University of the Ural Mining
and Metallurgical Company,
3 Uspensky pr., Verkhnyaya Pyshma 624091, Russia
university@tu-ugmk.com
<https://orcid.org/0009-0003-7753-1467>

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Authors' contribution

The authors contributed equally to the article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 02.07.2024 г.; одобрена после рецензирования 21.07.2024 г.; принята к публикации 10.08.2024 г.

Information about the article

The article was submitted 02.07.2024; approved after reviewing 21.07.2024; accepted for publication 10.08.2024.



Изучение структуры и динамической вязкости модельных шлаковых систем CaO-SiO_2 и $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$

Н.В. Немчинова^{1✉}, А.А. Ильин², А.А. Тютрин³, С.В. Галачиева⁴,
А.А. Яковлева⁵

^{1-3,5}Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

²Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Республика Казахстан

⁴Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия

Резюме. Цель – изучение корреляционных зависимостей между динамической вязкостью шлаков и параметрами их структуры для определения оптимальной основности шлака кремниевой плавки при добавлении (для устранения ошлакования подины рудотермической печи) оксида бора. Экспериментальные исследования проводились на модельных шлаках CaO-SiO_2 , $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$, полученных при 1600°C. Рамановский спектроскопический анализ проводился на анализаторе Horiba Jobin-Yvon HR800UV (Франция). Теоретические расчеты вязкости шлаков осуществлялись с применением моделей Урбена и Миллса. В ходе экспериментов фундаментальные показатели, описывающие структуру шлаковых систем, варьировались в пределах: экспериментальная функция деконволюции спектра Рамана от 1,41 до 2,45, оптическая основность от 0,58 до 0,68. Полученные экспериментальные и теоретические данные были связаны математическими зависимостями. Установлено, что динамическая вязкость шлака может быть оперативно определена методом рамановской спектроскопии на основе математических моделей. Полученная зависимость показывает, что вязкость шлака снижается при увеличении числа мостиковых атомов кислорода в структуре силикатного аниона. При этом снижение вязкости шлака наблюдается до величины для экспериментальной функции деконволюции спектра Рамана ~1,55–1,60 или оптической основности шлака 0,60–0,62; при добавлении B_2O_3 вязкость далее снижается. На практике для шлаков системы CaO-SiO_2 использование в качестве разжижающего агента борсодержащего флюса целесообразно при $\text{CaO/SiO}_2 = 0,61\text{--}0,63$ при поддержании содержания B_2O_3 в составе шлака на уровне 1%. Показано, что для теоретического расчета вязкости в системах CaO-SiO_2 , $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ более подходят две модели (классическая и модифицированная), предложенные Урбеном. Показано, что модель Миллса не подходит для этих целей, так как коэффициенты корреляции в соответствующей математической модели недостаточно велики. Необходимо продолжение работ в данном направлении с целью установления соответствующих зависимостей вязкости от параметров структуры шлаков при различных температурах с целью поиска обобщающих закономерностей.

Ключевые слова: металлургия кремния, структура шлака, рамановская спектроскопия, функция деконволюции спектра Рамана, оптическая основность, вязкость, оксид бора

Для цитирования: Немчинова Н.В., Ильин А.А., Тютрин А.А., Галачиева С.В., Яковлева А.А. Изучение структуры и динамической вязкости модельных шлаковых систем CaO-SiO_2 и $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 3. С. 562–575. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-562-575>. EDN: IXGBEL.

METALLURGY

Original article

Structure and dynamic viscosity of CaO-SiO_2 and $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ model slag systems

Nina V. Nemchinova^{1✉}, Alexander A. Ilin², Andrey A. Tyutrin³,
Svetlana V. Galachieva⁴, Ariadna A. Yakovleva⁵

^{1-3,5}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

²Karaganda Industrial University, Temirtau, Republic of Kazakhstan

⁴North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia

Abstract. Correlation dependencies between the dynamic viscosity of slag and its structural parameters were studied to determine an optimal basicity of silicon smelting slag under the addition of boron oxide to eliminate

slagging of the bottom of ore-smelting furnaces. Experimental studies were conducted on CaO–SiO₂ and CaO–SiO₂–B₂O₃ model slags obtained at 1600 °C. Raman spectroscopic analysis was carried out using a Horiba Jobin-Yvon HR800UV analyzer (France). Theoretical calculations of slag viscosity were performed using Urbain and Mills models. During the experiments, the key structural parameters of slag systems varied within the following limits: the experimental Raman spectrum deconvolution function from 1.41 to 2.45 and optical basicity from 0.58 to 0.68. The obtained experimental and theoretical data were related by mathematical dependencies. It was found that the dynamic viscosity of slag can be promptly determined by Raman spectroscopy on the basis of mathematical models. The dependence obtained shows that slag viscosity decreases upon an increase in the number of bridging oxygen atoms in the silicate anion structure. Notably, this decrease in slag viscosity is observed up to the value of the experimental Raman spectrum deconvolution function of ~1.55–1.60 or slag optical basicity of 0.60–0.62. When B₂O₃ is added, the viscosity undergoes a further decrease. In practice, for CaO–SiO₂ slag systems, the use of boron-containing flux as a liquefying agent is reasonable at CaO/SiO₂ = 0.61–0.63 while maintaining the content of B₂O₃ in the slag at a level of 1%. The two models (classical and modified) proposed by Urbain were established to be more suitable for theoretical calculation of viscosity in CaO–SiO₂ and CaO–SiO₂–B₂O₃ systems. Mills' model is not suitable for these purposes, since the correlation coefficients in the corresponding mathematical model are not sufficiently large. Further research in this direction is required in order to establish appropriate dependencies of slag viscosity on its structural parameters at different temperatures.

Keywords: silicon metallurgy, slag structure, Raman spectroscopy, Raman spectrum deconvolution function, optical basicity, viscosity, boron oxide

For citation: Nemchinova N.V., Ilin A.A., Tyutrin A.A., Galachieva S.V., Yakovleva A.A. Structure and dynamic viscosity of CaO–SiO₂ and CaO–SiO₂–B₂O₃ model slag systems. *iPolytech Journal*. 2024;28(3):562–575. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-562-575>. EDN: IXGBEL.

ВВЕДЕНИЕ

В практике металлургического производства важной прикладной задачей является поиск составов металлургических шлаков, обеспечивающих оптимальное протекание физико-химических превращений, сопровождающих процесс выплавки металлов и сплавов. В большинстве случаев для придания шлакам необходимых технологическому процессу свойств используют добавление в шихту различных флюсов. В качестве флюсов используются материалы, содержащие оксиды кремния, кальция, железа, бора, а также соответствующие хлориды, фториды и т.д. [1–7]. Флюсы наряду с формированием шлака определенного состава с требуемой температурой пирометаллургического процесса, улучшения электропроводности шлака обеспечивают снижение вязкости металлургических шлаков в зависимости от потребностей технологии.

Однако флюсы могут способствовать загрязнению готовой продукции вредными примесями. Так, специфика выплавки технического кремния состоит в том, что бор может восстановиться из печных шлаков и перейти в кремниевую фазу; бор является вредной примесью, которая снижает качество готового кремниевого материала, направляемого в дальнейшем на производство солнечных

элементов (бор при направленной кристаллизации практически не удаляется из кремния). Поэтому количество вводимых флюсов в состав шихты плавки должно быть оптимальным. В этой связи актуальным является вопрос проведения фундаментальных исследований, позволяющих изучить взаимосвязи между различными физико-химическими характеристиками шлаков и особенностями их структуры с целью разработки рационального состава шлакообразующих систем при добавке флюсов.

Изучаемый нами технологический процесс – получение кремния в рудовосстановительных печах⁶ [8, 9]. Большинство шлаковых систем в металлургии базируется на двух главных оксидах – CaO и SiO₂, изучению свойств их бинарной системы посвящено множество работ. Перспективным модификатором, который значительно влияет на физические свойства шлаков, является оксид бора [10, 11]. Поэтому в данной работе совместно с системой, основанной на главных компонентах, рассматривается система с добавкой оксида бора – CaO–SiO₂–B₂O₃.

Одной из важнейших характеристик шлаковых расплавов является вязкость. Вязкость, как известно, является мерой текучести. Размеры структурных компонентов, присутствующих в расплаве, составляют препят-

⁶Минеев Г.Г., Минеева Т.С., Жучков И.А., Зелинская Е.В. Теория металлургических процессов: учебник. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2010. 522 с.

ствие для его движения. В составе шлаков укрупнение структурных компонентов часто связано с наличием в шлаке SiO_2 . Поскольку силикаты содержат различные структурные блоки, возникающие за счет полимеризации простейших кремниевых ионов с различными размерами [12], вязкость расплавов силикатов должна быть функцией структуры.

Двумя параметрами, полезными для прогнозирования структуры шлака, являются степень полимеризации, определяемая как отношение несвязанных ионов кислорода к тетраэдрически координированным катионам (NBO/T), и оптическая основность (Λ). Считается, что использование оптической основности вместо отношения NBO/T представляет преимущества при описании структуры силиката [13]. NBO/T рассчитывается по уравнению (1):

$$\frac{\text{NBO}}{\text{T}} = \frac{\sum nM_i^{n+}}{\text{T}}, \quad (1)$$

где M_i – мольная доля катиона после вычета пропорции, необходимой для балансировки заряда; n – заряд катиона; T – количество тетраэдрически координированных катионов.

Более подробное описание процедуры расчета NBO/T можно найти в известной учебной литературе по геологии, геохимии или в специальной литературе [14].

Другой параметр для оценки корреляции структурных изменений силикатов при добавлении модифицирующих оксидов – это оптическая основность. Большинство химических взаимодействий включает передвижение электронов от одного атома к другому. Эти взаимодействия описывают характеристики кислот и оснований. Расплавленные силикатные системы можно описывать с использованием теории кислот и оснований Льюиса [15]. Льюисово основание определяется как вещество, которое может отдать пару электронов, а льюисова кислота – как вещество, которое может принять пару электронов. Химическая связь между акцептором и донором фокусируется на выявлении степени отдачи электронов. Оптическая основность при этом является параметром силы донора электронов [15]. Исследования, касающиеся свойств льюисовых кислот и оснований, были ограничены водными системами, пока Даффи и Инграм не предложили

ее использование для изучения стекол [16]. Результаты их экспериментальных измерений оптической основности оксидов были обработаны с получением уравнения (2), которое связывает оптическую основность с электроотрицательностью по Полингу:

$$\Lambda = \frac{x_c}{\gamma}, \quad (2)$$

где x_c – доля катиона; γ – параметр умеренности основности.

Параметр умеренности основности рассчитывается с использованием отношения, показанного в уравнении (3):

$$\gamma = 1,36(x - 0,26), \quad (3)$$

где x – электроотрицательность по Полингу.

Наиболее важным параметром является еще один фундаментальный показатель, который позволяет лучше понять природу шлака. Это функция деконволюции (Q^n_{exp}), которую можно получить на основе данных спектров Рамана шлаковой системы. Функция Q^n_{exp} является производной от соотношения NBO/T и выражена уравнением (4):

$$4Q^0 + 3Q^1 + 2Q^2 + Q^3 = Q^n_{\text{exp}}, \quad (4)$$

где Q^n – параметр для описания видов силикатных анионов, которые возможно рассчитать на основании деконволюции экспериментально полученных спектров Рамана; n – количество мостиковых кислорода (0, 1, 2, 3), соединяющих соседние полиэдры в силикатных стеклах, в том числе и в борном ангидриде.

Оценку вязкости изучаемых шлаковых расплавов производили теоретическим путем на основе признанной в научном сообществе модели Урбена [17] и ее модификации [18], а также на основании модели, базирующейся на использовании в расчетах оптической основности, известной также как модель NPL (от англ. National Physical Laboratory), разработанной Милсом и Шридхаром [19–21]. Отличие моделей Урбана заключается в допущении, что оксид бора – амфотерный (классический вариант модели) и кислотный (модифицированный вариант). Выбор теоретического способа определения вязкости шлака связан с тонкой настройкой

величины вязкости шлака, которую не обеспечивают экспериментальные способы определения.

Существует много методов прямого экспериментального определения вязкости шлака: ротационный, вибрационный и т.д. [22]. Недостаток применения этих методов в том, что они определяют вязкость в идеализированных условиях. Плавка в печи происходит в условиях неопределенности в части температуры, величины окислительно-восстановительного потенциала атмосферы печи и других параметров, которые могут повлиять на вязкость. В этой связи в данной работе мы изучали воздействие модификаторов шлака по косвенным, но более фундаментальным показателям (NBO/T , Λ , Q_{exp}^n), которые дают возможность судить о природе шлака как о системе с заряженными частицами, структурированными определенным образом.

