

ISSN 2782-4004 (PRINT)
ISSN 2782-6341 ONLINE

iPolytech Journal

TOM 27, № 3, 2023 / VOL. 27, № 3, 2023



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

iPolytech Journal

Tom 27, № 3. 2023 /

Vol. 27, № 3. 2023





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 - **4 раза в год**. Языки – **русский и английский**.

Учредитель и издатель:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ФГБОУ ВО ИРНИТУ).

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

Издательство:

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

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (**Роскомнадзор**): Свидетельство о регистрации СМИ : **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 2011 г.;

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

Адрес редакции:

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

SCIENTIFIC 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 tehnicheskogo universiteta) is an academic journal issued 4 times a year since 1997.

Articles are published in Russian and English.

Founder and Publishers:

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

Publishers:

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

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

Founders:

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education
Irkutsk National Research Technical University (INRTU)
The postal address of INRTU-Press:
83A Lermontov St. Irkutsk, 664074
e-mail: pgp@istu.edu



Редакционная коллегия

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

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

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

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

ФЕДОСОВ Д.С., к.т.н., доцент, заведующий кафедрой электрических станций, сетей и систем Иркутского национального исследовательского технического университета, заместитель главного редактора по направлению «Энергетика» (г. Иркутск, Россия)

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

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

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

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

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

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

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

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

КРЮКОВ А.В., д.т.н., академик Российской академии транспорта, член-корр. АН ВШ РФ и Российской инженерной академии, заслуженный энергетик Республики Бурятия, профессор кафедры электроэнергетики транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения (г. Иркутск, Россия)

КУРБАЦКИЙ В.Г., д.т.н., ведущий научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия) , профессор кафедры ветроэнергетики, Университетский колледж Корка, исследователь, Центр морских, климатических и энергетических исследований Ирландского научного фонда MAREI (г. Корк, Ирландия) я д.т.н., профессор, заведующий кафедрой металлургии цветных металлов Уральского Федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург, Россия)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

(г. Иркутск, Россия)

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

СТЫЧИНСКИ З.А., профессор Университета Otto-fon-Gericke (г. Магдебург, Германия)

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

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

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

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

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

Editorial board

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

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

Semen A. ZADES, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Materials Science, Welding and Additive Technologies, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

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

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

Vladimir Yu. BAZHIN, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Head of the Department of Nonferrous Metallurgy, Saint Petersburg Mining University (Saint Petersburg, Russia)

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

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

Yury S. BOROVIKOV, Dr. Sci. (Eng.), Rector, Novgorod State University n.a. Yaroslav-the-Wise (Veliky Novgorod, Russia) Josef GAVLIK, Advanced Professor, Department of Production Technology and Automation, Krakow University of Technology (Krakow, Poland)

PAVEL V. ILYUSHIN, Doctor of Sciences (Engineering), Chief Researcher, Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Head of the Center for Intelligent Electric Power Systems and Distributed Energy

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

Irina N. KOLOSOK, Dr. Sci. (Eng.), Leading researcher, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)

Andrey V. KRYUKOV, Dr. Sci. (Eng.), Academician of the Russian Academy of Transport, Corresponding member of the Academy of Sciences, Higher School of the Russian Federation and the Russian Academy of Engineering, Honored Power Engineer of the Republic of Buryatia, Advanced Professor, Department of Transport Electric Power Industry, Irkutsk State Railway University (Irkutsk, Russia)

Viktor G. KURBATSKY, Dr. Sci. (Eng.), Leading researcher, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)

Paul LEAHY, Professor at University College Cork (Department of Wind Power);Funded Investigator in the Science Foundation Ireland MAREI Centre for Marine, Climate and Energy research (Cork, Ireland)

Sergey V. MAMYACHENKOV, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Head of the Department of Nonferrous Metallurgy, Ural Federal University n.a. the First President of Russia B.N. Yeltsin (Yekaterinburg, Russia)

Igor V. MARCHUK, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Director of the Mechanics and Mathematics Department, Novosibirsk State University (Russia)

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

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

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

Pyotr M. OGAR, Dr. Sci. (Eng.), Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Material Handling, Construction, Road Machinery and Equipment, Bratsk State University (Bratsk, Russia)

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

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

Mohammad Mehdi RASHIDI, Professor Tongji University, (China)

Sergey M. SENDEROV, Dr. Sci. (Eng.), Deputy Director, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)

Valery A. STENNIKOV, Dr. Sci. (Eng.), Advanced Professor, Director, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)

Zbigniew A. STYCZYNSKI, Professor, Otto-von-Guericke University (Magdeburg, Germany) Liu FANG, Professor, Central Southern University (Changsha, Hunan Province, China)

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

Liu FANG, Professor, Central Southern University (Changsha, Hunan Province, China)

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

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

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



Содержание

Машиностроение

Базанов С.А., Анферов В.Н. Методика исследования закрытой гидропередачи с аккумуляторным поддержанием избыточного давления во всасывающей линии насоса.....	462
Бычковский В.С. Технологический процесс исследования маслонаполнения деталей из полиамидных материалов	472
Зедгенизов В.Г., Сенотрусова Т.А. Результаты исследований ударного механизма с повышенной энергией единичного удара на физической модели	482
Казимиров Д.Ю., Исаченко А.С. Влияние режимов обработки центробежно-ударным прочнителем на микротвёрдость поверхности деталей из алюминиевых сплавов	490
Махалов М.С., Кречетов А.А., Блюменштейн В.Ю., Горбатенко В.В. Методика обработки экспериментальных данных при исследовании остаточных напряжений сверлением зондирующих отверстий с использованием метода цифровой корреляции изображений.....	501
Мокрицкий Б.Я., Космынин А.В. Проектирование покрытий металлорежущего инструмента на атомарном уровне	511

Энергетика

Гришаев Д.А., Радзюк А.Ю., Истягина Е.Б. Обработка экспериментальных результатов суперкавитационного обтекания конуса методом локальной полиномиальной регрессии (LOESS)	518
Кривенко Т.В., Тремясов В.А., Кенден К.В., Кожемякин В.Е. Интеллектуальная поддержка принятия решения по вводу мощностей малой гидроэлектростанции в Республике Тыва	527
Обухов С.Г., Плотников И.А., Климова Г.Н. Идентификация параметров моделей фотоэлектрических преобразователей.....	539
Суслов К.В., Крюков А.В., Илюшин П.В., Черепанов А.В., Крюков А.Е. Моделирование электромагнитных влияний многопроводных тяговых сетей на трубопроводы	552
Таваров С.Ш., Сидоров А.И., Суворов И.Ф., Святых А.Б. Метод прогнозирования и расчёта электрической нагрузки коммунально-бытовых потребителей в условиях неопределённости	565

Металлургия

Алексеев К.Д., Логинова И.В., Четыркин И.Е., Гостинская И.С. Повышение эффективности разложения алюминатного раствора за счёт приготовления и ввода активной затравки в процесс декомпозиции.....	574
Бричкин В.Н., Васильев В.В., Максимова Р.И. Производство глинозема: исторические этапы развития, проблемы и пути их решения. Часть 1.....	583
Пягай И.Н., Сизяков В.М., Свахина Я.А., Титова М.Е., Мирошниченко В.В. Исследование процесса получения жидкого стекла из кремнегеля для использования в металлургии.....	598
Размахнин К.К., Хатькова А.Н., Шумилова Л.В., Номоконова Т.С. Гидрометаллургическая переработка золошлаковых отходов	611

Персоналия

К 95-летнему Юбилею А. И. Промптова	622
--	-----



Content

Mechanical engineering

Sergey A. Bazanov, Valery N. Anferov. Method for investigating closed-loop hydraulic transmission with accumulator maintenance of overpressure in the suction line of a pump	462
Vladimir S. Bychkovskiy. Technological study of oil-filled polyamide parts	472
Viktor G. Zedgenizov, Tatiana A. Senotrusova. Investigation of high-energy impact system using a physical model	482
Denis Yu. Kazimirov, Aleksei S. Isachenko. Influence of impact-centrifugal hardener on microhardness of workpiece surface made of aluminium alloys	490
Maksim S. Makhlov, Andrey A. Krechetov, Valeriy Yu. Blumenstein, Vadim V. Gorbatenko. Method for processing experimental data when investigating residual stresses by drilling probe holes and digital image correlation	501
Mokritskii B.Ya., Kosmyrin A.V. Design of metal-cutting tool coatings at the atomic level	511

Power engineering

Denis A. Grishaev, Aleksandr Yu. Radzyuk, Elena B. Istyagina. Processing of experimental results for super-cavitating flow past cone by local polynomial regression (LOESS)	518
Krivenko T.V., Tretyasov V.A., Kenden K.V., et al. Intelligent decision-making support system for the commissioning of a small hydroelectric power plant in the Republic of Tyva	527
Sergey G. Obukhov, Igor A. Plotnikov, Galina N. Klimova. Parameter identification of photovoltaic converter models	539
Konstantin V. Suslov , Andrey V. Kryukov, Pavel V. Ilyushin, Alexander V. Cherepanov, Alexander E. Kryukov. Modelling of electromagnetic influences of multi-wire traction networks on pipelines	552
Saidjon Sh. Tavarov, Aleksandr I. Sidorov, Ivan F. Suvorov, Andrey B. Svyatyykh. Method for forecasting and calculating the electrical load of municipal consumers under uncertainty	565

Metallurgy

Konstantin D. Alekseev, Irina V. Loginova, Igor E. Chetyrkin, Irina S. Gostinskaya. Improving decomposition efficiency of aluminate liquor through preparation and introduction of active seed during the decomposition process	574
Vyacheslav N. Brichkin, Vladimir V. Vasiliev, Regina I. Maksimova. Alumina production: Historical development, issues, and solutions. Part 1	583
Igor N. Pyagay, Viktor M. Sizyakov, Yana A. Svakhina, Marina E. Titova, Vladimir V. Miroshnichenko. Investigation of liquid glass production from silica gel for use in metallurgy	598
Konstantin K. Razmakhnin, Alisa N. Khatkova, Lidia V. Shumilova, Tatiana S. Nomokonova. Hydrometallurgical processing of ash and slag waste	611

Personalia

To the 95th anniversary of A.I.Promptova	622
--	-----



Уважаемые читатели!

Предлагаем вашему вниманию выпуск научного журнала «iPolytech Journal».

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

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

Редакция



Dear Readers!

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

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

"iPolytech Journal" is included in the "UlrichsPeriodicals Directory", 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

Научная статья
УДК 621.923:621.922
EDN: CVJYWU
DOI: 10.21285/1814-3520-2023-3-462-471

МАШИНОСТРОЕНИЕ



Методика исследования закрытой гидропередачи с аккумуляторным поддержанием избыточного давления во всасывающей линии насоса

С.А. Базанов¹✉, В.Н. Анферов²

¹ООО «Валсиб», г. Новосибирск, Россия

²Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск, Россия

Резюме. Цель работы – проверить работоспособность, надежность и технические возможности закрытой гидропередачи, повышающей долговечность гидропривода путем изоляции рабочей жидкости от атмосферного воздуха и обеспечения избыточного давления на входе в насос. Объектом исследования выбрана схема закрытой гидропередачи, в которой возврат дренажных утечек осуществляется эжекторным насосом, а поддерживающим избыточное давление в системе и выполняющим функцию закрытого гидробака элементом является пневмогидроаккумулятор. Теоретические соотношения характеристик проектируемых элементов гидросистемы получены методами математического моделирования с применением уравнения нормальных безразмерных гидравлических характеристик и пакета Microsoft Excel. При проектировании конструкции стенда использованы методы преемственности и модификации. На основе существующих исследований определена степень влияния различных засорителей на характер неисправностей системы, установлено положительное влияние чистоты рабочей жидкости на долговечность и надежность гидропривода. В результате проведенного обзора существующих открытых, комбинированных открыто-закрытых и закрытых гидропередач выявлены их недостатки в области обеспечения чистоты рабочей жидкости. Предложена принципиальная гидравлическая схема, на основе которой спроектирован и изготовлен стенд для исследования закрытой гидропередачи. Определены условия подбора пневмогидроаккумулятора, обоснована методика расчета параметров и разработана универсальная конструкция эжекторного насоса, работающего в различных режимах давлений рабочего потока. В конструкции эжекторного насоса предусмотрена замена основных частей проточной части (сопла, камеры смешения, горловины и конфузора). Сформированная программа и методика испытаний включает в себя четыре алгоритма проведения испытаний (подготовка стенда к работе; испытаний при отсутствии дренажных утечек; испытаний при максимально допустимых дренажных утечках; испытаний при промежуточных значениях объемов дренажных утечек) и сто шестьдесят экспериментов. Проведенное исследование позволяет проверить возможность применения представленной закрытой гидропередачи в машинах различного типа.

Ключевые слова: закрытая гидропередача, долговечность гидропривода, возврат дренажных утечек, эжекторный насос, чистота рабочей жидкости, закрытый гидробак

Для цитирования: Базанов С.А., Анферов В.Н. Методика исследования закрытой гидропередачи с аккумуляторным поддержанием избыточного давления во всасывающей линии насоса // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 3. С. 462–471. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-462-471>. EDN: CVJYWU.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Method for investigating closed-loop hydraulic transmission with accumulator maintenance of overpressure in the suction line of a pump

Sergey A. Bazanov¹✉, Valery N. Anferov²

¹LLC Valsib, Novosibirsk, Russia

²Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

Abstract. The aim of the study is to verify the operability, reliability and functionality of a closed-loop hydrostatic transmission, which enhances the durability of the hydraulic drive by isolating the working fluid from atmospheric air and maintaining excess pressure at the pump inlet. The selected research object is a closed-loop hydrostatic transmission configuration, where drain leakage return is carried out by an ejector pump, while a hydropneumatic accumulator serves as a closed hydraulic reservoir that maintains excess pressure. Theoretical relationships for the designed components of the hydraulic system were derived using mathematical modelling by equations of normal dimensionless hydraulic numbers and a Microsoft Excel package. Design methods of continuity and modification were applied to construct the test bench. Based on existing research, the influence of various contaminants on the system failure characteristics was determined, and the positive effect of the purity of the working fluid on the durability and reliability of the hydraulic drive was highlighted. An overview of existing open, combined open-closed and closed hydrostatic transmissions revealed their disadvantages in terms of ensuring fluid purity. A proposed hydraulic schematic formed the basis for designing and manufacturing a test stand for investigating the closed-loop hydrostatic transmission. Criteria for selecting the pneumatic-hydraulic accumulator were defined, and a methodology for calculating parameters was substantiated. A versatile design of the ejector pump, operating under various flow pressure conditions, was developed, including replaceable components for the flow section (nozzles, mixing chambers, throats and confusers). The test program and methodology involve four test algorithms: stand preparation, tests without drain leakage, tests with maximum allowable drain leakage, and tests with intermediate drain leakage volumes, resulting in a total of one hundred sixty experiments. This study allows the feasibility of applying the presented closed-loop hydrostatic transmission in various types of machinery to be assessed.

Keywords: closed hydraulic transmission, hydraulic drive durability, return of drainage leaks, ejector pump, working fluid purity, closed hydraulic tank

For citation: Bazanov S.A., Anferov V.N. Method for investigating closed-loop hydraulic transmission with accumulator maintenance of overpressure in the suction line of a pump. *iPolytech Journal*. 2023;27(3):462-471. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-462-471>. EDN: CVJYWU.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных типов приводов строительных, путевых и подъемно-транспортных машин является гидропривод благодаря ряду преимуществ: возможности бесступенчато регулировать скорость, простоте управления и автоматизации, сравнительно малому весу на единицу передаваемой мощности. Наряду с его преимуществами известно, что из общего числа простоев машин на долю гидропривода

приходится более 40% [1–14].

Большое влияние на надежность и долговечность гидропривода оказывает чистота рабочей жидкости. Наличие различных загрязнителей, попадающих внутрь системы, является основной проблемой функционирования гидропривода, вызывающей подавляющее большинство его неисправностей. Для различных гидросистем доля отказов из-за загрязнения рабочей жидкости составляет от 50% до 85% [2, 8, 15].

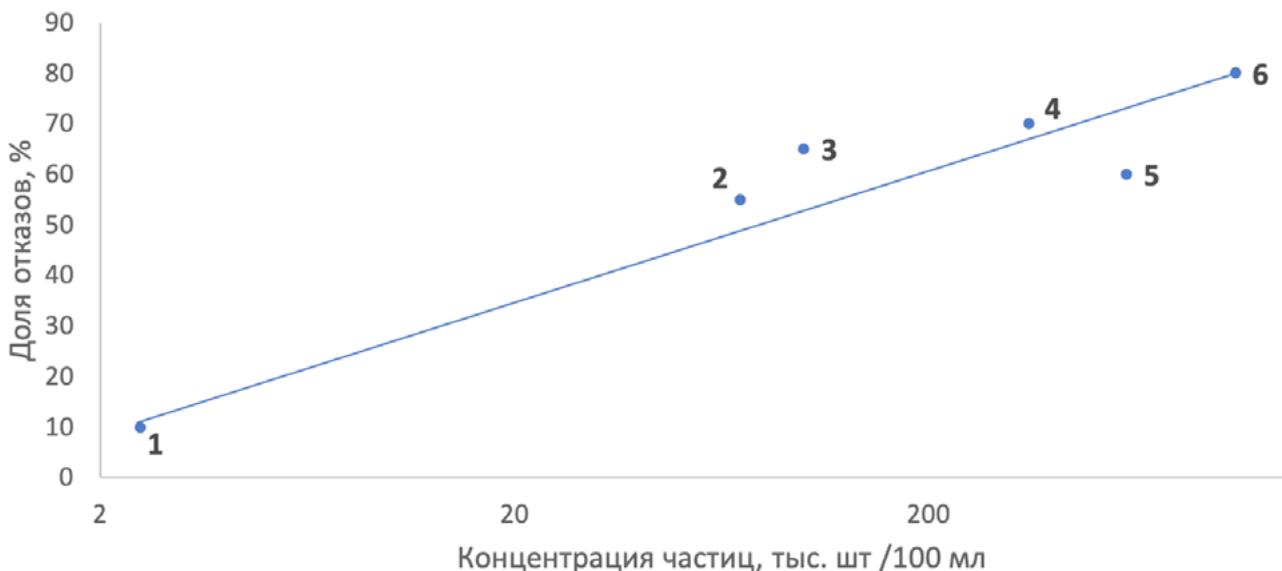


Рис. 1. Доля отказов гидравлических систем различных машин из-за загрязненности рабочей жидкости:

1 – летательные аппараты; 2 – станочное оборудование; 3 – строительные машины; 4 – карьерное оборудование; 5 – сельскохозяйственная техника; 6 – шахтное оборудование

Fig. 1. Failure percentage of various equipment hydraulic systems due to working fluid contamination:
1 – aircrafts; 2 – machine-tool equipment; 3 – construction machinery; 4 – pit equipment;
5 – agricultural machinery; 6 – mining equipment

Обеспечение надлежащей чистоты рабочей жидкости позволяет:

- значительно повысить ресурс основных агрегатов привода [16, 17] и существенно увеличить коэффициент готовности машин;
- поднять производительность техники за счет увеличения КПД привода;
- уменьшить расход топлива и рабочей жидкости [18];
- сократить расходы на обслуживание и ремонт.

Основным источником загрязнения рабочей жидкости в процессе работы машины является атмосферный воздух. Изоляция гидропередачи от воздуха окружающей среды позволит существенно снизить количество загрязнителей и повысить долговечность машин.

Загрязнения рабочей жидкости можно разделить на четыре основные группы: твердые частицы, мягкие частицы, вода, воздух, механизм влияния которых на долговечность различен.

Загрязнение механическими частицами вызывает заклинивание поршней гидроцилиндров и золотников гидрораспределителей, повышенные утечки в узлах и деталях гидросистемы, блокировку каналов смазки, самопроизвольное движение штоков гидроцилиндров исполнительных органов, изменение характеристик управления, повышенный износ узлов и деталей гидросистемы машины [19].

Вода, попадая в рабочую жидкость, вызывает ее старение, коррозию компонентов и деталей отдельных узлов гидросистемы, формирование отложений эмульсий в гидроагрегатах.

Воздух, соприкасаясь с рабочей жидкостью, растворяется в ней и вызывает кавитацию во всасывающей линии насоса, разрушение уплотнений подвижных соединений, нестабильность управления машиной, местный перегрев рабочей жидкости.

Загрязнители могут поступать в систему в процессе технического обслуживания, через уплотнения гидроцилиндров, в процессе износа деталей, но основной их объем попадает через сапун гидравлического бака во время работы системы.

Средняя загрязненность жидкости в гидросистемах различных типов машин регламентирована по ГОСТ 17216-2001³. Требования

к чистоте жидкости зависят от области применения машины и условий ее эксплуатации.

На рис. 1 видно, что усредненная доля отказов меняется в зависимости от концентрации частиц, содержащихся в рабочей жидкости гидроприводов. С ростом концентрации частиц возрастает доля отказов гидроприводов машин.

Гидроприводы разделяют по схеме циркуляции рабочей жидкости на открытые – с разомкнутой циркуляцией и закрытые – с замкнутой циркуляцией, также существуют гибридные типы гидроприводов [3, 9, 12].

В открытых гидроприводах рабочая жидкость, проходящая от гидродвигателя, возвращается в бак, соединенный с атмосферой, и что является основной причиной попадания засорителей, влаги и воздуха в рабочую жидкость. Это происходит из-за разности объемов поршневых и штоковых полостей гидроцилиндров. Во время выдвижения и втягивания штоков гидроцилиндров объем (этот объем жидкости замещается атмосферным воздухом, содержащим засорители и влагу) и уровень жидкости в баке меняются. За цикл работы машины это изменение объема может достигать десятки литров, а за смену – десятки тысяч литров.

В закрытых гидропередачах рабочая жидкость от гидродвигателя возвращается обратно во всасывающую линию насоса, а основной бак не имеет связи с атмосферой. Это исключает попадание загрязнителей в гидросистему через бак, что существенно увеличивает срок службы гидравлического масла и ресурс элементов гидропривода. Также известные закрытые гидропередачи имеют сравнительно меньшие габаритные размеры [2, 6].

Системы с закрытой циркуляцией широко распространены и хорошо зарекомендовали себя при работе с гидродвигателями вращательного действия. Жидкость от насоса поступает в гидромотор, а сливная линия гидромотора соединена напрямую со всасывающей линией насоса, образуя замкнутый контур. Для обеспечения функционирования гидравлическая схема дополнена подпиточным баком, используемым в процессе защиты от перегрузок и возврата дренажных утечек. Однако при допустимом снижении объемного КПД гидромоторов и насосов до 0,76 через бак

³ГОСТ 17216-2001³. Чистота промышленная. Классы чистоты жидкостей. Переиздание (по состоянию на май 2008 г.). М.: Стандартинформ, 2008.

подпитки, связанный с атмосферой, может проходить более 40% рабочей жидкости [2, 3, 10, 12]. Поэтому данную систему можно считать закрытой лишь частично. Другим недостатком таких схем является невозможность применения гидродвигателей в виде гидроцилиндров.

В схемах, использующих гидроцилиндры, задача изоляции рабочей жидкости от атмосферы в основном решена за счет использования комбинированных открытно-закрытых схем или применением закрытых гидробаков. Такие гидробаки сложны в изготовлении и повышают стоимость гидросистемы.

Закрытые гидропередачи, полностью изолированные от атмосферного воздуха, являются функциональными в летательных аппаратах. Их использование существенно увеличивает долговечность и надежность. Однако сложность исполнения схем затрудняет их применение в других типах машин.

Возврат дренажных утечек от насосов и гидромоторов в существующих схемах не предусмотрен или осуществлен введением подпиточных контуров, снижающих общий КПД системы.

В настоящее время ведутся разработки закрытых гидропередач, но имеющийся ряд недостатков существующих схем определяет предпосылки для более глубокого и детального изучения этого вопроса.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

На физической модели закрытой гидропередачи проверить работоспособность, надежность и технические возможности закрытой гидропередачи, повышающей долговечность гидропривода путем изоляции рабочей жидкости от атмосферного воздуха и обеспечения избыточного давления на входе в насос.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Элементами, играющими главную роль в стабильной работе закрытой гидропередачи, являются пневмогидроаккумулятор (ПГА) и эжекторный насос. Эти элементы и их характеристики тесно взаимосвязаны между собой и требуют взаимного расчета их параметров с учетом рекомендаций заводов-изготовителей насосов и гидромоторов и допустимых давлений в их всасывающей линии и линии дренажа.

Характеристики пневмогидроаккумулято-

ра подбираются из условия вмещения температурных приращений и максимальной разницы объемов поршневых и штоковых полостей гидроцилиндров. При этом избыточное давление во всасывающей линии с учетом потерь в эжекторе и на участке от ПГА до насоса не должно превышать максимально допустимых значений за все время цикла работы. Начальный объем газовой полости при мини-

$$V_1 = \frac{-p_2 \Delta V_c T_1 - p_2 \Delta V_{st} T_1}{p_1 T_2 - p_2 T_1}, \quad (1)$$

мальном заполнении определяется по [20]: где p_2 – начальное давление в газовой полости при минимальном уровне жидкости, Па. Минимальное значение избыточного давления рекомендуется принимать не менее 0,15 МПа; p_2 – конечное давление в газовой полости при максимальном заполнении ПГА жидкостью, Па; ΔV_c – максимальный объем разницы поршневых и штоковых полостей гидроцилиндров за цикл работы машины, m^3 ; ΔV_{st} – объем температурного приращения рабочей жидкости в гидросистеме, m^3 ; T_1, T_2 – начальная и конечная температура рабочей жидкости, К.

В стенде для проверки работоспособности закрытой гидропередачи при использовании гидромоторов и насосов различных марок и производителей, а также с различным объемным КПД предусмотрена возможность изменения характеристик пневмогидроаккумулятора по давлению, а при необходимости увеличения рабочего объема возможна замена на другой типоразмер.

Одним из условий расчета эжектора является поддержание избыточного давления в заданном диапазоне во всасывающей линии насоса (на выходе из эжектора). Также эжекторный насос должен обеспечить возврат дренажных утечек в систему, находящуюся под избыточным давлением, не вызывая превышения максимально допустимого давления дренажа и не создавая разрежения в дренажной линии.

Расчет эжекторного насоса проводится с помощью уравнения нормальных безразмерных гидравлических характеристик [20]:

$$(p_{\text{Эвых}} - p_{\text{Эдп}}) / (p_p - p_{\text{Эдп}}) = \varphi_1^2 \frac{d_b^2}{d_d^2} \left[2\varphi_2 + \left(2\varphi_2 - \frac{1}{\varphi_4^2} \right) \frac{\left(\frac{d_b}{d_d} \right)^2 u^2}{1 - \left(\frac{d_b}{d_d} \right)^2} - \left(2 - \varphi_3^2 \right) \frac{d_b^2}{d_d^2} (1 + u^2) \right], \quad (2)$$

где $p_{\text{Эвых}}$ – давление после эжекторного насоса, Па; $p_{\text{Эдп}}$ – давление подсасываемого потока, Па; p_p – давление рабочей жидкости, Па; $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ – коэффициенты скоростей сопла, диффузора входа в камеру смешения; d_d – диаметр горловины, м; d_b – диаметр сопла, м; u – коэффициент эжекции.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На основе принципиальной схемы спроектирован и изготовлен стенд для исследования закрытой гидропередачи. Данная схема и стенд запатентованы. Принципиальная схема стенда показана на рис. 2.

Основные отличительные особенности данной схемы закрытой гидропередачи:

- элементом, выполняющим роль закрытого гидробака, который изолирует систему от атмосферных засорителей и вмещает в себя разность объемов жидкости от гидроцилиндра

и температурных расширений является ПГА низкого давления с разделением сред газовой и жидкостной полостей;

- с целью уменьшения кавитации во всасывающей линии насоса с помощью ПГА создается избыточное давление в сливной и всасывающей линии насоса;

- используя энергию сливающегося потока жидкости, эжекторный насос осуществляет возврат дренажных утечек во всасывающую линию насоса, находящуюся под избыточным давлением, которое больше допустимого давления дренажа.

Стенд работает следующим образом. Гидравлическая жидкость поступает из бака Б1 в насос Н, приводимый во вращение электродвигателем ЭД. Затем через напорный фильтр Ф большая часть жидкости поступает в распределитель Р, а другая часть отделяется регулятором потока РП, имитируя дренажные утечки насоса Н в необходимом для эксперимента

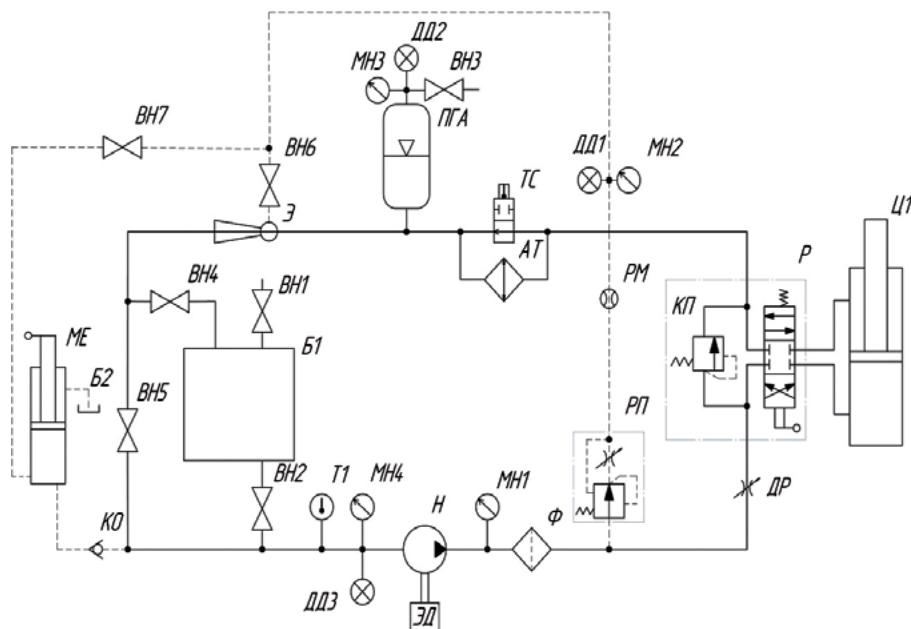


Рис. 2. Принципиальная схема стенда закрытой гидропередачи.
 Б1, Б2 – баки; ВН1-ВН7 – вентили; Н – насос; Ф – фильтр; РП – регулятор потока;
 РМ – расходомер; КП – предохранительный клапан; Р – распределитель; Ц1 – гидроцилиндр;
 Ц2 – мерная емкость; ДР – дроссель; АТ – теплообменный аппарат; ТС – терmostat;
 ПГА – пневмогидроаккумулятор; Э – эжекторный насос; КО – клапан обратный;
 Т1 – датчик температуры; МН1-МН4 – манометры; ДД1-ДД3 – датчики давления

Fig. 2. Schematic diagram of the closed hydraulic transmission test bench:
 Б1, Б2 – tanks; ВН1-ВН7 – valves; Н – pump; Ф – filter; РП – flow regulator; РМ – flow meter;
 КП – safety valve; Р – distributor; Ц1 – hydraulic cylinder; Ц2 – measuring container; ДР – throttle; АТ – heat exchanger; ТС – thermostat; ПГА – pneumatic hydroaccumulator; Э – ejector pump; КО – check valve;
 Т1 – temperature sensor; МН1-МН4 – pressure gages; ДД1-ДД3 – pressure sensors

объеме. Для визуального измерения расхода утечек перед проведением эксперимента в систему включена герметичная мерная емкость Ц2, выполненная в виде цилиндра, и клапан КО, которые позволяют измерить и вернуть рабочую жидкость в систему без ее разгерметизации. Расход имитируемых дренажных утечек во время проведения эксперимента контролируется расходомером РМ. Основной поток через одну из рабочих позиций распределителя поступает к гидроцилиндру Ц1. Затем рабочая жидкость из полости гидроцилиндра Ц1 поступает в пневмогидроаккумулятор ПГА. Далее сливаемая рабочая жидкость попадает в эжекторный насос Э в качестве рабочего потока, а жидкость, отделенная распределителем потока РП поступает во всасывающую линию эжекторного насоса Э. После этого рабочий поток вовлекает за собой поток из дренажной линии за счет сил, действующих на поверхности струи [21], далее оба потока объединяются в камере смешения эжекторного насоса Э и возвращаются в бак Б1.

Установка ПГА в сливной линии до эжекторного насоса Э обусловлена необходимостью компенсации перепадов расхода при изменении направления движения штока гидроцилиндра Ц. Такое расположение ПГА необходимо для стабильной работы эжекторного насоса Э.

Для поддержания необходимой температуры рабочей жидкости при проведении экспериментов в системе установлен теплообменный аппарат АТ с терmostатом ТС. Вентили ВН1...ВН7 необходимы для заправки основного бака и пневмогидроаккумулятора, отключения основного бака от системы, перенаправления потоков жидкости для замеров дренажных утечек.

Основными контролируемыми параметрами при проведении исследования являются давления в дренажной линии, в сливной линии до эжекторного насоса, во всасывающей линии насоса. Для их визуального контроля на стенде установлены, соответственно, манометры МН2...МН4, а для фиксации и записи показаний – датчики давления ДД1...ДД3. Для контроля давления в напорной линии служит манометр МН1.

Играющими главную роль в стабильной работе закрытой гидропередачи данного типа

элементами являются пневмогидроаккумулятор и эжекторный насос. Эти элементы и их характеристики тесно взаимосвязаны между собой и требуют взаимного расчета их параметров с учетом рекомендаций заводов-изготовителей насосов и гидромоторов и допустимых давлений в их всасывающей линии и линии дренажа. На исследовательском стенде, главным образом, проверяется правильность определения их параметров и контроль взаимной работы. Основные зависимости определения характеристик ПГА и эжектора представлены в материалах и методах.

Для исследования более широкого диапазона возможностей закрытой гидропередачи в стенде использован эжекторный насос, в конструкции которого предусмотрена замена основных частей проточной части (сопла, камеры смешения, горловины и конфузора). Эжекторный насос в данной системе работает в условиях переменного давления рабочего потока. Для поддержания заданного коэффициента эжекции конструкция насоса (рис. 3) является саморегулирующейся и включает в себя механизм регулировки 3 и регулировочную иглу 5. При увеличении давления рабочего потока поршень 6 и игла 5 смещаются, изменяя площадь проходного сечения сопла 4, при уменьшении давления рабочего потока пружина 7 возвращает иглу в исходное положение. Для регулировки коэффициента эжекции в процессе износа гидромоторов и насосов и, соответственно, при увеличении дренажных утечек в конструкции эжектора предусмотрена регулировка основного положения иглы относительно сопла с помощью гаек 8.

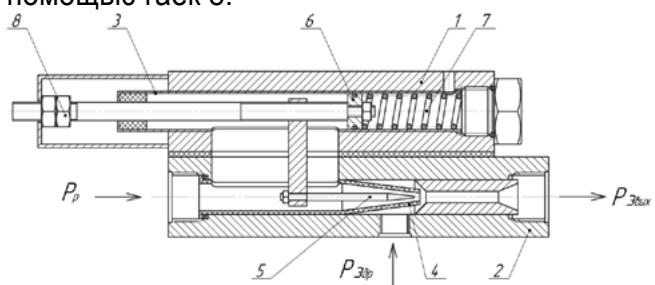


Рис. 3. Конструкция эжекторного насоса:
1 – корпус верхний; 2 – корпус нижний; 3 – механизм регулировки; 4 – сопло; 5 – игла; 6 – поршень; 7 – пружина; 8 – регулировочная гайка

Fig. 3. Ejector pump design: 1 – upper housing; 2 – lower housing; 3 – adjustment mechanism; 4 – nozzle; 5 – needle; 6 – piston; 7 – spring; 8 – adjusting nut

Экспериментальные исследования объемной гидропередачи требуют определения целого ряда параметров, их обработки и последующего анализа. Методы проведения приемо-сдаточных испытаний гидромашин регламентируются рядом стандартов: ГОСТ 14658-86⁴, ГОСТ 20719-75⁵, ГОСТ 29015-91⁶, однако они не предусматривают исследовательских испытаний, поэтому была разработана программа и методика испытаний, которые позволяют в полной мере обеспечить проверку работоспособности закрытой гидропередачи в различных режимах и оценить параметры спроектированной гидросистемы:

- обеспечение возврата имитации дренажных утечек в систему, находящуюся под избыточным давлением, с помощью эжектора;
- проверка поддержания подпорного давления во всасывающей линии на входе в насос.