МЕТОДЫ И УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

В наших исследованиях было подготовлено 11 вариантов модельных шлаков: 5 вариантов – системы CaO–SiO₂; 6 вариантов – системы CaO–SiO₂–B₂O₃. Общая масса каждого из модельных шлаков составляла 300 г. Для приготовления модельных шлаков использовали реагенты технической чистоты CaO (99,5%), SiO₂ (99,8%) и B₂O₃ (99,8%). Эти материалы загружались в различных пропорциях в графитовый тигель. После вакуумирования печи вводился аргон для минимизации окисления графитового тигля. Тигель нагревался в индукционной печи мар-

ки IT-KTV-80/115/1650 компании Linn High Therm (Германия) для расплавления материала при температуре от 1973 К до 2073 К (от 1700 °С до 1800 °С). После расплавления всех твердых веществ содержимое выливалось на водяной охлаждаемый медный блок для закалки. Затем материал измельчался до порошкообразного состояния в вибрационной дисковой мельнице марки RS 200 компании «Retsch» (Германия) с мелющими телами из карбида вольфрама. Операции плавления и дробления повторялись три раза для достижения однородности порошка. Порошок истирали до размера частиц менее 250 мкм. Образцы хранились в пластиковых мешках в эксикаторе для минимизации поглощения влаги и других примесей.

На последнем этапе проводили плавку образцов (по 2 г) в платиновых тиглях при температуре 1873 К (1600 °С). Образцы выдерживались при этой температуре в течение 1 ч. После выдержки дно платинового тигля погружалось в холодную воду для формирования стекловидного образца. Скорость охлаждения составляла около 10²–10³ К/с. Потери массы после плавления составили 0,4–0,5%. Образцы полученных стекол анализировали методом рамановской спектроскопии [23].

В табл. 1 представлены химический состав, рассчитанные значения параметров структуры шлаков и вязкости для системы CaO–SiO₂, в табл. 2 – для системы CaO–SiO₂–B₂O₃, включая сравнение с исследованиями автора⁷. Отсутствие отношения NBO/T для

Таблица 1. Химический состав стекол и соответствующие значения NBO/T , Λ , Q_{exp}^n динамической вязкости для системы CaO–SiO₂

Table 1. Chemical composition of glasses and the corresponding values of NBO/T , Λ , Q_{exp}^n of dynamic viscosity for CaO–SiO₂ system

№ шлака	Содержание в шлаке, % масс.		Основность (CaO/SiO ₂)	NBO/T	Λ	Q_{exp}^n	Вязкость шлака*, Па·с
	SiO ₂	CaO					
1	63,57	36,43	0,573	1,21	0,580	1,41	1,585 / 0,891
2	57,92	42,08	0,680	1,46	0,590	1,48	1,000 / 0,708
3	56,38	43,62	0,820	1,75	0,598	1,50	0,631 / 0,603
4	50,14	49,86	0,990	2,13	0,600	1,50	0,589 / 0,550
5	44,9	55,1	1,200	2,57	0,608	1,57	0,398 / 0,380

* – расчетные данные по моделям Урбена: числитель – классический вариант, знаменатель – модифицированный вариант

⁷Шартдинов Р.Р. Влияние физико-химических характеристик шлаков аргоноокислородного рафинирования на восстановление хрома, бора и десульфурацию нержавеющей стали: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 2.6.2. Екатеринбург, 2023.

Таблица 2. Химический состав стекол и соответствующее значение Λ , Q^n_{exp} динамической вязкости для системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$

Table 2. Chemical composition of glasses and corresponding value of Λ , Q^n_{exp} of dynamic viscosity for $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ system

№ шлака	Содержание в шлаке, % масс.			Основность (CaO/SiO_2)	Λ	Q^n_{exp}	Вязкость шлака, Па·с	
	SiO_2	CaO	B_2O_3				Расчет по Урбену	Эксперимент по Шартдинову
6	62,92	35,88	1,2	0,570	0,630	1,70	0,257 / 0,257	–
7	60,12	34,08	5,8	0,567	0,645	1,95	0,282 / 0,200	–
8	56,98	32,32	10,7	0,567	0,652	2,10	0,200 / 0,195	–
9	45,32	53,58	1,1	1,182	0,663	2,20	0,224 / 0,170	0,20
10	42,99	51,61	5,4	1,201	0,677	2,40	0,166 / 0,158	0,12
11	40,57	49,53	9,9	1,221	0,680	2,45	0,126 / 0,155	–

системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ обусловлено невозможностью определения точного распределения B^{3+} и B^{4+} в системе.

Рамановский спектроскопический анализ проводился на спектральном анализаторе марки Horiba Jobin–Yvon HR800UV (Франция). В качестве источника возбуждения использовался аргон-кадмиевый лазер с длиной волны 315 нм. Мощность лазера на образце составляла ~25 мВт для Ar/Cd. Голографическая дифракционная решетка имела 2200 штрихов/мм для лазера с длиной волны 315 нм и фокусировалась на детектор CCD. В качестве объектива был использован Olympus 412 UV для Ar/Cd. Измерения проводились в диапазоне от 500 до 1200 см^{-1} . Фильтр для снижения излучения, поступающего в детектор от образцов, не использовался.

Сущность метода состоит в том, что при прохождении лазерного луча с длиной волны 315 нм (волновое число около 31000 см^{-1}) через изучаемый образец шлака происходит поглощение энергии волны и, соответственно, длина волны увеличивается (волновое число снижается ~ на 2–5%). Детектор оценивает энергию всех рассеянных частиц, прошедших через образец шлака по величине волнового числа. Программа обработки данных прибора производит деконволюцию спектров по методу, описанному в [24, 25], т.е. вычитает из исходного волнового числа волновые числа рассеянных частиц, оценивает статистическое распределение этой разницы и рассчитывает долевое содержание каждой составляющей шлаковой системы, идентифицированной пиком на спектро-

грамме, пропорционально площади пика относительно базовой линии спектрограммы. Предварительно выполнена коррекция базовой линии на исходных спектрах перед нормализацией данных. Нормализация данных помогает сравнивать небольшие отклонения в спектрах. Формула для нормализации данных описана в [26].

Прибор калибровался на воздухе с использованием кремния электронного качества. Образцы стекла анализировались на угольной подложке в ориентации образцов плоскими гранями к объективу микроскопа. Измерения проводились при атмосферном давлении и комнатной температуре. Не было обнаружено увеличения температуры при прикосновении к образцам под воздействием лазера. Была проведена оценка согласованности данных для обеспечения точного их толкования и однородности образца. Измерения проводились в трех разных местах на образце шлака для того, чтобы удостовериться в отсутствии сегрегации во время закалки. Кроме того, проводились три параллельных измерения для проверки стабильности прибора и образцов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате интерпретации спектров Рамана были выявлены 4 вида шлаковых структур с различным количеством мостиковых атомов кислорода, описываемые функцией Q^n во всех изученных образцах шлаков. На рис. 1 [12] и в табл. 3 представлены данные относительно каждой из разновидностей шлаковых структур. В результате деконволю-

ции спектров были получены данные о содержании каждой разновидности шлаковой структурной единицы в общем объеме шлаковой фазы. Для всех 11 изученных образцов шлаков эти данные представлены в табл. 4.

На основе полученных данных о содержании разных видов силикатных анионов по формуле (4) рассчитывали функции деконволюции спектров Рамана экспериментальных образцов шлаков (Q^n_{exp}).

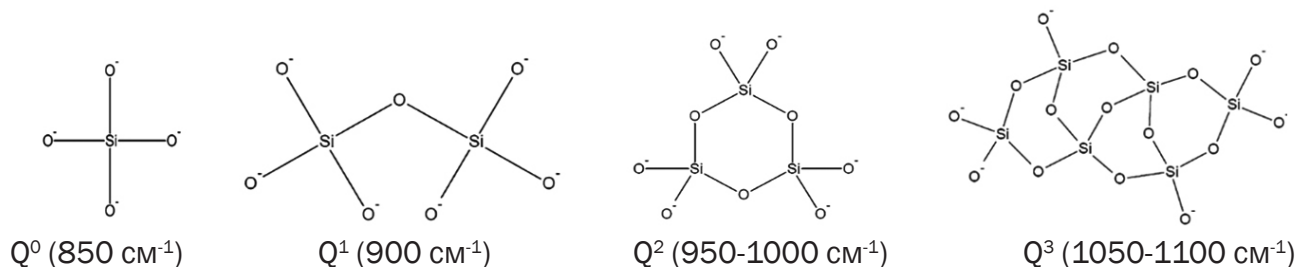


Рис. 1. Функции описания (Q^n) и соответствующие им особенности структуры силикатных анионов с разным количеством мостиковых атомов кислорода и сдвиги Рамана

Fig. 1. Description functions (Q^n) and corresponding to them structural features of silicate anions with the different number of bridging oxygen atoms and Raman shifts

Таблица 3. Сводка по сдвигам Рамана для видов Q^n , NBO/T и соответствующих структурных единиц силиката [27]
Table 3. Summary of Raman shifts for Q^n , NBO/T types and corresponding silicate structural units [27]

Виды Q	NBO/T	Рамановский сдвиг, см ⁻¹	Силикатные структурные единицы
Q^0	4	850	SiO ₄
Q^1	3	900	-SiO ₃
Q^2	2	от 950 до 1000	=SiO ₂
Q^3	1	с 1050 до 1100	≡≡SiO

Таблица 4. Средние значения с пределами погрешности определения сдвига Рамана и содержания структурных единиц шлаковой фазы Q^n по видам (при температуре 1600 °С)

Table 4. Average values with the threshold errors of determination of Raman shift and content of slag phase Q^n structural units by types (at the temperature of 1600 °C)

Виды Q^n		Q^0	Q^1	Q^2	Q^3
Сдвиг Рамана, см ⁻¹		861 ± 1,7	907 ± 2,1	964 ± 1,2	1048 ± 2,6
Содержание, %	№ шлака				
	1	3,5 ± 0,1	0,5 ± 0,1	39 ± 0,7	57 ± 0,5
	2	4,5 ± 0,2	0,5 ± 0,1	42 ± 0,9	53 ± 0,5
	3	8 ± 0,5	4 ± 0,2	48 ± 0,9	40 ± 0,5
	4	17 ± 0,3	6 ± 0,2	50 ± 0,9	27 ± 0,5
	5	26 ± 0,4	8 ± 0,2	51 ± 0,9	15 ± 0,5
	6	3,5 ± 0,2	0,5 ± 0,1	39 ± 0,5	59 ± 0,8
	7	3,5 ± 0,2	0,5 ± 0,1	36 ± 0,5	60 ± 0,9
	8	3,5 ± 0,2	0,5 ± 0,1	31 ± 0,5	65 ± 0,9
	9	24 ± 0,4	8 ± 0,2	51 ± 0,9	17 ± 0,4
	10	17 ± 0,3	8 ± 0,2	47 ± 0,9	28 ± 0,5
	11	13 ± 0,3	4 ± 0,2	45 ± 0,9	38 ± 0,5

Для оценки адекватности полученных экспериментальных данных нами было проверено наличие корреляции между теоретически рассчитанными величинами (NBO/T , Λ) и экспериментально установленными значениями Q^n_{exp} . В том случае, если эксперименты и расчеты были проведены правильно, то между указанными параметрами должна быть удовлетворительная корреляционная связь.

На рис. 2 показана взаимосвязь между Q^n_{exp} и NBO/T в системе $CaO-SiO_2$ (при температуре $1600^\circ C$). Из-за невозможности различить между собой ионы B^{3+} и B^{4+} в данном исследовании в корреляции между отношением NBO/T и Q^n_{exp} были использованы только 5 точек данных из бинарной системы $CaO-SiO_2$. На рис. 3 показаны взаимосвязи между Q^n_{exp} и Λ в системах $CaO-SiO_2$ и $CaO-$

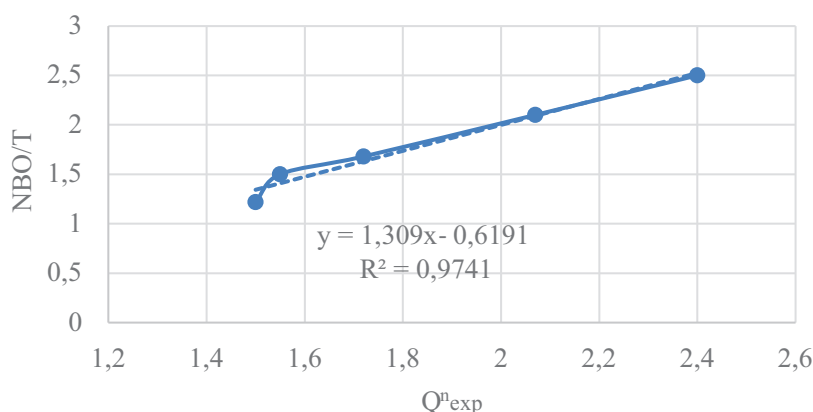
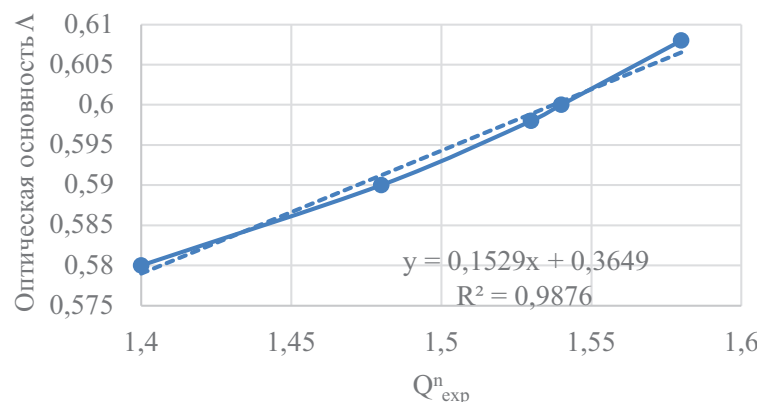
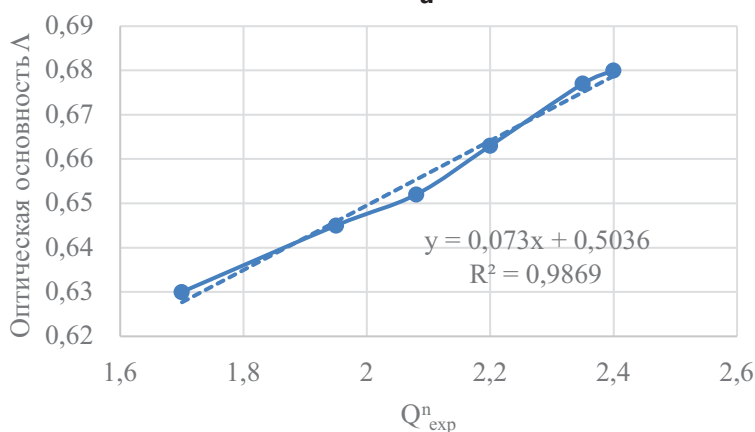


Рис. 2. Взаимосвязь между Q^n_{exp} и NBO/T в шлаковой системе $CaO-SiO_2$

Fig. 2. Relationship between Q^n_{exp} and NBO/T in $CaO-SiO_2$ slag system



a



b

Рис. 3. Взаимосвязь между Λ и Q^n_{exp} в шлаковых системах $CaO-SiO_2$ (a) и $CaO-SiO_2-B_2O_3$ (b)

Fig. 3. Relationship between Λ and Q^n_{exp} in $CaO-SiO_2$ (a) and $CaO-SiO_2-B_2O_3$ (b) slag systems

SiO₂-B₂O₃. Коэффициент детерминации (R^2) для зависимости η от Q_{exp}^n составил 0,974, а для зависимости Λ от Q_{exp}^n – 0,9876 и 0,9869 для системы CaO-SiO₂ и CaO-SiO₂-B₂O₃ соответственно. Наличие в достаточной степени хорошего уровня корреляции между основными параметрами, описывающими структурный состав шлака, свидетельствует о том, что эксперименты и расчеты были проведены с достаточным уровнем точности, чтобы использовать полученные данные для последующего их использования в выявлении теоретических закономерностей, связывающих структуру шлака и его вязкость.

Вязкость для всех рассмотренных составов шлаков была рассчитана при 1600 °С с использованием моделей Урбена [21].

На рис. 4–5 представлены зависимости вязкости шлака, рассчитанной по двум вариантам модели Урбена, от Λ и Q_{exp}^n , соответственно, для изучаемых шлаковых систем. Красными линиями на обоих графиках представлены данные о шлаковых системах с добавкой оксида бора, синими линиями – шлаки без добавки оксида бора.

Для классического варианта расчета вязкости (кривые 1): значения R^2 для зависи-

мости вязкости от Λ составили 0,9996 (для двухкомпонентной системы) и 0,939 (для трехкомпонентной системы), см. рис. 4. Аппроксимирующие уравнения представляют собой степенные функции и третьего и четвертого порядка соответственно. Значения R^2 для зависимости вязкости шлаков от Q_{exp}^n составили 0,9557 (для двухкомпонентной системы) и 0,9611 (для трехкомпонентной системы), см. рис. 5. Аппроксимирующие уравнения представляют собой степенные функции второго и четвертого порядка.

Как видно из данных рис. 4, кривая 2 (взаимосвязь вязкости от Λ по модифицированному варианту модели Урбена), значения R^2 для зависимости вязкости составили 0,9986 (для двухкомпонентной системы) и 0,9936 (для трехкомпонентной системы). Аппроксимирующие уравнения в данном случае также представляют собой степенные функции третьего и четвертого порядка соответственно. R^2 для зависимости вязкости от Q_{exp}^n (см. рис. 5, кривая 2) – 0,9902 для двойной системы и 1 для тройной системы. Аппроксимирующие уравнения в данном случае также представляют собой степенные функции третьего и пятого порядка.

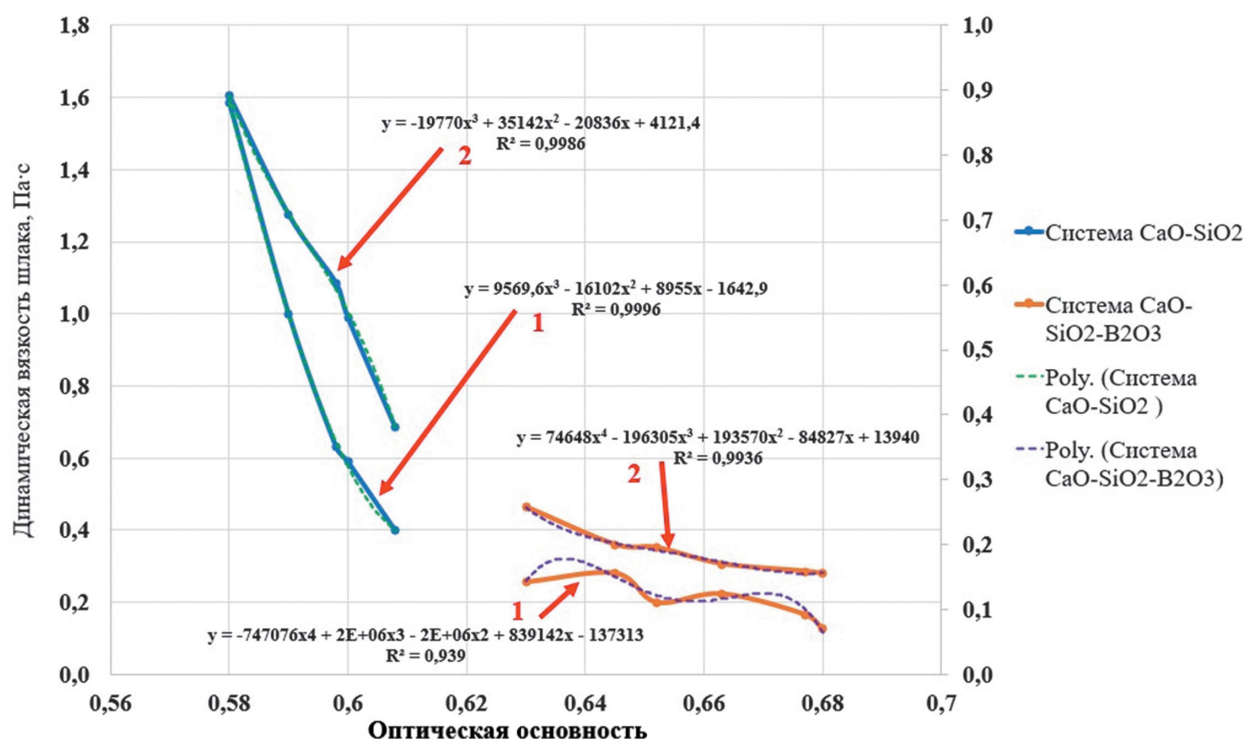


Рис. 4. Зависимость вязкости шлака от Λ изучаемых шлаковых систем, рассчитанной по вариантам модели Урбена: 1 – классическому; 2 – модифицированному

Fig. 4. Dependence of slag viscosity on the studied slag systems Λ calculated by Urbain model variants: 1 – classical variant; 2 – modified variant

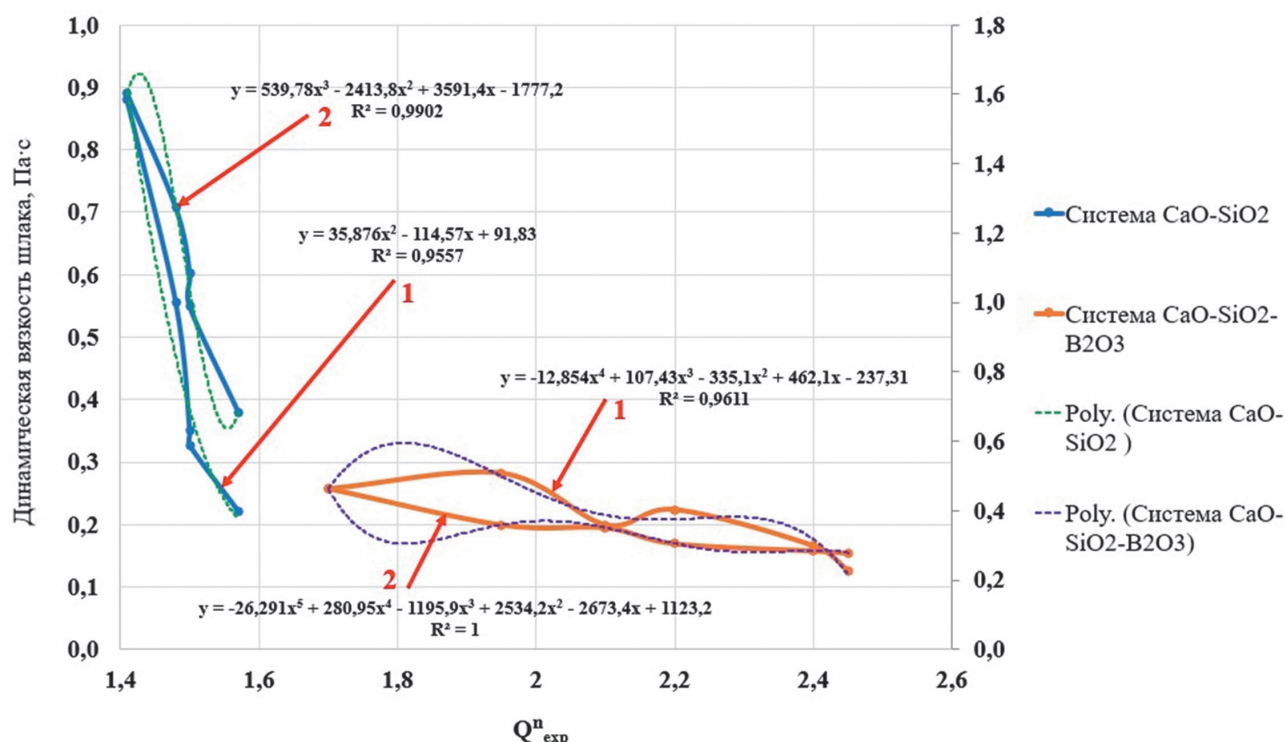


Рис. 5. Зависимость вязкости шлака от Q^n_{exp} изучаемых шлаковых систем, рассчитанной по вариантам модели Урбена: 1 – классическому; 2 – модифицированному

Fig. 5. Dependence of slag viscosity on the studied slag systems Q^n_{exp} calculated by the Urbain model variants: 1 – classical variant; 2 – modified variant

Допущение в модифицированном варианте модели Урбена о том, что B_2O_3 относится к кислотным оксидам, принципиально не повлияло на корреляцию между Λ и динамической вязкостью шлака.

В модели, разработанной Милсом и Сридхаром [19–21], также известной как

модель NPL, представлена идея связать вязкость и структурные модификации шлаков с использованием коррекций Λ для катионов, компенсирующих заряд. Графики зависимости между Λ , Q^n_{exp} и вязкостью шлаков, рассчитанные на основе данной модели, показаны на рис. 6 и 7.

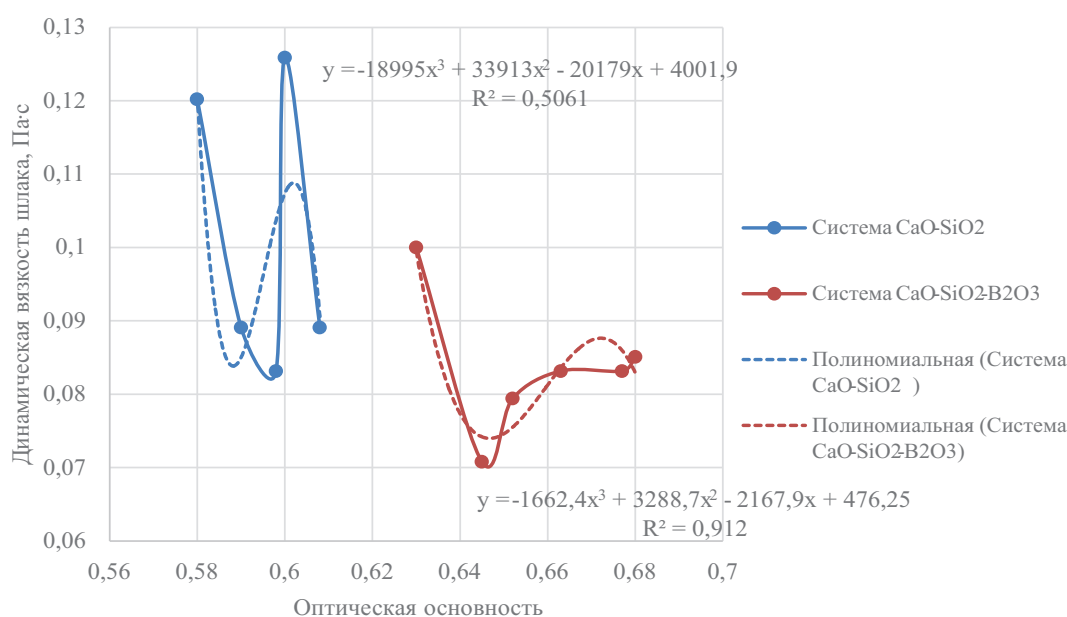


Рис. 6. Зависимость вязкости шлака, рассчитанной по модели Милса, от Λ изучаемых шлаковых систем