В ходе испытаний контролируются следующие показатели: температура рабочей жидкости; давление во всасывающей линии насоса; давление и расход в линии, имитирующей дренажную; давление в пневмогидроаккумуляторе.

Каждое испытание проводится при различных температурах рабочей жидкости: T1 = +20° С и T2 = +60° С.

Для получения достоверных результатов необходимо провести ряд экспериментов с определенным шагом объема дренажных утечек. Для этого необходимо разделить рабочий диапазон системы на желаемое количество точек. Малое количество точек не позволяет судить о характере зависимости и провести достоверный анализ. Чрезмерное повышение количества точек приводит к резкому возрастанию числа опытов. Таким образом, количество точек для вычисления шага принято равным 10.

Для определения шага между испытаниями необходимо провести замеры при отсутствии утечек. Затем необходимо определить максимальный уровень утечек, при котором

возможна стабильная работа системы. После определения максимального и нулевого уровня утечек определить шаг изменения расхода, разделив рабочий диапазон на 10. С полученным шагом проводятся испытания в соответствии с алгоритмом, приведенным на рис. 3, позволяющим проверить работоспособность закрытой гидропередачи в условиях промежуточных значений между нулевым и максимально возможным объемом дренажных утечек.

В каждом из случаев рассматривается работа закрытой гидропередачи с основным гидробаком и при его отключении.

Согласно ГОСТ 17108-86⁷, число опытов при применении средств измерений с регистрирующими устройствами, в соответствии со стандартом, должно быть не менее 10, с показывающими – не менее 3. Таким образом, общее количество экспериментов составляет 160 испытаний.

Методика испытаний состоит из четырех этапов. Для каждого этапа составлены алгоритмы:

- алгоритм подготовки стенда к работе;
- алгоритм испытаний при отсутствии дренажных утечек;
- алгоритм испытаний при максимально допустимых дренажных утечках;
- алгоритм испытаний при промежуточных значениях объемов дренажных утечек (рис. 4).

Регистрация и запись результатов измерения в процессе испытаний производятся с высокой частотой, что позволяет оценить не только статические, но и динамические процессы в закрытой гидропередаче. Обработка и анализ полученных экспериментальных данных дают возможность оценки работы и внесения корректировок в математическую модель системы.

Универсальность стенда, а именно – возможность смены проточной части эжектора, замена ПГА, подключение нескольких различных гидродвигателей, дает возможность проверить применимость закрытой гидропередачи

⁴ГОСТ 14658-86. Насосы объемные гидроприводов. Правила приемки и методы испытаний. Введ. 01.01.88 (с изм. 1999 г.). М.: Изд-во стандартов, 1999.

⁵ГОСТ 20719-75. Гидромоторы. Правила приемки и методы испытаний (изм. в апреле 1986 г.). М.: Изд-во стандартов, 1987.

⁶ГОСТ 29015-91. Гидроприводы объемные. Общие методы испытаний. Введ. 01.01.1992 (переизд. в авг. 2004 г.). М.: Изд-во стандартов, 2004.

⁷ГОСТ 17108-86. Гидропривод объемный и смазочные системы. Методы измерения параметров. Введ. 01.01.1988. М.: Изд-во стандартов, 1988.

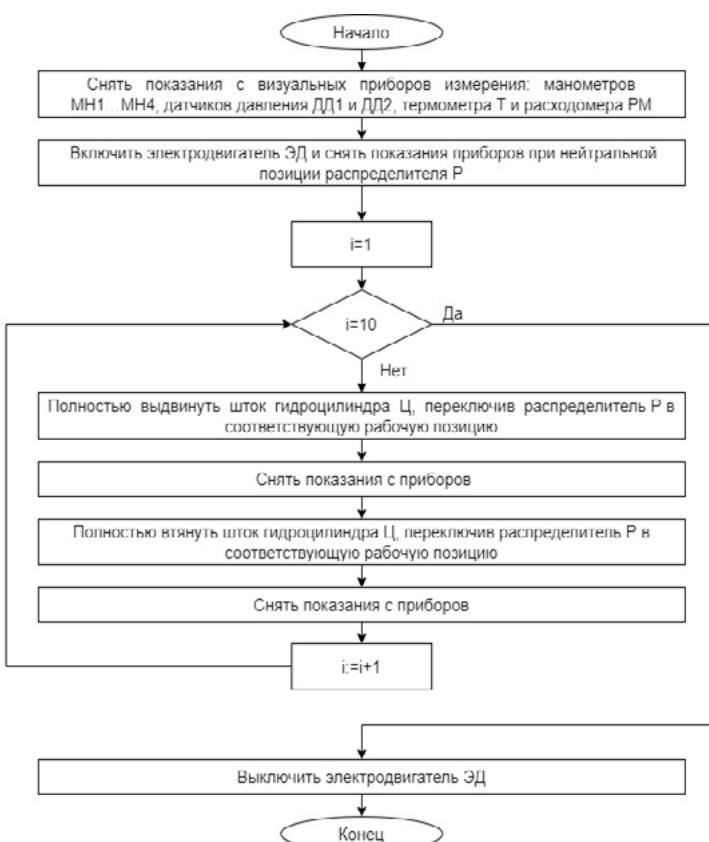


Рис. 4. Блок-схема алгоритма испытаний при промежуточных значениях объемов дренажных утечек

Fig. 4. Block diagram of the testing algorithm for intermediate values of drainage leakage volumes

для различных типов машин в лабораторных условиях. Испытания производятся не на реальной машине, а на физической модели (рис. 5), что позволяет снизить издержки на их проведение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании обзора влияния чистоты рабочей жидкости гидропривода на его долговечность обоснована актуальность вопроса исследования закрытой гидропередачи. Разработана принципиальная схема стенда,



Рис. 5. Фотография стенда для исследования закрытой гидропередачи с аккумуляторным поддержанием избыточного давления во всасывающей линии насоса

Fig. 5. An image of the test bench for the study of the closed hydraulic transmission with accumulator-supported overpressure in the pump suction line

включающая ПГА для поддержания избыточного давления в сливной линии и эжекторный насос, возвращающий дренажные утечки в систему. Спроектирован и изготовлен испытательный стенд для проверки работоспособности закрытой гидропередачи. Представлена конструкция эжектора, работающего в условиях переменного давления рабочего потока жидкости и обеспечивающего поддержание требуемого коэффициента эжекции и заданного давления на выходе из насоса путем изменения сечения сопла. Разработана программа и методика эксперимента. Проведенное исследование позволяет проверить возможность применения представленной закрытой гидропередачи в машинах различного типа.

Список источников

- Харазов А.М. Техническая диагностика гидроприводов машин. М.: Машиностроение, 1979. 58 с.
- Chen Mingdong, Zhao Dingxuan. The gravitational potential energy regeneration system with closed-circuit of boom of hydraulic excavator // Mechanical Systems and Signal Processing. 2017. Vol. 82. P. 178–192. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.05.017>.
- Bury P., Stosiak M., Urbanowicz K., Kodura A., Kubrak M., Malesińska A. A case study of open- and closed-loop control of hydrostatic transmission with proportional valve start-up process // Energies. 2022. Iss. 15. P. 1860. <https://doi.org/10.3390/en15051860>.
- Xiong Shaoping, Wilfong G., Lumkes J.J. Components sizing and performance analysis of hydro-mechanical power split transmission applied to a wheel loader // Energies. 2019. Vol. 12. Iss. 9. P. 1613. <https://doi.org/10.3390/en12091613>.
- Yao Zhikai, Liang Xianglong, Zhao Qianting, Yao Jianyong. Adaptive disturbance observer-based control of hydraulic systems with asymptotic stability // Applied Mathematical Modelling. 2022. Iss. 105. P. 226–242. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2021.12.026>.
- Guo Xiaofan, Vacca A. Advanced design and optimal sizing of hydrostatic transmission systems // Actuators. 2021. Iss. 10. P. 243. <https://doi.org/10.3390/act10090243>.
- Skorek G. Study of losses and energy efficiency of hydrostatic drives with hydraulic cylinder // Polish Maritime Research. 2018. Iss. 25. P. 114–128.

8. Domagała Z., Kędzia K., Stosiak M. The use of innovative solutions improving selected energy or environmental indices of hydrostatic drives // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2019. Vol. 679. P. 012016. <https://doi.org/10.2478/pomr-2018-0138>.
9. Singh V.P., Pandey A.K., Dasgupta K. Steady-state performance investigation of closed-circuit hydrostatic drive using variable displacement pump and variable displacement motor // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering. <https://doi.org/10.1177/0954408920953662>. 2021. Vol. 235. Iss. 2. P. 249–258.
10. Choi Jaewoong, Kim Hakgu, Yu Seungjin, Yi Kyongsu. Development of integrated controller for a compound hybrid excavator // Journal of Mechanical Science and Technology. 2011. Vol. 25. Iss. 6. P. 1557–1563.
11. Xiao Yang, Guan Cheng, Lai Xiaoliang. Research on the design and control strategy for a flow-coupling-based hydraulic hybrid excavator // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 2014. Vol. 228. Iss. 14. P. 1675–1687. <https://doi.org/10.1177/0954407013502326>.
12. Azzam I., Pate K., Garcia-Bravo J., Breidi F. Energy savings in hydraulic hybrid transmissions through digital hydraulics technology // Energies. 2022. Vol. 15. Iss. 4. P. 1348. <https://doi.org/10.3390/en15041348>.
13. Zhou Shilei, Walker P., Tian Yang, Zhang Nong. Mode switching analysis and control for a parallel hydraulic hybrid vehicle // Vehicle System Dynamics. 2020. Vol. 59. Iss. 6. P. 928–948. <https://doi.org/10.1080/00423114.2020.1737147>.
14. Zhou Shilei, Walker P., Zhang Nong. Parametric design and regenerative braking control of a parallel hydraulic hybrid vehicle // Mechanism and Machine Theory. 2020. Vol. 146. P. 103714. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2019.103714>.
15. Бродский Г.С., Слесарев Б.В. Повышение надежности гидропривода – средство эффективного внедрения гидравлических экскаваторов на горных предприятиях СНГ // Горная промышленность. 2002. № 2. С. 76–85.
16. Бродский Г.С. Фильтры и системы фильтрации для мобильных машин. М.: Гемос, 2004. 360 с.
17. Staley D.R. Correlating lube oil filtration efficiencies with engine wear // SAE International Truck and Bus Meeting and Exposition. 1988. P. 881825. <https://doi.org/10.4271/881825>.
18. Григорьев М.А., Борисова Г.В. Очистка топлива в двигателях внутреннего сгорания. М.: Машиностроение, 1991. 208 с.
19. Пискунов М.А. Чистое масло – исправная машина // ЛесПромИнформ. 2015. № 4. С. 66–72.
20. Anferov V.N., Bazanov S.A. Parameter determination procedure for the ejector pump and hydro-pneumatic accumulator in the enclosed hydraulic drive // Journal of Mining Science. 2021. Vol. 57. Iss. 4. P. 607–614. <https://doi.org/10.1134/S1062739121040086>.
21. Аронс Г.А. Струйные аппараты: теория и расчет. М.: Госэнергоиздат, 1948. 139 с.

References

1. Kharazov A.M. *Technical diagnostics of machinery hydraulic drives*. Moscow: Mashinostroenie; 1979, 58 p. (In Russ.).
2. Chen Mingdong, Zhao Dingxuan. The gravitational potential energy regeneration system with closed-circuit of boom of hydraulic excavator. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2017;82:178–192. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.05.017>.
3. Bury P., Stosiak M., Urbanowicz K., Kodura A., Kubrak M., Malesińska A. A case study of open- and closed-loop control of hydrostatic transmission with proportional valve start-up process. *Energies*. 2022;15:1860. <https://doi.org/10.3390/en15051860>.
4. Xiong Shaoping, Wilfong G., Lumkes J.J. Components sizing and performance analysis of hydro-mechanical power split transmission applied to a wheel loader. *Energies*. 2019;12(9):1613. <https://doi.org/10.3390/en12091613>.
5. Yao Zhikai, Liang Xianglong, Zhao Qianting, Yao Jianyong. Adaptive disturbance observer-based control of hydraulic systems with asymptotic stability. *Applied Mathematical Modelling*. 2022;105:226–242. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2021.12.026>.
6. Guo Xiaofan, Vacca A. Advanced design and optimal sizing of hydrostatic transmission systems. *Actuators*. 2021;10:243. <https://doi.org/10.3390/act10090243>.
7. Skorek G. Study of losses and energy efficiency of hydrostatic drives with hydraulic cylinder. *Polish Maritime Research*. 2018;25:114–128.
8. Domagała Z., Kędzia K., Stosiak M. The use of innovative solutions improving selected energy or environmental indices of hydrostatic drives. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2019;679:012016. <https://doi.org/10.2478/pomr-2018-0138>.
9. Singh V.P., Pandey A.K., Dasgupta K. Steady-state performance investigation of closed-circuit hydrostatic drive using variable displacement pump and variable displacement motor. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2021;235(2):249–258. <https://doi.org/10.1177/0954408920953662>.
10. Choi Jaewoong, Kim Hakgu, Yu Seungjin, Yi Kyongsu. Development of integrated controller for a compound hybrid excavator. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2011;25(6):1557–1563.
11. Xiao Yang, Guan Cheng, Lai Xiaoliang. Research on the design and control strategy for a flow-coupling-based hydraulic hybrid excavator. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2014;228(14):1675–1687. <https://doi.org/10.1177/0954407013502326>.
12. Azzam I., Pate K., Garcia-Bravo J., Breidi F. Energy savings in hydraulic hybrid transmissions through digital hydraulics technology. *Energies*. 2022;15(4):1348. <https://doi.org/10.3390/en15041348>.
13. Zhou Shilei, Walker P., Tian Yang, Zhang Nong. Mode switching analysis and control for a parallel hydraulic hybrid vehicle. *Vehicle System Dynamics*. 2020;59(6):928–948. <https://doi.org/10.1080/00423114.2020.1737147>.

14. Zhou Shilei, Walker P., Zhang Nong. Parametric design and regenerative braking control of a parallel hydraulic hybrid vehicle. *Mechanism and Machine Theory*. 2020;146:103714. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2019.103714>.
15. Brodskij G.S., Slesarev B.V. Improving hydraulic drive reliability as a means of effective implementation of hydraulic excavators at the mining enterprises of the Commonwealth of Independent States. *Gornaya promyshlennost'*. 2002;2:76-85. (In Russ.).
16. Brodsky G.S. *Filters and filtration systems for mobile machines*. Moscow: Geos; 2004, 360 p. (In Russ.).
17. Staley D.R. Correlating lube oil filtration efficiencies with engine wear. *SAE International Truck and Bus Meeting and Exposition*. 1988;881825. <https://doi.org/10.4271/881825>.
18. Grigoriev M.A., Borisova G.V. *Fuel purification in internal combustion engines*. Moscow: Mashinostroenie; 1991, 208 p. (In Russ.).
19. Piskunov M.A. *Pure oil as a condition of a serviceable machine*. *LesPromInform*. 2015;4:66-72. (In Russ.).
20. Anferov V.N., Bazanov S.A. Parameter determination procedure for the ejector pump and hydro-pneumatic accumulator in the enclosed hydraulic drive. *Journal of Mining Science*. 2021;57(4):607-614. <https://doi.org/10.1134/S1062739121040086>.
21. Arons G.A. *Jet devices: theory and calculation*. Moscow: Gosenergoizdat; 1948, 139 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Базанов Сергей Александрович,
заместитель директора по развитию,
ООО «Валсиб»,
630049, г. Новосибирск, Красный просп., 220/6, Россия
✉ bazanoff@ngs.ru
<https://orcid.org/0009-0005-7452-8523>

Анферов Валерий Николаевич,
д.т.н., профессор кафедры
«Подъемно-транспортные,
путевые, строительные и дорожные машины»,
Сибирский государственный университет путей
сообщения,
630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, Россия
avn43@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey A. Bazanov,
Deputy Director for Development,
LLC "Valsib",
220/6, Krasny Prospekt, Novosibirsk 630049, Russia
bazanoff@ngs.ru
<https://orcid.org/0009-0005-7452-8523>

Valery N. Anferov,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Lifting and Transport,
Track, Construction and Road Machinery,
Siberian Transport University
191, Dusi Kovalchuk str., Novosibirsk 630049, Russia
avn43@mail.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали равноценный вклад в исследование и написание статьи.

Contribution of the authors

The authors have made an equal contribution to the research and writing of the article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 4.05.2023 г.; одобрена после рецензирования 27.06.2023 г.; принята к публикации 15.07.2023 г.

Information about the article

The article was submitted 4.05.2023; approved after reviewing 27.06.2023; accepted for publication 15.07.2023.

Научная статья
УДК 631.171:004.3:681.587.78
EDN: XAWJFS
DOI: 10.21285/1814-3520-2022-3-472-481

МАШИНОСТРОЕНИЕ



Технологический процесс исследования маслонаполнения деталей из полиамидных материалов

В.С. Бычковский^{1✉}

¹Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия

Резюме. Цель работы – разработка технологии, обеспечивающей повышение эксплуатационных свойств поверхностного слоя готовых полиамидных деталей с целью увеличения износостойкости без изменений их нагрузочной способности. Для изучения процесса пропитки образца из полиамида-6 смесью моторного масла и гексана использовались натурные экспериментальные методы исследования по разработанному алгоритму на лабораторной установке. В работе применялся программный код для управляющей платы, работающей совместно с программным комплексом PowerGraph, необходимым для обработки полученных данных. В ходе проведенного исследования выбран метод сушки образцов размерами 4x50x50 мм в электрическом поле высокой частоты (до 2500 Гц), позволяющий равномерно за короткое время нагреть и удалить влагу из полимера. Использован закон Дарси, описывающий процесс пропитки полиамида маслом. С целью повышения эффективности пропитки, понижения вязкости наполнителя определен его состав: смесь моторного масла М-8В и гексана в пропорциях от 8:2 до 4:6, соответственно. Разработана и автоматизирована установка на основе оборудования УЗП-2500 с внедрением в нее управляющей платы и датчиков для замеров показаний о силе анодного тока и температуры полиамидного образца. Также в установку встроено регулирующее устройство мощностью высокочастотного генератора, работающего в диапазоне тока 0,25...0,35 А. При использовании режимов обработки (температура полиамидного образца – 75°C, содержание гексана в смеси – 40%) определен метод контроля температуры сушки путем отключения высокочастотного генератора на 700 мс. Проведенные исследования позволяют разработать новый технологический процесс маслонаполнения полиамидных деталей, работающих в узлах трения, на заданную глубину при известных значениях скорости пропитки. Полученные результаты направлены на повышение износостойкости поверхностного слоя готовых полиамидных деталей, применяемых в тележках железнодорожных вагонов, испытывающих на себе трение и износ, с целью увеличения ресурса их работы.

Ключевые слова: маслонаполнение полимеров и композитов, автоматизированная система, алгоритм проведения исследования, ВЧ-сушка полимеров, режимы обработки

Для цитирования: Бычковский В.С. Технологический процесс исследования маслонаполнения деталей из полиамидных материалов // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 3. С. 472-481. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-472-481>. EDN: XAWJFS.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Technological study of oil-filled polyamide parts

Vladimir S. Bychkovskiy^{1✉}

¹Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

Abstract. The work develops a technology that provides an increase in the operational properties of the surface layer of finished polyamide parts in order to increase wear resistance without affecting their load-bearing capacity. To study the impregnation of a polyamide-6 sample with a mixture of motor oil and hexane, full-scale experimental research was carried out following the algorithm developed using a laboratory unit. In the work, the program code for the control board was used that operates in conjunction with the PowerGraph software for processing the acquired data. During the study, a method for drying samples with the dimensions of 4x50x50 mm in a high-frequency electric field (up to 2500 Hz) was selected in order to heat and remove moisture from the polymer evenly within a short period. Darcy's law describing the process of impregnating polyamide with oil was used. In order to increase the efficiency of impregnation and reduce the

viscosity of the filler, its optimal composition was determined: a mixture of M-8B engine oil and hexane at a ratio from 8:2 to 4:6, respectively. A setup based on the UZP-2500 device was developed and automated by introducing a control board and sensors to measure the strength of the anode current and temperature of a polyamide sample. In addition, a regulating device with the power of a high-frequency generator operating in the current range of 0.25–0.35 A was built into the unit. Under the processing modes (the temperature of the polyamide sample is 75°C; the hexane content in the mixture is 40%), a method for controlling the drying temperature was established by switching off the high-frequency generator for 700 ms. The research results allow a new technological process of oil filling in polyamide parts operated in friction units to a given depth at known values of the impregnation rate to be developed. These results can help to increase the wear resistance and, consequently, the service life of the surface layer of finished polyamide parts used in railway wagon trucks exposed to friction and wear.

Keywords: oil filling of polymers and composites, automated system, research algorithm, high frequency drying of polymers, processing modes

For citation: Bychkovskiy V.S. Technological study of oil-filled polyamide parts. *iPolytech Journal*. 2023;27(3):472-481. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-472-481>. EDN: XAWJFS.

ВВЕДЕНИЕ

В отрасли железнодорожного транспорта, а именно – в конструкции тележек пассажирского или грузового вагона, присутствует большое количество деталей, работающих в сложных условиях, испытывающих на себе недопустимый износ под большими нагрузками в открытых узлах трения, куда попадают пыль и грязь, с отсутствием жидкостной и какой-либо смазки. Примером таких деталей могут быть прокладки, вкладыши, втулки, накладки (рис. 1). Данные узлы работают в основном в паре с ответной металлической деталью и деталью из износостойкого цветного металла (бронза или латунь), но в связи с тем, что цветные металлы не полностью удовлетворяют требованиям по износу, существует тенденция замены деталей из цветных металлов на детали из полимерных и композиционных материалов, чаще всего композитов на основе полиамида [1].

Такие полимерные детали применяются

в основном обработанном состоянии по существующим процессам модификации полимеров и композитов, которые производятся только при изготовлении самого материала детали путем добавления таких элементов, как графит, масло, стекло и углеволокно. Данные методы меняют эксплуатационные свойства всей детали, например, добавление элементов, снижающих износ, повышает пластичность, а их присоединение для повышения износостойкости и нагруженной способности осложняет механическую обработку при добавлении стекла и углеволокна или же при добавлении стекла значительно изнашивает ответную деталь, трущуюся об полиамидную деталь в условиях большой нагрузки [2]. Исходя из этого, возникает необходимость в разработке технологии, при которой можно повышать эксплуатационные характеристики поверхностного слоя уже готовых или эксплуатируемых деталей, не меняя свойства всей детали. В связи с этим и основываясь на явле-

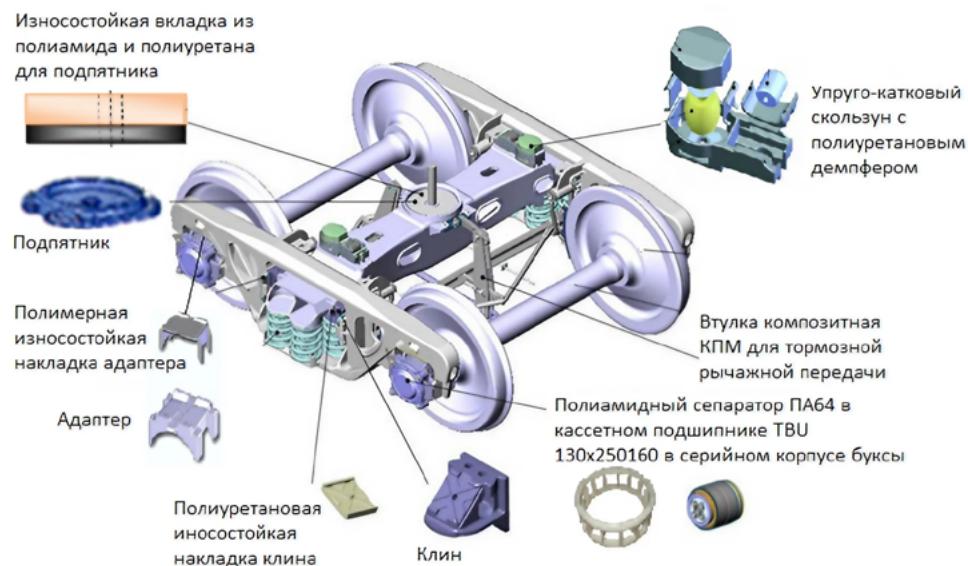


Рис. 1. Полимерные и композитные детали тележки вагона 18-578 железнодорожного транспорта

Fig. 1. Polymer and composite parts of the 18-578 railway car truck

ния гигроскопичности полимеров (поглощения до 10% влаги полиамид-6), имеется возможность заместить влагу маслом в детали из полиамида. Для разработки технологического процесса маслонаполнения полиамидных деталей необходимо исследовать сам процесс маслонаполнения. С этой целью разработан технологический процесс исследования маслонаполнения полиамидных деталей.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработка технологического процесса исследования маслонаполнения деталей из полиамидных материалов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: определить способ сушки; обосновать возможность разработки технологического процесса, исходя из законов, действующих при пропитке маслом полимера; определить состав наполнителя; выявить этапы проведения исследования процесса маслонаполнения; описать алгоритм выполнения технологического процесса исследования маслонаполнения.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Образцом для исследуемого объекта размерами 4x50x50 мм взят полимер ПА6, наполняемый смесью, в состав которой входит моторное масло М8-В и гексан. Само определение наполненного состояния полимерного образца выполняется по представленным ранее апробированным работам [3–6] – температурно-динамическим способом определения наполненного состояния за счет расположения по определенной схеме термодатчиков в теле образца. Сущность данного метода заключается в определении, когда изменится закономерность остывания образца при прохождении наполнителя до определенной высоты расположения термодатчиков 11.1...11.5 в теле полимерного образца (рис. 2).

Разработка технологического процесса исследования маслонаполнения направлена на обеспечение параметров технологического процесса: стабильности, производительности и качества готовой продукции. Решение данных задач осуществляется за счет определения влияния режимов технологического процесса, температуры образца и пропорции

смеси на время и скорость пропитки полиамидной детали, выявление наиболее эффективной комбинации этих режимов, где скорость пропитки будет максимальна.

Так как полиамидные детали при различных условиях хранения и эксплуатации поглощают в себя влагу перед осуществлением самого процесса маслонаполнения, необходимо выгнать ее из полимера, то есть произвести их сушку [7–9]. Для решения этой задачи был проведен литературный обзор, благодаря которому найдена технология высокой частоты ВЧ-сушки деталей из полиамидного материала [10–12]. Исследуемый объект помещается между двумя плитами (рис. 2), имитирующими конденсатор, после подается напряжение высокой частоты от электронного генератора на радиолампах. Переменное высокочастотное электрическое поле между плитами вызывает разогрев диэлектрического материала образца [13–15]. В данных работах авторы производили процесс обработки токами высокой частоты на доработанном промышленном оборудовании УЗП-2500 с целью восстановления эксплуатационных свойств полиамидных деталей после разносезонных условий эксплуатации. В целях обеспечения управления технологическим процессом ВЧ-сушки рассмотрена работа, в которой исследовалась зависимость анодного тока от фазового состояния полиамида, благодаря чему был предложен способ определения сухого состояния и температуры плавления полимера по изменению анодного тока по времени, исходя из его точек экстремума, первая точка максимума соответствует сухому состоянию полиамида [16]. Проведенное исследование позволило определиться с тем, что анодный ток будет режимом технологического процесса маслонаполнения для операции сушки. Разработанная технология ВЧ-сушки применима для разработки технологии маслонаполнения с целью выгнать влагу, помимо прочего, восстановить эксплуатационные свойства к исходным до эксплуатации или до хранения.

Для разработки технологии исследования процесса маслонаполнения необходимо понять, какие закономерности применимы к данному физическому явлению. Так как детали из полиамидных материалов являются

²ТУ2224-036-00203803-2012. Капрон (полиамид 6-блочный). Технические условия. Введ. 01.01.2013.
ОАО «Метафракс».

гидрофильтральными [17] и пористыми, согласно ТУ2224-036-00203803-2012², размер пор может быть в пределах от 0,1 до 1,5 мм. Размеры исследуемого полиамидного образца имеют геометрическую форму пластины (4x50x50 мм), течение наполнителя можно представить односторонним (линейная фильтрация) снизу вверх (рис. 2), течением через граничные боковые области в связи с малой высотой образца можно пренебречь. Данный физический процесс маслонаполнения можно отнести к капиллярному явлению с использованием закона фильтрации в пористых средах, описываемый уравнением неразрывности и законом Дарси (1):

$$Q = \frac{kA \Delta P}{\mu L}, \quad (1)$$

где Q – объемный расход наполнителя, см³/с; A – площадь фильтрации, см²; k – коэффициент проницаемости, д; μ – динамическая вязкость наполнителя, Па·с; ΔP – перепад давления, Па, на образце длиной L , см. Данное предположение обосновывает возможность в разработке настоящего технологического процесса.

Для того чтобы определиться с видом наполнителя и повысить эффективность пропитки, необходимо понижение вязкости наполнителя (масла). Исходя из этого, была рассмотрена работа авторов [18–20], заключающаяся в термовакуумном нагреве, а после – наполнении полиамидных образцов моторным маслом М8-В с добавлением в него гексана, приблизительные пропорции – 70% масла и 30% гексана. Что позволило достичь вязкости наполнителя близкой к вязкости воды в целях достижения максимального объема впитывания полимером жидкости, близкого к 10%. Результаты работы взяты за основу для определения состава масляного наполнителя для настоящего исследования. Исходя из этого, определены технологические режимы операции маслонаполнения, это температура полиамидного образца и процентное содержание гексана в масле.

Для решения задач настоящего исследования, с учетом уже разработанной и рассчитанной схемы расположения термопар в теле полимерного образца для контроля температуры по всему объему, необходимой для опреде-

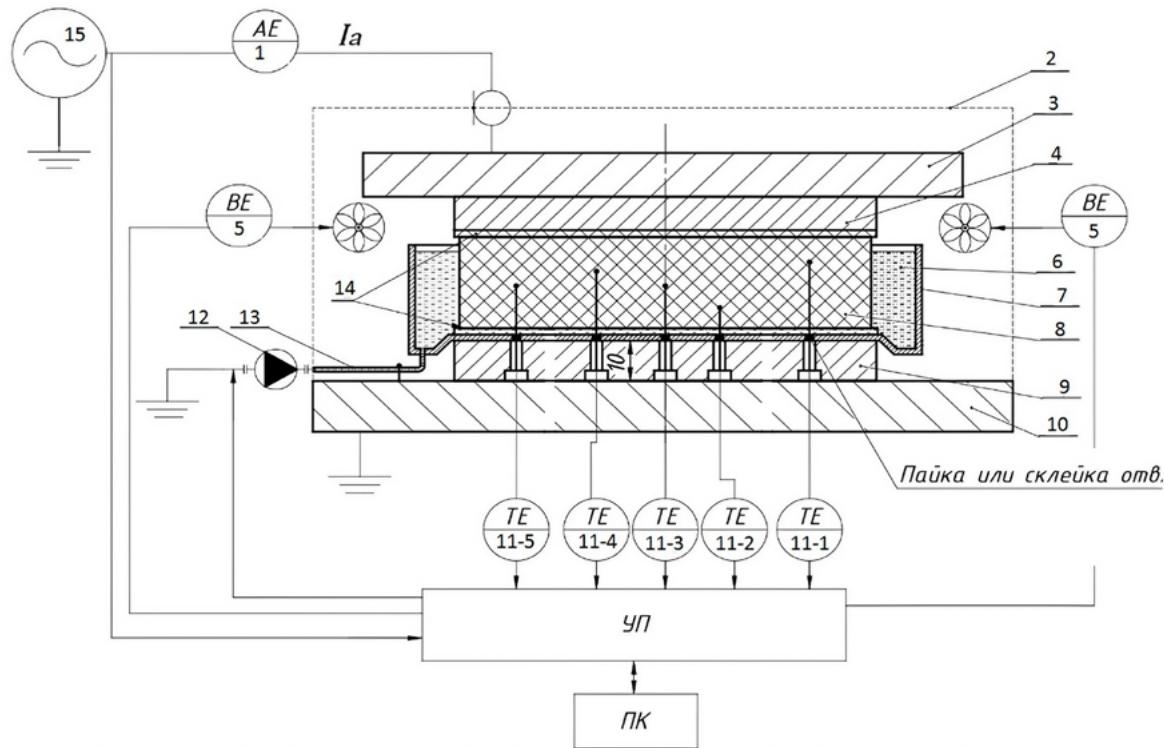


Рис. 2. Схема экспериментально-исследовательской установки (1 – амперметр; 2 – защитный экран; 3 – высокопотенциальный электрод; 4 – высокопотенциальная плита; 5 – вентилятор; 6 – масло; 7 – ванна; 8 – обрабатываемое изделие [9–11]; 9 – низкопотенциальная опорная плата; 10 – заземленный электрод; 11 – термодатчик 11–1...11–5 для контроля температуры по всему объему и уровня заполнения маслом образца; 12 – насос; 13 – трубка для подвода и отвода наполнителя (масла); 14 – картонный изолятатор; 15 – генератор высокой частоты)

Fig. 2. Diagram of the experimental research installation (1 – ammeter; 2 – protective screen; 3 – high-potential electrode; 4 – high-potential plate; 5 – fan; 6 – oil; 7 – tank; 8 – processed product [9–11]; 9 – low-potential base plate; 10 – earthed electrode; 11 – sensor 11–1...11–5 for temperature control over the entire volume and oil filling level of the sample; 12 – pump; 13 – tube for filler (oil) supply and removal; 14 – cardboard insulator; 15 – high frequency generator)

ления скорости пропитки, разработана схема автоматизированной экспериментально-исследовательской установки электротермического маслонаполнения, представленная на рис. 2.

Технологический процесс исследования маслонаполнения состоит из следующих этапов:

- изготовление образца размерами 4x50x50 мм с заранее просверленными отверстиями в нем по схеме [3], необходимыми для размещения в них термодатчиков;
- выполнение изоляторов из картона размерами 0,5x55x55 мм;
- расположение образца на ванне-электроде (рис. 3) с установкой сверху и снизу изоляторов;
- установка собранной ванны с образцом

- подача наполнителя;
- контроль достижения пропитки, наблюдение за временем процесса и показаниями на термодатчиках, результаты регистрируются в PowerGraph;
- завершение процесса, изъятие исследуемого образца;
- обработка результатов исследования;
- повтор этапов исследования нового образца со следующей комбинацией режимов технологического процесса.

В ходе разработки технологического процесса исследования маслонаполнения разработана оснастка «Ванна-электрод» для установки наполнения полимерного образца.



Рис. 3. Ванна-электрод со встроенным термодатчиками (1 – ванна 100x100 мм; 2 – картонный изолятор; 3 – медная трубка для подачи наполнителя; 4 – плата термисторов)

Fig. 3. Electrolytic tank with built-in temperature sensors (1 – 100x100 mm tank; 2 – cardboard insulator; 3 – copper tube for filler supply; 4 – thermistor board)

на низкопотенциальной плате ВЧ-установки УЗП2500;

- закрытие колпака и включение электромагнита для его фиксации;
- подключение блока управления к компьютеру;
- запуск программного обеспечения PowerGraph;
- повернуть до упора влево рукоять регулировки мощности;
- подача питания на ВЧ-генератор;
- достижение сухого состояния по анодному току согласно работе авторов [3];
- охлаждение до требуемой температуры согласно пропорции гексана и масла в наполнителе. Температура полимерного образца не должна превышать предельные значения температуры испарения гексана из масла;
- отключение питания ВЧ-генератора;

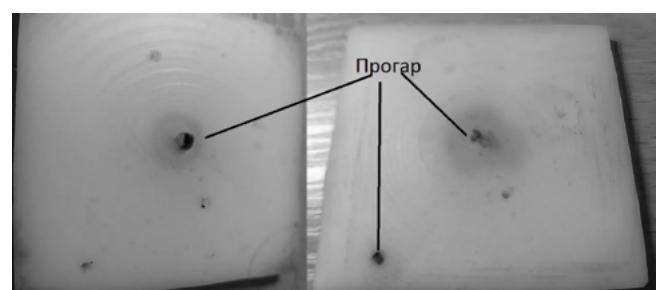


Рис. 4. Фото прогара на образце из ПА6 с размерами 4x50x50 мм

Fig. 4. An image of PA6 sample burnout with the dimensions of 4x50x50 mm

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе проведения экспериментальных исследований возникла проблема, а именно – проблема прогара образца в местах, где присутствовала наибольшая глубина отвер-

стия под термодатчик в теле объекта, в виде дефекта глобального углубления (рис. 4). Причину возникновения данного явления можно пояснить резкими скачками мощности электротермического излучения. Исходя из этого, было принято решение добавить автоматическое регулирование мощности ВЧ-генератора за счет установки шагового двигателя с ременным редуктором (рис. 5). Данный механизм был совмещен с рукоятью регулировки мощности ВЧ-генератора.