Fig. 6. Dependence of slag viscosity calculated by Mills model on Λ of the studied slag systems

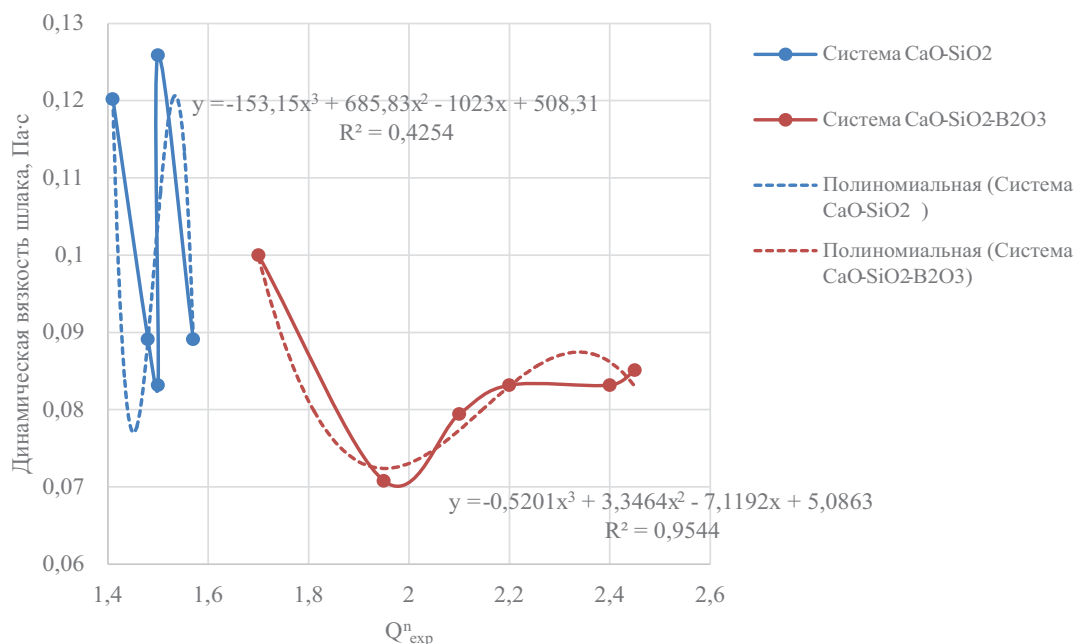


Рис. 7. Зависимость вязкости шлака, рассчитанной по модели Миллса, от Q^n_{exp} изучаемых шлаковых систем
Fig. 7. Dependence of slag viscosity calculated by Mills model on Q^n_{exp} of the studied slag systems

Значения R^2 для зависимости вязкости от Λ составили 0,5061 (для двухкомпонентной шлаковой системы) и 0,912 (для системы CaO-SiO₂-B₂O₃). R^2 для зависимости вязкости от Q^n_{exp} составили только 0,4254 для системы CaO-SiO₂ и 0,9544 для системы CaO-SiO₂-B₂O₃. Несмотря на то, что в обоих случаях аппроксимирующие уравнения – степенные функции высокого порядка, уровень корреляции очень низкий в области двухкомпонентной шлаковой системы. Из этого следует, что модель Миллса, в отличие от моделей Урбена, в меньшей степени подходит для оценки вязкости шлака по данным рамановской спектроскопии по составам шлака в областях диаграмм состояния, характерных для технологии выплавки металлургического кремния.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как видно из результатов проведенной исследовательской работы, динамическая вязкость шлака может быть оперативно определена на основе данных рамановской спектроскопии с применением математических моделей, связывающих вязкость и экспериментальную функцию деконволюции спектра Рамана шлаковых систем. Данная зависимость проявляет свойства фундаментальности, т.к. базируется на функции, наиболее точно описывающей особенности структуры шлака. Полученная зависимость пока-

зывает, что вязкость шлака снижается при увеличении числа мостиковых атомов кислорода в структуре силикатного аниона. При этом снижение вязкости шлака наблюдается до величины Q^n_{exp} , равной ~ 1,55–1,60 или Λ шлака 0,60–0,62. При добавлении оксида бора к двухкомпонентной системе динамическая вязкость также уменьшается, и с увеличением содержания оксида бора уменьшается, но незначительно. Однако для пирометаллургии кремния увеличение содержания бора в материалах, поступающих в процесс плавки, нежелательно, поэтому, несмотря на основность шлака, равную 1,22, и содержание бора 9,9%, вязкость имеет наименьшее значение (0,126 Па·с). С практической точки зрения (применительно для шлаков системы CaO-SiO₂) использование в качестве разжижающего агента борсодержащего флюса целесообразно при CaO/SiO₂ = 0,61–0,63, содержание оксида бора в составе шлака при этом необходимо поддерживать на уровне 1% (в наших модельных образцах 1,1–1,2%).

Показано, что для теоретического расчета вязкости в системах CaO-SiO₂, CaO-SiO₂-B₂O₃ более подходят два варианта модели, разработанной Урбеном. Разработанная Миллсом модель не подходит для этих целей, т.к. значения параметра корреляции в соответствующей математической модели для обеих шлаковых систем недостаточно велики.

Поскольку шлаковые системы синтезировались при температуре 1600 °С, необходимо продолжение работ в этом направлении в более широком температурном диапазоне с целью установления соответствующих зависимостей вязкости от Λ и Q_{exp}^n при различных температурах и их анализа.

По результатам проведенных теоретических исследований авторами были

проведены укрупненно-лабораторные испытания по выплавке кремния с добавкой борсодержащего флюса для устранения аварийной работы печи, связанной с ошлаковыванием подины. При этом особое внимание уделялось вопросу минимального перехода бора в кремний из флюса. Результаты данного этапа работы приведены в [28].

Список источников

1. Ракипов Д.Ф., Бардин Н.М., Жуков В.П. Физико-химические основы и технология переплава алюминиевого лома и сплавов в среде расплавленных хлоридов. Екатеринбург: ИздатНаукаСервис, 2009. 194 с.
2. Popov I., Mitrofanov Y., Ustinov S.M. Feasibility of using aegirine concentrate as a complex flux in copper metallurgy // Metallurgist. 2012. Vol. 56. P. 64–70. <https://doi.org/10.1007/s11015-012-9537-4>.
3. Попов Д.А., Пентюхин С.И., Соснов В.О., Трапезников А.В. Флюсы для производства алюминиевых сплавов // Металлургия машиностроения. 2016. № 5. С. 15–19. EDN: WMNMYB.
4. Abdeyazdan H., Edris H., Abbasi M.H. The effect of CaF_2 content in hot metal pretreatment flux based on lime // International Journal of Iron & Steel Society of Iran. 2011. Vol. 8. No. 2. P. 5–8.
5. Жеребцов С.Н., Чернышов Е.А. Особенности физико-химических свойств флюсов, используемых в технологиях электрошлакового переплава // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. 2016. № 1. С. 228–235. EDN: VZDVEZ.
6. Ким А.С., Акбердин А.А., Султангазиев Р.Б., Орлов А.С., Адамова Г.Х. Экспериментальные лабораторные исследования по разработке оптимальных технологических параметров выплавки борсодержащего силикохрома // Труды университета. Машиностроение. Металлургия. 2022. Т. 4. С. 72–79. https://doi.org/10.52209/1609-1825_2022_4_72.
7. Жучков В.И., Заякин О.В., Акбердин А.А. Перспективы использования бора в металлургии. Сообщение 1 // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 7. С. 471–476. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-7-471-476>. EDN: AWOXRZ.
8. Гасик М.И., Гасик М.М. Электротермия кремния. Днепропетровск: Национальная металлургическая академия Украины, 2011. 487 с.
9. Немчинова Н.В., Тютрин А.А., Хоанг В.В., Жидков К.И. Шлаки кремниевого производства // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 11. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.3>. EDN: ZNLKJP.
10. Ефимец А.М., Акбердин А.А., Ким А.С. Разработка и промышленное освоение технологии производства ферросилиция в руднотермических печах на борсодержащих шлаках // Труды Карагандинского государственного технического университета. 1999. Вып. 5. С. 65–68.
11. Ким А.С. Особенности выплавки ферросплавов с использованием боратовых руд // Сталь. 2008. № 8. С. 55–58. EDN: JUWNUZ.
12. Kline J., Tangstad M., Tranell G. A Raman spectroscopic study of the structural modifications associated with the addition of calcium oxide and boron oxide to silica // Metallurgical and Materials Transactions B. 2015. Vol. 46. P. 62–73. <https://doi.org/10.1007/s11663-014-0194-9>.
13. Mills K.C. The influence of structure on the physico-chemical properties of slags // ISIJ International. 1993. Vol. 33. Iss. 1. P. 148–155. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.33.148>.
14. Mysen B., Richet P. Melt and glass structure: basic concepts // Silicate Glasses and Melts: Properties and Structure. Amsterdam: Elsevier, 2005. Vol. 10. Part 4. P. 101–130. [https://doi.org/10.1016/s0921-3198\(05\)x8001-2](https://doi.org/10.1016/s0921-3198(05)x8001-2).
15. Duffy J.A. A review of optical basicity and its applications to oxidic systems // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1993. Vol. 57. Iss. 16. P. 3961–3970. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(93\)90346-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(93)90346-X).
16. Duffy J.A., Ingram M.D. Establishment of an optical scale for Lewis basicity in inorganic oxyacids, molten salts, and glasses // Journal of American Chemical Society. 1971. Vol. 93. Iss. 24. P. 6448–6454. <https://doi.org/10.1021/ja00753a019>.
17. Urbain G., Cambier F., Deletter M., Anseau M.R. Viscosity of silicate melts // Transactions and Journal of British Ceramics Society. 1981. Vol. 80. No. 4. P. 139–141.
18. Urbain G. Viscosity estimation of slag // Steel Research. 1987. Vol. 58. Iss. 3. P. 111–116. <https://doi.org/10.1002/srin.198701513>.
19. Mills K.C., Sridhar S. Viscosities of ironmaking and steelmaking slags // Ironmaking and Steelmaking. 1999. Vol. 26. Iss. 4. P. 262–268. <https://doi.org/10.1179/030192399677121>.
20. Mills K.C. Slag atlas / ed. V.D. Eisenhuttenleute. Dusseldorf: Verlag Sthleisen GmbH, 2008. P. 349–401.
21. Kekkonen M., Oghbasilasie H., Louhenkilpi S. Viscosity models for molten slags. Helsinki: Unigrafia Oy, 2012. 34 p.
22. Рожихина И.Д., Нохрина О.И., Ходосов И.Е., Ёлкин К.С. Исследование основных характеристик шлаков рафинирования кристаллического кремния // Металлургия: технологии, инновации, качество. Металлургия. 2019: труды XXI Междунар. научно-практич. конф. (г. Новокузнецк, 23–24 ноября 2019 г.). Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2019. Ч. 1. С. 66–72.

23. Orlando A., Franceschini F., Muscas C., Pidkova S., Bartoli M., Rovere M., et al. A comprehensive review on Raman spectroscopy applications // *Chemosensors*. 2021. Vol. 9. Iss. 9. P. 262. <https://doi.org/10.3390/chemosensors9090262>.
24. Kemmer G.C., Keller S. Nonlinear least-squares data fitting in Excel spreadsheets // *Nature Protocols*. 2010. Vol. 5. No. 2. P. 267–281. <https://doi.org/10.1038/nprot.2009.182>.
25. Mysen B.O., Finger L.W., Virgo D., Seifert F.A. Curve-fitting of Raman spectra of silicate glasses // *American Mineralogist*. 1982. Vol. 67. P. 686–695.
26. Ferraro J.R., Nakamoto K., Brown C.W. *Introductory Raman spectroscopy* // 2nd. ed. Elsevier, 2003. 434 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-254105-6.X5000-8>.
27. McMillan P. A Raman spectroscopic study of glasses in the system CaO–MgO–SiO₂ // *American Mineralogist*. 1984. Vol. 69. Iss. 7-8. P. 645–659.
28. Ilin A.A., Zobnin N.N., Pikalova I.A., Nemchinova N.V. Distribution of iron and boron between silicon metal smelting products in industrial SAF using borate fluxes // *Silicon*. 2024. Vol. 16. P. 3085–3092. <https://doi.org/10.1007/s12633-024-02895-z>.

References

1. Rakipov D.F., Bardin N.M., Zhukov V.P. *Physicochemical foundations and technology of remelting aluminum scrap and alloys in a molten chloride environment*. Ekaterinburg: IzdatNaukaServis; 2009, 194 p. (In Russ.).
2. Popov I., Mitrofanov Y., Ustinov S.M. Feasibility of using aegirine concentrate as a complex flux in copper metallurgy. *Metallurgist*. 2012;56:64-70. <https://doi.org/10.1007/s11015-012-9537-4>.
3. Popov D.A., Pentyuhin S.I., Sosnov V.O., Trapeznikov A.V. Fluxes for the production of aluminum alloys. *Metallurgiya mashinostroeniya*. 2016;5:15-19. (In Russ.). EDN: WMNMYB.
4. Abdeyazdan H., Edris H., Abbasi M.H. The effect of CaF₂ content in hot metal pretreatment flux based on lime. *International Journal of Iron & Steel Society of Iran*. 2011;8(2):5-8.
5. Zherebtsov S.N., Chernyshov E.A. Features of the physicochemical properties of fluxes used in electros slag remelting technologies. *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R.E. Alekseeva*. 2016;1:228-235. (In Russ.). EDN: VZDVEZ.
6. Kim A.S., Akberdin A.A., Sultangaziev R.B., Orlov A.S., Adamova G.H. Experimental laboratory studies on the development of optimal technological parameters for the smelting of boron-containing silicochrome. *Trudy universiteta. Mashinostroyeniye. Metallurgiya*. 2022;4:72-79. (In Russ.). https://doi.org/10.52209/1609-1825_2022_4_72.
7. Zhuchkov V.I., Zayakin O.V., Akberdin A.A. Prospects for using boron in metallurgy. Report 1. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021;64(7):471-476. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-7-471-476>. (In Russ.). EDN: AWQXRZ.
8. Gasik M.I., Gasik M.M. *Electrothermy of silicon*. Dnepropetrovsk: National Metallurgical Academy of Ukraine; 2011, 487 p. (In Russ.).
9. Nemchinova N.V., Tyutrin A.A., Hoang V.V., Zhidkov K.I. Silicon production slags. *International Research Journal*. 2022;11. (In Russ.). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.3>. EDN: ZNLKJP.
10. Efimets A.M., Akberdin A.A., Kim A.S. Development and industrial implementation of ferrosilicon production technology in ore-smelting furnaces using boron-containing slag. *Trudy universiteta Karagandinskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 1999;5:65-68. (In Russ.). EDN: JUWNUZ.
11. Kim A.S. Smelting ferroalloys by means of borate ores. *Stal'*. 2008;8:55-58. (In Russ.). EDN: JUWNUZ.
12. Kline J., Tangstad M., Tranell G. A Raman spectroscopic study of the structural modifications associated with the addition of calcium oxide and boron oxide to silica. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2015;46:62-73. <https://doi.org/10.1007/s11663-014-0194-9>.
13. Mills K.C. The influence of structure on the physico-chemical properties of slags. *ISIJ International*. 1993;33(1):148-155. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.33.148>.
14. Mysen B., Richet P. Melt and glass structure: basic concepts. In: *Silicate Glasses and Melts: Properties and Structure*. Amsterdam: Elsevier; 2005, vol. 10, part 4, p. 101-130. [https://doi.org/10.1016/S0921-3198\(05\)X8001-2](https://doi.org/10.1016/S0921-3198(05)X8001-2).
15. Duffy J.A. A review of optical basicity and its applications to oxidic systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1993;57(16):3961-3970. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(93\)90346-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(93)90346-X).
16. Duffy J.A., Ingram M.D. Establishment of an optical scale for Lewis basicity in inorganic oxyacids, molten salts, and glasses. *Journal of American Chemical Society*. 1971;93(24):6448-6454. <https://doi.org/10.1021/ja00753a019>.
17. Urbain G., Cambier F., Deletter M., Anseau M.R. Viscosity of silicate melts. *Transactions and Journal of British Ceramics Society*. 1981;80(4):139-141.
18. Urbain G. Viscosity estimation of slag. *Steel Research*. 1987;58(3):111-116. <https://doi.org/10.1002/srin.198701513>.
19. Mills K.C., Sridhar S. Viscosities of ironmaking and steelmaking slags. *Ironmaking and Steelmaking*. 1999;26(4):262-268. <https://doi.org/10.1179/030192399677121>.
20. Mills K.C. *Slag atlas* / ed. V.D. Eisenhuttenleute. Dusseldorf: Verlag Sthleisen GmbH; 2008, p. 349-401.
21. Kekkonen M., Oghbasilase H., Louhenkilpi S. *Viscosity models for molten slags*. Helsinki: Unigrafia Oy; 2012, 34 p.
22. Rozhihina I.D., Nohrina O.I., Hodosov I.E., Yolkin K.S. Study of the main characteristics of crystalline silicon refining slags. *Metallurgiya: tekhnologii, innovacii, kachestvo. Metallurgiya*. 2019: trudy XXI Mezhdunarodnoj

nauchno-prakticheskoy konferencii = *Metallurgy: technologies, innovations, quality*. 23–24 November 2019, Novokuznetsk. Novokuznetsk: Siberian State Industrial University; 2019, Part. 1, p. 66-72. (In Russ.).

23. Orlando A., Franceschini F., Muscas C., Pidkova S., Bartoli M., Rovere M., et al. A comprehensive review on Raman spectroscopy applications. *Chemosensors*. 2021;9(9):262. <https://doi.org/10.3390/chemosensors9090262>.

24. Kemmer G.C., Keller S. Nonlinear least-squares data fitting in Excel spreadsheets. *Nature Protocols*. 2010;5(2):267-281. <https://doi.org/10.1038/nprot.2009.182>.

25. Mysen B.O., Finger L.W., Virgo D., Seifert F.A. Curve-fitting of Raman spectra of silicate glasses. *American Mineralogist*. 1982;67:686-695.

26. Ferraro J.R., Nakamoto K., Brown C.W. *Introductory Raman spectroscopy*. Elsevier; 2003, 434 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-254105-6.X5000-8>.

27. McMillan P. A Raman spectroscopic study of glasses in the system CaO–MgO–SiO₂. *American Mineralogist*. 1984;69(7-8):645-659.

28. Ilin A.A., Zobnin N.N., Pikalova I.A., Nemchinova N.V. Distribution of iron and boron between silicon metal smelting products in industrial SAF using borate fluxes. *Silicon*. 2024;16:3085-3092. <https://doi.org/10.1007/s12633-024-02895-z>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Немчинова Нина Владимировна,

д.т.н., профессор,
заведующий кафедрой металлургии
цветных металлов,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
✉ ninavn@yandex.ru
<http://orcid.org/0000-0001-9895-1709>

Ильин Александр Александрович,

научный сотрудник,
Карагандинский индустриальный университет,
101400, г. Темиртау, пр. Республики, 30,
Республика Казахстан
worldilyins@gmail.com
<http://orcid.org/0009-0003-8167-9640>

Тютрин Андрей Александрович

к.т.н., доцент,
доцент кафедры металлургии цветных металлов,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
an.tu@inbox.ru,
<http://orcid.org/0000-0001-9983-2680>

Галачиева Светлана Владимировна

д.э.н., профессор,
первый проректор,
Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(государственный технологический университет),
362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44, Россия
svetagalachieva@list.ru
<http://orcid.org/0000-0002-7193-0454>

Яковлева Ариадна Алексеевна,

д.т.н., профессор,
профессор кафедры химии
и биотехнологии им. проф. В.В. Тутуриной,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
ayakovistu@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0002-5747-2864>

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>

Alexander A. Ilin,

Researcher,
Karaganda Industrial University,
30, Respubliki pr., Temirtau 101400,
Republic of Kazakhstan,
worldilyins@gmail.com
<http://orcid.org/0009-0003-8167-9640>

Andrey A. Tyutrin

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Non-Ferrous Metals Metallurgy,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
an.tu@inbox.ru,
<http://orcid.org/0000-0001-9983-2680>

Svetlana V. Galachieva,

Dr. Sci. (Econ.), Professor,
First Vice-Rector,
North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy
(State Technological University),
44, Nikolaev St., Vladikavkaz 362021, Russia
svetagalachieva@list.ru
<http://orcid.org/0000-0002-7193-0454>

Ariadna A. Yakovleva,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Chemistry
and Biotechnology
named after Professor V.V. Tuturina,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
ayakovistu@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0002-5747-2864>

Заявленный вклад авторов

Немчинова Н.В. осуществляла научное руководство исследованиями. Ильин А.А. провел эксперименты, обобщил полученные результаты. Тютрин А.А. сделал выводы по результатам исследований, осуществил графическую интерпретацию результатов исследований. Галачиева С.В. осуществляла консультационное сопровождение экспериментальных работ. Яковлева А.А. проводила подбор литературных источников по тематике и общее редактирование текста рукописи.

Конфликт интересов

Немчинова Нина Владимировна 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 25.06.2024 г.; одобрена после рецензирования 10.08.2024 г.; принята к публикации 10.09.2024 г.

Authors' contribution

Nina V. Nemchinova carried out scientific supervision of the research. Alexander A. Ilin conducted experiments and summarized the obtained results. Andrey A. Tyutrin derived conclusions based on the research results as well as diagrammed the research results. Svetlana V. Galachieva provided consultative support for the experimental work. Ariadna A. Yakovleva selected literary sources on the research topic and generally edited the manuscript.

Conflict of interests

Nina V. Nemchinova has been a member of the iPolytech Journal Editorial Board since 2000, but she was not involved in making decision about accepting the present article for publication. The article was subjected 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 25.06.2024; approved after reviewing 10.08.2024; accepted for publication 10.09.2024.



Определение кинетических характеристик растворения борнита и халькопирита в азотной кислоте

Ю. Шкляев¹, О.А. Дизер^{2✉}, Т.Н. Луговичская³, Д.И. Головкин⁴, Д.А. Рогожников⁵

¹⁻⁵Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Резюме. Цель данного исследования заключается в определении кинетических характеристик процесса растворения в азотной кислоте сульфидных медьсодержащих минералов: халькопирита (CuFeS_2) и борнита (Cu_5FeS_4). Для описания кинетики процесса использовалась модель сжимающегося ядра. В качестве основного сырья для проведения исследований были использованы минералы халькопирит Воронцовского и борнит Карабашского месторождений. Растворы анализировали оптико-эмиссионным спектральным методом, кеки – волновым рентгенофлуоресцентным. Обработка результатов исследований осуществлялась с помощью пакета прикладных программ MS Excel. Проведены исследования по изучению влияния различных факторов (температуры, концентрации растворителя, крупности частиц и продолжительности процесса) на степень растворения минералов. Температурный диапазон варьировался от 35 до 95 °С, концентрация HNO_3 изменялась от 1 до 9 моль/дм³, размер частиц – от +0,1 до 0,056 мм, продолжительность – от 0 до 60 мин. Установлено, что увеличение температуры и концентрации кислоты значительно повышает степень растворения как халькопирита, так и борнита. Показано, что уменьшение размера частиц также способствует более эффективному растворению обоих минералов в азотной кислоте. Рассчитанные значения энергии активации составили 55 кДж/моль для халькопирита и 43 кДж/моль для борнита, соответственно, что характерно для кинетической области протекания процесса. Были определены порядки реакции по реагенту: 1,62 для халькопирита и 1,57 для борнита, а также по размеру частиц: -1,16 для халькопирита и -2,53 для борнита. Эти данные позволили вывести обобщенные уравнения кинетики растворения обоих минералов. Таким образом, на основании проведенных расчетов и анализа результатов было сделано предположение, что процесс растворения халькопирита и борнита в изучаемых условиях протекает в кинетическом режиме

Ключевые слова: медь, железо, халькопирит, борнит, растворение, азотная кислота, кинетические характеристики, энергия активации, кинетическое уравнение

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Госзадания Российской Федерации по Гранту № 075-03-2024-009/1 (FEUZ-2024-0010).

Для цитирования: Шкляев Ю., Дизер О.А., Луговичская Т.Н., Головкин Д.И., Рогожников Д.А. Определение кинетических характеристик растворения борнита и халькопирита в азотной кислоте // iPolytechJournal. 2024. Т. 28. № 3. С. 576–584. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-576-584>. EDN: WTLVTK.

METALLURGY

Original article

Kinetic characteristics of bornite and chalcopyrite dissolution in nitric acid

Yurii Shklyayev¹, Oleg A. Dizer^{2✉}, Tatyana N. Lugovitskaya³, Dmitry I. Golovkin⁴, Denis A. Rogozhnikov⁵

¹⁻⁵Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Russia

Abstract. The kinetic characteristics of dissolution of copper-bearing sulfides – chalcopyrite (CuFeS_2) and bornite (Cu_5FeS_4) – in nitric acid were studied. The kinetics of the dissolution process was described using a compressible nucleus model. Chalcopyrite of the Vorontsovskoye deposit and bornite of the Karabash deposit were used as research objects. Solution and cake samples were analyzed by optical emission spectrometry and X-ray fluorescence analysis, respectively. The results obtained were processed in the MS Excel software package. The influence of various factors, including temperature, solvent concentration, particle size, and process duration on the dissolution degree of minerals was studied. The process parameters were varied as follows: temperature – from 35

to 95 °C; HNO₃ concentration – from 1 to 9 mol/dm³; particle size – from +0.1 to 0.056 mm; duration – from 0 to 60 min. It was established that an increase in temperature and acid concentration leads to a significant increase in the degree of dissolution of both chalcopyrite and bornite. A decrease in particle size also contributes to a more efficient dissolution of both minerals in nitric acid. The calculated activation energy values were 55 kJ/mol for chalcopyrite and 43 kJ/mol for bornite, which is characteristic of the kinetic region of the process. The reaction orders in terms of reactant were determined: 1.62 for chalcopyrite and 1.57 for bornite. In terms of particle size, these were -1.16 for chalcopyrite and -2.53 for bornite. On this basis, generalized equations of dissolution kinetics for both minerals were derived. The results obtained allow an assumption about the kinetic nature of dissolution of chalcopyrite and bornite under the studied conditions.