Исходя из этой модернизации, возникла задача по определению интервала величины анодного тока, при нем достигается состояние полностью высушенного образца, который будет выдерживаться за счет разработанного устройства регулировки мощности.

Экспериментальным путем был определен интервал значений анодного тока, при нем достигается полная сушка и не происходит прогар образца, 0,25...0,35 А. Определенный интервал значения анодного тока соответствует приблизительно температуре 170°C, что удовлетворяет установленному ранее условию предела температуры для достижения полностью сухого состояния образца из ПА6 [12, 13].

Исходя из проведенных работ по разработке технологического процесса исследования маслонаполнения деталей из полиамидных материалов, разработана автоматизированная экспериментально-исследовательская установка на основе использования оборудования УЗП 2500 путем внедрения в него блока управления с разработанной управляющей программой, в которой за основной управля-

емый параметр взята величина анодного тока [16], по нему производится управление температурой нагрева для сушки с последующим контролем наполнения по термодатчикам масляным наполнением.

По окончании работ составлен код управляющей программы для данной установки по алгоритму управления исследования технологического процесса. Этот код загружается в управляющую плату. Все данные с управляющей платычитываются при помощи программного обеспечения PowerGraph.

Для настоящего исследования в качестве результатов проведенных работ выполнено описание алгоритма выполнения технологического процесса исследования маслонаполнения полiamидных образцов при режимах: анодный ток – 0,25...0,35 А, температура образца – 75°C, 40% гексана.

Установка запущена, начался отчет времени работы ВЧ-генератора. При помощи датчика тока ACS712 считывается величина анодного тока и сравнивается с заданным интервалом значений (0,2...0,35 А). Если значение анодного тока превышает заданный предел, то шаговый двигатель уменьшает или увеличивает мощность за счет изменения угла поворота рукоятки. По установленному датчику угла поворота WH148 узнается угол поворота рукоятки регулировки мощности ВЧ-генератора. По полученным значениям анодного тока I_a и угла поворота ϕ рассчитывается мощность высокочастотного генератора по формуле (2):

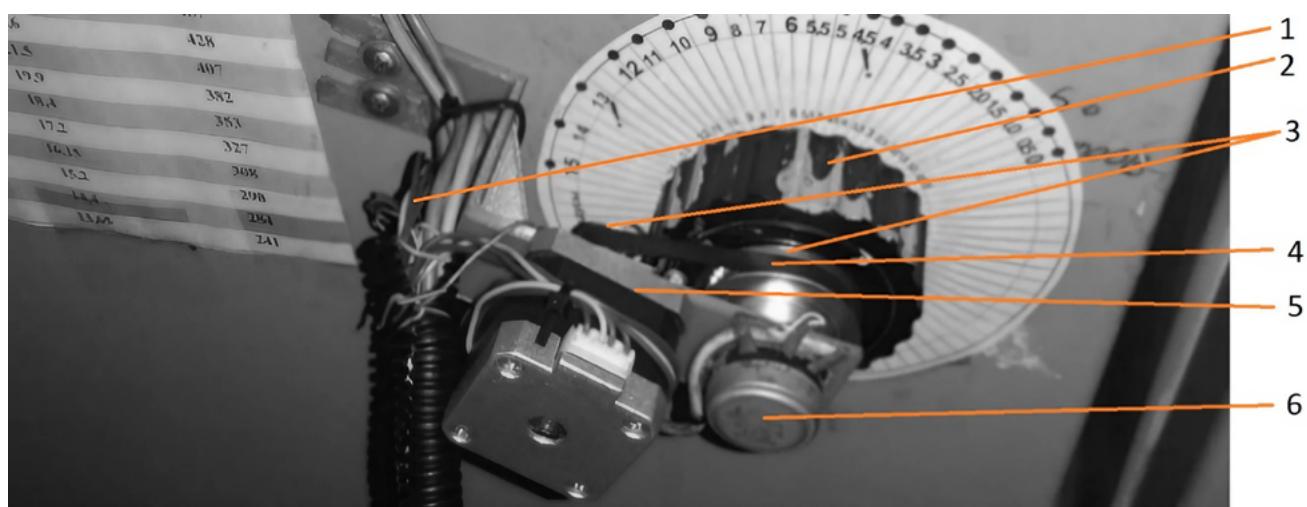


Рис. 5. Автоматическое устройство регулировки мощности высокой частоты (1 – драйвер с переходной платой; 2 – рукоятка; 3 – шкивы; 4 – ремень; 5 – шаговый двигатель; 6 – потенциометр)

Fig. 5. Automatic high frequency power control (1 – driver with an adapter board; 2 – handle; 3 – belt rollers; 4 – belt; 5 – stepper motor; 6 – potentiometer)

$$P = I_a \times U, \quad (2)$$

где I_a – анодный ток, А; U – напряжение, В.
По формуле (3) [8] определим

$$\begin{aligned} U = & -0,04 \times \varphi^5 + 2,21 \times \varphi^4 - 41,03 \times \\ & \varphi^3 + 407,55 \times \varphi^2 - 1907,4 \times \varphi + 4000, \end{aligned} \quad (3)$$

где φ – угол поворота рукоятки мощности ВЧ-генератора.

По полученным значениям тока I_a и мощности P строятся графические данные в реальном времени в программном обеспечении PowerGraph.

В связи с тем, что датчики температуры NTC 3950 находятся в поле высокой частоты во время работы ВЧ-генератора, на них воздействуют значительные помехи, изменяющие температуру исследуемого объекта, что не является целесообразным в данном исследовании. Для решения этой задачи было принято решение периодически выключать ВЧ-генератор. Время работы ВЧ-генератора длится в течение 5 с, после происходит отключение его за счет твердотельного реле. После отключения срабатывает счетчик на 700 мс (миллисекунд) [21], необходимый для того, чтобы высокочастотное поле успело рассеяться и не смогло оказывать никакого воздействия на показания температуры, которые снимаются с термодатчиков [4]. Затем в течение 300 мс происходит замер температуры полимерного образца и вывод графических данных в программное обеспечение PowerGraph. По окончании этих временных интервалов снова включается ВЧ-генератор.

После достижения средней температуры между датчиками 170°C отключается ВЧ-генератор. Включаются вентиляторы обдува при подаче сигнала на механическое реле. Вентиляторы используются для избавления поверхностной влаги на образце. Затем по первому термодатчику 11.1 контролируется температура остывания образца до 75°C (для масляного наполнителя с содержанием гексана 40%), так масляный наполнитель поступает снизу вверх. Для исследования важна температура, близкая к нижней поверхности исследуемого объекта. По достижении данной температуры отключаются вентиляторы, и по силиконовой трубке ванны-электрода подается масляный наполнитель.

Потом продолжается замер температур по

пяти термодатчикам, и по ним же в реальном времени рассчитывается производная температуры по времени, $dT1/dt \dots dT5/dt$.

По полученным значениям производных $X1 \dots X5$ высчитывается средняя величина из 50-ти замеров. Позже – итоговые данные $X1_{ср} \dots X5_{ср}$. При помощи операции сравнения средних значений определяем точку минимум на графике производной температуры по времени, что соответствует достижению наполнителя соответствующей точки. Для случая, если у какой-либо производной температуры по времени не было определено точки экстремума-минимум (туда не поступил наполнитель), установлен счетчик на 60 с, так как по проведенным многочисленным экспериментам это максимальное время для наполнения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования обеспечивают разработку новых методов и технологий повышения эксплуатационных характеристик поверхностного слоя детали, не изменяя свойства всего ее объема, позволяющие повысить ресурс эксплуатации полиамидных деталей и долговечности машин.

Технологический процесс исследования, разработанный с привлечением автоматизации промышленного оборудования УЗП-2500, необходимого для определения наиболее оптимальных режимов обработки, исходя из определения скорости наполнения, позволяет повысить его параметры, такие как производительность и стабильность обработки уже готовых деталей.

На основе проведенных экспериментов с полимерным образцами из материала ПА6 по разработанной автоматизированной системе появилась возможность составления базы данных по различным полимерным и композиционным материалам для определения пропитки наполнителем на заданную глубину, зная время и скорость проникновения. Результаты данного исследования применимы для модификации полимерных и композиционных материалов используемых в узлах трения деталей.

Результаты настоящего исследования применимы для дальнейшего изучения изменения эксплуатационных свойств полимерных и композиционных деталей, таких как износостойкость, ударная вязкость, коэффициент

трения и т.д. в целях повышения качества готовых полимерных деталей.

По завершении проведенной работы можно сделать выводы о том, что технологический процесс исследования маслонаполнения позволяет обеспечить разработку совершенно нового технологического процесса пропитки полимерных деталей без применения термодатчиков на заданную глубину поверхностного слоя, который будет больше величины допустимого износа, исходя из определенной скорости пропитки, согласно выбранным режимам.

По окончании проведенных работ была достигнута цель настоящего исследования, а именно – разработка технологического процесса исследования маслонаполнения деталей из полиамидных материалов, позволяющая создать новый технологический процесс самого маслонаполнения, который может обеспечить повышение долговечности износостойких полимерных и композиционных деталей, работающих в сложных условиях на железнодорожном транспорте.

Список источников

1. Скачков А.Н., Юхневский А.А., Мешков В.В., Горлов И.В., Горлов А.И. Триботехнические испытания нового материала для вкладыша скользунна пассажирского вагона // Транспорт Российской Федерации. 2015. № 3. С. 69–71. EDN: UCCVUJ.
2. Ярославцев В.М. Технологические решения проблем обработки ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2005. № S2. С. 41–62. EDN: WDTWYT.
3. Бычковский В.С., Филиппенко Н.Г., Лившиц А.В., Баканин Д.В., Фарзалиев Э.Ф. Автоматизированный способ контроля наполнения маслом полимерных и композиционных материалов // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2021. Т. 68. № 4. С. 9–16. <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2021-68-4-9-16>. EDN: NTDJOF.
4. Bychkovsky V., Bakanin D., Filippenko N., Butorin D., Kuraitis A., Larchenko A. Contact method of volume control of temperature of a polymer sample at high-frequency heating // Journal of Physics: Conference Series. Series: International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies. 2020. Vol. 1614. P. 012053. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1614/1/012053>. EDN: ILAHBS.
5. Филиппенко Н.Г., Лившиц А.В. Автоматизированные исследования пропитки эластомеров // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2022. Т. 69. № 1. С. 72–78. <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2022-69-1-72-78>. EDN: QDIYUJ.
6. Чернец М., Шилько С., Корниенко А., Пашечко М. Трибоанализ антифрикционных материалов на основе полимеров для металлополимерных подшипников скольжения // Трение и износ. 2023. Т. 44. № 2. С. 103–113. <https://doi.org/10.32864/0202-4977-2023-44-2-103-113>.
7. Владимирова А.А., Воробьев А.А. Установление оптимального материала для сепаратора подшипника буксового узла вагона метрополитена // Прогрессивные технологии, применяемые при ремонте рельсового подвижного состава: сб. тр. конф. (г. Санкт-Петербург, 30 ноября 2022 г.). 2022. С. 40–45. EDN: GGIYWR.
8. Ларченко А.Г. Автоматизированное выявление дефектов в изделиях из полимерных материалов методом высокочастотного излучения // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2014. № 1. С. 160–165.
9. Mamada S., Ohta T., Okamura Yo. Autonomous damage detection system for damaged axle bearings of railway car bogies // Quarterly Report of RTRI. 2023. Vol. 64. Iss. 3. P. 193–198. https://doi.org/10.2219/rtrijqr.64.3_193.
10. Лачинов А.Н., Давлетгареев Х.И., Яхин А.Р., Юсупов А.Р., Карамов Д.Д., Галиев А.Ф. Подвижность носителей заряда вдоль границы раздела полимер/полимер // Известия Уфимского научного центра РАН. 2023. № 2. С. 28–33. <https://doi.org/10.31040/2222-8349-2023-0-2-28-33>. EDN: PXPANP.
11. Буторин Д.В. Математическое моделирование процесса высокочастотной сушки партии полимерных изделий, изолированных от электродов рабочего конденсатора с обеих сторон // Colloquium-Journal. 2018. № 7-3. С. 14–23.
12. Антипов Ю.Н., Дмитренко Е.В., Коваленко А.В., Горяной С.А., Рыбаков А.А., Семенов С.Е., Филипчук Т.Н. Технология производства газонефтепроводных труб способом высокочастотной сварки на ПАО «Интерпайп НМТЗ» // Автоматическая сварка. 2014. № 3. С. 43–49. EDN: TDMVCH.
13. Fesharaki P.J., Boutaous M., Xin Shi He. Numerical and experimental study of polymers microwaves heating // Key Engineering Materials. 2022. Vol. 926. P. 1890–1899. <https://doi.org/10.4028/p-92u0g5>.
14. Jinesh K.J., Pankaj S. Recent trends in welding polymers and polymer–metal hybrid structures // Light Weight Materials / eds. K. Kumar, B.S. Babu, J.P. Davim. 2021. P. 39–71. <https://doi.org/10.1002/9781119887669.ch3>.
15. Sater N.A., Grigorov A., Tulска A., Nahliuk M., Lazorik P. Theoretical basis of application of the parameter of dielectric permeability of hydrocarbon feedstock during its processing // EAI International Conference on Automation and Control in Theory and Practice. EAI ARTEP 2023. EAI/Springer Innovations in Communication and Computing / eds. M. Balog, A. Iakovets, S. Hrehova. Cham: Springer, 2023. P. 139–150. https://doi.org/10.1007/978-3-031-31967-9_11.
16. Бородаев И.А., Желтухин В.С., Сизов А.С., Сысоев В.А. Математическое моделирование обработки сверхвысокомолекулярного полистилена высокочастотной плазмой пониженного давления // Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий. 2019. Т. 1. № 10. С. 53–56. EDN: CMOUZX.
17. Нельсон У.Е. Технология пластмасс на основе полимеров / пер. с англ. С.Г. Куличикова, Р.З. Маркович; под

- ред. А.Я. Малкина. М.: Химия, 1979. 256 с.
18. Колесников В.И., Мясникова Н.А., Мясников Ф.В., Мантуров Д.С., Новиков Е.С., Данильченко С.А., Авилов В.В. Трибологические и физико-механические свойства маслонаполненных композитов на основе фенилена // Трение и износ. 2018. Т. 39. № 5. С. 462–470. EDN: FRPKDH.
19. Булатова В.И., Молчанов В.И. Набухание наполненных резин в полярных средах // Материалы студенческой научной конференции за 2016 год: в 2 ч. Ч. I. Технические науки. Воронеж, 2016. С. 559.
20. Петрова П.Н. Федоров А.Л. Исследование механизмов формирования износостойких маслонаполненных композитов на основе политетрафторэтилена, полученных путем пропитки пористых заготовок // Вестник Северо-восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. 2010. Т. 7. № 4. С. 52–58.
21. Eguchi K., Ishibashi T. A high voltage generation using a hybrid Marx generator with Fibonacci operation // Energy Reports. 2023. Vol. 9. P. 256–264. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.10.415>.

References

1. Skachkov A.N., Yukhnevskiy A.A., Meshkov V.V., Gorlov I.V., Gorlov A.I. Tribotechnical testing of a new material for the side bearing liner of a passenger car. *Transport Rossiijskoj Federacii*. 2015;3:69-71. (In Russ.). EDN: UCCVUJ.
2. Yaroslavtsev V.M. Technological solutions to the processing issues of composite material rocket and aerospace structures. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni N.E. Baumana. Seriya: Seriya Mashinostroyeniye = Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*. 2005;S2:41-62. (In Russ.). EDN: WDTWYT.
3. Bychkovskiy V.S., Filippenko N.G., Livshits A.V., Bakanin D.V., Farzaliev E.F. Automated method for controlling oil filling of polymer and composite materials. *Elektrotehnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2021;68(4):9-16. (In Russ.). <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2021-68-4-9-16>. EDN: NTDJOF.
4. Bychkovsky V., Bakanin D., Filippenko N., Butorin D., Kuraitis A., Larchenko A. Contact method of volume control of temperature of a polymer sample at high-frequency heating. *Journal of Physics: Conference Series. Series: International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies*. 2020;1614:012053. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1614/1/012053>. EDN: ILAHBS.
5. Filippenko N.G., Livshits A.V. The automated research of the impregnation process of elastometers. *Elektrotehnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2022;69(1):72-78. <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2022-69-1-72-78>. EDN: QDIYUJ.
6. Chernets M., Shil'ko S., Kornienko A., Pashechko M. Triboolysis of antifrictional materials based on polyamides for metal-polymer sliding bearings. *Trenie i iznos = Journal of Friction and Wear*. 2023;44(2):103-113 (In Russ.). <https://doi.org/10.32864/0202-4977-2023-44-2-103-113>.
7. Vladimirova A.A., Vorob'ev A.A. Search for the optimal material for the bearing separator of the subway car axle box unit. In: *Progressivnye tekhnologii, primenyaemye pri remonte rel'sovogo podvizhnogo sostava: sbornik trudov konferencii = Advanced technologies used in rail rolling stock repair: collected articles of the conference*. 30 November 2022, Saint-Petersburg. Saint-Petersburg; 2022, p. 40-45. (In Russ.). EDN: GGIYWR.
8. Larchenko A.G. Automatic detection of defects in the product of a polyamide materials by a method of high radiation. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie = Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2014;1:160-165. (In Russ.).
9. Mamada S., Ohta T., Okamura Yo. Autonomous damage detection system for damaged axle bearings of railway car bogies. *Quarterly Report of RTRI*. 2023;64(3):193-198. https://doi.org/10.2219/rtrir.64.3_193.
10. Lachinov A.N., Davletgareev H.I., Yakhin A.R., Yusupov A.R., Karamov D.D., Galiev A.F. Charge mobility along the polymer. *Izvestia Ufimskogo Nauchnogo Tsentra RAN = Proceedings of the RAS Ufa Scientific Centre*. 2023;2:28-33. (In Russ.). <https://doi.org/10.31040/2222-8349-2023-0-2-28-33>. EDN: PXPANP.
11. Butorin D.V. Mathematical modeling of high-frequency drying of polymer products insulated on both sides from the working capacitor electrodes. *Colloquium-Journal*. 2018;7-3:14-23. (In Russ.).
12. Antipov Yu.N., Dmitrenko E.V., Kovalenko A.V., Goryanov S.A., Rybakov A.A., Semenov S.E., Filipchuk T.N. High-frequency welding production technology of gas and oil pipeline pipes at PJSC Interpipe NMTZ. *Avtomateskaya svarka*. 2014;3:43-49. EDN: TDMVCH.
13. Fesharaki P.J., Boutaous M., Xin Shi He. Numerical and experimental study of polymers microwaves heating. *Key Engineering Materials*. 2022;926:1890-1899. <https://doi.org/10.4028/p-92u0g5>.
14. Jinesh K.J., Pankaj S. Recent trends in welding polymers and polymer-metal hybrid structures. In: Kumar K., Babu B.S., Davim J.P. (eds.). *Light Weight Materials*. 2021, p. 39-71. <https://doi.org/10.1002/9781119887669.ch3>.
15. Sater N.A., Grigorov A., Tulskaya A., Nahliuk M., Lazorko P. Theoretical basis of application of the parameter of dielectric permeability of hydrocarbon feedstock during its processing. In: Balog M., Iakovets A., Hrehova S. (eds.). *EAI International Conference on Automation and Control in Theory and Practice. EAI ARTEP 2023. EAI/Springer Innovations in Communication and Computing*. Cham: Springer; 2023, p. 139-150. https://doi.org/10.1007/978-3-031-31967-9_11.
16. Borodaev I.A., Zheltuhin V.S., Sizov A.S., Sysoev V.A. Mathematical modeling of low-pressure high-frequency plasma processing of ultra-high molecular weight polyethylene. *Nizkotemperaturnaya plazma v processakh naneseniya funkcionala pos;nyh pokrytij*. 2019;1(10):53-56. EDN: CMOUZX.
17. Nelson U.E. Nylon plastics technology. 1979, 256 p. (Russ. ed.: *Tekhnologiya plastmass na osnove poliamidov*. Moscow, Himiya; 1979, 256 p.)
18. Kolesnikov V.I., Myasnikova N.A., Myasnikov P.V., Manturov D.S., Novikov E.S., Danilchenko S.A., Avilov V.V. Tribological and physicomechanical properties of oil-filled, phenilon-based composites. *Trenie i iznos = Journal of Friction*

- and Wear. 2018;39(5):365-370. (In Russ.). EDN: FRPKDH.
19. Bulatova V.I., Molchanov V.I. Filled rubber swelling in polar environments. In: *Materialy studencheskoy nauchnoj konferencii za 2016 god. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of the student scientific conference 2016. Engineering Sciences.* Voronezh; 2016, p. 559. (In Russ.).
20. Petrova P.N., Fedorov A.L. Researching formation mechanism of polytetrafluoroethylene-based wear-resistant oil-filled composites obtained by porous half-product impregnation. *Vestnik severo-vostochnogo federal'nogo universiteta im. M.K. Ammosova = Vestnik of North-Eastern Federal University.* 2010;7(4):52-58. (In Russ.).
21. Eguchi K., Ishibashi T. A high voltage generation using a hybrid Marx generator with Fibonacci operation. *Energy Reports.* 2023;9:256-264. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.10.415>.

ИНФОРМАЦИЯ О АВТОРЕ

Бычковский Владимир Сергеевич,
ассистент кафедры автоматизации
производственных процессов,
Иркутский государственный университет
путей сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия
✉ bikovskii_vs@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5831-3216>

Вклад автора

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

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 4.05.2023 г.; одобрена после рецензирования 27.06.2023 г.; принята к публикации 15.07.2023 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Vladimir S. Bychkovskiy,
Assistant Professor of the Department of Automation
of Production Processes,
Irkutsk State Transport University,
15, Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia
✉ bikovskii_vs@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5831-3216>

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 4.05.2023; approved after reviewing 27.06.2023; accepted for publication 15.07.2023.

МАШИНОСТРОЕНИЕ



Научная статья

УДК 621.879.31

EDN: GARLWJ

DOI: 10.21285/1814-3520-2023-3-482-489

Результаты исследований ударного механизма с повышенной энергией единичного удара на физической модели

В.Г. Зедгенизов¹✉, Т.А. Сенотрусова²^{1,2}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме. Цель экспериментальных исследований – подтверждение теоретических результатов, полученных на математической модели двухмассной ударной системы. Объектом исследования является физическая модель двухмассной ударной системы, которая исключает передачу реактивной составляющей на базовую машину. Модель состоит из корпуса, инерционной массы, упругого элемента, ударной части. В рабочем положении сжатый упругий элемент располагается между инерционной массой и ударной частью и удерживается от разъединения со-бачками. Высоту разъединения ударной массы определяет положение хомута, который разъединяет в свободном падении движущиеся ударную часть и инерционную массу. В исследованиях использованы основные положения теории подобия, теории планирования и обработки результатов эксперимента. В качестве независимого фактора принята высота разъединения инерционной массы и ударной части; функцией отклика служит энергия единичного удара, которая определяется по диаметру отпечатка конуса ударной части на деревянной основе. На основании метода анализа физических законов составлены критерии подобия ударного механизма, предложены зависимые и независимые индикаторы, а также формулы перехода от параметров натуры к параметрам модели. По результатам исследований установлено, что суммарная площадь продувочных отверстий должна быть не менее половины поперечного сечения корпуса физической модели. Получена зависимость диаметра отпечатка конуса ударной части на деревянной основе от энергии удара. Подтверждена адекватность математической модели, описывающей процессы, происходящие в ударном устройстве. Показано, что максимальное расхождение результатов математического и физического моделирования рабочего процесса ударного механизма с повышенной энергией единичного удара составило 18%. Таким образом, проведенные исследования подтвердили результаты, полученные на математической модели ударного механизма. Дальнейшие исследования следует направить на доработку физической модели, позволяющей регистрировать зависимость высоты отскока инерционной массы от параметров ударного механизма.

Ключевые слова: ударный механизм, критерии подобия, энергия единичного удара, адекватность

Для цитирования: Зедгенизов В.Г., Сенотрусова Т.А. Результаты исследований ударного механизма с повышенной энергией единичного удара на физической модели // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 3. С. 482–489. DOI: <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-482-489>. EDN: GARLWJ.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Investigation of high-energy impact system using a physical model

Viktor G. Zedgenizov¹✉, Tatiana A. Senotrusova²^{1,2}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The aim of the experimental research is to validate the theoretical findings obtained from a mathematical model of a two-mass impact system. The research object is a physical model of a two-mass impact system, designed to prevent the transfer of the reactive component to the tool carrier. The model includes a housing, inertial mass, elastic member and impact part. In the operating position, a compressed elastic member is placed between the inertial mass and the impact part, held together by dogs. The height at which the impact part detaches from the inertial mass is determined by the position of the clamp, which separates the moving impact part and inertial mass during free fall. The study involved the fundamental principles of similarity theory, planning theory and data processing. The height at which the impact part detaches

from the inertial mass and the impact part is taken as an independent factor, while the energy of a single impact serves as the response function, determined by the diameter of the cone impression delivered by the impact part onto a wooden base. Based on the analysis of physical laws, similarity criteria for the impact mechanism were established, along with dependent and independent indicators, and transfer equations from real parameters to model parameters were derived. The research findings indicate that the total area of air holes should be at least half of the cross-sectional area of the housing for a physical model. The relationship between the diameter of the cone impression on the wooden base and the impact energy was determined. The adequacy of the mathematical model describing the processes in the impact device was confirmed, with a maximum discrepancy of 18% between the results of mathematical and physical modelling of the operating process for the impact mechanism characterised by an increased energy of a single impact. Therefore, the research results validate the results obtained from the mathematical model of the impact mechanism. Further studies should focus on refining the physical model to record the rebound height of the inertial mass as a function of the parameters of the impact mechanism.

Keywords: percussion mechanism, similarity criteria, single impact energy, adequacy

For citation: Zedgenizov V.G., Senotrusova T.A. Investigation of high-energy impact system using a physical model. *iPolytech Journal*. 2023;27(3):482-489. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-482-489>. EDN: GARLWJ.

ВВЕДЕНИЕ

Энергия единичного удара оказывает решающее влияние на эффективность процесса разрушения прочных материалов [1–6]. Наращивание энергии традиционным способом приводит к существенному увеличению массово-габаритных характеристик машин. В случае применения аккумуляторов энергии фактором, ограничивающим дальнейшее повышение энергии единичного удара, выступает реактивная составляющая, которая в момент удара передается на базовую машину [7, 8].

В [9–11] предложена оригинальная схема двухмассной ударной системы, которая исключает передачу реактивной составляющей на базовую машину. Разработана и реализована в среде Matlab-Simulink математическая модель системы, получены зависимости скорости снаряда, энергии единичного удара, высоты отскока инерционной массы от основных параметров ударной системы.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Подтверждение теоретических результа-

тов, полученных на математической модели двухмассной ударной системы.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В исследованиях использованы основные положения теории подобия, теории планирования и обработки результатов эксперимента.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Научно-методической основой разработки физических моделей является теория подобия, которая дает возможность установить подобие или разработать способы его достижения. Подобными являются такие физические системы, у которых подобны все характеризующие их параметры: векторные величины геометрически подобны, а скалярные – пропорциональны в соответствующих точках пространства и в соответствующие моменты времени. Подобие характеризуется пропорциональностью всех величин, определяющих их качественную и количественную стороны^{2,3} [12, 13].

$$\Pi_1 = \frac{L_i}{l_i}; \Pi_2 = \alpha_i; \Pi_3 = \frac{\rho l^3}{m}; \Pi_4 = \frac{mg}{cl}; \Pi_5 = \frac{cl}{P}; \Pi_6 = \sqrt{2gH}; \Pi_7 = \frac{mV^2}{2},$$

где L_i и l_i – определяющий линейный размер натурного образца и модели, м; α_i – угловой размер, рад; ρ – плотность материала инструмента, кг/м³; m – величина инерционной массы, кг; g – ускорение свободного падения,

м/с²; c – жесткость упругого элемента, Н/м; P – усилие, Н; H – высота подъема ударной части, м; V – скорость удара, м/с. Независимые индикаторы подобия:

$$k_l = 5; k_\alpha = 1; k_\rho = 1; k_g = 1.$$

$$\text{Тогда: } k_m = k_\rho k_l^3; k_c = \frac{k_m k_g}{k_l}; k_p = k_c k_l; k_v = k_g k_l^{0.5}; k_E = k_m k_v^2.$$

В зависимости от характера исходной информации используются различные методы получения критериев подобия. Широкое применение получил метод анализа физических законов, на основе которого составлены критерии подобия ударного механизма [10–12]:

Формулы перехода от параметров натуры к параметрам модели представлены в табл. 1.

Таблица 1. Формулы перехода от параметров натуры к параметрам модели

Table 1. Formulas of nature parameters transition to model parameters

№	Наименование параметра	Формула перехода
1	Линейный размер	$l_m = l_n/k_l$
2	Угловой размер	$\alpha_m = \alpha_n$
3	Масса	$m_m = m_n/k_l^3$
4	Жесткость	$c_m = c_n/k_l^2$
5	Сила	$P_m = P_n/k_l^3$
6	Скорость	$V_m = V_n/k_l^{1.5}$
7	Энергия единичного удара	$E_m = E_n/k_l^4$

При помощи теории подобия формируются системы безразмерных соотношений – критерии подобия [14–18]. Полученные результаты использованы при изготовлении физической модели ударного устройства (рис. 1), которая состоит из корпуса 1, инерционной массы 2, упругого элемента 3, ударной части 4.

В рабочем положении сжатый упругий элемент 3 располагается между инерционной массой 2 и ударной частью 4 и удерживается от разъединения собачками 5. Высоту разъединения ударной массы определяет положение хомута 6, который разъединяет в свободном падении движущуюся ударную часть 4 и инерционную массу 2. Основные параметры физической модели представлены в табл. 2.

Таблица 2. Основные параметры физической модели

Table 2. Basic parameters of the physical model

№	Наименование параметра	Значение
1	Величина инерционной массы, кг	7,2
2	Масса ударной части, кг	4,8
3	Жесткость упругого элемента, Н/м	7000
4	Высота подъема, м	0,36
5	Высота разъединения, м	0,06; 0,18; 0,3

Физическая модель позволяет варьировать независимым фактором – высотой разъединения инерционной массы и ударной части за счет установки хомута в соответствующее положение. Функцией отклика служит энергия единичного удара, которая определяется величиной отпечатка конуса ударной части на деревянном основании.



Рис. 1. Физическая модель ударного устройства:
1 – корпус; 2 – инерционная масса; 3 – упругий элемент;
4 – ударная часть; 5 – собачки; 6 – хомут

Fig. 1. Physical model of the percussion device: 1 – case; 2 – inertial mass; 3 – elastic element; 4 – percussion part; 5 – catches; 6 – clamp

³Баловнев В.И. Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин: учеб. пособ. М.: Высш. шк., 1981. 335 с.

⁴Баловнев В.И. Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин: учеб. способ. для студентов высш. учеб. заведений. 2-е изд., перераб. М.: Машиностроение, 1994. 432 с.

Таблица 3. Результаты пробных экспериментов
Table 3. Results of trial experiments

№	xk	y1	y2	y3	$m_k = \frac{1}{n} \sum y_i$	$S^2_k = \sum \frac{(y_i - m_k)^2}{n-1}$
1	0	34	38	35	35,7	4,34
2	4	40	38	42	40	4
3	8	39	40	42	40,3	1,74
Σ	-	-	-	-	116	10,08

Методика предполагает проведение двух серий экспериментов: пробных и основных

Целью пробных экспериментов являлось определение влияния сопротивления воздуха в закрытом корпусе на энергию единичного удара. Для этого с помощью тарировочного устройства последовательно производилось сбрасывание ударной части массой 12 кг с высоты 1,5 м без продувочных отверстий 3 в корпусе 1, затем с четырьмя и восемью отверстиями (рис. 2). Число параллельных опытов равнялось трем. Результаты пробных экспериментов представлены в табл. 2.

Величина доверительной вероятности:

$$\delta = t \sqrt{\frac{S^2 \Sigma}{n}},$$

где t – критерий Стьюдента; $S^2 \Sigma$ – дисперсия эксперимента; n – число параллельных опытов.

Табличное значение критерия Стьюдента при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и степени свободы $f = 2$ составляет $t_{\text{табл}} = 4,3$.

$$\delta = 4,3 \sqrt{\frac{10,8}{3}} = 7,87 \text{ мм.}$$

Доверительный интервал:

$$30,83 < d < 46,57.$$

Фрагмент пробного эксперимента представлен на рис. 3.

Целью основных экспериментов являлось установление зависимости энергии единичного удара от высоты разъединения инерционной массы и ударной части. Высота разъедине-

ния устанавливалась на уровне 0,06 м; 0,18 м и 0,3 м. Число параллельных опытов равнялось трем. Результаты пробных экспериментов представлены в табл. 3.

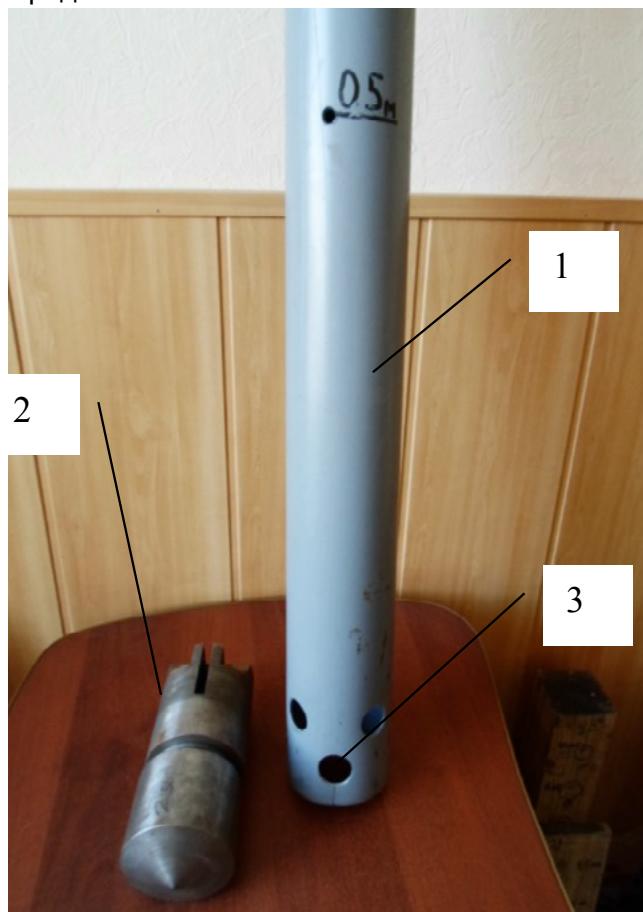


Рис. 2. Тарировочное устройство: 1 – корпус; 2 – ударная часть; 3 – продувочные отверстия
Fig. 2. Calibration device: 1 – case; 2 – percussion part; 3 – purge holes

Таблица 4. Результаты основных экспериментов
Table 4. Results of the main experiments

№	xk	y1	y2	y3	$m_k = \frac{1}{n} \sum y_i$	$S^2_k = \sum \frac{(y_i - m_k)^2}{n-1}$
1	0,06	28	30	29	29	1
2	0,16	29	31	30	30	1
3	0,3	32	31	32	31,7	0,335
Σ	-	-	-	-	-	2,335

Критерий Кохрена: $G = \frac{S_{kmax}^2}{S_{\Sigma}^2} = \frac{1}{2,335} = 0,42$



Рис. 3. Фрагмент пробного эксперимента
Fig. 3. A fragment of a trial experiment



Рис. 4. Фрагмент основного эксперимента
Fig. 4. A fragment of the main experiment

Сравнение результатов эксперимента с результатами, полученными на математической модели, показывает их удовлетворительную сходимость (рис. 7). Максимальное расхождение составляет 18%.