Keywords: copper, iron, chalcopyrite, bornite, dissolution, nitric acid, kinetic characteristics, activation energy, kinetic equation

Funding. The study was carried out with the financial support of the State Assignment of the Russian Federation under the Grant no. 075-03-2024-009/1 (FEUZ-2024-0010).

For citation: Shklyayev Yu., Dizer O.A., Lugovitskaya T.N., Golovkin D.I., Rogozhnikov D.A. Kinetic characteristics of bornite and chalcopyrite dissolution in nitric acid. *iPolytech Journal*. 2024;28(3):576-584. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-576-584>. EDN: WTLVTK.

ВВЕДЕНИЕ

В современной эпохе промышленности существует разнообразие методов переработки медного сырья, причем наиболее распространенными и эффективными являются пирометаллургические методы. Эти методы обеспечивают высокую эффективность извлечения меди и высокое содержание меди в конечном продукте [1]. Однако они не лишены недостатков, таких как необходимость дополнительной переработки, высокий расход кокса, сложность обслуживания и высокие затраты [2].

В связи с этим с каждым днем гидрометаллургические технологии приобретают все большую популярность в области переработки медных руд. Среди современных гидрометаллургических методов особое внимание привлекают хлоридные [3, 4], сульфатные [5–9] и аммиачные процессы выщелачивания [10], а также биовыщелачивание [11–17] и автоклавное окисление [18–21].

Главными недостатками биовыщелачивания являются сложность поддержания жизнедеятельности применяемых микроорганизмов, необходимость создания больших отапливаемых помещений, значительная продолжительность процесса [22]. Основные трудности при реализации автоклавных процессов связаны с высокой энергоемкостью и большими капитальными вложениями.

Для повышения эффективности гидрометаллургических методов выщелачивания широко применяются технологии сверхтонкого измельчения, такие как технологии Albion и Activox [23]. Однако существуют сложности, связанные с капитальными затратами на

оборудование и высокими энергозатратами при получении мелкодисперсного материала.

В данной ситуации актуальна разработка нового эффективного метода переработки комплексных сульфидных медных руд. Один из перспективных подходов в этом направлении – азотнокислотное выщелачивание. Азотная кислота обладает сильными окислительными свойствами (окислительный потенциал 0,957 В). Она способна разлагать сульфидные минералы, переводя медь, железо, цинк и другие ценные компоненты в раствор. Достоинством этого процесса является возможность улавливания образующихся нитрозных газов с дальнейшей регенерацией азотной кислоты. Благодаря этому уменьшаются затраты на реагент [24].

Хотя некоторое количество работ [25, 26] посвящено изучению кинетики азотнокислотного растворения сульфидных медных руд, существует потребность в дальнейших исследованиях для более глубокого понимания процессов на примере природных минералов.

Цель данного исследования заключается в изучении определения закономерностей азотнокислотного растворения халькопирита и борнита.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве основного сырья для проведения исследований были использованы минералы халькопирит Воронцовского и борнит Карабашского месторождений. Материалы для исследований были измельчены и просеяны на ситах для получения необходимой крупности частиц.

Исследования по азотнокислотному растворению сульфидных медных минералов

проводились с использованием установки, включающей реактор из боросиликатного стекла объемом 0,5 дм³ и термостат Huber Kiss K6. Перемешивание осуществляли при помощи верхнеприводной мешалки Eurostar 20 digital. Перед проведением эксперимента раствор нагревали до требуемой температуры, затем добавляли 10 г исходного материала. Через определенные промежутки времени в течение часа отбирали пробы. В конце эксперимента пульпу выщелачивания фильтровали с использованием вакуума для отделения раствора от твердого остатка. Растворы анализировали с использованием оптико-эмиссионного спектрометра EXPEC 6500. Кек сушили и анализировали на волнодисперсионном спектрометре ARL Advant'X 4200.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние температуры на степень растворения минералов было исследовано при следующих постоянных параметрах: концентрация азотной кислоты – 5 моль/дм³, Ж:Т = 20:1, размер частиц – 0,074 + 0,063 мм. На рис. 1 представлены зависимости степени растворения минералов от времени при различных температурах.

Из графиков, представленных на рис. 1, видно, что повышение температуры положительно влияет на процесс растворения халькопирита и борнита. Например, степень растворения CuFeS₂ увеличивается с 5 до 87%, а Cu₅FeS₄ – с 24 до 80% соответственно.

Влияние концентрации HNO₃ на растворение халькопирита и борнита оценивали при следующих параметрах: температура – 65 °С, Ж:Т = 20:1, размер частиц – 0,074 + 0,063 мм. На рис. 2 представлены зависимости степени растворения минералов от продолжительности при различных концентрациях азотной кислоты.

Исходя из данных, представленных на рис. 2, можно отметить, что повышение концентрации HNO₃ оказывает положительное воздействие на процесс растворения халькопирита и борнита. Степень растворения CuFeS₂ увеличивается с 19 до 87%, а Cu₅FeS₄ – с 19 до 81% соответственно.

Для оценки влияния размера частиц на растворение CuFeS₂ и Cu₅FeS₄ использовались следующие условия: температура – 65 °С, Ж:Т = 20:1, концентрация HNO₃ – 5 моль/дм³. На рис. 3 представлены зависимости степени растворения минералов от продолжительности при различной крупности частиц.

Уменьшение размера частиц оказывает положительное влияние на растворение халькопирита и борнита. При этом степень растворения халькопирита увеличивается с 42 до 52%, борнита – с 30 до 66%.

Для расчета кинетических характеристик растворения CuFeS₂ и Cu₅FeS₄ в азотной кислоте использовали модель сжимающегося ядра [27, 28]. Эта модель предполагает, что область реакции постепенно углубляется внутрь частицы, создавая позади себя инертный слой твердого вещества. В каждый момент времени существует ядро еще непрореагировавшего материала, размер которого непрерывно уменьшается.

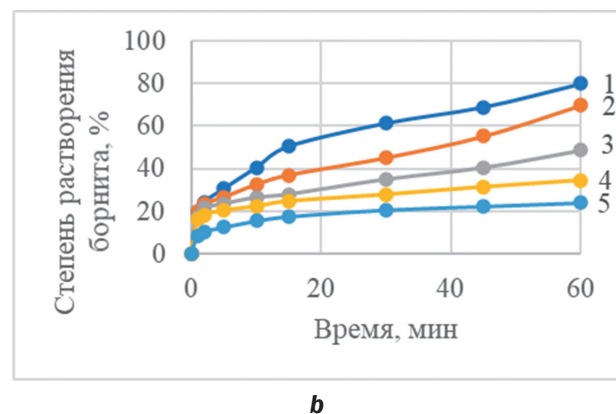
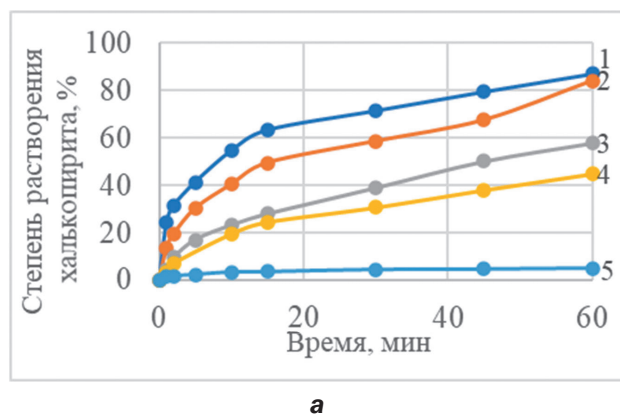


Рис. 1. Зависимости степени растворения минералов от продолжительности при разных температурах для халькопирита (а); для борнита (б): 1 – 95 °С; 2 – 80 °С; 3 – 65 °С; 4 – 50 °С; 5 – 35 °С

Fig. 1. Mineral dissolution degree vs time at different temperatures for chalcopyrite (a); for bornite (b): 1 – 95 °С; 2 – 80 °С; 3 – 65 °С; 4 – 50 °С; 5 – 35 °С

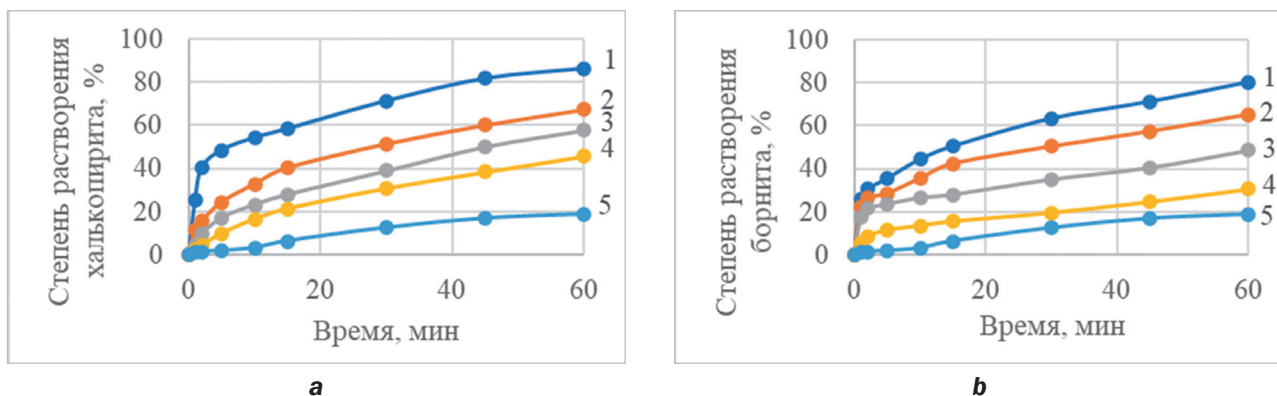


Рис. 2. Зависимости степени растворения минералов от продолжительности при различных концентрациях азотной кислоты для халькопирита (а); для борнита (б): 1 – 9 моль/дм³; 2 – 7 моль/дм³; 3 – 5 моль/дм³; 4 – 3 моль/дм³; 5 – 1 моль/дм³
Fig. 2. Mineral dissolution degree vs time at different concentrations of nitric acid for chalcopyrite (a); for bornite (b): 1 – 9 mol/dm³; 2 – 7 mol/dm³; 3 – 5 mol/dm³; 4 – 3 mol/dm³; 5 – 1 mol/dm³

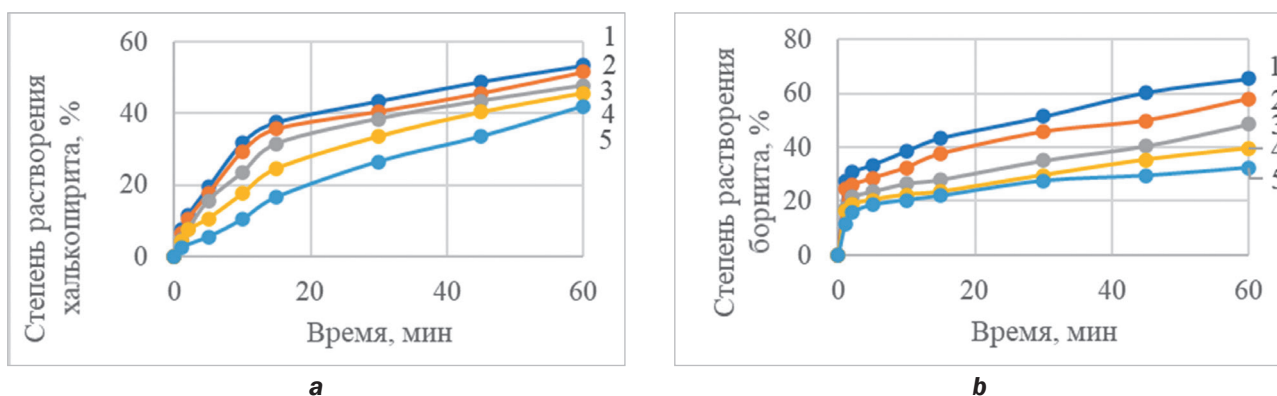


Рис. 3. Зависимости степени растворения минералов от продолжительности при различной крупности халькопирита (а); для борнита (б): 1 – -0,056 мм; 2 – -0,063 + 0,056 мм; 3 – -0,074 + 0,063 мм; 4 – -0,1 + 0,074 мм; 5 – +0,1 мм
Fig. 3. Mineral dissolution degree vs time at different particle sizes for chalcopyrite (a); for bornite (b): 1 – -0.056 mm; 2 – -0.063 + 0.056 mm; 3 – -0.074 + 0.063 mm; 4 – -0.1 + 0.074 mm; 5 – +0.1 mm

По результатам анализа значения коэффициента детерминации было установлено, что процесс растворения обоих минералов протекает в кинетическом режиме.

С использованием графического метода для обоих минералов были вычислены значения минимальной избыточной энергии, не-

обходимой для начала реакции. Расчет проводился на основе зависимости логарифма константы скорости (рис. 4) от обратной температуры (рис. 5). Путем определения тангенса угла наклона прямой были получены значения: для халькопирита – 55 кДж/моль и для борнита – 43 кДж/моль.

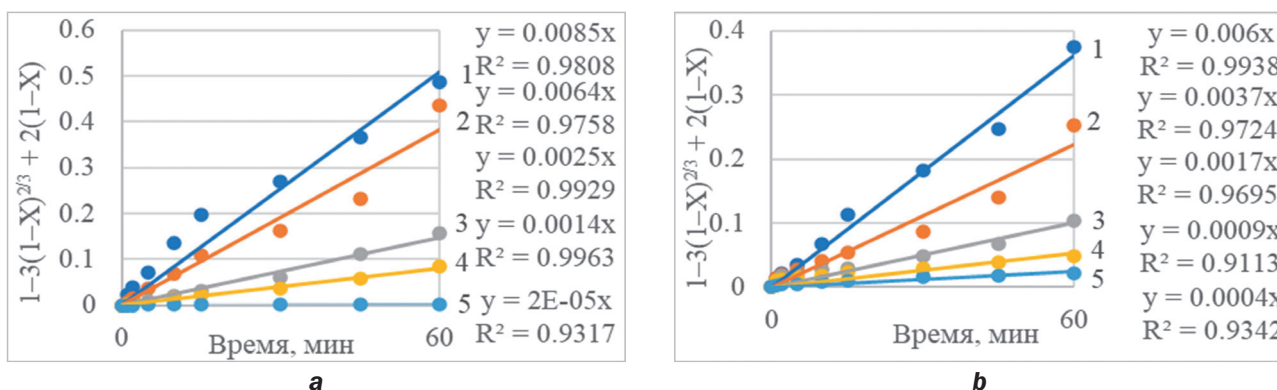
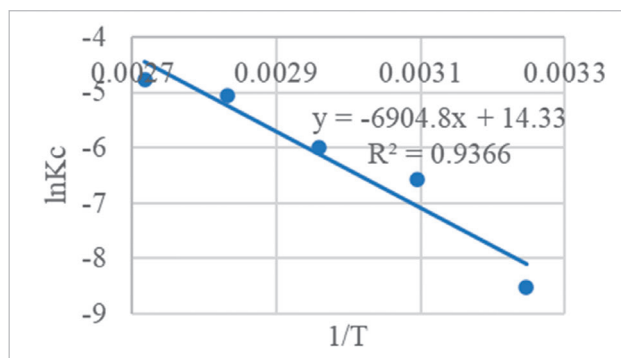
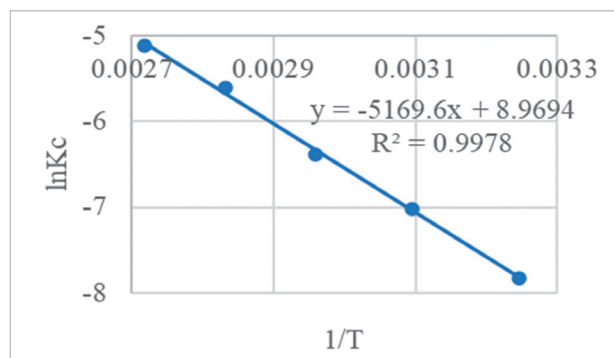


Рис. 4. Определение k_c для халькопирита (а); для борнита (б): 1 – 95°C; 2 – 80°C; 3 – 65°C; 4 – 50°C; 5 – 35°C
Fig. 4. k_c determination for chalcopyrite (a); for bornite (b): 1 – 95°C; 2 – 80°C; 3 – 65°C; 4 – 50°C; 5 – 35°C



a



b

Рис. 5. Зависимость $\ln K_c$ от $1/T$ для халькопирита (a); для борнита (b)Fig. 5. $\ln K_c$ vs $1/T$ for chalcopirite (a); for bornite (b)

Аналогичным методом, используя графики зависимости логарифма константы скорости реакции от логарифма концентрации азотной кислоты и размера частиц, были определены эмпирические порядки по реагенту (1,62 для халькопирита и 1,57 для борнита) и размеру частиц (-1,16 для халькопирита и -2,53 для борнита).

Согласно результатам проведенных исследований, были выведены обобщенные кинетические уравнения для азотнокислотного растворения халькопирита, борнита.

Для CuFeS_2 :

$$1 - 3(1-X)^{2/3} + 2(1-X) = 2488,2 \cdot C_{\text{HNO}_3}^{1,62} \cdot r^{-1,16} \cdot e^{\frac{-55410}{8,314 \cdot T}} \cdot t$$

Для Cu_5FeS_4 :

$$1 - 3(1-X)^{2/3} + 2(1-X) = 793,8 \cdot C_{\text{HNO}_3}^{1,57} \cdot r^{-2,53} \cdot e^{\frac{-42980}{8,314 \cdot T}} \cdot t$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выявлено, что концентрация азотной кислоты и температура оказывают наиболее благоприятное воздействие на процесс растворения халькопирита и борнита, в то время как уменьшение размеров частиц оказывает менее значительное влияние.

2. С применением модели сжимающегося ядра были определены значения минимальной избыточной энергии, необходимой для начала реакции растворения для халькопирита (CuFeS_2) – 55 кДж/моль и для борнита (Cu_5FeS_4) – 43 кДж/моль. Порядки реакций по реагенту для халькопирита и борнита составляют 1,62 и 1,57 соответственно. А по крупности порядки реакций для халькопирита и борнита равны -1,16 и -2,53.

3. Получены обобщенные уравнения, позволяющие на основании значений энергии активации, температуры, порядков по реагенту и крупности, концентрации азотной кислоты, размера частиц, продолжительности процесса спрогнозировать степень растворения обоих минералов.

Для CuFeS_2 :

$$1 - 3(1-X)^{2/3} + 2(1-X) = 2488,2 \cdot C_{\text{HNO}_3}^{1,62} \cdot r^{-1,16} \cdot e^{\frac{-55410}{8,314 \cdot T}} \cdot t$$

Для Cu_5FeS_4 :

$$1 - 3(1-X)^{2/3} + 2(1-X) = 793,8 \cdot C_{\text{HNO}_3}^{1,57} \cdot r^{-2,53} \cdot e^{\frac{-42980}{8,314 \cdot T}} \cdot t$$

4. На основании проведенных расчетов сделано предположение, что процесс растворения халькопирита и борнита при данных условиях протекает в кинетическом режиме.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Japel S., Schwager B., Ross M., Boehler R. Melting of copper and nickel at high pressure: the role of delectrons // Physical review letters. 2005. Vol. 95. Iss. 16. P. 167801. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.95.167801>.
2. Khojiev S.T.T. Pyrometallurgical processing of copper slags into the metallurgical ladle // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. 2019. Vol. 6. Iss. 2. P. 8094–8099.

3. Ma Yalong, Yang Yi, Fan Rong, Gao Xiyu, Zheng Lei, Chen Miao. Chalcopyrite leaching in ammonium chloride solutions under ambient conditions: insight into the dissolution mechanism by XANES, Raman spectroscopy and electrochemical studies // *Minerals Engineering*. 2021. Vol. 170. Iss. 15. P. 107063. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107063>.
4. Jara C., Harris R., Abbolt A., Jenkin G. Chemical dissolution of chalcopyrite concentrate in choline chloride ethylene glycol deep eutectic solven // *Minerals*. 2022. Vol. 12. Iss. 1. P. 65. <https://doi.org/10.3390/min12010065>.
5. Dutrizac J.E., Macdonald R.J.C., Ingraham T.R. The kinetics of dissolution of bornite sulfate solutions // *Metallurgical transactions*. 1970. Vol. 1. P. 225–231. <https://doi.org/10.1007/BF02819265>.
6. Winarko R., Dreisinger D.B., Miura A., Fukano Yu., Liu Wenying. Characterization of the solid leach residues from the iodine-assisted chalcopyrite leaching in ferric sulfate media // *Hydrometallurgy*. 2024. Vol. 226. P. 106302. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2024.106302>.
7. Muravyov M., Panyushkina A. Comparison of sphalerite, djurleite, and chalcopyrite leaching by chemically and biologically generated ferric sulfate solutions // *Hydrometallurgy*. 2023. Vol. 219. P. 106067. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106067>.
8. Winarko R., Dreisinger D.B., Miura A., Fukano Yu., Liu Wenying. Iodine-assisted chalcopyrite leaching in ferric sulfate media: kinetic study under fully controlled redox potential and pH // *Hydrometallurgy*. 2022. Vol. 208. P. 105797. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105797>.
9. Булаев А.Г., Меламуд В.С., Бодуэн А.Я. Высокотемпературное выщелачивание меди и цинка из некондиционного концентрата с высоким содержанием мышьяк // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2018. № 12-1. С. 72–76. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.012>.
10. Hua Xiao-ming, Zheng Yong-fei, Xu Qian, Lu Xiong-gang. Interfacial reactions of chalcopyrite in ammonia–ammonium chloride solution // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2018. Vol. 28. Iss. 3. P. 556–566. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(18\)64688-6](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(18)64688-6).
11. Toledo A.G.R., Costa R.B., Delforno T.P., Arena F.A., Bevilacqua D. Exploring chalcopyrite (bio)leaching mechanisms under thermophilic conditions // *Minerals Engineering*. 2023. Vol. 204. P. 108417. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108417>.
12. Liu Mengfei, Zhu Jinglei, Zhang Chenyang, He Peng, Chen Daixiong, Zhong Guojian, et al. Effect of calcium lignosulfonate on surface modification and bioleaching of chalcopyrite // *Biochemical Engineering Journal*. 2024. Vol. 207. P. 109329. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2024.109329>.
13. Zhang Hao, Wei Dezhou, Liu Wengang, Hou Duanxu, Zhang Ruiyang. Effect of polyvinyl pyrrolidone on chalcopyrite bioleaching with *Acidithiobacillus ferrooxidans* // *Hydrometallurgy*. 2021. Vol. 205. № 12(1). P. 105753. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105753>.
14. Хайнасова Т.С. Биовыщелачивание сульфидной кобальт-медно-никелевой руды с применением стандартной и модифицированной сред 9K // *Успехи современного естествознания*. 2019. № 12-1. С. 175–180. <https://doi.org/10.17513/use.37286>. EDN: BCAEVQ.
15. Хайнасова Т.С. Биовыщелачивание халькопирита из сульфидных медно-никелевых руд (обзор) // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2020. № S46. С. 247–264. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-12-46-247-264>. EDN: IGPDPK.
16. Елкина Ю.А., Мельникова Е.А., Меламуд В.С., Булаев А.Г. Биовыщелачивание теннантита и энэргита умеренно-термофильными ацидофильными микроорганизмами // *Микробиология*. 2020. Т. 89. № 4. С. 419–431. <https://doi.org/10.31857/S0026365620040059>. EDN: QIRGDH.
17. Елкина Ю.А., Меламуд В.С., Булаев А.Г. Биовыщелачивание медно-цинкового концентрата с высоким содержанием мышьяка // *Микробиология*. 2021. Т. 90. № 1. С. 90–99. <https://doi.org/10.31857/S0026365620060038>. EDN: IBCOUH.
18. Bai Yunlong, Wang Wei, Xie Feng, Lu Diankun, Jiang Kaixi, Dreisinger D. In-situ electrochemical study of chalcopyrite pressure oxidation leaching from 110 °C to 150 °C under saturated vapor pressure // *Arabian Journal of Chemistry*. 2022. Vol. 15. Iss. 10. P. 104139. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.104139>.
19. Turan M.D., Sari Z.A., Nizamoglu H. Pressure leaching of chalcopyrite with oxalic acid and hydrogen peroxide // *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2021. Vol. 118. P. 112–120. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2020.10.021>.
20. McDonald R.G., Li Jian, Austin P.J. High temperature pressure oxidation of a low-grade nickel sulfide concentrate with control of the residue composition // *Minerals*. 2020. Vol. 10. Iss. 3. P. 249. <https://doi.org/10.3390/min10030249>.
21. Karimov K.A., Rogozhnikov D.A., Kuzas E.A., Shoppert A.A. Leaching kinetics of arsenic sulfide-containing materials by copper sulfate solution // *Metals*. 2020. Vol. 10. Iss.1. P. 7. <https://doi.org/10.3390/met10010007>.
22. Ghosh A.G., Pandey B.D. Bioleaching of low-grade granitic chalcopyrite ore by hyperthermophiles: elucidation of kinetics-mechanism // *Metallurgical Research Technology*. 2015. Vol. 112. Iss. 5. P. 506. <https://doi.org/10.1051/metal/2015031>.
23. Johnson G., Corrans I., Angove J. The Activox process for refractory gold ores // *Randol Gold Forum - Beaver Creek*. 1993. Vol. 93. P. 183–189.
24. Karimov K., Rogozhnikov D., Kuzas E., Dizer O., Golovkin D., Tretiak M. Deposition of arsenic from nitric acid leaching solutions of gold-arsenic sulphide concentrates // *Metals*. 2021. Vol. 11. Iss. 6. P. 889. <https://doi.org/10.3390/met11060889>.
25. Agacayak T., Aras A. Leaching of chalcopyrite concentrate (CuFeS₂) in nitric acid (HNO₃) solution // *Academic Journal of Science*. 2013. Vol. 2. Iss. 1. P. 61–65.

26. Alafara A.B., Kuranga I.A., Rafiu B.B., Folahan A.A. Quantitative leaching of a Nigerian chalcopryrite ore by nitric acid // Bayero Journal of Pure and Applied Sciences. 2014. Vol. 7. Iss. 2. P. 115–121. <http://dx.doi.org/10.4314/bajopas.v7i2.20>.
27. Levenspiel O. Chemical reaction engineering. New York: Wiley, 1999. 688 p.
28. Rogozhnikov D., Karimov K., Shoppert A., Dizer O., Naboichenko S. Kinetics and mechanism of arsenopyrite leaching in nitric acid solutions in the presence of pyrite and Fe(III) ions // Hydrometallurgy. 2021. Vol. 199. P. 105525. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105525>.