Таким образом, результаты экспериментов на физической модели подтвердили теоретические выкладки, полученные на математической

модели двухмассной ударной системы.

Табличное значение критерия Кохрена при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и степени свободы $f = 2$ составляет $G_{\text{табл}} = 0,87$. Условие $G < G_{\text{табл}}$ выполняется, поэтому эксперимент воспроизводим.

Фрагмент основного эксперимента представлен на табл. 4. Три верхних отпечатка – результаты тарировки, три нижних – результаты эксперимента.

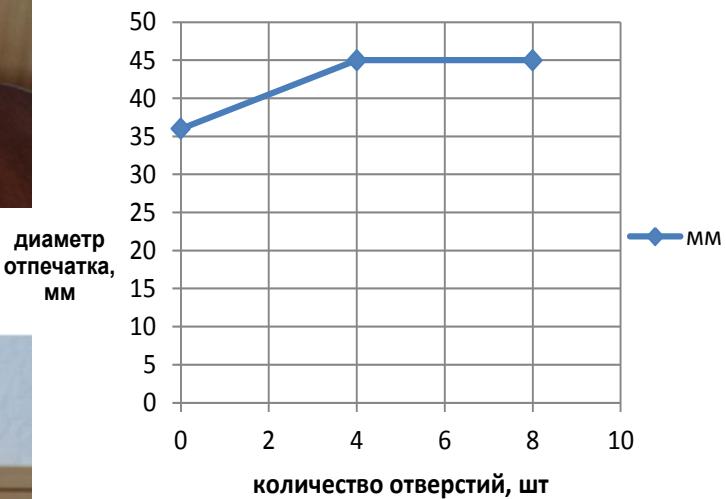


Рис. 5. Зависимость диаметра отпечатка от количества продувочных отверстий
Fig. 5. Dent diameter vs the number of purge holes

Отсюда следует заключение о том, что отношение площади поперечного сечения корпуса к суммарной площади продувочных отверстий должно быть:

$$\frac{S_{\text{кор}}}{S_{\text{отв}}} \leq 2,$$

где $S_{\text{кор}}$ – площадь поперечного сечения корпуса, м^2 ; $S_{\text{отв}}$ – суммарная площадь продувочных отверстий, м^2 .

На рис. 6 представлена зависимость диаметра отпечатка от энергии удара. Зависимость является нелинейной и наилучшим образом описывается уравнением [19, 20]:

$$d = -0,0007E^2 + 0,2917E + 15,$$

где d – диаметр отпечатка, мм ;
 E – энергия удара, Дж .

Нелинейность объясняется тем, что с увеличением энергии удара увеличиваются глубина погружения и площадь контакта ударной части с основанием.

По результатам пробных экспериментов получена зависимость диаметра отпечатка от количества продувочных отверстий (рис. 5).

Из графика следует, что четыре продувочных отверстия суммарной площадью 38,44 см² существенно снижают сопротивление воздуха и увеличивают энергию удара на 20%. Дальнейшее увеличение количества продувочных отверстий не дает положительного результата.

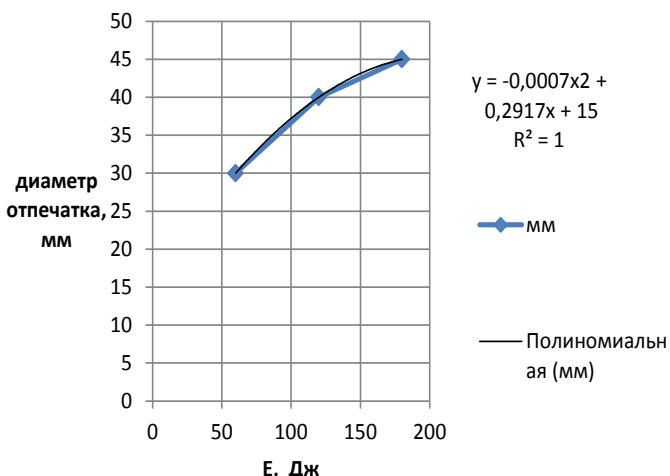


Рис. 6. Зависимость диаметра отпечатка от энергии удара
Fig. 6. Dent diameter vs impact energy

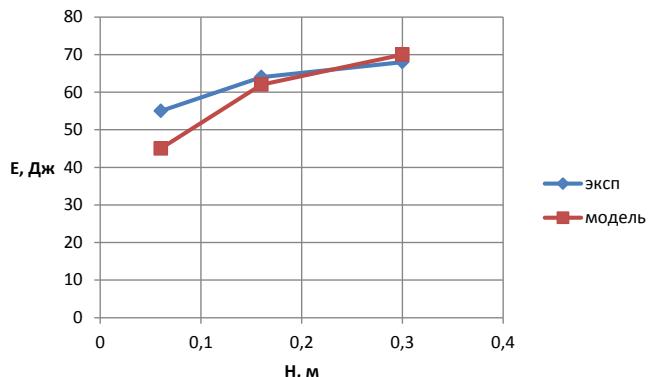


Рис. 7. Зависимость энергии удара от высоты разъединения инерционной массы и ударной части
Fig. 7. Impact energy vs the separation height of the inertial mass and the percussion part

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований:

- установлено, что суммарная площадь продувочных отверстий должна быть не менее половины поперечного сечения корпуса;
- получена зависимость диаметра отпечатка на деревянной основе от энергии удара;
- подтверждена адекватность математической модели, описывающей процессы, происходящие в ударном устройстве. Максимальное расхождение составило 18%.

Список источников

- Барон Л.И., Веселов Г.М., Коняшин Ю.Г. Экспериментальные исследования процессов разрушения горных пород ударом. М.: АН СССР, 1962. 217 с.
- Афанасьев А.И. Энергоэффективность машин ударного действия // Горное оборудование и электромеханика. 2002. № 9. С. 37–39.
- Галдин Н.С. Определение основных параметров рабочего органа ударного действия при разрушении грунта // Строительные и дорожные машины. 2006. № 6. С. 37–39.
- Чупров И.В. Взаимосвязь удельной энергии разрушения горной породы с энергией единичного удара // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2006. № 5. С. 66–69.
- Геллер Ю.А. Факторы, влияющие на процесс разрушения грунтового и горного массива // Вестник Забайкальского государственного университета. 2021. Т. 27. № 5. С. 17–25. <https://doi.org/10.21209/2227924520212751725>.
- Мельников А.В. Анализ работы молота с пружинным аккумулятором энергии при разрушении негабаритов горных пород // Горное оборудование и электромеханика. 2008. № 11. С. 43–47.
- Зедгенизов В.Г., Аль-саккаф Халед Саид Таха. Результаты исследования рабочего процесса ударника для разрушения негабаритов горных пород на математической модели // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 7. С. 18–22.
- Аль-саккаф Халед Саид Таха. Типоразмерный ряд ударников для разрушения негабаритов горных пород // Авиамашиностроение и транспорт Сибири: матер. III Всерос. науч.–практ. конф. (г. Иркутск, 11–12 апреля 2013 г.). Иркутск: ИрГТУ, 2013. С. 381–386.
- Зедгенизов В.Г., Сенотрусова Т.А. Исследование влияния основных параметров на характеристики ударной системы с повышенной энергией удара // Вестник машиностроения. 2021. № 12. С. 31–34. <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2021-12-31-34>.
- Пат. № 2762133, Российская Федерация, Е21C 37/00. Способ взвода и разгона снаряда и установка ударного действия для его реализации / В.Г. Зедгенизов, Д.В. Кокоуров, Т.А. Сенотрусова; заявитель и патентообладатель Иркутский национальный исследовательский технический университет. Заявл. 25.02.2021; опубл. 16.12.2021. Бюл. № 35.
- Zedgenizov V.G., Kokourov D.V., Senotrusova T.A. Mathematical modeling of the percussion mechanism with a single impact energy increase // Materials Science and Engineering: Iop Conference Series. 2021. P. 012042. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1061/1/012042>.
- Гухман А.А. Введение в теорию подобия. М.: Высш. шк., 1973. 296 с.

13. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1987. 423 с.
14. Сайтов В.И., Чупров В.В. Критерии подобия процесса дробления горных пород несвободным ударом // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2006. № 3. С. 351–353. EDN: HZOEXV.
15. Вишневский А.С., Балаганский И.А. Критерии подобия для ударных процессов // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 1998. № 1. С. 151–153. EDN: TOWQVH.
16. Тургунбаев М.С. Критерии подобия процесса разрушения грунта, содержащего обломочно-каменное включение // Известия ВУЗов Кыргызстана. 2016. № 11-1. С. 47–51. EDN: WWXAIT.
17. Соболева Н.С., Ефремов А.К. О подобии процессов при упругопластическом ударе // Машиностроение и компьютерные технологии. 2019. № 2. С. 1–12. EDN: BGOJKS. <https://doi.org/10.24108/0219.0001459>.
18. Усков И.Б., Глобус А.М., Онищенко В.Г. Физическое моделирование и подобие // Агрофизика от А.Ф. Иоффе до наших дней: сб. ст. СПб.: ООО «Издательство «Алфавит», 2002. С. 84–107. EDN: YSRNYY.
19. Кошкин С.В., Соколов А.Л. Обработка и анализ результатов эксперимента и проверка гипотез // Специальная техника и технологии транспорта. 2020. № 5. С. 280–285.
20. Чемодуров В.Т., Литвинова Э.В. Моделирование систем: монография. Симферополь: АРИАЛ, 2016. 236 с.

References

1. Baron L.I., Veselov G.M., Konyashin Yu.G. *Experimental studies of impact-caused rock destruction processes*. Moscow: USSR Academy of Sciences; 1962, 217 p. (In Russ.).
2. Afanasiev A.I. Energy efficiency of impact machines. *Gornoje oborudovanie i elektromekhanika*. 2002;9:37-39. (In Russ.).
3. Galdin N.S. Determining the main parameters of the working body of impact action under soil destruction. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny = Construction and road building machinery*. 2006;6:37-39. (In Russ.).
4. Chuprov I.V. Relationship between the specific energy of rock destruction and the single impact energy. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Gornyj zhurnal*. 2006;5:66-69. (In Russ.).
5. Geller Yu. Factors affecting the process of soil and rock massif destruction. *Vestnik Zabajkal'skogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of ZabGU*. 2021;27(5):17-25. (In Russ.). <https://doi.org/10.21209/2227924520212751725>.
6. Melnikov A.V. Analysis of operation of a spring energy accumulator hammer under oversized rock destruction. *Gornoje oborudovanie i elektromekhanika*. 2008;11:43-47. (In Russ.).
7. Zedgenizov V.G., Al-sakkaf Khaled Saed Taha. Results of studying striker's operation for oversize rocks destruction on a mathematical model. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2013;7:18-22. (In Russ.).
8. Al-sakkaf Khaled Saed Taha. Striker size range for oversized rock destruction. *Aviamashinostroenie i transport Sibiri: materialy III Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Aircraft engineering and transport of Siberia: materials of the 3^d All-Russian scientific and practical conference*. Irkutsk, 11–12 April 2013. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2013, p. 381-386. (In Russ.).
9. Zedgenizov V.G., Senotrusova T.A. Research of the main parameters effect on characteristics of a striker system with increased impact energy. *Vestnik mashinostroeniya = Russian Engineering Research*. 2021;12:31-34. <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2021-12-31-34>.
10. Zedgenizov V.G., Kokourov D.V., Senotrusova T.A. *The method of projectile triggering and acceleration and the percussion installation for its implementation*. Patent RF, 2762133; 2021. (In Russ.).
11. Zedgenizov V.G., Kokourov D.V., Senotrusova T.A. Mathematical modeling of the percussion mechanism with a single impact energy increase. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2021;012042. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1061/1/012042>.
12. Guzman A.A. *Introduction to the theory of similarity*. Moscow: Vysshaya shkola; 1973, 296 p. (In Russ.).
13. Sedov L.I. *Methods of similarity and dimension in mechanics*. Moscow: Nauka; 1987, 423 p. (In Russ.).
14. Saitov V.I., Chuprov V.V. Similarity criteria of the crushing rock process by non-free impact. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' = Mining informational and analytical bulletin*. 2006;3:351-353. EDN: HZOEXV
15. Vishnevskij A.S., Balaganskij I.A. Similarity criteria for shock processes. In: *Sbornik nauchnyh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Collected scientific papers of the Novosibirsk State Technical University*. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University; 1998, no. 1. p. 151-153. EDN: TOWQVH.
16. Turgunbaev M.S. Similitude parameters of process of destruction of the soil containing detrital and stone inclusion. *Izvestiya VUZov Kyrgyzstana*. 2016;11-1:47-51. (In Russ.). EDN: WWXAIT.
17. Soboleva N.S., Efremov A.K. Elastic-plastic shock processes similarity. *Mashinostroenie i kompyuternye tekhnologii*. 2019;2:1-12. EDN: BGOJKS. <https://doi.org/10.24108/0219.0001459>.
18. Uskov I.B., Globus A.M., Onishchenko V.G. Physical modeling and similarity. *Agrofizika ot A.F. Ioffe do nashih dnej: sbornik statej = Agrophysics from A.F. Ioffe to the present day: collected articles*. St Petersburg: OOO "Izdatel'stvo "Alfavit"; 2002, p. 84-107. EDN: YSRNYY.
19. Koskin S.V., Sokolov A.L. Processing and analysis of experimental results and testing of hypotheses. In: *Spesial'naya tekhnika i tekhnologii transporta = Special Equipment and Transport Technologies*. 2020;5:280-285. (In Russ.).
20. Chemodurov V.T., Litvinova E.V. *System modeling: monograph*. Simferopol: ARIAL; 2016, 236 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Зедгенизов Виктор Георгиевич,
д.т.н., профессор,
профессор кафедры строительных, дорожных машин
и гидравлических систем,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
✉ vzedgenizov@bk.ru
htths://orcid.org/0000-0001-5141-0876

Сенотрусова Татьяна Александровна,
аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
v03@istu.edu
htths://orcid.org/0000-0001-5141-0876

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 26.03.2023 г.; одобрена после рецензирования 15.05.2023 г.; принятая к публикации 08.07.2023 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Viktor G. Zedgenizov,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Road Construction
Machinery and Hydraulic Systems,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
✉ vzedgenizov@bk.ru
htths://orcid.org/0000-0001-5141-0876

Tatiana A. Senotrusova,
Postgraduate Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
v03@istu.edu
htths://orcid.org/0000-0001-5141-0876

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 26.03.2023; approved after reviewing 15.05.2023; accepted for publication 08.07.2023.



Научная статья

УДК 621.787.6:621.7(.09+.012+.015)

EDN: GJSRPH

DOI: 10.21285/1814-3520-2023-3-490-500

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Влияние режимов обработки центробежно-ударным упрочнителем на микротвердость поверхности деталей из алюминиевых сплавов

Д.Ю. Казимиров^{1✉}, А.С. Исаченко²^{1,2}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме. Цель – разработка инструмента для центробежно-ударной обработки и определение режимов обработки, увеличивающих микротвердость поверхности. Реализовано экспериментальное исследование, где в качестве технологических параметров центробежно-ударной обработки предложены натяг, количество рабочих ходов, частота вращения упрочнителя и подача. Эксперименты проводились на плоских фрезерованных образцах из алюминиевого сплава D16T. Был спроектирован и изготовлен опытный вариант ротационного упрочнителя с унификацией крепления. В ходе эксперимента выявлено, что вклад частоты вращения упрочнителя в изменение средней микротвердости выше, чем для продольной подачи. Отмечено значительное влияние натяга на поверхностную микротвердость: после обработки ротационным упрочнителем она возрастает. Показано, что данное увеличение в большей степени зависит от технологического натяга и в меньшей степени – от частоты вращения инструмента, которые рекомендуется повышать. Установлено, что увеличение натяга в 2 раза позволило добиться роста микротвердости на 70 HV 0,1 или на 42 HV 0,1 при увеличении частоты вращения инструмента на 200 об/мин. Однако при этом технологические параметры необходимо назначать с учетом работоспособности конструкции упрочнителя. Показано, что слабо влияющим фактором на повышение микротвердости является продольная подача. Таким образом, опытный образец спроектированного инструмента позволяет выполнять обработку как на станках фрезерной, расточной, так и шлифовальной групп с числовым программным управлением за счет унифицированного узла крепления. Это обеспечивает достаточную технологическую гибкость процесса и позволяет ориентировать его на упрочнение плоскостей и радиусов сопряжения. Прогнозируемое увеличение поверхностной микротвердости образца из D16T при помощи ротационного упрочнителя составляет 38,5% от исходной в исследуемой области экспериментирования при достаточной производительности.

Ключевые слова: ударное воздействие, режим упрочнения, конструкция ротационного инструмента, микротвердость поверхности, поверхностное упрочнение

Для цитирования: Казимиров Д.Ю., Исаченко А.С. Влияние режимов обработки центробежно-ударным упрочнителем на микротвёрдость поверхности деталей из алюминиевых сплавов // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 3. С. 490–500. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-490-500>. EDN: GJSRPH.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Influence of impact-centrifugal hardener on microhardness of workpiece surface made of aluminium alloys

Denis Yu. Kazimirov^{1✉}, Aleksei S. Isachenko²^{1,2}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. This article develops a tool for impact-centrifugal processing and establishes processing modes that increase the microhardness of the surface. An experimental study was carried out, where the tightening force, the number of working strokes, the rotation frequency of the hardener and the motion were proposed as technological parameters of impact-centrifugal processing. The experiments were carried out using flat machine-cut samples based on aluminium alloy D16T. A prototype of the rotary hardener with the standard fastening was designed and manufactured. During the experiment, it was revealed that, for the variation in average microhardness, the contribution of the rotation frequency is

higher than that of the longitudinal motion. A significant influence of the tension on the surface microhardness is noted: following processing with a rotary hardener, it increases. It is shown that, to a greater extent, this increase depends on the technological tightening force and to a lesser extent on the rotation speed of the tool; it is recommended to increase these parameters. It was found that a 2-fold increase in tightening force resulted in an increase in microhardness by 70 HV 0.1, while increasing the tool rotation speed by 200 rpm led to an increase in microhardness by 42 HV 0.1. However, technological parameters must be selected taking into account the operability of the hardener. It was shown that the longitudinal motion has little influence on the increase in microhardness. The prototype of the designed tool can be used for processing at milling, boring, and grinding machines with computerised numerical control through a standardised fastening unit. This ensures sufficient technological flexibility and allows it to be used for reinforcing flat surfaces and fillet radii. The forecasted increase in the surface microhardness of the D16T sample using a rotary hardener amounts to 38.5% of the initial value in the experimental area with satisfactory productivity.

Keywords: impact peening, peening mode, centrifugal impact peening tool design, surface microhardness, surface hardening

For citation: Kazimirov D.Yu., Isachenko A.S. Influence of impact-centrifugal hardener on microhardness of workpiece surface made of aluminium alloys. *iPolytech Journal*. 2023;27(3):490-500. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-490-500> EDN: GJSRPH.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение прочности деталей машиностроения до сих пор является важной задачей. Поверхностное пластическое деформирование (ППД) – один из методов воздействия на поверхность деталей машин с целью упрочнения. Его применение в технологии изготовления объясняется значительным повышением несущей способности элементов конструкции и в первую очередь повышением усталостной прочности, которое связано с наклепом поверхностного слоя. В повышении прочности деталей машиностроения важны и другие характеристики. Точность размеров и формы деталей может быть получена при этом на предварительных операциях и сохранена при выполнении заключительной стадии ППД.

Следует отметить, что на повышение прочности оказывают воздействие многочисленные факторы упрочнения, которые можно объединить в следующие классы. Это режимные параметры процесса упрочнения, важным из которых является усилие, это и исходные физико-механические свойства и их изменение в период обработки, а также кинематические условия взаимодействия контактирующих тел. Такие факторы влияют на процесс формирования качественных показателей упрочненного поверхностного слоя.

Детали из алюминиевых сплавов для авиастроения имеют в основном плоскую форму, а длину – превышающую ширину в несколько раз, поэтому методы упрочнения ППД плоских поверхностей являются преимущественными. К таким процессам относят обкатывание и его разновидность с дополнительной энергией вибрации, чеканку, обработку дробью и вибродробку, ударно-барабанную обработку, а также центробежно-ударную обработку ротационным инструментом.

Интерес к процессам, связанным с ударными методами упрочнения, в частности с чеканкой, возрос в начале 2010-х годов, что отмечено в [1]. Авторы указывают на увеличение микротвердости в поверхностном слое алюминиевого сплава типа АК12, которое может достигать 70%, и вероятную глубину упрочненного слоя для цветных материалов до 3 мм. На качество влияют не только энергетические характеристики процесса чеканки, но и траектория предшествующей обработки, а также угол соударения [2]. Согласно [3], отмечается меньшая дисперсия поверхностного упрочнения за счет более стабильной интенсивности воздействия, что связано с пульсацией постоянной силы [4] по сравнению, например, с обработкой дробью [5], где этот параметр стохастичен по природе. Авторы там же отмечают, что обработка с пульсацией силы имеет незначительное рассеяние результата микротвердости по поверхности обработки, что доказано для низкоуглеродистой стали, при этом следы предшествующей обработки могут быть недостаточно полностью деформированы. Перспективой применения процесса ударной чеканки является повышение прочности деталей из спеченных сплавов в аддитивном производстве, которое исследовано в [6] на титановых сплавах.

В противовес ударной чеканке шариковое обкатывание плоских поверхностей отличается простотой конструкции инструмента, но характеризуется низкой производительностью и недостаточно высокой степенью наклева, не превышающей 17% при глубине упрочнения 1 мм для алюминиевого сплава Д1 [7], которую можно незначительно повысить за счет дополнительных проходов [8].

Сопоставляя отмеченное ранее, дробеударные процессы обладают повышенной

дисперсией степени упрочнения из-за естественного рассеяния пучка дроби, не позволяющей добиться сплошного покрытия обработанного участка [9]. Но даже при таком недостатке наблюдается повышение эксплуатационных характеристик за счет уменьшения подповерхностных дефектов, особенно для спеченных алюминиевых сплавов [10]. Для дробеударной обработки показатели упрочнения ниже, чем для обкатывания, и не превышают 10% согласно [11] для сплава типа 1933, который подвергался обработке мелкоразмерной дробью, или 22% для технического алюминия, который обрабатывался дробью диаметром 1 мм. Возможная глубина залегания сжимающих остаточных напряжений не превышает 0,3 мм [12] при наблюдаемом на поверхности максимуме твердости [13], но глубина даже при совершенствовании метода дробеобработки достигает не более 0,4 мм [14]. Еще меньший эффект оказывают вибронаклед микрошариками [15], обеспечивающий значения упрочненного слоя не более 50 мкм, или, например, жидкостное кавитационное бездробное упрочнение, при котором глубина не превышает 20 мкм [16].

Еще в СССР велись работы по исследованию центробежно-ударной обработки [17] и отмечалось увеличение поверхностной микротвердости на 50% по сравнению с исходной. Авиационные детали, особенно места подсечек и границы ступенчатого основания, хорошо поддаются такому процессу ротационным инструментом, установленным в наклонноповоротной голове фрезерного станка с ЧПУ. Поэтому работу в этом направлении необходимо активизировать.

Цель – разработать инструмент для центробежно-ударной обработки на фрезерном станке, определить предпочтительные режимы обработки и установить величину поверхностной микротвердости при упрочнении алюминиевых деталей.

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИНСТРУМЕНТ

Центробежно-ударная обработка из-за конструктивных особенностей ротационного упрочнителя имеет наиболее вероятную, но не точную картину формирования отпечатка или очага деформации в отличие от обкатывания, которое обеспечивает след в виде параллельных канавок вдавливания или чеканки бойками, следы которой имеют вид примыкающих друг к другу лунок. Для его более широкого

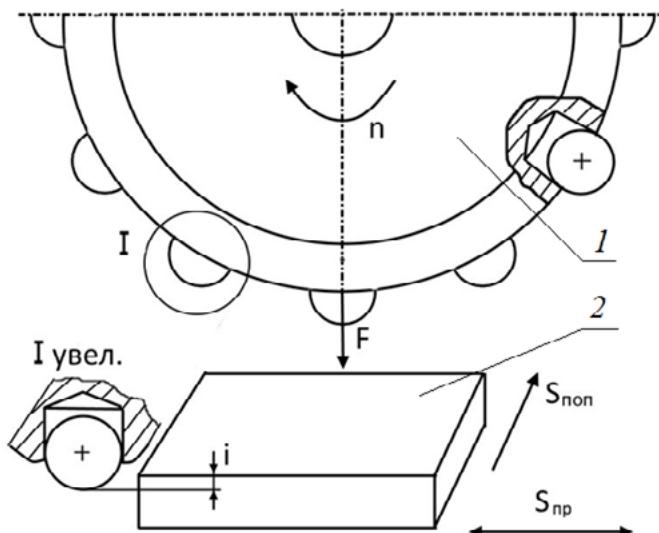


Рис. 1. Схема процесса центробежно-ударной обработки: 1 – вращающийся инструмент, 2 – деталь на столе станка

Fig. 1. Diagram of centrifugal impact peening:
1 – rotary tool, 2 – workpiece on the machine table

применения не хватает исследований технологической направленности. Поэтому авторы видят необходимость в уточнении знаний о процессе при обработке плоскостей: о влиянии подач инструмента на степень ее упрочнения и в установлении диапазона необходимых величин продольной $S_{\text{пр}}$ и поперечной подачи $S_{\text{поп}}$ (рис. 1), обеспечивающих условие роста производительности процесса центробежно-ударной обработки при повышении микротвердости поверхности.

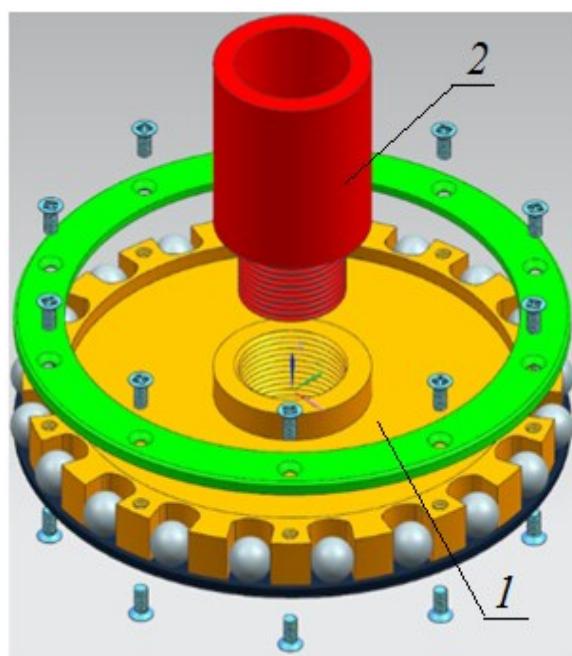


Рис. 2. Конструкция экспериментального упрочнителя: 1 – сборочная модель инструмента, 2 – съемный хвостовик

Fig. 2. Experimental peening tool design:
1 – tool assembly model, 2 – dismantlable shank

С целью выполнения указанных задач исследования был спроектирован (рис. 2) и изготовлен опытный вариант ротационного инструмента 1 диаметром $D = 205$ мм, с шариками от подшипников диаметром $d_w = 15$ мм из материала ШХ15, с твердостью HRC 58–64, с количеством ударных элементов до 20. Для расширения технологических возможностей по установке ударного инструмента на станки фрезерной и шлифовальной групп выполнена унификация крепления упрочнителя. Это реализовано сменным хвостовиком 2, закрепляемым на резьбе по M35-8H/8h, со стандартным внутренним или внешним конусом, сопрягаемым со шпинделем станка.

Одним из важнейших технологических параметров центробежно-ударной обработки является натяг, влияющий на глубину и степень упрочнения. При вращении диска шарики под действием центробежных сил должны одинаково выступать над цилиндри-

ческой поверхностью диска. Это обеспечивает равномерность и постоянство наклепанного слоя. Известны рекомендуемые значения технологического натяга в системе инструмент–поверхность детали, которые должны задаваться с точностью до $\pm 0,05$ мм. В связи с погрешностями обработки и сборки ротационного упрочнителя шарики могут иметь разброс в значении натяга. Его определяли рычажно-зубчатым индикатором ИРБ 0–0,8 с ценой деления 0,01 мм, установленным под свободно висящим шариком. Так как вес шариков примерно одинаков, а сила пружины индикатора 2 постоянна, то в ходе измерения определяли не сам натяг, а относительную погрешность для данного упрочнителя 1 (рис. 3).

Результаты измерения показали расхождение этой величины в 0,3 мм. Была произведена пригонка каждого недостаточно широкого гнезда под шарик. Работа выполнялась на станке 676П без снятия инструмента.

Важной характеристикой технологического процесса является время обработки:

$$t = \frac{l_d}{S_{\text{пр}}} \cdot k,$$

где l_d – длина детали, мм; $S_{\text{пр}}$ – продольная подача инструмента, мм/мин; k – число рабочих ходов.

Число рабочих ходов зависит от ширины пятна контакта и рассчитывается для однопроходной обработки как

$$k = b_d / S_{\text{поп}}$$

где b_d – ширина детали, мм; $S_{\text{поп}}$ – величина поперечной подачи, согласно кинематике многопроходной обработке, мм/ход, либо мм/двойной ход инструмента.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для определения желаемого значения поперечной подачи был проведен эксперимент на фрезерованном образце Д16Т размерами 50x50 мм с толщиной 20 мм, являющейся частью детали типа «плита», закрепленном в тисах высокой точности. Обработка инструментом выполнялась после фрезерования и дополнительного плоского шлифования черным карбидом кремния, при котором была достигнута неплоскость не более 0,02 мм, что позволило сократить ее влияние на изменение натяга. Для устранения погрешности закрепления образец не откреплялся,

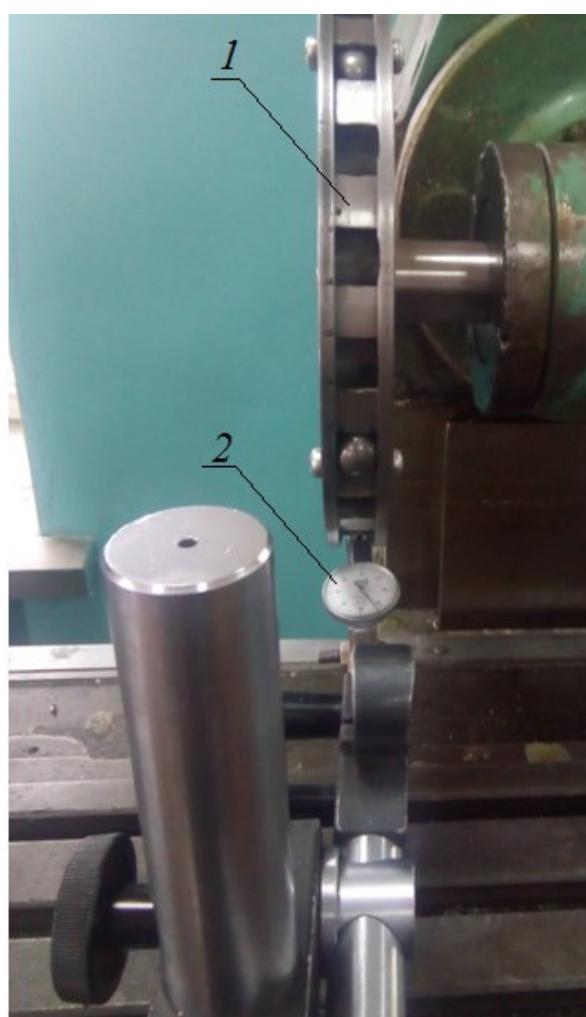


Рис. 3. Установка центробежно-ударного упрочнителя на станке: 1 – опытный инструмент, 2 – индикатор на стойке

Fig. 3. Installation of the centrifugal impact peening tool on the machine tool: 1 – pilot instrument, 2 – stand indicator

Таблица 1. Зависимость ширины следов упрочнения от режимов обработки ротационно-ударным инструментом
Table 1. Correlation between the width of peening dents and peening process modes

S_{np} , мм/мин	n , об/мин	k	Ширина дорожки упрочнения в трех точках, мм			Средняя арифметическая ширина упрочнения, мм
			1	2	3	
13	410	2	0,6	0,6	0,65	0,62
26	410	1	0,5	0,45	0,55	0,50
42	410	1	0,45	0,5	0,55	0,50
13	315	1	0,55	0,35	0,6	0,50
26	410	2	0,8	0,6	0,75	0,72
42	315	2	0,65	0,6	0,4	0,55
42	410	2	0,9	0,7	0,75	0,78
13	410	1	0,6	0,55	0,7	0,62

а перемещался с плоскошлифовального станка ЗГ71М на стол фрезерного станка вместе с тисами. Натяг i центробежно-ударной обработки был принят равным 0,25 мм. Ширина дорожки упрочнения измерялась лупой Бринелля – микроскопом измерительным МБП-2 с ценой деления 0,05 мм в трех местах. Для выявления влияния режимов обработки на ширину дорожки упрочнения в ходе эксперимента менялись частота вращения упрочнителя n , равная 315 и 410 об/мин,

и продольная подача S_{np} : 13, 26, 42 мм/мин, а также количество ходов k с разной кратностью приложения нагрузки. Количество повторений – 3. Результаты измерения сведены в табл. 1.

Для поиска следов обработки лупой Бринелля они выполнены с промежутками, превышающими ширину упрочнения. Сфотографированные следы упрочнения имеют различия в оттенках (рис. 4). Наиболее выделяются следы 2 при обработке с подачей $S_{np} = 13$ мм/мин при частоте вращения 410 об/мин

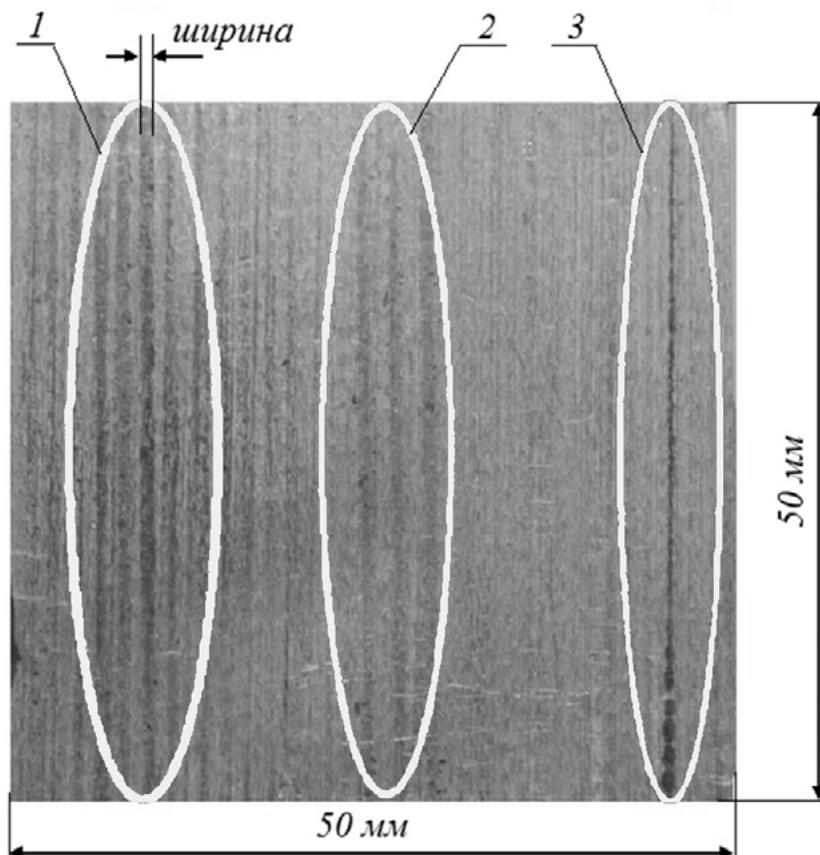


Рис. 4. Ширина следов упрочнения: 1 – $i = 0,25$ мм, $S_{np} = 26$ и 42 мм/мин, $n = 410$ об/мин, $k = 2$; 2 – $i = 0,25$ мм, $S_{np} = 13$ мм/мин, $n = 410$ об/мин, $k = 2$; 3 – $i = 0,5$ мм, $S_{np} = 42$ мм/мин, $n = 410$ об/мин, $k = 1$
Fig. 4. Peening indentation width: 1 – $i = 0.25$ mm, $S_{np} = 26$ and 42 mm/min, $n = 410$ rev/min, $k = 2$; 2 – $i = 0.25$ mm, $S_{np} = 13$ mm/min, $n = 410$ rev/min, $k = 2$; 3 – $i = 0.5$ mm, $S_{np} = 42$ mm/min, $n = 410$ rev/min, $k = 1$

за два хода. Хорошо видны на фото дорожки упрочнения 1 на режиме: $S_{\text{пп}} = 26$ и 42 мм/мин, $n = 410$ об/мин при $k = 2$. Однако увеличение числа проходов ведет лишь к плотности покрытий отпечатками (четкости следа), но не влияет на ширину обработанной поверхности. Из табл. 1 следует, что ширина дорожки упрочнения не превышает 0,7 мм. Таким образом, перемещение в направлении поперечной подачи принято 0,5 мм, позволяющее добиться равномерного покрытия поверхности следами отпечатков. Кроме того, проверено предположение, что величина натяга принципиально не влияет на ширину следа. Для чего была получена дорожка упрочнения 3 при $i = 0,5$ мм, $S_{\text{пп}} = 42$ мм/мин, $n = 410$ об/мин и $k = 1$.