References

1. Japel S., Schwager B., Ross M., Boehler R. Melting of copper and nickel at high pressure: the role of delectrons. *Physical review letters*. 2005;95(16):167801. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.95.167801>.
2. Khojiev S.T.T. Pyrometallurgical processing of copper slags into the metallurgical ladle. *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*. 2019;6(2):8094-8099.
3. Ma Yalong, Yang Yi, Fan Rong, Gao Xiyu, Zheng Lei, Chen Miao. Chalcopryrite leaching in ammonium chloride solutions under ambient conditions: insight into the dissolution mechanism by XANES, Raman spectroscopy and electrochemical studies. *Minerals Engineering*. 2021;170(15):107063. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107063>.
4. Jara C., Harris R., Abbolt A., Jenkin G. Chemical dissolution of chalcopryrite concentrate in choline chloride ethylene glycol deep eutectic solven. *Minerals*. 2022;12(1):65. <https://doi.org/10.3390/min12010065>.
5. Dutrizac J.E., Macdonald R.J.C., Ingraham T.R. The kinetics of dissolution of bornite sulfate solutions. *Metallurgical transactions*. 1970;1:225-231. <https://doi.org/10.1007/BF02819265>.
6. Winarko R., Dreisinger D.B., Miura A., Fukano Yu., Liu Wenying. Characterization of the solid leach residues from the iodine-assisted chalcopryrite leaching in ferric sulfate media. *Hydrometallurgy*. 2024;226:106302. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2024.106302>.
7. Muravyov M., Panyushkina A. Comparison of sphalerite, djurleite, and chalcopryrite leaching by chemically and biologically generated ferric sulfate solutions. *Hydrometallurgy*. 2023;219:106067. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106067>.
8. Winarko R., Dreisinger D.B., Miura A., Fukano Yu., Liu Wenying. Iodine-assisted chalcopryrite leaching in ferric sulfate media: kinetic study under fully controlled redox potential and pH. *Hydrometallurgy*. 2022;208:105797. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105797>.
9. Bulaev A.G., Melamud V.S., Boduen A.Ya. High-temperature biox of copper and zinc from non-standard concentrate with high content of arsenic. *International Research Journal*. 2018;12-1:72-76. (In Russ.). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.012>.
10. Hua Xiao-ming, Zheng Yong-fei, Xu Qian, Lu Xiong-gang. Interfacial reactions of chalcopryrite in ammonia-ammonium chloride solution. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2018;28(3):556-566. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(18\)64688-6](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(18)64688-6).
11. Toledo A.G.R., Costa R.B., Delforno T.P., Arena F.A., Bevilaqua D. Exploring chalcopryrite (bio)leaching mechanisms under thermophilic conditions. *Minerals Engineering*. 2023;204:108417. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108417>.
12. Liu Mengfei, Zhu Jinglei, Zhang Chenyang, He Peng, Chen Daixiong, Zhong Guojian, et al. Effect of calcium lignosulfonate on surface modification and bioleaching of chalcopryrite. *Biochemical Engineering Journal*. 2024;207:109329. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2024.109329>.
13. Zhang Hao, Wei Dezhou, Liu Wengang, Hou Duanxu, Zhang Ruiyang. Effect of polyvinyl pyrrolidone on chalcopryrite bioleaching with Acidithiobacillus ferrooxidans. *Hydrometallurgy*. 2021;205(12-1):105753. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105753>.
14. Khaynasova T.S. Bioleaching of sulfide cobalt-copper-nickel ore using the standard and modified 9k media. *Advances in current natural sciences*. 2019;12-1:175-180. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/use.37286>. EDN: BCAEVQ.
15. Khainasova T.S. Bioleaching of chalcopryrite from sulphide copper-nickel ore (review). *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;S46:247-264. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-12-46-247-264>. EDN: IGPPDK.
16. Elkina Yu.A., Melnikova E.A., Melamud V.S., Bulaev A.G. Bioleaching of enargite and tennantite by moderately thermophilic acidophilic microorganisms. *Microbiology*. 2020;89(4):419-431. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0026365620040059>. EDN: QIRGDH.
17. Elkina Yu.A., Melamud V.S., Bulaev A.G. Bioleaching of a copper-zinc concentrate with high arsenic content. *Microbiology*. 2021;90(1):90-99. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0026365620060038>. EDN: IBCOUH.
18. Bai Yunlong, Wang Wei, Xie Feng, Lu Diankun, Jiang Kaixi, Dreisinger D. In-situ electrochemical study of chalcopryrite pressure oxidation leaching from 110 °C to 150 °C under saturated vapor pressure. *Arabian Journal of Chemistry*. 2022;15(10):104139. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.104139>.
19. Turan M.D., Sari Z.A., Nizamoglu H. Pressure leaching of chalcopryrite with oxalic acid and hydrogen peroxide. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2021;118:112-120. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2020.10.021>.
20. McDonald R.G., Li Jian, Austin P.J. High temperature pressure oxidation of a low-grade nickel sulfide concentrate with control of the residue composition. *Minerals*. 2020;10(3):249. <https://doi.org/10.3390/min10030249>.
21. Karimov K.A., Rogozhnikov D.A., Kuzas E.A., Shoppert A.A. Leaching kinetics of arsenic sulfide-containing materials by copper sulfate solution. *Metals*. 2020;10(1):7. <https://doi.org/10.3390/met10010007>.
22. Ghosh A.G., Pandey B.D. Bioleaching of low-grade granitic chalcopryrite ore by hyperthermophiles: elucidation of kinetics-mechanism. *Metallurgical Research Technology*. 2015;112(5):506. <https://doi.org/10.1051/met/2015031>.

23. Johnson G., Corrans I., Angove J. The Activox process for refractory gold ores. In: *Randol Gold Forum - Beaver Creek*. 1993;93:183-189.
24. Karimov K., Rogozhnikov D., Kuzas E., Dizer O., Golovkin D., Tretiak M. Deposition of arsenic from nitric acid leaching solutions of gold-arsenic sulphide concentrates. *Metals*. 2021;11(6):889. <https://doi.org/10.3390/met11060889>.
25. Agacayak T., Aras A. Leaching of chalcopyrite concentrate (CuFeS₂) in nitric acid (HNO₃) solution. *Academic Journal of Science*. 2013;2(1):61-65.
26. Alafara A.B., Kuranga I.A., Rafiu B.B., Folahan A.A. Quantitative leaching of a Nigerian chalcopyrite ore by nitric acid. *Bayero Journal of Pure and Applied Sciences*. 2014;7(2):115-121. <http://dx.doi.org/10.4314/bajopas.v7i2.20>.
27. Levenspiel O. *Chemical reaction engineering*. New York: Wiley; 1999, 688 p.
28. Rogozhnikov D., Karimov K., Shoppert A., Dizer O., Naboichenko S. Kinetics and mechanism of arsenopyrite leaching in nitric acid solutions in the presence of pyrite and Fe(III) ions. *Hydrometallurgy*. 2021;199:105525. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105525>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шкляев Юрий,

инженер – исследователь,
Научная лаборатория перспективных технологий
комплексной переработки минерального
и техногенного сырья цветных и черных металлов,
Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 19, Россия
iushklyayev@urfu.ru
<https://orcid.org/0009-0001-4220-4330>

Дизер Олег Анатольевич,

к.т.н.,
старший научный сотрудник,
Научная лаборатория перспективных технологий
комплексной переработки минерального
и техногенного сырья цветных и черных металлов,
Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 19, Россия
✉ oleg.dizer@urfu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7705-0864>

Луговицкая Татьяна Николаевна,

к.т.н.,
старший научный сотрудник,
Научная лаборатория перспективных технологий
комплексной переработки минерального
и техногенного сырья цветных и черных металлов,
Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 19, Россия
t.n.lugovitskaia@urfu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7705-0864>

Головкин Дмитрий Игоревич

младший научный сотрудник,
Научная лаборатория перспективных технологий
комплексной переработки минерального
и техногенного сырья цветных и черных металлов,
Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 19, Россия
dmitry.golovkin@urfu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6308-4086>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yurii Shklyayev,

Research Engineer,
Scientific Laboratory of Advanced Technologies
for Complex Processing
of Mineral and Man-Made Raw Materials
of Non-Ferrous and Ferrous Metals,
Ural Federal University named after the first President
of Russia B.N. Yeltsin,
19 Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia
iushklyayev@urfu.ru
<https://orcid.org/0009-0001-4220-4330>

Oleg A. Dizer,

Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher,
Scientific Laboratory of Advanced Technologies
for Complex Processing
of Mineral and Man-Made Raw Materials
of Non-Ferrous and Ferrous Metals,
Ural Federal University named after the first President
of Russia B.N. Yeltsin,
19 Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia
✉ oleg.dizer@urfu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7705-0864>

Tatyana N. Lugovitskaya,

Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher,
Scientific Laboratory of Advanced Technologies
for Complex Processing
of Mineral and Man-Made Raw Materials
of Non-Ferrous and Ferrous Metals,
Ural Federal University named after the first President
of Russia B.N. Yeltsin,
19 Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia
t.n.lugovitskaia@urfu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7705-0864>

Dmitry I. Golovkin,

Junior Researcher,
Scientific Laboratory of Advanced Technologies
for Complex Processing
of Mineral and Man-Made Raw Materials
of Non-Ferrous and Ferrous Metals,
Ural Federal University named after the first President
of Russia B.N. Yeltsin,
19 Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia
dmitry.golovkin@urfu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6308-4086>

Рогожников Денис Александрович,

д.т.н., доцент,
заведующий лабораторией,
Научная лаборатория перспективных технологий
комплексной переработки минерального
и техногенного сырья цветных и черных металлов,
Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 19, Россия
darogozhnikov@urfu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5940-040X>

Denis A. Rogozhnikov,

Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Head of the Laboratory,
Scientific Laboratory of Advanced Technologies
for Complex Processing
of Mineral and Man-Made Raw Materials
of Non-Ferrous and Ferrous Metals,
Ural Federal University named after the first President
of Russia B.N. Yeltsin,
19 Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia,
darogozhnikov@urfu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5940-040X>

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготов-
ку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный
вариант рукописи.*

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 11.03.2024 г.; одобре-
на после рецензирования 30.04.2024 г.; принята к
публикации 05.07.2024 г.

Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 11.03.2024; approved
after reviewing 30.04.2024; accepted for publication
05.07.2024.

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. Рукопись статьи направляется в редакцию через online форму (после предварительной регистрации авторов). Рекомендуемый объем статьи не менее 20 000 знаков.

К статье прилагаются:

1. Экспертное заключение от аффилированной организации о возможности публикаций в открытой печати.
2. Лицензионный договор.

3. Название рубрики, в которой должна быть размещена Ваша статья; УДК; название статьи; реферат (аннотация), количество слов в реферате – не менее 200; ключевые слова (5–7); сведения об авторах: название учреждения, его адрес; фамилия, имя, отчество (полностью); ученая степень; звание и должность; контактный телефон, e-mail и ORCID (вся информация предоставляется одним файлом).

3. Статья должна иметь личную подпись автора; на статьях адъюнктов и аспирантов должна стоять также подпись научного руководителя.

II. **Текст статьи, сведения об авторах, реферат, ключевые слова, адрес учреждения, контактный телефон и E-mail** должны быть также представлены по электронной почте: pgp@istu.edu **в виде файла с расширением *.DOC** – документа, построенного средствами Microsoft Word 97 или последующих версий.

При наборе статьи в Microsoft Word рекомендуются следующие установки:

1) параметры страницы и абзаца: отступы сверху и снизу – 2 см; слева и справа – 2 см; табуляция – 2 см; ориентация – книжная;

2) шрифт – **Times New Roman**, размер – **12**, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;

3) при вставке формул использовать **Microsoft Equation 3** при установках: элементы формулы выполняют 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 «iPolytech Journal» включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий, в которых должны быть науки, (Категория K1) в DOAJ, международный каталог периодических изданий «UlrichsPeriodicals Directory», EBSCO, Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU), представлен в Научной электронной библиотеке «Киберленинка» (CYBERLENINKA), рассылается в Российскую книжную палату, ВИНТИ РАН.

Статьи, опубликованные в журнале «iPolytech Journal», реферируются и рецензируются.

Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям.

Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям. ский национальный исследовательский технический университет», Д-215.

Телефон: **(3952) 40-57-56** – Привалова Галина Петровна, ответственный секретарь.

Факс: **(3952) 405-100**, e-mail: pgp@istu.edu.

Редактор Я.В. Макшанцева
Дизайнер В.Г. Лисицин
Ответственный секретарь
Г.П. Привалова
Перевод на английский язык
Tomas A. Beavitt,
Н.Г. Поповой, В.В. Батицкой
Верстка Ю.В. Макаровой

Выход в свет 30.09.2024 г.
Формат 60х90/8.
Бумага офсетная. Печать трафаретная.
Усл. печ. л. 24.
Тираж 500 экз. Номер по реестру 60/3н.

Издание распространяется бесплатно



iPolytech Journal

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