Для определения влияния конструктивных особенностей инструмента и технологических параметров обработки на величину упрочнения используются современные конечно-элементные программные продукты на основе математических моделей процессов, о чем свидетельствуют работы [18, 19], которые из-за упрощения модели и пренебрежения некоторыми влияющими факторами могут приводить к расхождению расчетных и опытных значений или же к отличающимся зависимостям. В некоторых случаях результаты численного эксперимента, которые, безусловно, можно выполнить в большем

объеме, приводят к нестыковкам с общепринятыми физическими закономерностями [20]. Авторами был проведен натурный эксперимент и регрессионный анализ, что позволяет сохранить природу физических закономерностей и их математическое описание.

В качестве зависимой переменной изучалась микротвердость без изменения ее по глубине, которую определяли на ПМТ-3 четырехгранной пирамидой при нагрузке 100 г. Измерения повторяли три раза в различных зонах обработки, которые имели ширину 5 мм. В эксперименте неизменными были приняты исходная микротвердость, равная 160 HV 0,1 по ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007³ на поверхности образца из Д16Т. Для проверки влияния кратности приложения нагрузки и касательной скорости шарика продольная подача задавалась равной $S = 26$ мм/мин с поперечной подачей $S_{\text{поп}} = 0,5$ мм/ход, а также еще в двух вариантах – 42 мм/мин с поперечной подачей $S_{\text{поп}} = 0,5$ мм/ход и двойной ход, что соответствует $k = 1$ и 2. Производительность при этом менялась, что позволяло оценить наиболее предпочтительные значения подачи. Кроме того, оценивалось изменение микротвердости для разной интенсивности воздействия процесса центробежно-ударной обработки. Для этого упрочнение дополнительно велось и с величиной натяга $i = 0,5$ мм, а также при частоте

Таблица 2. Экспериментальные значения микротвердости образца из Д16Т на изучаемых режимах обработки ротационно-ударным упрочнителем

Table 2. Experimental values of D16T sample microhardness based on the researched centrifugal impact peening process modes

№ опыта	Режимы обработки				Микротвердость поверхности			Средняя арифметическая микротвердость
	$S_{\text{пп}}$, мм/мин	n , об/мин	k	i , мм	1	2	3	
1	315	26	1	0,25	169	177	173	173
2	315	42	1	0,25	159	167	162	162,7
3	315	42	2	0,25	157	163	182	167,3
4	315	42	1	0,5	240	237	327	238
5	410	26	1	0,25	198	182	181	187
6	410	42	1	0,25	179	160	173	170,7
7	410	42	2	0,25	193	184	189,5	188,8
8	410	42	1	0,5	249	244	244	245,7
9	500	26	1	0,25	209	237	223	223
10	500	42	1	0,25	201	202	182	195
11	500	42	2	0,25	198	200	234	210,7
12	500	42	1	0,5	264	256	249	256,3

³ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007. Металлы и сплавы. Измерение твердости по Виккерсу М.: Стандартинформ, 2008.

вращения упрочнителя от 315 до 500 об/мин.

Результаты измерения микротвердости на поверхности образца, ее средняя величина и значения контролируемых факторов сведены в табл. 2. Шероховатость после обработки была менее $R_a 3,2$, что не требует зачистки для некоторых поверхностей деталей.

Экспериментальные данные представлены в столбиковой диаграмме (рис. 5), из которой видно влияние каждого контролируемого фактора, установленного на изучаемых уровнях, на изменение величины микротвердости поверхности упрочненного образца из Д16Т. Глубина измененной микротвердости для натяга $i = 0,25$ мм не превышает 0,5 мм. Такой припуск удалялся с образцов после проведения серии опытов, а контроль исходной микротвердости позволял удостовериться, что среднее значение неизменно близко к 160 HV 0,1.

При задании поперечной подачи на одинарный и двойной ходы (нечетные номера опытов в табл. 2) при равной кратности приложения нагрузки с сохранением одинаковой производительности не было выявлено существенного изменения микротвердости. Все изменения находятся в пределах статистической погрешности, так как критерий Стьюдента показал значение t -критерия меньше критического, следовательно, средние значения микротвердости

не различаются. Общая средняя микротвердость H_μ для варианта задания поперечной подачи на одинарный ход (опыты 1, 5 и 9) равна 194,3 HV 0,1, а для задания поперечной подачи на двойной ход (опыты 3, 7 и 11) – 188,9 HV 0,1 при стандартной ошибке $\pm 7,5$ HV 0,1.

Однако прослеживается влияние значения продольной подачи S_{np} и частоты вращения упрочнителя n . Например, отмечен рост поверхности микротвердости в зависимости от увеличения частоты вращения инструмента. При постоянном натяге $i = 0,25$ мм повышение микротвердости наблюдалось со значения 167,7 HV 0,1 для среднего по опытам 1–3 до 209,6 HV 0,1 для среднего по опытам 9–11, что видно по рис. 5.

Это влияние было оценено регрессионным уравнением для условного математического

Таблица 3. Результаты дисперсионного анализа ANOVA различий средней микротвердости поверхности при варьировании n и S_{np}
Table 3. Analysis of variance (ANOVA) results for average surface microhardness with varied n and S_{np}

Источник вариации	f	SS	MS	F-отношение
n	2	5451,4	2725,7	30,3
S_{np}	1	1494,2	1494,2	16,6
$S_{np} \cdot n$	2	242,1	121,1	1,3

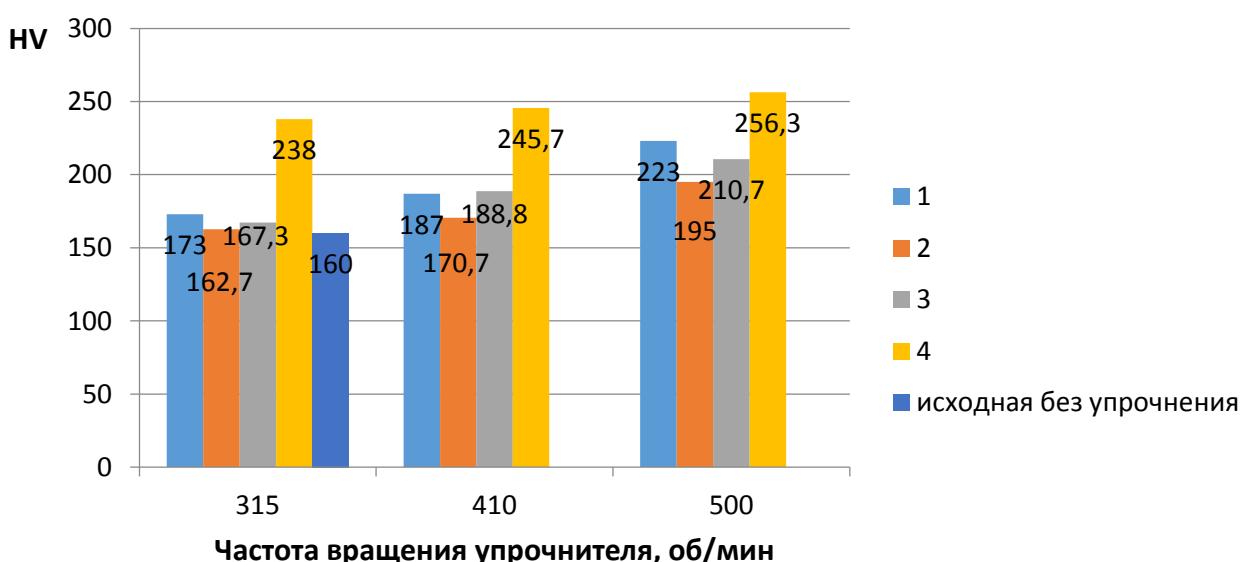


Рис. 5. Изменение поверхностной микротвердости детали из Д16Т по сравнению с исходной для различных режимов упрочнения. Режим: 1 – $S_{np} = 25$ мм/мин, $k = 1$, $i = 0,25$ мм; 2 – $S_{np} = 42$ мм/мин, $k = 1$, $i = 0,25$ мм; 3 – $S_{np} = 42$ мм/мин, $k = 2$, $i = 0,25$ мм; 4 – $S_{np} = 42$ мм/мин, $k = 1$, $i = 0,5$ мм

Fig. 5. Variation of D16T part surface microhardness as compared with original one for different peening modes. Mode: 1 – $S_{np} = 25$ mm/min, $k = 1$, $i = 0.25$ mm; 2 – $S_{np} = 42$ mm/min, $k = 1$, $i = 0.25$ mm; 3 – $S_{np} = 42$ mm/min, $k = 2$, $i = 0.25$ mm; 4 – $S_{np} = 42$ mm/min, $k = 1$, $i = 0.5$ mm

Таблица 4. Результаты дисперсионного анализа ANOVA различий средней микротвердости поверхности при варьировании n и i **Table 4.** Analysis of variance (ANOVA) results for average surface microhardness with varied n and i

Источник вариации	f	SS	MS	F-отношение
n	2	2018,8	1009,4	19,84
i	1	22401,4	22401,4	440,20
i^*n	2	191,4	95,7	1,88
Ошибка	12	610,7	50,9	—
Всего	17	25222,3	—	—

ожидания исследуемой микротвердости, имеющей линейный вид:

$$H_\mu = b_0 + b_1 n + b_2 S_{\text{пр}}.$$

Используя данные табл. 2, была построена матрица в ПО Statistica и выполнен регрессионный и дисперсионный анализ с целью поиска и оценки этой связи. Проведенный дисперсионный анализ показывает явную зависимость от двух исследуемых факторов (выделено в табл. 3) и отсутствие значимого влияния на среднюю микротвердость взаимодействия.

Отметим, что вклад частоты вращения упрочнителя n в изменение средней микротвердости выше, чем для $S_{\text{пр}}$, так как F-отношения для продольной подачи меньше, что видно в табл. 3. Это подтверждают и рассчитанные стандартизованные коэффициенты β -регрессии, при этом влияние этих факторов противоположное, что согласуется с физическими представлениями о процессе – энергия удара и, следовательно, микротвердость возрастают с увеличением частоты вращения, а кратность приложения нагрузки и, следовательно, микротвердость снижаются при увеличении подачи. Декларируемое для практических расчетов регрессионное уравнение имеет вид:

$$H_\mu = 136,7 + 0,2n - 1,2S_{\text{пр}}.$$

Кроме того, в ходе экспериментов было отмечено сильное влияние технологического натяга i в системе инструмент–деталь на поверхностную микротвердость, что видно из рис. 5, так как все значения изучаемой переменной при $i = 0,5$ мм больше для всех задаваемых в эксперименте частотах вращения. Зависимость от натяга оценена линейным регрессионным уравнением с двумя объясняющими переменными – частотой вращения n и натягом i как превалирующими по влиянию факторами. Результаты дисперсионного анализа приведены в табл. 4.

Отмечается, что влияние натяга на измен-

чивость микротвердости выше (см. табл. 4), чем влияние подачи в несколько раз. F-отношения, соответственно, равны 440,2 и 16,6 при одинаковых степенях свободы. Так, при изменении подачи $S_{\text{пр}}$ рост микротвердости в 3,5 раза ниже по сравнению с изменением натяга, так как осредненные значения микротвердости по опытам 2, 6 и 10 возросли на величину 70,5 HV для опытов 4, 8 и 12, в которых менялась величина натяга. Стандартизованные коэффициенты β для предикторов n и i равны, соответственно, 0,28 и 0,94, что предопределяет назначение натяга как первого технологического фактора из трех изучаемых. Целесообразно оценить изменение угла встречи шарика с обрабатываемой поверхностью, который является важным показателем упрочнения, на примере дробеобработки.

Уравнение регрессии, найденное для этих переменных с коэффициентом детерминации, равным 0,97, для практических задач будет иметь вид:

$$H_\mu = 51,9 + 0,13n + 280i.$$

Оба найденных уравнения регрессии значимы и адекватны, что подтверждается высокими значениями критерия Фишера.

На основе прогнозируемых величин представим зависимость поверхностью отклика в ПО Statistica. Отклик, представленный в виде поверхности предсказанной микротвердости для полученного регрессионного уравнения, показал следующее: интенсификация ударного и силового воздействия за счет увеличения n и i вызывает рост прогнозируемой величины микротвердости поверхности (рис. 6); этот рост в большей степени обусловлен изменением натяга в системе инструмент–деталь.

Прогнозируемое увеличение поверхностной микротвердости составляет 38,5% относительно исходной в исследуемой области экспериментирования. Однако следует отметить краевые дефекты в виде забоин на входе инструмента при максимальных значениях натяга и частоты вращения, которые требуют зачистки.

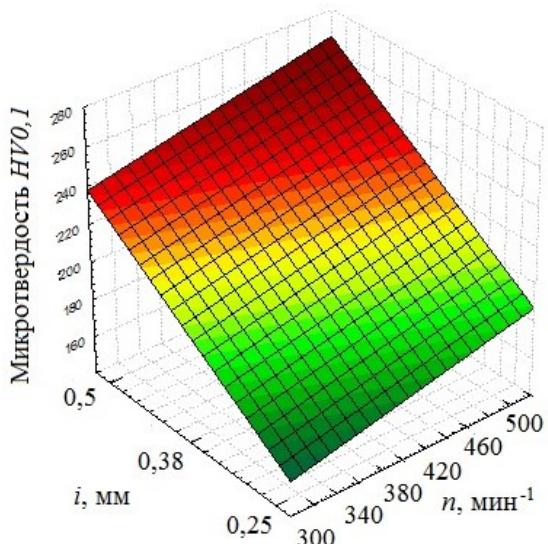


Рис. 6. Влияние частоты вращения упрочнителя n и натяга i на поверхность отклика микротвердости HV 0,1. Режим – $S_{\text{пр}} = 42 \text{ мм/мин}$, $S_{\text{шт}} = 0,5 \text{ мм/ход}$

Fig. 6. Influence of the peening tool rotation frequency n and interference i on the response surface of microhardness HV 0.1. Mode – $S_{\text{pr}} = 42 \text{ mm/min}$, $S_{\text{шт}} = 0.5 \text{ mm/singular stroke}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опытный образец спроектированного инструмента позволяет выполнять обработку как на станках с фрезерной, расточной, так и шлифовальной групп с ЧПУ за счет унифицированного узла крепления. Это обеспечивает достаточную технологическую гибкость процесса и позволяет ориентировать его как на

плоскости, так и на радиусы сопряжения. Центробежно-ударный упрочнитель с диаметром шарика 15 мм формирует следы на поверхности алюминиевой детали из Д16Т в виде отпечатков с шириной не более 0,7 мм, что определяет величину поперечной подачи равную $S_{\text{поп}} = 0,5 \text{ мм}$, которую можно выполнить на ход или на двойной ход. Поверхностная микротвердость после обработки ротационным упрочнителем возрастает. Данное увеличение в большей степени зависит от технологического натяга и в меньшей степени от частоты вращения инструмента, которые рекомендуется увеличивать. Увеличение натяга в два раза позволило добиться роста микротвердости на 70 HV 0,1 и на 42 HV 0,1 при увеличении частоты вращения инструмента на 200 об/мин. Однако их необходимо назначать с учетом работоспособности конструкции упрочнителя. Так, при частоте вращения экспериментального инструмента 500 об/мин при натяге $i = 0,5 \text{ мм}$ возникают нежелательные вибрации и разбивка гнезд под шарик. Даже изготовление их из стали 30ХГСНА с термообработкой до HRC 38 не позволяет повысить ресурс инструмента. Слабо влияющим фактором является продольная подача. Обработка с подачей 42 мм/мин при задании поперечной подачи на ход ведет к снижению величины упрочнения из-за недостаточного количества ударов на единицу площади поверхности.

Список источников

1. Chan Wai Luen, Cheng Henry Kuo Feng. Hammer Peening technology – the past, present, and future // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022. Vol. 118. P. 683–701. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07993-5>.
2. Pfeiffer S., Fiedler M., Bergelt T., Kolouch M., Putz M., Wagner M. F-X. On the correlation of hammer-peened surfaces and process, material and geometry parameters // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2019. Vol. 480. P. 012021. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/480/1/012021>.
3. Matuszak J., Zaleski K., Skoczylas A., Ciecielag K., Kecik K. Influence of semi-random and regular shot peening on selected surface layer properties of aluminum alloy // Materials. 2021. Vol. 14. Iss. 24. P. 7620. <https://doi.org/10.3390/ma14247620>.
4. Mannens R., Uhlmann L., Feuerhack A., Bergs T. Energy-dependent surface integrity of stainless steel AISI 304 after robot-based machine hammer peening // Forming the Future. The Minerals, Metals & Materials Series. 2021. P. 1863–1877. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75381-8_156.
5. Meyer D., Hettig M., Mensching N. Pulsed mechanical surface treatment - an approach to combine the advantages of shot peening, deep rolling, and machine hammer peening // Journal of Manufacturing and Materials Processing. 2021. Vol. 5. Iss. 3. P. 98. <https://doi.org/10.3390/jmmp5030098>.
6. Neto L., Williams S., Ding J., Hönnige J., Martina F. Mechanical properties enhancement of additive manufactured Ti-6Al-4V by machine hammer peening // Advanced Surface Enhancement. INCASE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering / eds. S. Itoh, S. Shukla. Singapore: Springer, 2020. P. 121–132. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0054-1_13.
7. Amdouni H., Bouzaiene H., Montagne A., Nasri M., lost A. Modeling and optimization of a ball-burnished aluminum alloy flat surface with a crossed strategy based on response surface methodology // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017. Vol. 88. P. 801–814. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8817-8>.
8. Ferencsik V., Varga G. Examination of surface state-change on diamond burnished aluminium components. In: Proceedings of the International Symposium for Production Research 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering / eds. N. Durakbasa, M. Gençyilmaz. Cham: Springer, 2020. P. 535–544. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31343-2_47.
9. Пашков А.Е., Ле Чи Винь, Нгуен Тхе Хоанг, Блудов В.В., Тюньков В.В. Экспериментальное определение зависимости степени покрытия при дробеударном формообразовании от режимов обработки // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2019. Т. 23. № 6. С. 1052–1060. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1052-1060>.

10. Denti L., Sola A. On the effectiveness of different surface finishing techniques on A357.0 parts produced by laser-based powder bed fusion: surface roughness and fatigue strength // *Metals*. 2019. Vol. 9. Iss.12. P. 1284. <https://doi.org/10.3390/met9121284>.
11. Ferreira N., Jesus J.S., Ferreira J.A.M., Capela C., Costa J.M., Batista A.C. Effect of bead characteristics on the fatigue life of shot peened Al 7475-T7351 specimens // *International Journal of Fatigue*. 2020. Vol. 134. P. 105521. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105521>.
12. Ullah H., Ullah B., Rauf A., Muhammad R. Dynamic finite element analysis of shot peening process of 2618-T61 aluminium alloy // *Scientia Iranica. Transactions B: Mechanical Engineering*. 2019. Vol. 26. Iss. 3. P. 1378–1387. <https://doi.org/10.24200/SCI.2018.5483.1302>.
13. Liu Yangfang, Cao Yang, Zhou Hao, Chen Xuefei, Liu Ying, Xiao Lirong, et al. Mechanical properties and microstructures of commercial-purity aluminum processed by rotational accelerated shot peening plus cold rolling // *Advanced Engineering Materials*. 2022. Vol. 22. Iss. 1. P. 1900478. <https://doi.org/10.1002/adem.201900478>.
14. Abeens M., Muruganandhan R., Thirumavalavan K. Comparative analysis of different surface modification processes on AA 7075 T651 // *International Conference on Materials Engineering and Characterization. Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2019. Vol. 574. P. 012018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/574/1/012018>.
15. Feldmann G., Wong Chow Cher, Wei Wang, Haubold T. Application of vibropeening on aero – engine component // *Procedia CIRP*. 2014. Vol. 13. P. 423–428. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.04.072>.
16. Soyama H., Saito K., Saka M. Improvement of fatigue strength of aluminum alloy by cavitation shotless peening // *Journal of Engineering Materials and Technology*. 2002. Vol. 124. Iss. 2. P. 135–139. <https://doi.org/10.1115/1.1447926>.
17. Шнейдер Ю.Г., Маккавеев Е.П. Образование регулярного микрорельефа способом ротационно-ударного деформирования // *Станки и инструмент*. 1981. № 7. С. 31–33.
18. Zhang Jiabin, Lu Shihong, Zhang Tao, Xu Gang, Zhou Zhen. An analytical model to study of potential effects on component elongation in shot peening // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. Vol. 97. P. 3299–3310. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2201-9>.
19. Gallitelli D., Boyer V., Gelineau M., Colaitis Y., Rouhaud E., Retraint D., et al. Simulation of shot peening: from process parameters to residual stress fields in a structure // *Comptes Rendus Mécanique*. 2016. Vol. 344. Iss. 4-5. P. 355–374. <https://doi.org/10.1016/j.crme.2016.02.006>.
20. Luk-Cyr J., El-Bawab R., Champliaud H. Lanteigne J., Vadean A. Sequential approximate optimization of industrial hammer peening using finite element simulations // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2017. Vol. 55. P. 767–778. <https://doi.org/10.1007/s00158-016-1538-7>.

References

1. Chan Wai Luen, Cheng Henry Kuo Feng. Hammer peening technology – the past, present, and future. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022;118:683-701. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07993-5>.
2. Pfeiffer S., Fiedler M., Bergelt T., Kolouch M., Putz M., Wagner M. F-X. On the correlation of hammer-peened surfaces and process, material and geometry parameters. *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2019;480:012021. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/480/1/012021>.
3. Matuszak J., Zaleski K., Skoczylas A., Ciecielag K., Kecik K. Influence of semi-random and regular shot peening on selected surface layer properties of aluminum alloy. *Materials*. 2021;14(24):7620. <https://doi.org/10.3390/ma14247620>.
4. Mannens R., Uhlmann L., Feuerhack A., Bergs T. Energy-dependent surface integrity of stainless steel AISI 304 after robot-based machine hammer peening. *Forming the Future. The Minerals, Metals & Materials Series*. 2021;1863-1877. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75381-8_156.
5. Meyer D., Hettig M., Mensching N. Pulsed mechanical surface treatment – an approach to combine the advantages of shot peening, deep rolling, and machine hammer peening. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2021;5(3):98. <https://doi.org/10.3390/jmmp5030098>.
6. Neto L., Williams S., Ding J., Hönnige J., Martina F. Mechanical properties enhancement of additive manufactured Ti-6Al-4V by machine hammer peening. In: Itoh S., Shukla S. (eds.). *Advanced Surface Enhancement. INCASE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Singapore: Springer; 2020, p. 121-132. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0054-1_13.
7. Amdouni H., Bouzaïene H., Montagne A., Nasri M., lost A. Modeling and optimization of a ball-burnished aluminum alloy flat surface with a crossed strategy based on response surface methodology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017;88:801-814. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8817-8>.
8. Ferencsik V., Varga G. Examination of surface state-change on diamond burnished aluminium components. In: Durakbasa N., Gencyilmaz M. (eds.). *Proceedings of the International Symposium for Production Research 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham: Springer; 2020, p. 535-544. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31343-2_47.
9. Pashkov A.E., Le Tri Vinh, Nguyen The Hoang, Bludov V.V., Tyunkov V.V. Experimental determination of coverage degree dependence on processing modes at shot peen forming. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(6):1052-1060. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-6-1052-1060>.
10. Denti L., Sola A. On the effectiveness of different surface finishing techniques on A357.0 parts produced by laser-based powder bed fusion: surface roughness and fatigue strength. *Metals*. 2019;9(12):1284. <https://doi.org/10.3390/met9121284>.
11. Ferreira N., Jesus J.S., Ferreira J.A.M., Capela C., Costa J.M., Batista A.C. Effect of bead characteristics on the fatigue life of shot peened Al 7475-T7351 specimens. *International Journal of Fatigue*. 2020;134:105521. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105521>.

12. Ullah H., Ullah B., Rauf A., Muhammad R. Dynamic finite element analysis of shot peening process of 2618-T61 aluminium alloy. *Scientia Iranica. Transactions B: Mechanical Engineering*. 2019;26(3):1378-1387. <https://doi.org/10.24200/SCI.2018.5483.1302>.
13. Liu Yangfang, Cao Yang, Zhou Hao, Chen Xuefei, Liu Ying, Xiao Lirong, et al. Mechanical properties and microstructures of commercial-purity aluminum processed by rotational accelerated shot peening plus cold rolling. *Advanced Engineering Materials*. 2022;22(1):1900478. <https://doi.org/10.1002/adem.201900478>.
14. Abeens M., Muruganandhan R., Thirumavalavan K. Comparative analysis of different surface modification processes on AA 7075 T651. In: *International Conference on Materials Engineering and Characterization. Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2019;574:012018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/574/1/012018>.
15. Feldmann G., Wong Chow Cher, Wei Wang, Haubold T. Application of vibropeening on aero – engine component. *Procedia CIRP*. 2014;13:423-428. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.04.072>.
16. Soyama H., Saito K., Saka M. Improvement of fatigue strength of aluminum alloy by cavitation shotless peening. *Journal of Engineering Materials and Technology*. 2002;124(2):135-139. <https://doi.org/10.1115/1.1447926>.
17. Shneider Yu.G., Makkaveev E.P. Forming regular microrelief by the method of centrifugal impact peening. *Stanki i instrument*. 1981;7:31-33. (In Russ.).
18. Zhang Jibin, Lu Shihong, Zhang Tao, Xu Gang, Zhou Zhen. An analytical model to study of potential effects on component elongation in shot peening. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018;97:3299-3310. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2201-9>.
19. Gallitelli D., Boyer V., Gelineau M., Colaitis Y., Rouhaud E., Retraint D., et al. Simulation of shot peening: from process parameters to residual stress fields in a structure. *Comptes Rendus Mécanique*. 2016;344(4-5):355-374. <https://doi.org/10.1016/j.crme.2016.02.006>.
20. Luk-Cyr J., El-Bawab R., Champliaud H. Lanteigne J., Vadear A. Sequential approximate optimization of industrial hammer peening using finite element simulations. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2017;55:767-778. <https://doi.org/10.1007/s00158-016-1538-7>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Казимиров Денис Юрьевич,
к.т.н., доцент,
доцент кафедры технологии и оборудования
машиностроительных производств,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
✉ kazimirdenn@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-6438-1525>

Исаченко Алексей Сергеевич,
к.т.н.,
доцент кафедры технологии
и оборудования машиностроительных производств,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
✉ isachenkoas@ex.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0001-9522-3714>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Denis Yu. Kazimirov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Technology
and Equipment for Machine-Building Production,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
✉ kazimirdenn@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-6438-1525>

Aleksei S. Isachenko,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Technology
and Equipment for Machine-Building Production,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
✉ isachenkoas@ex.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0001-9522-3714>

Вклад авторов

Вклад каждого автора в подготовку публикации равнозначный.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный
вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 24.06.2023 г.; одобрена
после рецензирования 01.09.2023 г.; принята к публикации
04.12.2023 г.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 24.06.2023; approved
after reviewing 01.09.2023; accepted for publication
04.12.2023.

Научная статья
УДК 539.389:621.9.011

EDN: TRSQYG

DOI: 10.21285/1814-3520-2022-3-501-510

МАШИНОСТРОЕНИЕ



Методика обработки экспериментальных данных при исследовании остаточных напряжений сверлением зондирующих отверстий с использованием метода цифровой корреляции изображений

М.С. Махалов^{1✉}, А.А. Кречетов², В.Ю. Блюменштейн³, В.В. Горбатенко⁴

¹⁻³Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Россия

⁴Институт физики прочности металлов СО РАН, г. Томск, Россия

Резюме. Цель – получение экспериментальных данных и оценка возможности достоверного определения значений остаточных напряжений поверхностного слоя металла сверлением зондирующих отверстий и методом цифровой корреляции изображений. Экспериментальные образцы изготавливались и впоследствии обрабатывались свободным ортогональным резанием и поверхностным пластическим деформированием по схеме качения на специальном станке с числовым программным управлением. Далее с использованием того же станка выполнялось сверление зондирующих отверстий с видеосъемкой изображения поверхности до и после сверления. По изменению спеклов изображений методом цифровой корреляции изображений определялись смещения материальных частиц на поверхности образца, после чего дифференцированием полученных значений перемещений определяли значения радиальных деформаций. Статистический анализ выборки значений радиальных деформаций на одинаковом расстоянии от центра отверстия при изменении угла поворота путем разложения в ряды Фурье с вычислением периода распределения показал, что распределение является периодическим. Установлено, что периодограммы, построенные по экспериментальным данным, имеют локальные максимумы при значении периода, близком к 180 градусам. Это обстоятельство обуславливает неизменность вычисляемых значений главных компонент остаточных напряжений и угла их поворота при выборе для расчета значений радиальных деформаций в произвольных точках вокруг отверстия. В работе изложен подход, позволяющий определить остаточные напряжения путем сверления зондирующих отверстий и оценки перемещений материальных частиц на поверхности образца, обусловленных перераспределением остаточных напряжений. Для аналитического описания экспериментальных данных предложено использовать аппроксимирующую периодическую функцию, установлен физический смысл ее коэффициентов.

Ключевые слова: остаточные напряжения, механическое состояние металла, поверхностный слой, сверление зондирующих отверстий, метод цифровой корреляции изображений

Финансирование: Исследование выполнено при поддержке Российского Фонда Фундаментальных исследований, грант № 20-08-00587.

Для цитирования: Махалов М.С., Кречетов А.А., Блюменштейн В.Ю., Горбатенко В.В. Методика обработки экспериментальных данных при исследовании остаточных напряжений сверлением зондирующих отверстий с использованием метода цифровой корреляции изображений // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 3. С. 501–510. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-501-510>. EDN: TRSQYG.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Method for processing experimental data when investigating residual stresses by drilling probe holes and digital image correlation

Maksim S. Makhalov^{1✉}, Andrey A. Krechetov², Valeriy Yu. Blumenstein³,
Vadim V. Gorbatenko⁴

¹⁻³T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia

⁴Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Tomsk, Russia

Abstract. In this work, the possibility of reliable determination of the residual stresses on the surface layer of metal by using drilling probing holes and digital image correlation is investigated. Manufactured experimental samples were

subsequently processed by free orthogonal cutting and rolling contact deformation using a special machine with numerical control. Further, using the same machine, drilling of probing holes was performed with video recording of the surface image prior to and following drilling. By varying the speckle images, the displacements of material particles on the sample surface were determined by the digital image correlation method, following which the radial deformations were determined by differentiating the obtained displacement values. Statistical analysis of a sample of radial deformations equidistant from the centre of the hole while varying the rotation angle by Fourier transformation with the calculation of the distribution period showed that the distribution is periodic. It is established that the periodograms constructed using experimental data have local maxima at a period value close to 180 degrees. This determines that the main calculated components of the residual stresses and the angle of their rotation be constant when selected to calculate the values of radial deformations at arbitrary points around the hole. The paper presents an approach that allows residual stresses to be determined by drilling probing holes and assessing the displacement of material particles on the sample surface due to the redistribution of residual stresses. For the analytical description of experimental data, it is proposed that an approximating periodic function be used, and the physical meaning of its coefficients is determined.

Keywords: residual stresses; metal mechanical condition; surface layer; probing hole drilling; digital image correlation

Funding: The research was supported by the Russian Foundation for Basic Research, grant no. 20-08-00587.

For citation: Makhalov M.S., Krechetov A.A., Blumenstein V.Yu., Gorbatenko V.V. Method for processing experimental data when investigating residual stresses by drilling probe holes and digital image correlation. *iPolytech Journal*. 2023;27(3):501-510. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-501-510>. EDN: TRSQYG.

ВВЕДЕНИЕ

Остаточные напряжения первого рода (ОН) существенно влияют на долговечность изделия. Несмотря на высокую эффективность современных методов моделирования, сохраняется необходимость экспериментального измерения остаточных напряжений (деформаций) [1–13]. Однако большинство механических методов определения ОН являются разрушающими и имеют высокую погрешность (до 40–50%). Несмотря на это, они получили широкое распространение главным образом потому, что основаны на тех же представлениях о напряжениях и деформациях механики твердого тела, что и при расчетах прочности, жесткости и устойчивости деталей машин.

Точность механических методов зависит от погрешности, появляющейся на этапе механического удаления металла (деформационные и температурные воздействия), и от погрешности измерения возникающих деформаций (перемещений). Целью использования комбинации методов сверления зондирующих отверстий и цифровой корреляции изображений [14–16] является значительное снижение погрешности обеих составляющих.

Метод сверления зондирующих отверстий позволяет оценивать остаточные напряжения по перемещениям материальных частиц поверхности образца после выполнения сверления. Эти перемещения, их величина и направление являются результатом перераспределения ОН, которые из-за удаления

металла выходят из состояния равновесия. Сверление зондирующих отверстий происходит с высокой скоростью, что обуславливает относительно небольшой уровень погрешностей в механическом состоянии образца.

Перемещение материальных частиц поверхности при зондирующем сверлении определяется с использованием спекл-структур, созданной на поверхности образца когерентным лазерным освещением. Спеклы – это яркие пятна на поверхности образца, разделенные темными промежутками, которые появляются при освещении поверхности когерентным источником лазерного излучения вследствие интерференции рассеянного какой-либо точкой поверхности когерентного света со светом, рассеянным другими точками.

Распределение спеклов по изображению поверхности объекта определяется микрорельефом поверхности, меняясь от точки к точке. При перемещениях материальных частиц поверхности распределение спеклов изменяется. Величина и направление перемещения материальных частиц поверхности определяются с использованием метода корреляции цифровых изображений (Digital Image Correlation – DIC).

Суть метода заключается в оценке сдвигов в наборах данных, в качестве которых используются два изображения – в данном случае до процесса сверления и после. Оценка сдвига (то есть направление и величина переме-

щения) осуществляется путем определения максимума кросскорреляционной функции между двумя наборами данных.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Получение экспериментальных данных для оценки возможности достоверного определения значений остаточных напряжений сверлением зондирующих отверстий и методом цифровой корреляции изображений.

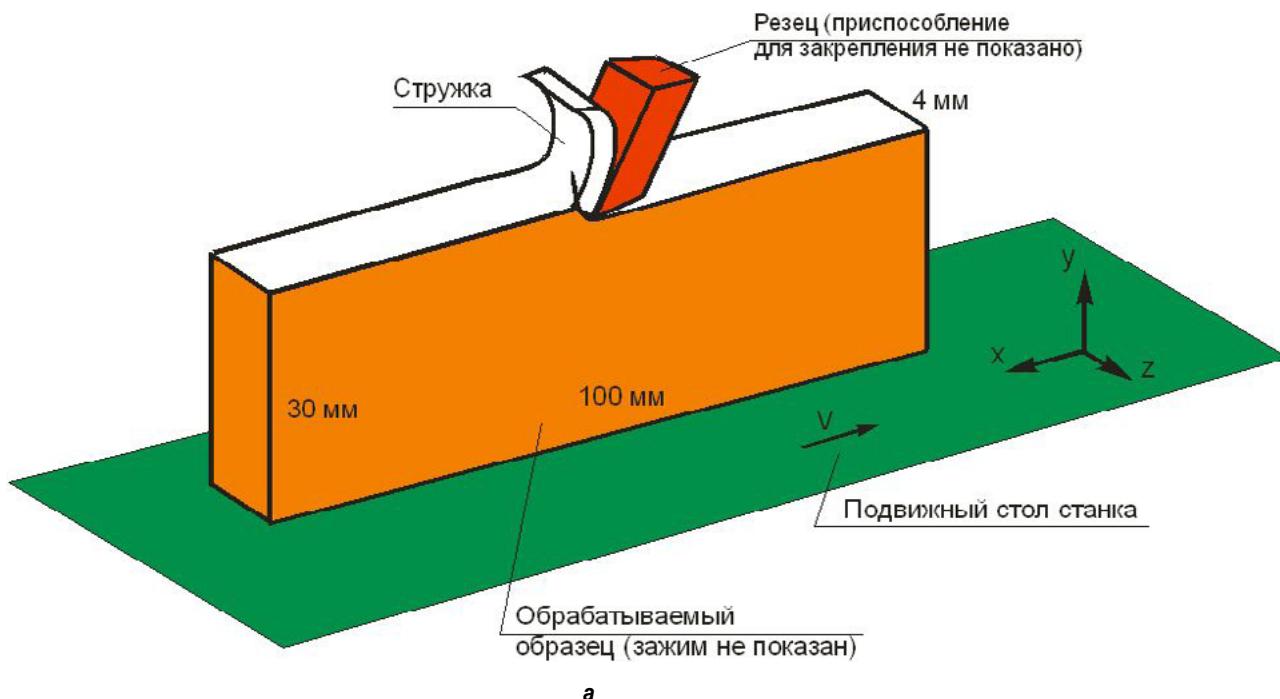
МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования остаточных напряжений осуществлялась предварительная обработка рабочих поверхностей экспериментальных образцов (верхняя грань образца) двумя видами нагружения: свободным ортогональным резанием (рис. 1 а) и свободным ортогональным поверхностным пластическим деформированием (ППД) по схеме качения (рис. 1 б). Экспериментальные образцы были выполнены из конструкционной стали в форме пластины размером 100x30x4 мм [17].

Представленная методика определения ОН основана на работах И.А. Биргера [18]. Значительно позже ряд отечественных и зарубежных авторов развили эти идеи, адаптировали методы пересчета значений перемещений/деформаций к различным мето-

дам измерения и условиям эксперимента [19–21]. Были разработаны рекомендации по выбору диаметра и глубины зондирующего отверстия, а также других параметров режима сверления.

Для оценки остаточных напряжений экспериментальный образец неподвижно закреплялся на подвижном столе станка (рис. 2). Ось сверла, закрепленного в станке, совмещалась с осью симметрии образца в плоскости XY (рис. 3), при этом поверхность размером 100x4 мм устанавливалась перпендикулярно оси сверла [22]. Система регистрации, состоящая из цифровой видеокамеры и полупроводникового лазера, устанавливалась над подвижным столом, закреплялась отдельно. Цифровая камера была направлена вертикально вниз, перпендикулярно к обрабатываемой поверхности образца размером 100x4 мм (рис. 2). Для регистрации изображения использовали монохромную цифровую видеокамеру FL3GE50S5MC фирмы «PointGray» с объективом Kowa LM50JC10M. В качестве осветителя использовали полупроводниковый лазерный модуль мощностью 5 мВт, длиной волны 650 нм. Данный модуль имеет встроенный регулируемый расширитель пучка, что позволяет установить необходимый уровень освещенности изменением размера светового пятна.



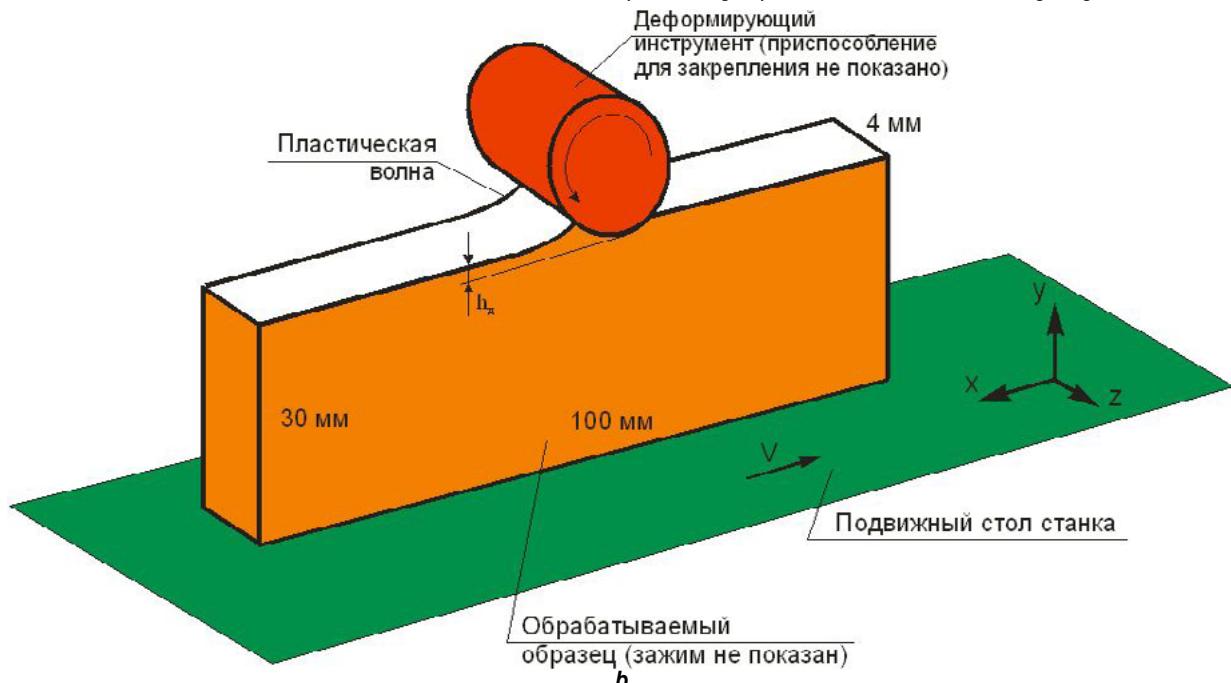


Рис. 1. Схемы нагружения экспериментальных образцов: а – свободное ортогональное резание;

б – свободное ортогональное поверхностное пластическое деформирование

Fig. 1. Experimental samples loading schemes: a – free orthogonal cutting;

b – free orthogonal surface plastic deformation

Первоначально осуществлялась съемка области образца, в которой впоследствии выполнялось сверление зондирующего отверстия. Для улучшения качества результатов записывалось значительное (1000...2000) количество кадров. Затем подвижный стол станка с образцом сдвигался на заданное расстояние (m , рис. 2) и в области образца, подвергну-

той первоначальной записи, высверливалось отверстие на заданную глубину.

После отвода сверла подвижный стол с образцом возвращался в исходное положение, микростружка удалялась пылесосом, и возобновлялась запись той же зоны образца с полученным отверстием.

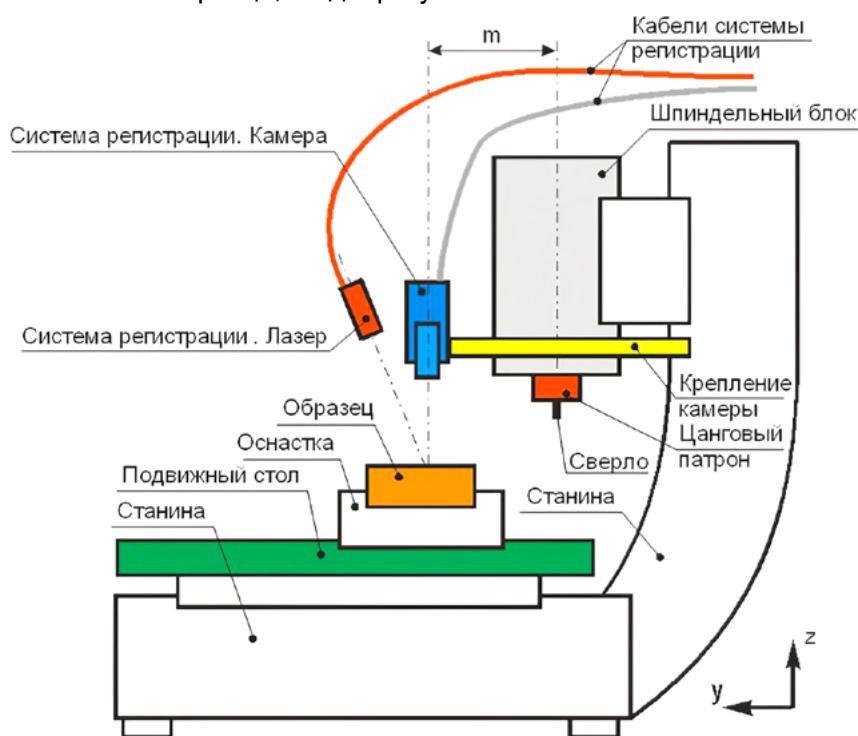


Рис. 2. Экспериментальная установка для определения остаточных напряжений сверлением зондирующих отверстий и цифровой корреляцией изображений

Fig. 2. The experimental assembly for residual stresses determination by probing hole drilling and digital image correlation

По полученным изображениям до и после сверления определялись векторы перемещения материальных частиц вдоль осей X и Y.

В соответствии с рекомендациями, приведенными в [18–20], было принято, что зона определения деформаций и напряжений находится на расстоянии 0,1...0,5 мм от края отверстия (радиус расположения точек от центра отверстия $r = 1\ldots1,4$ мм). Такие значения выбирались, с одной стороны, для исключения влияния краевых эффектов вблизи кромки отверстия, а с другой – с учетом интенсивного уменьшения деформаций по мере их удаления от кромки.

$$\varepsilon_r = -\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2E} (1 + \mu) \frac{R^2}{r^2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2E} \left[(1 + \mu) \frac{3R^4}{r^4} - \frac{4R^2}{r^2} \right] \cos 2\theta , \quad (1)$$

Обработка результатов для каждого отверстия выполнялась в 4 этапа:

1. Из дальнейшего расчета исключались значения векторов смещения в точках, принадлежащих отверстию.

2. Для значений векторов смещения в остальных точках внутри зоны определения деформаций ($r = 1\ldots1,4$ мм) осуществлялась фильтрация случайных и систематических ошибок. Основная идея алгоритма фильтрации основана на тезисе о том, что отношения значений векторов в различных опорных точках не должны изменяться от кадра к кадру. Те значения векторов, для которых это условие не выполняется, считаются случайной ошибкой, вызванной несовершенством системы позиционирования станка, внешними воздействиями, ударами при сверлении и т.д. Следовательно, они исключаются из дальнейшего анализа.

3. Усреднение полученных значений в рамках записанного количества кадров.

4. Расчет радиальных деформаций в точках вокруг отверстия происходил путем дифференцирования значений перемещений материальных частиц. На этом этапе требовалось задать начальное и конечное значения радиуса, а также шаг изменения радиуса и угол для определения координат точек, в которых рассчитывается радиальная деформация в полярных координатах.

После вычисления программа экспортирует данные в файл текстового формата, содержащий следующие массивы:

1. Полярные координаты точки: радиус r (мм) относительно центра отверстия и угол поворота α (град) относительно оси X.

2. Величина радиальной деформации в точке ε_r .

3. Декартовы координаты точки X, Y (мм).

Для определения остаточных напряжений, существовавших в заготовке до сверления отверстия, за основу был принят метод отверстий для пластин, находящихся в двухосном напряженном состоянии [18].

Радиальная деформация, компоненты главных напряжений σ_1 , σ_2 и угол их поворота θ относительно выбранной системы координат связаны соотношением: где E – модуль Юнга, μ – коэффициент Пуассона, R – радиус отверстия, r – радиус

расположения точки (расстояние от центра отверстия до рассматриваемой точки).

Определив значения радиальной деформации в трех различных точках с помощью выражения (1), можно получить систему из трех уравнений, решение которой даст искомые значения остаточных напряжений и угла поворота относительно выбранной системы координат.

Следует отметить, что в связи с неизменностью остаточных напряжений в образце в зависимости от выбранных точек, в которых известна радиальная деформация, результаты расчета остаточных напряжений должны быть постоянными вне зависимости от выбранных значений радиальной деформации.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ выражения (1) показывает, что условие неизменности расчетных значений остаточных напряжений и угла поворота относительно выбранной системы координат при выборе различных точек радиальной деформации выполняется только тогда, когда распределение радиальных деформаций в точках с полярными координатами одного радиуса при изменении угла поворота относительно центра координатной системы является периодической функцией с периодом 180° . Максимальные и минимальные значения деформации определяют величину главных ОН и их знак. Если угол поворота относительно выбранной системы координат θ отличается от нуля, значения функции сдвигаются вдоль оси абсцисс на соответствующие значения.

Для определения значений главных компонент σ_1 , σ_2 и угла θ был проведен дальнейший анализ экспериментальных данных путем разложения полученных статистических выборок в ряды Фурье с вычислением периода распределения.

Установлено, что периодограммы, построенные по экспериментальным данным, имеют локальный максимум при близком к 180° значении периода.

основные остаточные напряжения и их угол поворота, которые для отверстия глубиной 0,5 мм в образце 1A составляли $\sigma_1 = 600$ МПа, $\sigma_2 = -80$ МПа и $\theta = 0$ градусов, соответственно.

Для аналитического описания аппроксимирующей периодической функции предлагается использовать следующее выражение (рис. 4):

$$\varepsilon_r = \cos\left(2 \cdot (\alpha - b) \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot c + d \quad (2)$$

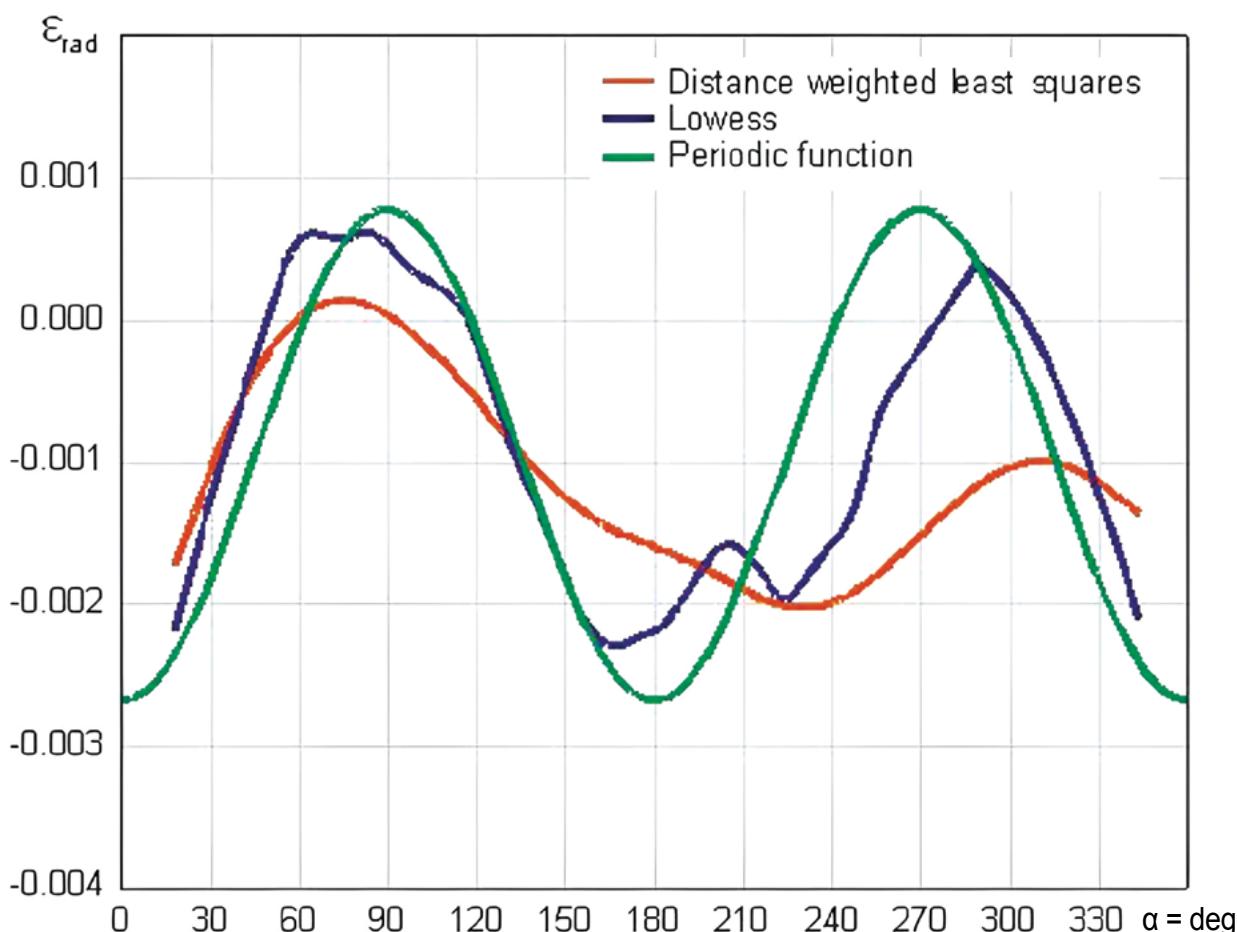


Рис. 3. Аппроксимации значений радиальных деформаций вокруг отверстия
(образец 0102-1A, отверстие глубиной 0,5 мм)

Fig. 3. Radial strains approximations around the hole (sample 0102-1A, 0.5 mm depth hole)

В процессе дальнейшего анализа значения радиальных деформаций были усреднены в диапазоне значений радиуса $r = 1...1,4$ мм, и на основе полученных данных были построены три различные аппроксимирующие функции (рис. 3): кривая с использованием метода наименьших квадратов (distance weighted least squares – показана красным цветом), локально взвешенная регрессия (lowess – синим), периодическая функция с периодом 180° (periodic function – зеленым).

Как видно из рис. 3, периодическая функция надежно описывает экспериментально полученные данные и позволяет рассчитать

где ε_r – радиальная деформация; α – угол точки относительно выбранной оси абсцисс (угол полярной системы координат); b , c , d – аппроксимирующие коэффициенты.

Поскольку периодическая функция с периодом 180° представляет собой косинус двойного угла, значение угла в выражении (2) умножается на два.

Рассмотрим значения коэффициентов b , c и d (рис. 4).

Коэффициент b описывает смещение функции вдоль оси абсцисс на соответствующий угол. Так, например, если $b = 10^\circ$, то функция принимает экстремальное значение при $\alpha = 10^\circ$.

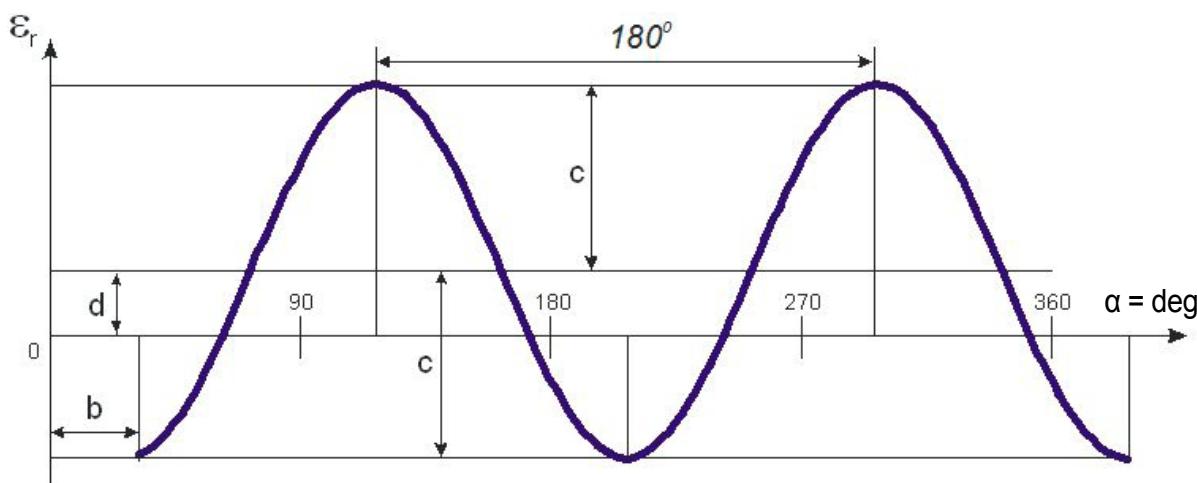


Рис. 4. К аналитическому описанию аппроксимирующей периодической функции
Fig. 4. To approximating periodic function analytical description

Тогда значение коэффициента b можно считать равным значению угла θ .

Коэффициент c описывает амплитуду радиальных деформаций, которая, соответственно, равна $2c$. Знак коэффициента определяет значение (минимальное или максимальное), которое принимает функция в своем первом экстремуме: поскольку $\cos(2.0^\circ) = 1$, $\cos(2.90^\circ) = -1$, отрицательное значение коэффициента c указывает на минимальное значение функции в первом экстремуме, а положительное значение указывает на функцию максимум.

Коэффициент d описывает смещение функции вдоль оси ординат. Если $d = 0$, то функция симметрична относительно оси абсцисс.

Основываясь на предложенном аналитическом описании аппроксимирующей функции, радиальная деформация в экстремумах:

- в первом: $\varepsilon_r^{1ex} = c + d$;
- во втором: $\varepsilon_r^{2ex} = -c + d$.

Полученный результат справедлив для случая сверления сквозных отверстий в тонкой пластине. Дальнейшая задача состоит в экстраполяции этого алгоритма на несквозные отверстия различной глубины в сплошной заготовке, что позволит получить распределение компонентов по глубине.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Представлена методика обработки экспериментальных данных при оценке остаточных

напряжений путем сверления зондирующими отверстиями и цифровой корреляции изображений, позволяющая оценить распределение тангенциальной и нормальных составляющих в плоскости поверхности образца.

2. Сверление зондирующих отверстий осуществляется на специальном станке с ЧПУ, обеспечивающим высокую точность перемещений для четкого позиционирования образца при съемке его поверхности до и после сверления.

3. Разработаны средства автоматизации обработки результатов, позволяющие осуществлять первичную фильтрацию и обработку экспериментальных результатов, расчет радиальных деформаций.

4. Разработана методика обработки экспериментальных результатов, основанная на разложении полученных данных для точек (равноудаленных от центра отверстия) в ряды Фурье. Показано, что для такого разложения периодограмма имеет локальный максимум для периода 180° . Данный период соответствует теоретическому распределению, обеспечивающему неизменность получаемых значений остаточных напряжений при выборе для их расчета произвольных точек вокруг отверстия.

5. Предложено аналитическое описание аппроксимирующей экспериментальные результаты периодической функции, установлен физический смысл ее коэффициентов.

Список источников

1. Gopinath A., Lim A., Nagarajan B., Wong Chow Cher, Maiti R., Castagne S. Introduction of enhanced compressive residual stress profiles in aerospace components using combined mechanical surface treatments // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2016. Vol. 157. Iss. 1. P. 012013. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/157/1/012013>.
2. Sadashivam B., Hizal A., Arola D. Abrasive waterjet peening with elastic prestress: subsurface residual stress distribution // International Mechanical Engineering Congress and Exposition (Seattle, Washington, 11–15 November 2007). Seattle, Washington: IMECE, 2007. P. 471–475. <https://doi.org/10.1115/IMECE2007-43473>.

3. Saini S., Ahuja I.S., Sharma V.S. Modeling the effects of cutting parameters on residual stresses in hard turning of AISI H11 tool steel // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. Vol. 65. Iss. 5-8. P. 667–678. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4206-0>.
4. Yonezu A., Kusano R., Hiyoshi T., Chen Xi. A Method to estimate residual stress in austenitic stainless steel using a micro-indentation test // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2015. Vol. 24. Iss. 1. P. 362–372. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-1280-5>.
5. Qin W.J., Dong C., Li X. Assessment of Bending Fatigue Strength of Crankshaft Sections with Consideration of Quenching Residual Stress // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2016. Vol. 25. Iss. 3. P. 938–947. <https://doi.org/10.1007/s11665-016-1890-1>.
6. Ma Yuan, Feng Pingfa, Zhang Jianfu, Wu Zhijun, Yu Dingwen Energy criteria for machining-induced residual stresses in face milling and their relation with cutting power // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015. Vol. 81. P. 1023–1032. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7278-9>.
7. Huang Xiaoming, Sun Jie, Li Jianfeng. Finite element simulation and experimental investigation on the residual stress-related monolithic component deformation // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015. Vol. 77. P. 1035–1041. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6533-9>.
8. Su Jiann-Cherng, Young A. Keith, Ma Kong, Srivatsa Shesh, Morehouse B.J., Liang Y. Steven. Modeling of residual stresses in milling // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. Vol. 65. P. 717–733. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4211-3>.
9. Ji Xia, Zhang Xueping, Liang Y. Steven. Predictive modeling of residual stress in minimum quantity lubrication machining // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014. Vol. 70. P. 2159–2168. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5439-2>.
10. Martell J.J., Liu C.R., Shi Jing. Experimental investigation on variation of machined residual stresses by turning and grinding of hardened AISI 1053 steel // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014. Vol. 74. Iss. 9-12. P. 1381–1392. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6089-8>.
11. Chen Jianbin, Fang Qihong, Zhang Liangchi. Investigate on distribution and scatter of surface residual stress in ultra-high speed grinding // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014. Vol. 75. P. 615–627. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6128-5>.
12. Lohe D., Lang K.-H., Vohringer O. Residual stresses and fatigue behavior // *Handbook of residual stress and deformation of steel*. Materials Park: ASM International, 2002, P. 27–54.
13. Chenevry K., Bouscaud D., Girinon M., Karaouni H., Bergheau J.-M., Feulvach E. Study of the thermal history upon residual stresses during the dry drilling of inconel 718 // *Metals*. 2022. Vol. 12. Iss. 2. P. 305. <https://doi.org/10.3390/met12020305>.
14. Zuev L.B., Barannikova S.A., Lunev A.G., Kolosov S.V., Zharmukhabetova A.M. Basic relationships of the autowave model of a plastic flow // *Russian Physics Journal*. 2019. Vol. 61. P. 1709–1717. <https://doi.org/10.1007/s11182-018-1591-3>.
15. Barannikova S., Li Yu., Zuev L. Research of the plastic deformation localization of bimetal // *Metalurgija*. 2018. Vol. 57. Iss. 4. P. 275–278.
16. Zuev L.B., Barannikova S.A., Orlova D.V. Autowave criteria of fracture and plastic strain localization of zirconium alloys // *Metals*. 2022. Vol. 12. P. 95. <https://doi.org/10.3390/met12010095>.
17. Блюменштейн В.Ю., Жирков А.А., Учайкин С.Е., Кречетов А.А., Махалов М.С. Разработка методик и средств технологического оснащения для исследования пластического течения металла в процессах обработки. Часть 1. Проектирование и изготовление специального настольно-фрезерного станка с ЧПУ для исследования пластического течения мета // Упрочняющие технологии и покрытия. 2022. Т. 18. № 7. С. 311–319. <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2022-18-7-311-319>.
18. Биргер И.А. Остаточные напряжения. Изд. 2-е. М.: ЛЕНАНД, 2015. 234 с.
19. Чернышев Г.Н., Попов А.Л., Козинцев В.М., Пономарев И.И. Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах. М.: Наука; Физматлит, 1996. 240 с.
20. Rickert T. Residual Stress Measurement by ESPI Hole-Drilling // *Procedia CIRP*. 2016. Vol. 45. P. 203–206. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.256>.
21. Usov S.M., Razumovsky I.A., Odintsev I.A. Study of inhomogeneous fields of residual stresses using step-by-step enlarged crack method in combination with electronic speckle pattern interferometry // *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 2021. Vol. 87. Iss. 9. P. 50–58. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2021-87-9-50-58>.
22. Махалов М.С. Методика исследований остаточных напряжений методами сверления зондирующего отверстия и 2-х экспозиционной спектрографии // Инновации в машиностроении: Сб. тр. XII Междунар. науч.-практ. конф., посвященной памяти д-ра техн. наук, профессора Рахимянова Хариса Магсумановича (г. Новосибирск, 7–9 октября 2021 г). Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2021. С. С. 405–411.

References

1. Gopinath A., Lim A., Nagarajan B., Wong Chow Cher, Maiti R., Castagne S. Introduction of enhanced compressive residual stress profiles in aerospace components using combined mechanical surface treatments. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2016;157(1):012013. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/157/1/012013>.
2. Sadashivam B., Hizal A., Arola D. Abrasive waterjet peening with elastic prestress: subsurface residual stress distribution. In: *International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. 11–15 November 2007, Seattle, Washington. Seattle, Washington: IMECE; 2007, p. 471-475. <https://doi.org/10.1115/IMECE2007-43473>.
3. Saini S., Ahuja I.S., Sharma V.S. Modeling the effects of cutting parameters on residual stresses in hard turning of AISI H11 tool steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013;65(5-8):667-678. <https://doi.org/10.1007>

s00170-012-4206-0.

4. Yonezu A., Kusano R., Hiyoshi T., Chen Xi. A Method to estimate residual stress in austenitic stainless steel using a microindentation test. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2015;24(1):362-372. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-1280-5>.
5. Qin W.J., Dong C., Li X. Assessment of Bending Fatigue Strength of Crankshaft Sections with Consideration of Quenching Residual Stress. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2016;25(3):938-947. <https://doi.org/10.1007/s11665-016-1890-1>.
6. Ma Yuan, Feng Pingfa, Zhang Jianfu, Wu Zhijun, Yu Dingwen Energy criteria for machining-induced residual stresses in face milling and their relation with cutting power. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015;81:1023-1032. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7278-9>.
7. Huang Xiaoming, Sun Jie, Li Jianfeng. Finite element simulation and experimental investigation on the residual stress-related monolithic component deformation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015;77:1035-1041. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6533-9>.
8. Su Jiann-Cheng, Young A. Keith, Ma Kong, Srivatsa Shesh, Morehouse B.J., Liang Y. Steven. Modeling of residual stresses in milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013;65:717-733. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4211-3>.
9. Ji Xia, Zhang Xueping, Liang Y. Steven. Predictive modeling of residual stress in minimum quantity lubrication machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014;70:2159-2168. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5439-2>.
10. Martell J.J., Liu C.R., Shi Jing. Experimental investigation on variation of machined residual stresses by turning and grinding of hardened AISI 1053 steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014;74(9-12):1381-1392. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6089-8>.
11. Chen Jianbin, Fang Qihong, Zhang Liangchi. Investigate on distribution and scatter of surface residual stress in ultra-high speed grinding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014;75:615-627. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6128-5>.
12. Lohe D., Lang K.-H., Vohringer O. Residual stresses and fatigue behavior. In: *Handbook of residual stress and deformation of steel*. Materials Park: ASM International; 2002, P. 27-54.
13. Chenevrel K., Bouscaud D., Girinon M., Karaouni H., Bergheau J.-M., Feulvach E. Study of the thermal history upon residual stresses during the dry drilling of inconel 718. *Metals*. 2022;12(2):305. <https://doi.org/10.3390/met12020305>.
14. Zuev L.B., Barannikova S.A., Lunev A.G., Kolosov S.V., Zharmukhametova A.M. Basic relationships of the autowave model of a plastic flow. *Russian Physics Journal*. 2019;61:1709-1717. <https://doi.org/10.1007/s11182-018-1591-3>.
15. Barannikova S., Li Yu., Zuev L. Research of the plastic deformation localization of bimetal. *Metalurgija*. 2018;57(4):275-278.
16. Zuev L.B., Barannikova S.A., Orlova D.V. Autowave criteria of fracture and plastic strain localization of zirconium alloys. *Metals*. 2022;12:95. <https://doi.org/10.3390/met12010095>.
17. Blumenstein V.Yu., Zhirkov A.A., Uchaykin S.E., Krechetov A.A., Makhalov M.S. Development of methods and technological equipment for metal plastic flow in treatment processes researches. Part 1. Special milling CNC machine design and manufacture for metal plastic flow research. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Strengthening Technologies and coatings*. 2022;18,7,311-319. (In Russ.). <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2022-18-7-311-319>.
18. Birger I.A. *Residual stresses*. Moscow: Lenand; 2015, 234 p. (In Russ.).
19. Chernyshev G.N., Popov A.L., Kozintsev V.M., Ponomarev I.I. *Residual stresses in deformable solids*. Moscow: Nauka; Fizmatlit; 1996, 240 p. (In Russ.).
20. Rickert T. Residual stress measurement by ESPI hole-drilling. *Procedia CIRP*. 2016;45:203-206. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.256>.
21. Usov S.M., Razumovsky I.A., Odintsev I.A. Study of inhomogeneous fields of residual stresses using step-by-step enlarged crack method in combination with electronic speckle pattern interferometry. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov = Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 2021;87(9):50-58. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2021-87-9-50-58>.
22. Makhalov M.S. The probe hole drilling and 2-exposure speckle photography residual stress research methods. In: *Innovacii v mashinostroenii: Sbornik trudov XII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj pamyati doktora tekhnicheskikh nauk, professora Rahimyanova Harisa Magsumanovicha = Innovations in mechanical engineering: Collected works of the 12th International scientific and practical conference devoted to the memory of the Doctor of technical sciences, Professor Rakhimianov Kharis Magsumanovich*. 7–9 October 2021, Novosibirsk. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University; 2021, p. 405-411. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Махалов Максим Сергеевич,
к.т.н., доцент,
доцент кафедры технологии машиностроения,
Кузбасский государственный технический университет
им. Т.Ф. Горбачева
650026, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, Россия
✉ maxim_st@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3266-9724>

Кречетов Андрей Александрович,
к.т.н., доцент,
доцент кафедры технологии машиностроения,
Кузбасский государственный технический университет
им. Т.Ф. Горбачева
650026, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, Россия
krechetovaa@kuzstu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7569-7362>

Блюменштейн Валерий Юрьевич,
д.т.н., профессор,
профессор кафедры технологии машиностроения,
Кузбасский государственный технический университет
им. Т.Ф. Горбачева
650026, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, Россия
blumenstein@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3711-1535>

Горбатенко Вадим Владимирович,
к. ф.-м. наук,
старший научный сотрудник,
Институт физики прочности и материаловедения СО
РАН,
634025, г. Томск, Академический просп., 2/4, Россия
gvv@ispms.tsc.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6464-6159>

Вклад авторов

Махалов М.С. – формирование концепции статьи; разработка методики обработки экспериментальных результатов; аналитическое описание аппроксимирующей экспериментальные результаты периодической функции; подготовка текста; графическое оформление полученных результатов.

Кречетов А.А. – разработка средств автоматизации обработки результатов; первичная фильтрация, обработка, анализ и обобщение экспериментальных результатов; подготовка текста.

Блюменштейн В.Ю. – определение цели и задачи исследования; разработка методики эксперимента; определение граничных условий.

Горбатенко В.В. – техническое обоснование задач исследования; выполнение эксперимента и получение первичных результатов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 29.07.2023 г.; одобрена после рецензирования 01.09.2023 г.; принятая к публикации 05.09.2023 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Maksim S. Makhalov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Mechanical Engineering
Technologies Department,
T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,
28 Vesennaya St., Kemerovo 650026, Russia
✉ maxim_st@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3266-9724>

Andrey A. Krechetov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Mechanical Engineering
Technologies Department,
T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,
28 Vesennaya St., Kemerovo 650026, Russia
krechetovaa@kuzstu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7569-7362>

Valeriy Yu. Blumenstein,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Mechanical Engineering Technologies
Department,
T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,
28 Vesennaya St., Kemerovo 650026, Russia
blumenstein@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3711-1535>

Vadim V. Gorbatenko,
Cand. Sci. (Phys.- Math.),
Senior Researcher,
Institute of Strength Physics and Materials Science SB
RAS,
2/4, Akademicheskii pr., Tomsk 634025, Russia
gvv@ispms.tsc.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6464-6159>

Contribution of the authors

Makhalov M.S. worked out the concept of the article, developed the experimental result processing methods, delivered the analytical description of the approximating periodic function of the experimental results, prepared the copyright and was responsible for the graphic design of the obtained results.

Krchetov A.A. developed the tools of automated result processing, performed primary filtering processing, analysis and generalization of experimental results, prepared the copyright.

Blumenstein V.Yu. identified the purpose and objectives of the research, developed the experiment procedure, determined boundary conditions.

Gorbatenko V.V. provided technical justification of the research objectives, performed the experiment and obtained primary results.

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 29.07.2023; approved after reviewing 01.09.2023; accepted for publication 05.09.2023.



Design of metal-cutting tool coatings at the atomic level

Boris Ya. Mokritskii¹✉, Alexander V. Kosmynin²

^{1,2}Komsomolsk-na-Amure State University

Abstract. The research aims to lower tooling costs by reducing the time allotted to designing coatings on domestic cemented carbide metal-cutting tools by using the atomic force approach. The object of the study is coatings on cemented carbides of the tungsten carbide group such as titanium carbide (TiC), titanium nitride (TiN), and titanium (Ti) coatings or a nitride-based titanium, chromium and aluminum (Ti,Cr,Al)N composite coating. To select the most rational coatings, the article employed the method of calculating the functionals of interatomic systems using the density functional description of single atoms. The simplest measure to reduce the cost of designing metal-cutting instruments for manufacturing parts made of difficult-to-machine materials is to develop coatings for this tool type. The article considers various atomic arrangements in the coating material in relation to the WCo8 cemented carbide (VK8, tungsten carbide-cobalt alloy containing 8% cobalt). The calculated values of the interaction energy of the coating material atoms with one another and with the cemented carbide material ranged from 3.04 to 3.5 J/m². Moreover, the research has established a correlation between the calculation results and the performance parameter of metal-cutting tools considering fracture toughness K_{1c} (MPa · √m). The main result of the study is that the employed computational method made it possible to determine the adhesion value for the atoms of the above-mentioned coating materials with tungsten carbide and cobalt atoms packed in different scale configurations. This enables the classification of coatings from the perspective of ensuring maximum performance properties of the tooling material. The present article assumes that the higher the adhesion value, the better the performance properties. The hypothesis has been confirmed experimentally as well as by the values of fracture toughness K_{1c}. Thus, the most rational coating options have been selected for specified operating conditions of a metal-cutting tool, which permits reduction of tool design costs and makes it possible to predict the performance properties of tools at the design stage.

Keywords: atomic force approach to coating design, cemented carbide coatings, tooling cost reduction

Funding: The study was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 23-29-00393, <https://rscf.ru/project/23-29-00393/>.

For citation: Mokritskii B.Ya., Kosmynin A.V. Design of metal-cutting tool coatings at the atomic level. *iPolytech Journal*. 2023;27(3):511-517. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-511-517>. EDN: ZTLDOL.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Научная статья

УДК 621.9:621.91.01:621.9.025

Проектирование покрытий металлорежущего инструмента на атомарном уровне

Б.Я. Мокрицкий¹✉, А.В. Космынин²

^{1,2}Комсомольский-на-Амуре государственный университет, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия

Резюме. Цель работы – снизить инструментальные затраты за счет сокращения времени на проектирование покрытий на твердосплавном отечественном металлорежущем инструменте путем применения атомарно-силового подхода. Объектом исследования являются покрытия на твердом сплаве группы карбидов вольфрама, например: покрытия карбидом титана TiC, нитридом титана TiN, титаном Ti или нитридом сложносоставного покрытия смеси титана, хрома и алюминия (Ti,Cr,Al)N. Для выбора наиболее рациональных покрытий применен метод расчета функционалов межатомных систем с использованием функциональной плотности одиночных атомов. Наиболее простой мерой, позволяющей снизить расходы на проектирование металлорежущего инструмента для изготовления деталей, выполненных из труднообрабатываемых материалов, является разработка покрытий для данного вида инструментов. Рассмотрены различные схемы расположения атомов в материале покрытия по отношению к твердосплавному

материалу ВК8. Рассчитанные величины энергии взаимодействия атомов материала покрытия между собой и с материалом твердого сплава составили от 3,04 до 3,5 Дж/м². Установлена взаимосвязь результатов расчета с эксплуатационным параметром металлорежущего инструмента по коэффициенту трещиностойкости K1c (МПа·√м). Главным результатом проведенных исследований является то, что расчетным методом определена величина адгезии для атомов материала покрытий, указанных выше, с атомами карбида вольфрама и кобальта, уложенных в разные масштабные конфигурации. Это позволяет классифицировать покрытия с позиций обеспечения максимальных эксплуатационных свойств инструментального материала. Предполагается, что чем выше величина адгезии, тем лучше эксплуатационные свойства. Это подтверждено экспериментально и по значениям коэффициента трещиностойкости K1c. Таким образом, выбраны наиболее рациональные варианты покрытий под заданные условия эксплуатации металлорежущего инструмента, что позволяет сократить затраты на проектирование инструмента и обеспечивает возможность прогнозирования эксплуатационных свойств инструмента на этапе его проектирования.

Ключевые слова: атомарно силовой подход к проектированию покрытий, покрытия на твердом сплаве, сокращение инструментальных затрат

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00393, <https://rscf.ru/project/23-29-00393/>.

Для цитирования: Мокрицкий Б.Я., Космынин А.В. Проектирование покрытий металлорежущего инструмента на атомарном уровне // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 3. С. 511– 517. (In Eng.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-511-517>. EDN: ZTLDOL.

INTRODUCTION

Designing coatings for metal-cutting tools for specified operating conditions is a labor-intensive process. The study [1] presents the results of designing coatings based on the atomic force approach. In it, the adhesion between the atomic layers of the coating material is used as a criterion for coating selection. As for foreign scientific literature, this approach is outlined in specialized sources [2–4]. In the Russian Federation, the founder of this approach is Professor V.G. Zavodinsky [5, 6].

In works [1, 5, 6], the adhesion energy value E_{ad} is determined by the formula:

$$E_{ad} = \frac{E_{\text{system}} - E_1 - E_2}{S},$$

where E_{system} is the total energy of the system. The system is conventionally divided into parts 1 and 2 (top and bottom), J/m². E_1 and E_2 are the energies of the system parts calculated separately, without interaction with each other, J/m². Part 1 can be a substrate or a WC substrate with a layer on it. Part 2 can be all other layers (one or two). The symbol S denotes the interface area.

Fig. 1 provides an example of the arrangement of one row (monorow) of the coating material atoms in the conventional XYZ coordinate system.

From a geometric perspective, this is an ideal atomic arrangement (packing). It assumes:

- 1) in each row the atoms are in contact with one another;
- 2) each atomic row in the following similar rows

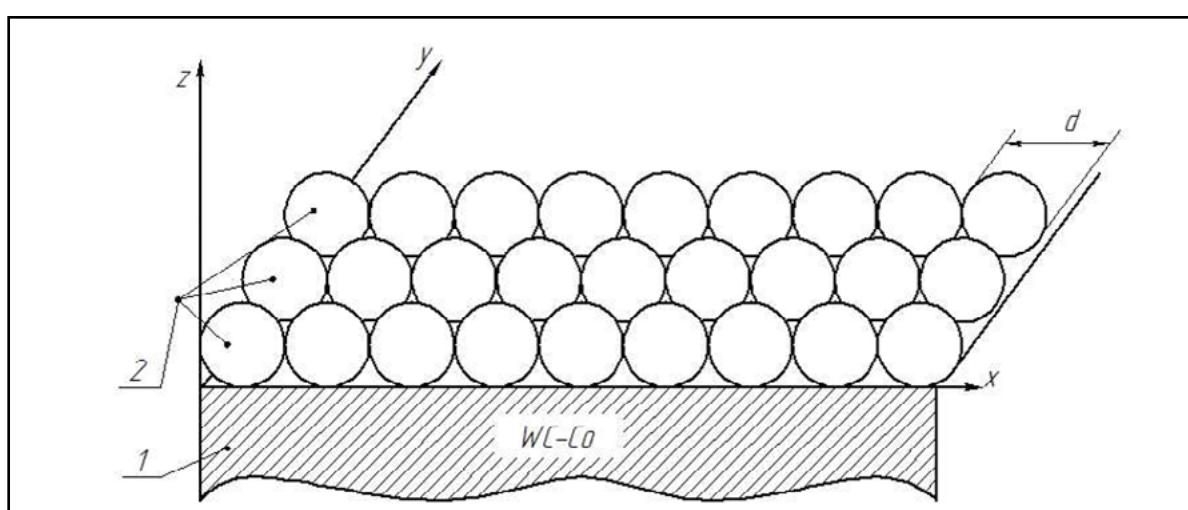
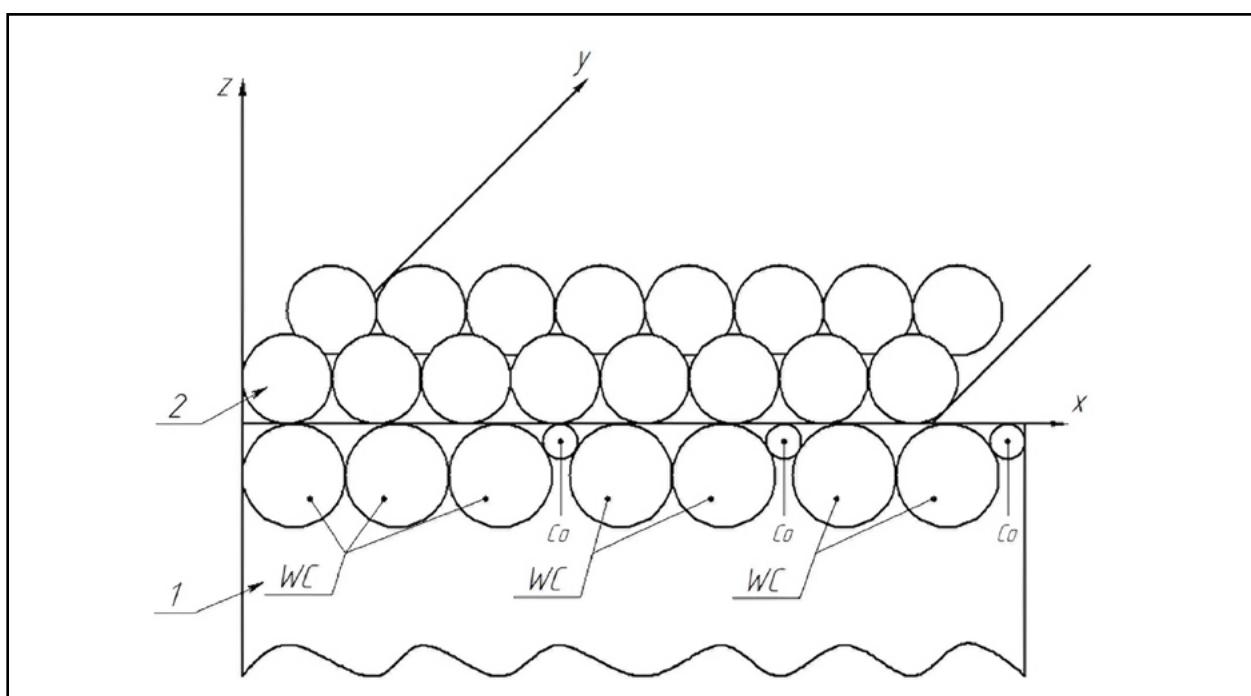


Fig. 1. A conventional arrangement picture of a coating material atom layer (monolayer) on the WC group hard alloy
(1 – hard-alloy material, 2 – atoms of the coating material, d – atom diameter,
WC – tungsten carbide atoms of hard alloy, Co – cobalt atoms)

Рис. 1. Условная картина расположения ряда (монослоя) атомов материала покрытия на твердом сплаве группы ВК (1 – твердосплавной материал, 2 – атомы материала покрытия, d – диаметр атомов, WC – атомы карбида вольфрама твердого сплава, Co – атомы кобальта)



*Fig. 2. An example of the coating material mono layer arrangement on a hard-alloy material
WC – Co (1 – carbide material, 2 – coating material atoms)*

*Рис. 2. Пример расположения монослоя материала покрытия на твердосплавном материале WC – Co
(1 – твердосплавный материал, 2 – атомы материала покрытия)*

is located so that the atoms in the XY plane are in contact only with a similar atom in the preceding row.

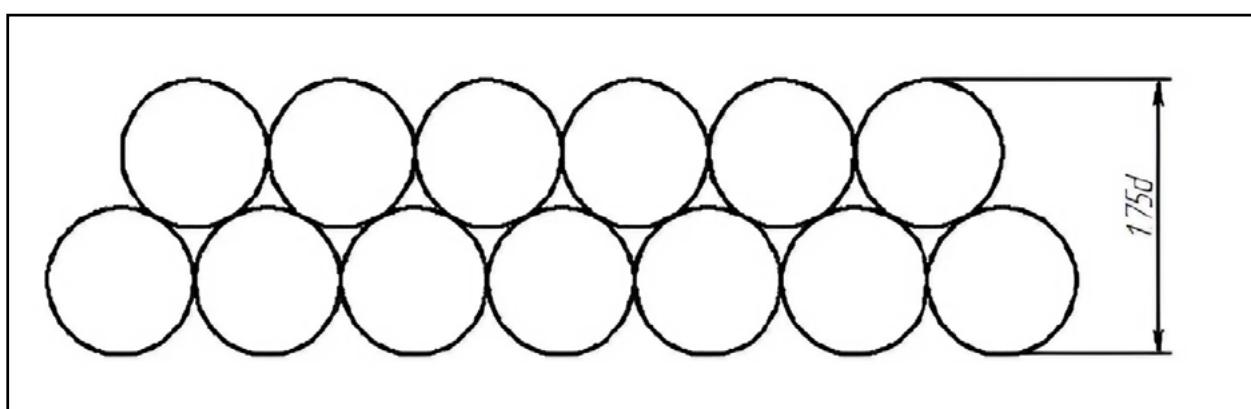
In a real situation, this ideal packing scheme changes. Fig. 2 shows one example of the change.

Fig. 2 conventionally shows an example when (from left to right) 3 coating material atoms are in contact with the tungsten carbide (WC) atoms, then a gap occurs between the atoms due to the presence of cobalt (Co) atoms and again two

atoms are in contact with atoms 2 of the coating material, and so on.

Fig. 3 shows an example of close packing of the coating material atoms. Undoubtedly, other combinations of atomic arrangements are possible, including the formation of discontinuities (absence of one or more atoms in a row).

As applied to titanium atoms, the calculation results obtained by the adhesion energy formula (see above) are given in Table 1.

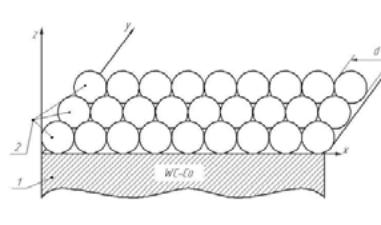
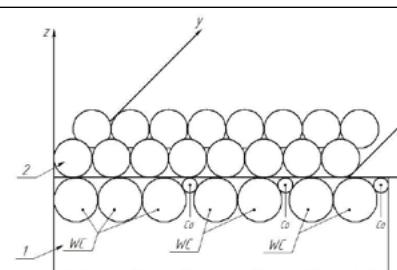
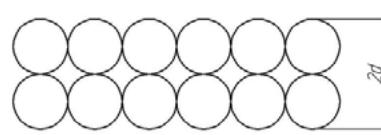
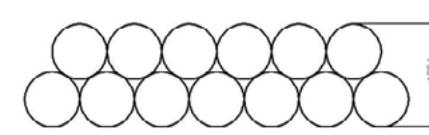
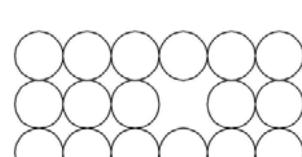
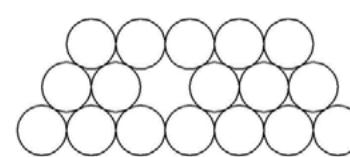


*Fig. 3. An example of a close-packed arrangement of two rows of atoms of the coating material
(1.75d – height of two rows of atoms, d – atom diameters)*

*Рис. 3. Пример плотного расположения двух рядов атомов материала покрытия
(1,75d – высота двух рядов атомов, где d – диаметр атомов)*

Table 1. Values of the adhesion energy for the considered arrangement cases of coating titanium atoms

Таблица 1. Величины энергии адгезии для рассмотренных случаев расположения атомов титана покрытия

Example of atom arrangement	Adhesion energy, J/m ²
	3.07
	3.27
	3.34
	3.48
	3.34 in solid columns (from left to right columns 1, 2, 3, 5 and 6) 3.11 in column 4
	3.50 in the places lacking discontinuity 3.04 in the places close to Discontinuity

The data in Table 1 shows that the adhesion energy is maximum (3.48 J/m^2) at the close-packed double-row arrangement of titanium atoms in the coating (case d). It is significant (3.5 J/m^2) for the three-row atomic arrangement (case f), but only in

places remote from the discontinuity. The presence of a discontinuity reduces the adhesion energy to 3.11 J/m^2 for the three-row vertical atomic arrangement (case e) and to 3.04 J/m^2 for the close-packed three-row atomic arrangement (case f). This per-

mits the conclusion that discontinuities should be classified as defects reducing the metal-cutting tool performance due to the low adhesion energy in the coating layers.

The study has experimentally proved that the more the coating resists the formation and growth of microcracks, including microcrack branching, the higher the cutting tool performance is. In other

Table 2. Comparative assessment of crack resistance of the WC8 grade tool hard alloy and its several coating options
Таблица 2. Сравнительная оценка трещиностойкости инструментального твердого сплава марки ВК8 и нескольких вариантов его покрытий

Materials	VK8	TiC	TiN	Ti	(Ti,Cr,Al)N
K1c, MPa · √m	11.4	1.85	1.89	1.94	2.26

Table 2 shows that from the perspective of resistance to microcrack formation and growth, including microcrack branching, in comparison with carbide (1.85 MPa · √m) or nitride (1.89 MPa · √m) coatings:

- the titanium coating is predicted to be rational (1.94 MPa · √m);
- the nitride-based composite coating (Ti,Cr,Al)N is predicted to be the most rational one (2.26 MPa · √m).

The obtained results do not contradict the existing ideas [7–20]. Nevertheless, they indicate that it is feasible to use a new approach to tooling materials design for specified operating conditions of metal-cutting tools.

CONCLUSION

Calculating the adhesion energy of atomic interaction, the study has evaluated the adhesion properties which different coating layers display in relation to each other and to the WC₈ hard alloy used for making tools. This approach has been experimentally verified in terms of resistance to microcrack formation and growth, including

words, the higher the adhesion energy between the coating layers, the longer the cutting tool life up to the allowable wear.

Table 2 shows the results of evaluating the fracture toughness of cemented carbide (grade WC₈) used for tool making and several options of its coating according to the K_{1c} parameter (MPa · √m).

microcrack branching. The article has considered various atomic arrangements in the coating material in relation to the WC₈ cemented carbide material. The values of the energy of interaction of the coating material atoms with each other and with the hard alloy material have been calculated. The research has employed the method of calculating functionals of interatomic systems using the density functional description of single atoms. The correlation between the calculation results and the performance parameter of metal-cutting tools according to fracture toughness K_{1c} (MPa · √m) has been established. The article proposes to examine tooling materials at the design stage by the adhesion energy value. The novelty of the research consists in determining the adhesion value for atoms arranged in different scale configurations by a computational method. Thus, coatings can be classified from the standpoint of ensuring maximum performance properties of the tooling material. It is assumed that the higher the adhesion value, the higher the performance properties. This has been confirmed experimentally and by fracture toughness K_{1c}.

References

1. Mokrskii B.Ya., Zavodinskij V.G., Garkusha O.A. Investigation of the adhesion properties of Ti, TiN and (Ti, Cr, Al)N layers successively deposited on the WC₉₂-Co₈ hard alloy surface. *Computational Nanotechnology*. 2023;10(2):53-59. <https://doi.org/10.33693/2313-223X-2023-10-2-53-59>. END: BOLLQP.
2. Wang Yan Alexander, Carter E.A. Orbital-free kinetic-energy density functional theory. In: Schwartz S.D. (eds.). *Theoretical Methods in Condensed Phase Chemistry*. Dordrecht: Springer; 2002, vol. 5, p. 117-184. https://doi.org/10.1007/0-306-46949-9_5.
3. Chen Huajie, Zhou Aihui. Orbital-free density functional theory for molecular structure calculations. *Numerical Mathematics Theory Methods and Applications*. 2008;1(1):1-28.
4. Zhou Baojing, Ligneris V.L., Carter E.A. Improving the orbital-free density functional theory description of covalent materials. *The Journal of Chemical Physics*. 2005;122(4):044103-044113. <https://doi.org/10.1063/1.1834563>.
5. Zavodinsky V.G., Gorkusha O.A. On the way to modeling large nanosystems at the atomic level. *Computational nanotechnology*. 2014;1:11-16.
6. Zavodinskii V.G., Gorkusha O.A. A new orbital-free approach for density functional modeling of large molecules and nanoparticles. *Modeling and Numerical Simulation of Material Science*. 2015;5:39-47. <https://doi.org/10.4236/mnsm.2015.52004>.
7. Grigoriev S., Vereschaka A., Milovich F., Tabakov V., Sitnikov N., Andreev N., et al. Investigation of multicomponent nanolayer coatings based nitrides of Cr, Mo, Zr, Nb, and Al. *Surface and Coating Technology*. 2020;401:126258. <https://doi.org/10.1016/j.surcoat.2020.126258>.
8. Vereschaka A.A., Grigoriev S.N., Naumov A.G., Sotova E.S., Kirilov A.K., Bublikov J.I. 11 - Nanoscale multilayered composite

- coating—applications for ecomachining. In: *Handbook of Modern Coating Technologies*. 2021;377–423. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-63237-1.00011-5>.
9. Vereschaka A.A., Grigoriev S.N., Sitnikov N.N., Batako A.D. Delamination and longitudinal cracking in multi-layered composite nano-structured coating and their influence on cutting tool life. *Wear*. 2017;390–391:209–219. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.07.021>.
10. Colding B. War characteristics of coated carbide. In: *International Cutting Tool Bay Sandviken, Lecture*. 1969;5:11980.
11. Tabakov V.P., Chihranov A.V. Improving carbide tool performance through the targeted selection of rational parameters for wear-resistant coating composition. *STIN*. 2016;3:14–18. (In Russ.). EDN: WCMMND.
12. Grigoriev S.N., Volosova M.A., Fedorov S.V., Okunkova A.A., Pivkin P.M., Peretyagin P.Y. et al. Development of DLC-coated solid SiAlON/TiN ceramic end mills for nickel alloy machining: problems and prospects. *Coatings*. 2021;11(5):532. <https://doi.org/10.3390/coatings11050532>.
13. Fox-Rabinovich G.S., Yamamoto K., Veldhuis S.C., Kovalev A.I., Dosbaeva G.K. Tribological adaptability of TiAlCrN PVD coatings under high performance dry machining conditions. *Surface and Coatings Technology*. 2005;200(5–6):1804–1813. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.08.057>.
14. Wang Nina, Zhang Guangpeng, Ren Lijuan, Pang Wanjing, Wang Yupeng. Vision and sound fusion-based material removal rate monitoring for abrasive belt grinding using improved LightGBM algorithm. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021;66:281–292. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.04.014>.
15. Zhang Hua, Deng Zhaohui, Fu Yahui, Lv Lishu, Yan Can. A process parameters optimization method of multi-pass dry milling for high efficiency, low energy and low carbon emissions. *Journal of Cleaner Production*. 2017;148:174–184. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.077>.
16. Huang Weijian, Li Xi, Wang Boxing, Chen Jihong, Zhou Ji. An analytical index relating cutting force to axial depth of cut for cylindrical end mills. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2016;111:63–67. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2016.10.003>.
17. Nath C. Integrated tool condition monitoring systems and their applications: a comprehensive review. *Procedia Manufacturing*. 2020;48(9):852–863. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.05.123>.
18. Vasilchenko S., Cherny S., Khrulkov V. Improving dynamic and energy characteristics of electromechanical systems with single-phase rectifiers. International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. 2020;9111902 <https://doi.org/10.1109/ICIEAM48468.2020.9111902>.
19. Choi Du-Youl, Sharma Ashutosh, Uhm Sang-Ho, Jung Jae Pil. Liquid metal embrittlement of resistance spot welded 1180 TRIP steel: effect of electrode force on cracking behavior. *Metals and Materials International*. 2019;25(1):219–228. <https://doi.org/10.1007/s12540-018-0180-x>.
20. Zaychenko I.V., Bazheryanu V.V., Gordin S.A. Improving the energy efficiency of autoclave equipment by optimizing the technology of manufacturing parts from polymer composite materials. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020;753(2):032069. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/753/3/032069>.

Список источников

1. Мокрицкий Б.Я., Заводинский В.Г., Горкуша О.А. Исследование адгезионных слоев Ti_x и TiN (Ti,Cr,Al)N, последовательно осаждаемых на поверхность твердого сплава WC₉₂–Co₈ // Computational Nanotechnology. 2023. Т. 10. № 2. С. 53–59. <https://doi.org/10.33693/2313-223X-2023-10-2-53-59>. EDN: BOLLQP.
2. Wang Yan Alexander, Carter E.A. Orbital-free kinetic-energy density functional theory // Theoretical Methods in Condensed Phase Chemistry / eds. S.D. Schwartz. Dordrecht: Springer, 2002. Vol. 5. P. 117–184. https://doi.org/10.1007/0-306-46949-9_5.
3. Chen Huajie, Zhou Aihui. Orbital-free density functional theory for molecular structure calculations // Numerical Mathematics Theory Methods and Applications. 2008. Vol. 1. Iss. 1. P. 1–28.
4. Zhou Baojing, Ligneres V.L., Carter E.A. Improving the orbital-free density functional theory description of covalent materials // The Journal of Chemical Physics. 2005. Vol. 122. Iss. 4. P. 044103–044113. <https://doi.org/10.1063/1.1834563>.
5. Заводинский В.Г., Горкуша О.А. На пути к моделированию больших наносистем на атомном уровне // Computational nanotechnology. 2014. № 1. 11–16.
6. Zavodinsky V.G., Gorkusha O.A. Anew orbital-free approach for density functional modeling of large molecules and nanoparticles // Modeling and Numerical Simulation of Material Science. 2015. Iss. 5. P. 39–47. <https://doi.org/10.4236/mnsms.2015.52004>.
7. Grigoriev S., Vereschaka A., Milovich F., Tabakov V., Sitnikov N., Andreev N., et al. Investigation of multicomponent nanolayer coatingsbased nitrides of Cr, Mo, Zr, Nb, and Al // Surface and Coatings Technology. 2020. Vol. 401. P. 126258. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126258>.
8. Vereschaka A.A., Grigoriev S.N., Naumov A.G., Sotova E.S., Kirilov A.K., Bublikov J.I. 11 - Nanoscale multilayered composite coating—applications for ecomachining // Handbook of Modern Coating Technologies. 2021. P. 377–423. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-63237-1.00011-5>.
9. Vereschaka A.A., Grigoriev S.N., Sitnikov N.N., Batako A.D. Delamination and longitudinal cracking in multi-layered composite nanostructured coating and their influence on cutting tool life // Wear. 2017. Vol. 390–391. P. 209–219. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.07.021>.
10. Colding B. War characteristics of coated carbide // International Cutting Tool Bay Sandviken, Lecture. 1969. Iss. 5. P. 11980.
11. Табаков В.П., Чихранов А.В. Повышение работоспособности твердосплавного инструмента путем направленного выбора рациональных параметров состава износостойкого покрытия // СТИН. 2016. № 3. С. 14–18. EDN: WCMMND.
12. Grigoriev S.N., Volosova M.A., Fedorov S.V., Okunkova A.A., Pivkin P.M., Peretyagin P.Y. et al. Development of DLC-coated solid SiAlON/TiN ceramic end mills for nickel alloy machining: problems and prospects // Coatings. 2021. Vol. 11. Iss. 5. P. 532. <https://doi.org/10.3390/coatings11050532>.

13. Fox-Rabinovich G.S., Yamamoto K., Veldhuis S.C., Kovalev A.I., Dosbaeva G.K. Tribological adaptability of TiAlCrN PVD coatings under high performance dry machining conditions // Surface and Coatings Technology. 2005. Vol. 200. Iss. 5–6. P. 1804–1813. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.08.057>.
14. Wang Nina, Zhang Guangpeng, Ren Lijuan, Pang Wanjing, Wang Yupeng. Vision and sound fusion-based material removal rate monitoring for abrasive belt grinding using improved LightGBM algorithm // Journal of Manufacturing Processes. 2021. Vol. 66. P. 281–292. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.04.014>.
15. Zhang Hua, Deng Zhaohui, Fu Yahui, Lv Lishu, Yan Can. A process parameters optimization method of multi-pass dry milling for high efficiency, low energy and low carbon emissions // Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 148. P. 174–184. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.077>.
16. Huang Weijian, Li Xi, Wang Boxing, Chen Jihong, Zhou Ji. An analytical index relating cutting force to axial depth of cut for cylindrical end mills // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2016. Vol. 111. P. 63–67. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2016.10.003>.
17. Nath C. Integrated tool condition monitoring systems and their applications: a comprehensive review // Procedia Manufacturing. 2020. Vol. 48. Iss. 9. P. 852–863. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.05.123>.
18. Vasilchenko S., Cherny S., Khrulkov V. Improving dynamic and energy characteristics of electromechanical systems with single-phase rectifiers // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. 2020. P. 9111902. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM48468.2020.9111902>.
19. Choi Du-Youl, Sharma Ashutosh, Uhm Sang-Ho, Jung Jae Pil. Liquid metal embrittlement of resistance spot welded 1180 TRIP steel: effect of electrode force on cracking behavior // Metals and Materials International. 2019. Vol. 25. Iss. 1. P. 219–228. <https://doi.org/10.1007/s12540-018-0180-x>.
20. Zaychenko I.V., Bazheryanu V.V., Gordin S.A. Improving the energy efficiency of autoclave equipment by optimizing the technology of manufacturing parts from polymer composite materials // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2020. Vol. 753. Ch. 2. P. 032069. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/753/3/032069>.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**Boris Ya. Mokritskii,**

Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Professor of the Department of Mechanical
Engineering Technology,
Komsomolsk-na-Amure State University,
27, Lenin Prospect, Komsomolsk-on-Amur
681013, Russia
boris@knastu.ru

Alexander V. Kosmynin,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Vice-Rector for Research and Innovation,
Komsomolsk-na-Amure State University,
27, Lenin Prospect, Komsomolsk-on-Amur
681013, Russia
avkosc@knastu.ru

Contribution of the authors

The authors have made an equal contribution to the research and writing of the article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 13.07.2023; approved after reviewing 03.08.2023; accepted for publication 02.09.2023.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**Мокрицкий Борис Яковлевич,**

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры технологии машиностроения,
Комсомольский-на-Амуре государственный
университет,
681013, г. Комсомольск-на-Амуре,
пр. Ленина, 27, Россия
boris@knastu.ru

Космынин Александр Витальевич,

доктор технических наук, профессор,
проректор по науке и инновационной работе,
Комсомольский-на-Амуре государственный
университет,
681013, г. Комсомольск-на-Амуре,
пр. Ленина, 27, Россия
avkosc@knastu.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали равнозначный вклад в исследование и написание статьи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 13.07.2023 г.; одобрена после рецензирования 03.08.2023 г.; принята к публикации 02.09.2023 г.

ЭНЕРГЕТИКА



Научная статья

УДК 621.923:621.922

EDN: WOSBCK

DOI: 10.21285/1814-3520-2023-3-518-526

Обработка экспериментальных результатов суперкавитационного обтекания конуса методом локальной полиномиальной регрессии (LOESS)

Д.А. Гришаев^{1✉}, А.Ю. Радзюк², Е.Б. Истягина³¹⁻³Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме. Цель – получение зависимостей, описывающих параметры потока при суперкавитационном обтекании препятствия, часто встречающемся в различных элементах теплоэнергетических систем и установок, а также предложение доступного и достоверного метода для анализа массивов экспериментальных данных течений в таких системах. Натурное моделирование кавитационных процессов выполнялось на циркуляционном гидродинамическом стенде. Был исследован процесс суперкавитационного обтекания конусов с диаметрами основания 15,45 мм и 21,75 мм с углами раскрытия 154° и 127°, соответственно, в рабочем участке диаметром 30 мм. Полученные экспериментальные данные представляли собой четырехмерный массив, который описывал зависимость длины каверны, возникающей за препятствием, и давление в ней от скорости потока и температуры. Из-за сложности обработки и визуального представления данный массив экспериментальных данных был разбит на два трехмерных массива. Аппроксимация полученных данных выполнялась методом слаживания локально оцененной диаграммы рассеивания. Выполненная аппроксимация с использованием метода локальной полиномиальной регрессии показала, что момент перехода от парогазовой к паровой кавитации не зависит от геометрических размеров препятствия. Также в результате обработки экспериментальных данных была получена зависимость, соответствующая процессу перехода к паровой кавитации. Предложено эмпирическое уравнение, описывающее такой переход. Таким образом, метод слаживания локально оцененной диаграммы рассеивания (локальной полиномиальной регрессии) наглядно показал взаимосвязь между обрабатываемыми данными. Предложенное эмпирическое уравнение позволяет определить критическую длину каверны, соответствующую переходу от парогазовой кавитации к паровой, и может быть использовано при проектировании и эксплуатации теплоэнергетического оборудования.

Ключевые слова: кавитационное обтекание, суперкаверна, парогазовая кавитация, регрессионный анализ, локальная полиномиальная регрессия (LOESS)

Для цитирования: Гришаев Д.А., Радзюк А.Ю., Истягина Е.Б. Обработка экспериментальных результатов суперкавитационного обтекания конуса методом локальной полиномиальной регрессии (LOESS) // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 3. С. 518–526. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-518-526>. EDN: WOSBCK.

POWER ENGINEERING

Original article

Processing of experimental results for super-cavitating flow past cone by local polynomial regression (LOESS)

Denis A. Grishaev^{1✉}, Aleksandr Yu. Radzyuk², Elena B. Istyagina³¹⁻³Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The aim of the study is to define the correlations describing the flow parameters during super-cavitating flow past an obstacle, often found in various elements of thermal power systems and units, as well as to offer a simple and reliable method for analysing experimental datasets for the flows in such systems. Full-scale modelling of cavitation processes was carried out using a circulating hydrodynamic set-up. The process of super-cavitation flow past cones with base diameters of 15.45 and 21.75 mm and opening angles of 154° and 127°, respectively, in a working section having a diameter of 30 mm, was investigated. The obtained experimental data comprises a four-dimensional array that describes the dependence of the cavity length arising behind the obstacle and the pressure inside the cavity on the flow rate and temperature. Due to the complexity of processing and visual representation, this array was divided into two three-dimensional arrays. The approximation of the obtained data was carried out by locally estimated scatterplot smoothing (LOESS). The results demonstrated that the transition from vapour–gas to vapour cavitation is independent of the geometric dimensions of the obstacle. In addition, the dependence corresponding to the transition process to vapour cavitation was obtained by processing the experimental data.

An empirical equation describing such a transition is proposed. Therefore, the method of smoothing a locally estimated scatter plot (local polynomial regression) illustrates the correlation between the processed data. The proposed empirical equation allows the critical length of the cavity to be determined that corresponds to the transition from vapour–gas to vapour cavitation and can be used for the design and operation of thermal power equipment.

Keywords: cavitation flow, supercavern, steam-gas cavitation, regression analysis, local polynomial regression

For citation: Grishaev D.A., Radzyuk A.Yu., Istyagina E.B. Processing of experimental results of supercavitation flow around a nozzle by the method of local polynomial regression (LOESS). *iPolytech Journal*. 2023;27(3):518-526. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-518-526>. EDN: WOSBCK.

ВВЕДЕНИЕ

Кавитационные явления могут возникать при движении жидкости с большими скоростями в различных технологических элементах энергетического оборудования (насосах, запорной и регулирующей аппаратуре). Разрушающее воздействие кавитации традиционно объясняется воздействием кумулятивной струйки, возникающей при коллапсе парового пузырька, однако в реальных потоках, помимо паровой кавитации, может формироваться парогазовая кавитация, проявление которой будет существенно отличаться от паровой кавитации. В этой связи важным является определение параметров перехода от парогазовой к паровой кавитации.

Получение информации о тех или иных физических процессах и явлениях зачастую опирается на их экспериментальное изучение, в результате которого исследователь имеет ряд значений физических величин. Результаты любых измерений подвержены некоторым погрешностям. Анализ полученных результатов и погрешностей измерений является существенной частью любого научного эксперимента, поэтому владение методами обработки экспериментальных данных является неотъемлемой работой исследователя-экспериментатора.

Методы обработки экспериментальной информации зависят от того, какова модель, для уточнения которой проводится эксперимент. Фактически обработка экспериментальных данных – это преобразование информации к виду, удобному для использования и анализа, построение законов распределения случайных величин, установление зависимости между полученными величинами.

При рассмотрении результатов отдельных экспериментов бывает трудно обнаружить какие-либо закономерности. Однако если рассмотреть последовательность большого числа экспериментов, можно обнаружить определенные закономерности в устойчиво-

сти средних результатов.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью работы является экспериментальное определение параметров перехода от парогазовой к паровой кавитации при суперкавитационном обтекании препятствия и вычисление эмпирических коэффициентов уравнения, определяющего такой переход.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При исследовании обтекания конических тел с различным углом раскрытия были получены данные, объединяющие скорость, температуру потока, давление в кавитационной каверне и ее длину.

Полученные в результате исследования экспериментальные данные являются созависимыми и фактически образуют четырехмерный массив. Из-за сложности графического представления данный массив был разбит на две составляющие. Построены следующие зависимости:

1) давление в кавитационной каверне от скорости потока и температуры;

2) длина каверны от тех же параметров.

Но и при таком представлении большое количество полученных экспериментальных значений затрудняет анализ происходящих процессов. В связи с этим возникает необходимость их предварительной обработки.

Для наглядного представления взаимосвязей в экспериментальных данных желательно подобрать такую аппроксимирующую поверхность, которая окажется наиболее близка к имеющимся точкам в заданном диапазоне.

Существует много способов обработки данных и сглаживания их поверхностей. Например, в работе [1] описан автоматический метод построения гладких поверхностей, определяемых как сеть криволинейных треугольных участков (треугольников Безье). В работе [2] показано, что экспериментальные данные с разбросом можно сгладить при помощи радиальной базисной функции. Применяется также изогеометрический ана-

лиз [3] и многие другие методы. Каждый метод имеет свои достоинства и недостатки, применяется в различных областях исследования.

Для обработки полученных экспериментальных данных был использован метод LOESS (от англ. Local Estimated Scatterplot Smoothing – сглаживание локально оцененной диаграммы рассеивания) [4–6]. Данный алгоритм является обобщением известных способов обработки данных – метода наименьших квадратов (МНК), инструментом которого является регрессионный анализ. Идея метода заключается в том, чтобы сгладить ряд данных не во всем диапазоне, а в конкретном месте, который задает исследователь. Для этого выбирается произвольная точка в массиве данных, определяется расстояние от выбранной точки до соседних точек, попавших в интервал. Формируется окно для работы с массивом, его размер зависит от параметра сглаживания, который входит в формулу (1).

$$r = \|\beta \cdot N\|, \quad (1)$$

где r – натуральное число, определяющее интервал для сглаживания; $\|\cdot\|$ обозначает округление числа до целого по правилам математики; N – число точек в выборке, шт.; β – безразмерный коэффициент сглаживания, $\beta \in (0; 1]$ и задается исследователем.

Соответственно, размер окна сильно зависит от коэффициента сглаживания. Чем больше точек попадает в окно, тем лучше будет происходить сглаживание ряда данных. Далее для точек, попавших в окно, необходимо задать веса по принципу: чем ближе точка к центральной, тем больше ее вес и тем сильнее она будет учитываться при сглаживании. Центральная точка, от которой начинается окно, веса не имеет. Для оценки веса точки и сглаживания полученных экспериментальных данных использовалась трикубическая функция [4]:

$$W_{\text{трикуб}}(z) = \begin{cases} \left(1 - |z|^3\right)^3, & |z| < 1 \\ 0, & |z| \geq 1 \end{cases} \quad (2)$$

где $w(z)$ – функция веса; z – это переменная расстояния, характеризующая удаленность наблюдений от центральной точки. В самой центральной точке $= 0$.

Метод LOESS становится популярным для сглаживания данных [7]. Он хорошо описан в монографиях [8, 9]. Обычно метод применяют для сглаживания двумерных данных, например в социально-экономическом прогнозировании. По мнению автора работы [10], данный метод можно применить к многомерным данным. Полученные экспериментальные данные как раз являются такими.

Достоинства использования LOESS⁴:

- 1) достаточно указать два параметра: степень полинома и параметр сглаживания;
- 2) гибкость, из-за чего можно моделировать сложные процессы, для которых не существует теоретических моделей.

Недостатки метода LOESS⁴:

- 1) для создания качественных моделей требуется большое количество данных с хорошей выборкой;
- 2) нет регрессионной функции;
- 3) требует значительных вычислительных ресурсов. В таком случае необходимо разработать программу для ЭВМ [11]. Исследователями предпринимаются попытки снизить затраты на вычисления, например, в работе [12].

Существуют и другие методы сглаживания поверхностей. Например, метод смежного усреднения (adjacent-averaging), медианного усреднения (adjacent-Median), отрицательной экспоненты (negative exponential), биквадратичного взвешивания (Bisquare weighting) и закона обратных квадратов (inverse-square law)^{5,6}. Однако экспериментальные данные были обработаны именно методом LOESS с трикубической весовой функцией в качестве ядра, так как, по мнению авторов данной статьи, достоинства этого метода позволяют получить наиболее качественные аппроксимирующие поверхности. К тому же метод применен для результатов физического эксперимента, что не встречается в имеющейся литературе.

⁴4.1.4.4. LOESS (aka LOWESS). National institute of standards and technology [Электронный ресурс].

URL: <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pmd/section1/pmd144.htm> (18.07.2022).

⁵3D Smoother – File Exchange – OriginLab. OriginLab – Origin and OriginPro – Data Analysis and Graphing Software [Электронный ресурс]. URL: <https://www.originlab.com/fileExchange/details.aspx?fid=415> (18.07.2022).

⁶Help Online – Origin help – Algorithms (Smooth). OriginLab – Origin and OriginPro – Data Analysis and Graphing Software. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.originlab.com/doc/Origin-Help/Smooth-Algorithm> (23.07.2022).

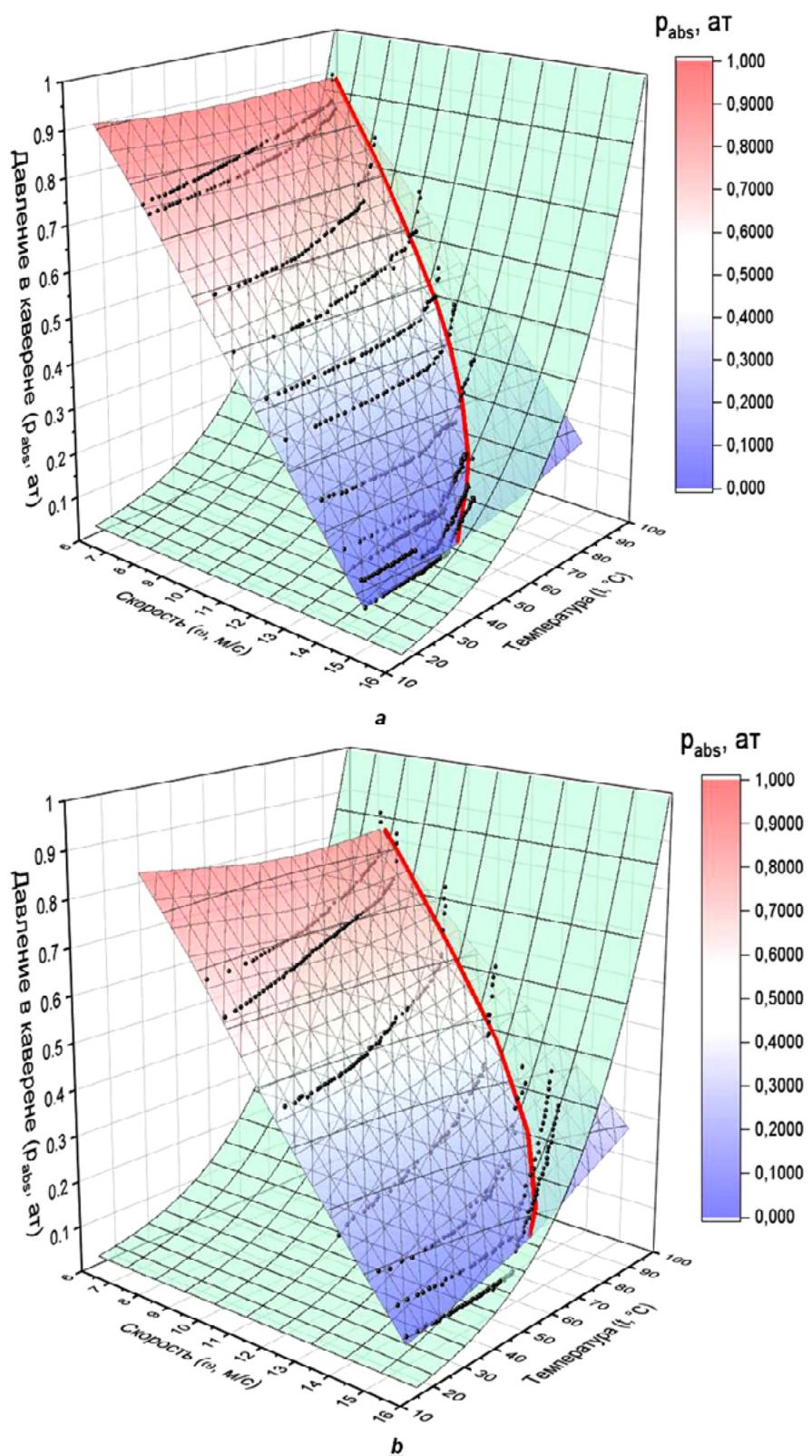


Рис. 1. Зависимость давления в каверне от температуры и скорости:
а – конус 15,45 мм; б – конус 21,75 мм

Fig. 1. Cavern pressure vs temperature and flow velocity:
a – 15.45 mm nozzle; b – 21.75 mm nozzle

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБРАБОТКА

Для возникновения кавитации необходимо падение давления ниже определенной критической величины, также называемой кавитационной прочностью жидкости. Этот эффект можно создать, поместив на пути потока жидкости препятствие, например, в виде конуса с различным углом раскрытия. Очевидно, что максимальное значение этого критического давления будет равно давлению насыщенных паров жидкости при температуре потока, однако такое утверждение будет справедливо только для полностью дегазированной жидкости и лишенной ядер кавитации. В реальных процессах такой случай почти не встречается, в этой связи актуальным является определение параметров возникновения кавитации в жидкости, содержащей примеси, растворенные газы и свободные пузырьки газа в потоке. Также необходимость разделения параметров паровой и парогазовой кавитации возникает в случае применения кавитации в парогенераторах и конденсаторах пара, в суперкавитационных испарителях.

При обтекании конуса были получены следующие ключевые параметры: температура, давление в кавитационной каверне, длина каверны и скорость потока. Данные были сняты при проведении экспериментов на гидродинамическом стенде, представляющим из себя замкнутый циркуляционный контур.

Описание конструкции представлено в работах [13–15]. Стенд является в некотором роде моделью промышленного объекта, на котором можно экспериментально установить, как скорость потока в трубопроводе влияет на интенсивность возникновения кавитации.

Результаты обработки полученных экспериментальных данных методом LOESS представлены на рис. 1, 2.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Помимо обработки данных по методу LOESS, были определены параметры перехода от парогазовой кавитации к паровой.

На рис. 1 нанесена кривая насыщения водяного пара в виде плоскости. Пересечение аппроксимирующей поверхности с плоскостью кривой насыщения показывает парциальное давление водяного пара, при котором из экспериментального стенда полностью удаляется воздух, а кавитация становится исключительно паровой. Место пересечения обозначено красной линией, которая соответ-

ствует экспериментальным точкам. Область левее красной линии означает, что кавитация еще является парогазовой и в ней давление водяного пара превышает давление насыщения на величину парциального давления воздуха. Область правее красной линии показывает, что кавитация уже полностью паровая. Часть аппроксимирующей поверхности, находящейся за кривой насыщения, как раз относится к такой.

Можно заметить следующую особенность: чем выше скорость потока, тем при более низкой температуре начинается переход от газовой кавитации к паровой.

Данные, приведенные на рис. 1, позволяют определить скорость и температуру, при которых давление становится равным давлению насыщенного пара при той или иной температуре. По определенным таким методом температуре и скорости выбраны соответствующие им длины каверны и представлены в виде красной линии на рис. 2, которая фактически представляет собой линию перехода на рис. 1 в другой проекции.

Результаты наших экспериментов сопоставимы с предыдущими работами [13–16] и результатами численного моделирования кавитации при истечении жидкости из конуса при различных скоростях потока [17]. Сравнивая полученные результаты с работой [18], в которой авторы проводили трехмерное численное исследование нестационарных турбулентных кавитационных течений вокруг круглого диска и конусного кавитатора, и работами [19, 20], в которых авторы экспериментально исследовали гидродинамическую кавитацию в микроканалах, можно сделать вывод, что результаты определения длины каверны при тех же диаметрах препятствия являются сопоставимыми.

По полученным кривым для двух конусов разных размеров можно вывести уравнение плоскости, проходящей через эти точки. Коэффициенты, входящие в уравнение, оказываются достаточно близкими, поэтому переход от газовой к паровой кавитации можно описать одним эмпирическим уравнением. В результате вычислений получено уравнение следующего вида:

$$L_{kp} = 0,037\omega + 0,0033t - 0,49, \quad (5)$$

где L_{kp} – критическая длина каверны, соответствующая переходу от парогазовой к паровой кавитации, м; ω – скорость потока в основании суперкаверны, м/с; – температура потока, °С.

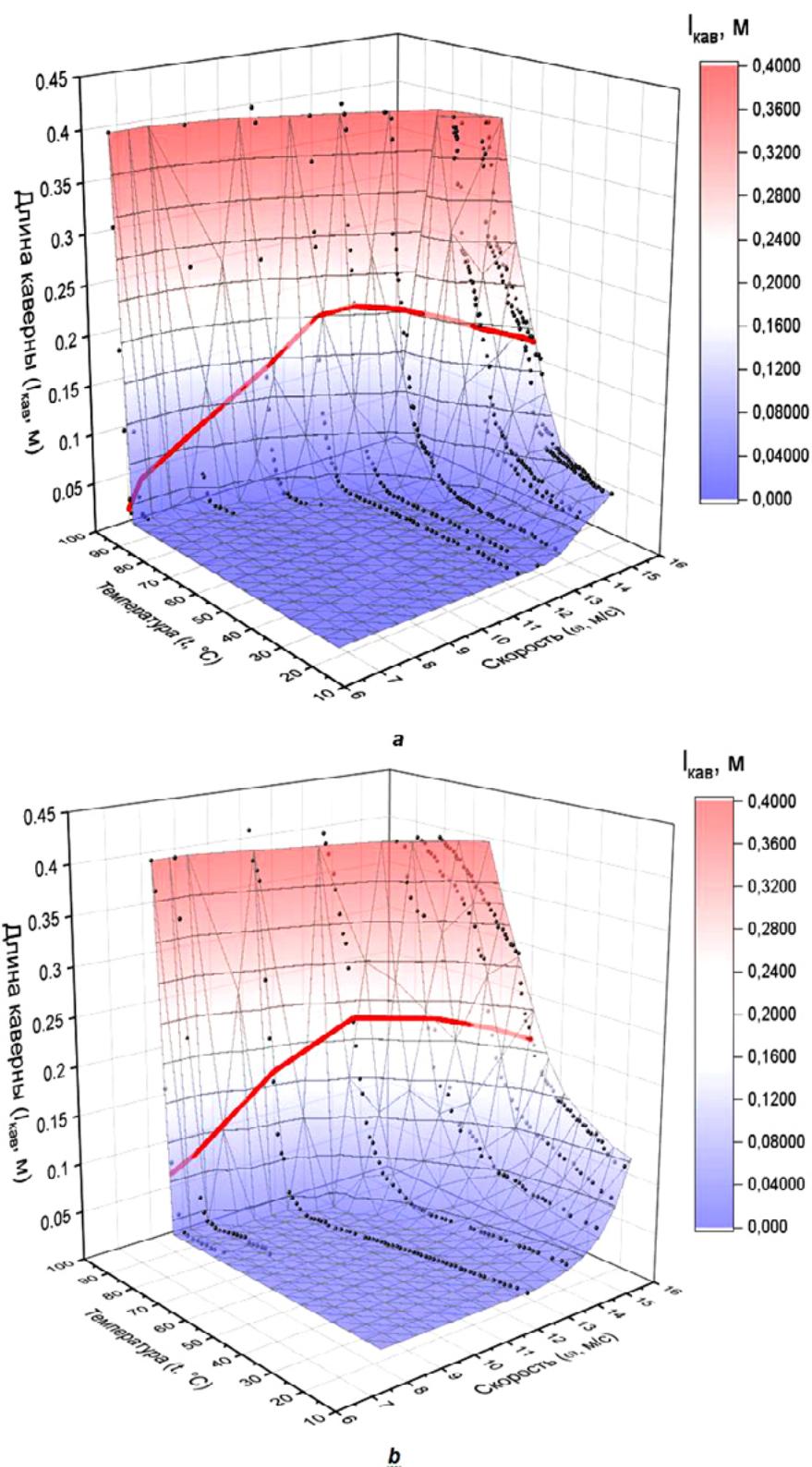


Рис. 2. Зависимость длины каверны от температуры и скорости.
Красная линия – параметры перехода от парогазовой (внизу) к паровой (вверху)
кавитации: а – конус 15,45 мм; б – конус 21,75 мм

Fig. 2. Cavern length vs temperature and flow velocity.

The red line stands for the parameters of the conversion from steam-gas (area below the red line) to steam
(area above the red line) cavitation: a – 15.45 mm nozzle; b – 21.75 mm

Параметры, входящие в уравнение (5), являются координатами точек в пространстве: скорость ω соответствует координате x, температура t – координате y и критическая длина каверны L_{kp} – координате z.

Предлагаемое уравнение хорошо аппроксимирует экспериментальные данные в заданном диапазоне, рассчитанная по нему критическая длина каверны попадает на кривую перехода от парогазовой к паровой кавитации. За пределами диапазона экспериментальных данных экстраполяция значений не проводилась, необходимо проводить дальнейшие эксперименты в области перехода от парогазовой кавитации к паровой для уточнения эмпирических коэффициентов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование для сглаживания массива экспериментальных данных локальной регрессии LOESS позволяет установить взаи-

мосвязь между четырьмя зависимыми между собой параметрами: скоростью потока, температурой, давлением в кавитационной каверне и ее длиной, что позволяет количественно и качественно анализировать изучаемое явление, опираясь на установленные эмпирические зависимости между варьирующимися характеристиками.

На основе сопоставления измеренного в каверне давления с давлением насыщенных паров воды при той же температуре определены параметры парогазовой и паровой кавитации; сделан вывод о том, что момент перехода от парогазовой кавитации к паровой не зависит от геометрии обтекаемого препятствия; на основе анализа экспериментальных данных получено эмпирическое уравнение, позволяющее определить критическую длину каверны, соответствующую переходу от парогазовой к паровой кавитации.

Список источников

1. Kaick O.M., Silva M.V.G., Schwartz W.R., Pedrini H. Fitting smooth surfaces to scattered 3D data using piecewise quadratic approximation // Proceedings. International Conference on Image Processing. 2002. Vol. 1. P. 493–496. <https://doi.org/10.1109/ICIP.2002.1038068>.
2. Carr J.C., Beatson R.K., McCalum B.C., Fright W.R., McLennan T.J., Mitchel T.J. Smooth surface reconstruction from noisy range data // Proceedings of the 1st international conference on Computer graphics and interactive techniques in Australasia and South East Asia. 2003. P. 119–127. <https://doi.org/10.1145/604471.604495>.
3. Cottrell J.A., Hughes T.J.R., Bazilevs Y. Isogeometric analysis: toward Integration of CAD and FEA. John Wiley & Sons; 2009. 335 p.
4. Cleveland W.S. Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots // Journal of the American Statistical Association. 1979. Vol. 74. Iss. 368. P. 829–836. <https://doi.org/10.1080/01621459.1979.10481038>.
5. Irizarry R.A. Local regression with meaningful parameters // The American Statistician. 2001. Vol. 55. Iss. 1. P. 72–79 <https://doi.org/10.1198/000313001300339969>.
6. Cleveland W.S., Grosse E. Computational methods for local regression // Stat Comput. 1991. Vol. 1. P. 47–62. <https://doi.org/10.1007/BF01890836>.
7. Jacoby W.G. Loess: a nonparametric, graphical tool for depicting relationships between variables. Electoral Studies. 2000;19(4):577-613. [https://doi.org/10.1016/S0261-3794\(99\)00028-1](https://doi.org/10.1016/S0261-3794(99)00028-1).
8. Loader C.R. Local regression and likelihood. New York: Springer, 1999. 290 p.
9. Chambers J.M., Hastie T.J. Statistical Models in S. New York, 1992. 624 p.
10. Jacoby W.G. Loess: a nonparametric, graphical tool for depicting relationships between variables. Electoral Studies. 2000;19(4):577-613. [https://doi.org/10.1016/S0261-3794\(99\)00028-1](https://doi.org/10.1016/S0261-3794(99)00028-1).
11. Cleveland W.S. Lowess: a program for smoothing scatterplots by robust locally weighted regression // The American Statistician. 1981. Vol. 35. Iss. 1. P. 54–55. <https://doi.org/10.2307/2683591>.
12. Talgorn B., Audet C., Digabel S., Kokkolaras M. Locally weighted regression models for surrogate-assisted design optimization // Optimization and Engineering. 2018. Vol. 19. Iss. 1. P. 213–238. <https://doi.org/10.1007/s11081-017-9370-5>.
13. Kulagin V.A., Radzyuk A.U., Istyagina E.B., Pianykh T.A. Experimental stand for the study of cavitation flow regimes // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2018. Vol. 450. Iss. 3. P. 032023. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/450/3/032023>.
14. Radzyuk A.Yu., Kulagin V.A., Istyagina E.B., Pianykh T.A., Grishina I.I. The determination of the dependence of the cavern length on the flow velocity on an experimental hydrodynamic workbench // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1399. Iss. 2. P. 022050. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1399/2/022050>.
15. Радзюк А.Ю., Кулагин В.А., Истягина Е.Б., Пьяных Т.А. Модернизация кавитационного стенда для исследования двухфазных режимов течения // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2019. Т. 12. № 4. С. 468–475. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0155>.
16. Radzyuk A.Yu., Istyagina E.B., Kulagina L.V., Li Feng-Chen, Pjanykh T.A., Grishaev D.A, et al. Determining properties of a flow-through supercavitation desalination plant // Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies. 2023.

Vol. 16. Iss. 1. P. 6–21. EDN GSDAGT.

17. Radzyuk A.Yu., Kulagin V.A., Istyagina E.B., Pjanykh T.A., Kolosov M.V. Numerical simulation of supercavitation in the constrained flow // Earth and Environmental Science: IOP Conference Series. 2019. Vol. 315. Iss. 3. P. 032027. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/315/3/032027>.
18. Fard M.B., Nikseresht A.H. Numerical simulation of unsteady 3D cavitating flows over axisymmetric cavitators // Scientia Iranica. 2012. Vol. 19. Iss. 5. P. 1258–1264. <https://doi.org/10.1016/j.scient.2012.07.013>.
19. Lobasov A.S., Skripkin S.G., Tsoi M.A., Kravtsova A.Y. Investigation of the cavitation processes behind a cylinder located in a microchannel in a wide range of Reynolds numbers // Case Studies in Thermal Engineering. 2022. Vol. 38. P. 102306. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102306>.
20. Ghorbani M., Sadaghiani A.K., Yidiz M., Koşar A. Experimental and numerical investigations on spray structure under the effect of cavitation phenomenon in a microchannel // Journal of Mechanical Science and Technology. 2017. Vol. 31. Iss. 1. P. 235–247. <https://doi.org/10.1007/s12206-016-1226-y>.

References

1. Kaick O.M., Silva M.V.G., Schwartz W.R., Pedrini H. Fitting smooth surfaces to scattered 3D data using piecewise quadratic approximation. In: *Proceedings. International Conference on Image Processing*. 2002;1:493–496. <https://doi.org/10.1109/ICIP.2002.1038068>.
2. Carr J.C., Beatson R.K., McCalum B.C., Fright W.R., McLennan T.J., Mitchel T.J. Smooth surface reconstruction from noisy range data. In: *Proceedings of the 1st international conference on Computer graphics and interactive techniques in Australasia and South East Asia*. 2003;119–127. <https://doi.org/10.1145/604471.604495>.
3. Cottrell J.A., Hughes T.J.R., Bazilevs Y. *Isogeometric analysis: toward Integration of CAD and FEA*. John Wiley & Sons; 2009. 335 p.
4. Cleveland W.S. Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots. *Journal of the American Statistical Association*. 1979;74(368):829–836. <https://doi.org/10.1080/01621459.1979.10481038>.
5. Irizarry R.A. Local regression with meaningful parameters. *The American Statistician*. 2001;55(1):72–79. <https://doi.org/10.1198/000313001300339969>.
6. Cleveland W.S., Grosse E. Computational methods for local regression. *Stat Comput*. 1991;1:47–62. <https://doi.org/10.1007/BF01890836>.
7. Jacoby W.G. Loess: a nonparametric, graphical tool for depicting relationships between variables. *Electoral Studies*. 2000;19(4):577–613. [https://doi.org/10.1016/S0261-3794\(99\)00028-1](https://doi.org/10.1016/S0261-3794(99)00028-1).
8. Loader C.R. Local regression and likelihood. New York: Springer; 1999. 290 p.
9. Chambers J.M., Hastie T.J. Statistical models in S. New York; 1992. 624 p.
10. Jacoby W.G. Loess: a nonparametric, graphical tool for depicting relationships between variables. *Electoral Studies*. 2000;19(4):577–613. [https://doi.org/10.1016/S0261-3794\(99\)00028-1](https://doi.org/10.1016/S0261-3794(99)00028-1).
11. Cleveland W.S. Lowess: a program for smoothing scatterplots by robust locally weighted regression. *The American Statistician*. 1981;35(1):54–55. <https://doi.org/10.2307/2683591>.
12. Talgorn B., Audet C., Digabel S., Kokkolaras M. Locally weighted regression models for surrogate-assisted design optimization. *Optimization and Engineering*. 2018;19(1):213–238. <https://doi.org/10.1007/s11081-017-9370-5>.
13. Kulagin V.A., Radzyuk A.U., Istyagina E.B., Pianykh T.A. Experimental stand for the study of cavitation flow regimes. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2018;450(3):032023. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/450/3/032023>.
14. Radzyuk A.Yu., Kulagin V.A., Istyagina E.B., Pianykh T.A., Grishina I.I. The determination of the dependence of the cavern length on the flow velocity on an experimental hydrodynamic workbench. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1399(2):022050. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1399/2/022050>.
15. Radzyuk A.Yu., Kulagin V.A., Istyagina E.B., Pianykh T.A. Modernization of the cavitation stand for the investigation of two-phase flow regimes. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2019;12(4):468–475. (In Russ.). <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0155>.
16. Radzyuk A.Yu., Istyagina E.B., Kulagina L.V., Li Feng-Chen, Pianykh T.A., Grishaev D.A., et al. Determining properties of a flow-through supercavitation desalination plant. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies*. 2023;16(1):6–21. EDN GSDAGT.
17. Radzyuk A.Yu., Kulagin V.A., Istyagina E.B., Pianykh T.A., Kolosov M.V. Numerical simulation of supercavitation in the constrained flow. In: *Earth and Environmental Science: IOP Conference Series*. 2019;315(3):032027. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/315/3/032027>.
18. Fard M.B., Nikseresht A.H. Numerical simulation of unsteady 3D cavitating flows over axisymmetric cavitators. *Scientia Iranica*. 2012;19(5):1258–1264. <https://doi.org/10.1016/j.scient.2012.07.013>.
19. Lobasov A.S., Skripkin S.G., Tsoi M.A., Kravtsova A.Y. Investigation of the cavitation processes behind a cylinder located in a microchannel in a wide range of Reynolds numbers. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2022;38:102306. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102306>.
20. Ghorbani M., Sadaghiani A.K., Yidiz M., Koşar A. Experimental and numerical investigations on spray structure under the effect of cavitation phenomenon in a microchannel. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2017;31(1):235–247. <https://doi.org/10.1007/s12206-016-1226-y>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гришаев Денис Андреевич,
аспирант,
Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск, пр-т. Свободный, 79, Россия
✉ frank_benyton@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0007-7116-2380>

Радзюк Александр Юрьевич,
к.т.н., доцент,
доцент кафедры теплотехники и гидрогазодинамики
Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск,
пр-т. Свободный, 79, Россия
aradzyuk@sfu-kras.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8387-1957>

Истягина Елена Борисовна,
к.ф.-м.н., доцент,
доцент кафедры теплотехники и гидрогазодинамики,
Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск, пр-т. Свободный, 79, Россия
tim.484@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Denis A. Grishaev,
Postgraduate student,
Siberian Federal University,
79, Svobodny pr., Krasnoyarsk 660041, Russia
✉ frank_benyton@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0007-7116-2380>

Aleksandr Yu. Radzyuk,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Heat Technology and Fluid Dynamics,
Siberian Federal University,
79, Svobodny pr., Krasnoyarsk 660041, Russia
aradzyuk@sfu-kras.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8387-1957>

Elena B. Istyagina,
Cand. Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Heat Technology and Fluid Dynamics,
Siberian Federal University, 79, Svobodny pr., Krasnoyarsk
660041, Russia
tim.484@mail.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
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 15.05.2023 г.; одобрена после рецензирования 22.06.2023 г.; принятая к публикации 13.07.2023 г.

Information about the article

The article was submitted 15.05.2023; approved after reviewing 22.06.2023; accepted for publication 13.07.2023.

Научная статья
УДК 620.91:330.15
EDN: XDJFRS
DOI: 10.21285/1814-3520-2023-3-527-538

ЭНЕРГЕТИКА

Интеллектуальная поддержка принятия решения по вводу мощностей малой гидроэлектростанции в Республике Тыва

Т.В. Кривенко¹, В.А. Тремясов², К.В. Кенден³, В.Е. Кожемякин⁴

^{1,2}Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

³Тувинский государственный университет, г. Кызыл, Россия

⁴Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

Резюме. Цель – развитие метода принятия технических решений в части системы генерации при вводе мощностей малых гидроэлектростанций в Республике Тыва с учетом надежности функционирования оборудования и неопределенности части исходной информации. В качестве исходной информации используются цены на применяемое оборудование, стоимость дизельного топлива в будущем времени и др. В данных исследованиях использован метод комплексного анализа эффективности технических решений автономной системы генерации от малой гидроэлектростанции, расположенной в Тоджинском районе Республики Тыва на основе системного подхода. Для адекватной оценки надежности функционирования гидроэнергетических агрегатов использован логико-вероятностный метод на основе кинетической теории дерева отказов. Метод позволяет учесть отказы используемого оборудования, а также незапланированные отключения агрегатов из-за дефицита гидроресурсов р. Большой Енисей (межень, пересыхание, частичное промерзание реки). Создание системы генерации от малой гидроэлектростанции для населенных пунктов Тоджинского района Республики Тыва позволяет покрыть нагрузку до 2 500 кВт, что способствует сокращению затрат на покупку, доставку и хранение дизельного топлива, при этом дизельные генераторы используются как резервные источники электроэнергии. Были рассмотрены 3 варианта состава малой гидроэлектростанции, отличающиеся количеством и установленной мощностью гидрогенерирующих агрегатов: 5x500 кВт; 4x630 кВт и 3x800 кВт. Таким образом, при помощи метода многокритериальной оптимизации из трех предлагаемых вариантов выбран оптимальный вариант системы генерации от малой гидроэлектростанции с тремя гидроагрегатами (мощностью 800 кВт каждый), учитывая надежность и неопределенность части исходной информации

Ключевые слова: малая гидроэлектростанция, функция принадлежности, эффективность технических решений, оценка надежности, дерево отказов

Для цитирования: Кривенко Т.В., Тремясов В.А., Кенден К.В., Кожемякин В.Е. Интеллектуальная поддержка принятия решения по вводу мощностей малой гидроэлектростанции в Республике Тыва // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 3. С. 527–538. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-527-538>. EDN: XDJFRS.

POWER ENGINEERING

Original article

Intelligent decision-making support system for the commissioning of a small hydroelectric power plant in the Republic of Tyva

Tatyana V. Krivenko¹, Vladimir A. Tretyasov², Kara-kys V. Kenden³,
Vyacheslav E. Kozhemyakin⁴

^{1,2}Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

³Tuvan State University, Kyzyl, Russia

⁴Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Abstract. This article develops the method for decision-making regarding the generating system during the commissioning of small hydroelectric power plants in the Republic of Tyva, taking into account the operational reliability of equipment and the uncertainty associated with a fraction of the initial information. The initial information includes such factors as the prices of equipment and projected expenses for diesel fuel. In this work, the method of complex analysis based on a systematic approach is used to evaluate the efficiency of technical solutions for an autonomous generation

system based on a small hydropower station located in the Todzhinsky district of the Republic of Tyva. For an adequate assessment of the operational reliability of hydropower units, a logical and probabilistic method based on the kinetic theory of fault tree was used. The method allows the failures of the used equipment, as well as unplanned shutdowns of units due to a shortage of water resources in the Great Yenisey (low water, overdriving, and frozen frost), to be taken into account. The development of a generation system based on a small hydroelectric power plant for the settlements in the Todzhinsky district of the Republic of Tyva offers a load of up to 2,500 kW, which helps to reduce the cost of purchasing, delivering, and storing diesel fuel, while diesel generators can be used as backup power sources. 3 scenarios of structuring a small hydroelectric power plant were considered that involved various numbers and total capacity of hydrogenating units: 5x500 kW, 4x630 kW, and 3x800 kW. Therefore, by using the multi-criteria optimization method, the optimal structure of the generating system based on a small hydroelectric power plant having three hydroelectric units (each characterized by a capacity of 800 kW) was selected from the three proposed options, taking into account the reliability and uncertainty of the initial information.

Keywords: small hydroelectric power station, membership function, efficiency of engineering solutions, reliability assessment, fault tree

For citation: Krivenko T.V., Tremyasov V.A., Kenden K.V., Kozhemyakin V.E. Intelligent decision-making support system for the commissioning of a small hydroelectric power plant in the Republic of Tyva. *iPolytech Journal*. 2023;27(3):527-538. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-527-538>. EDN: XDJFRS.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большинство задач оптимизации систем энергообеспечения с использованием гидроэлектростанций (ГЭС) решается с помощью основного критерия – приведенных затрат. Лучшим вариантом считается тот, который имеет меньшие затраты. В таких расчетах для всех рассматриваемых вариантов качество электроэнергии и надежность генерирующей системы с использованием ГЭС принимаются одинаковыми. Однако показатели качества электроэнергии и надежности не являются одинаковыми для сравниваемых вариантов, но могут находиться в допустимых границах.

Также задачи оптимизации таких энергетических объектов отличаются отсутствием части исходной информации (цена на используемое оборудование, стоимость дизельного топлива в будущем времени и другое), для учета которой в расчетах можно указать границы интервала значений от минимума до максимума.

Решение задач оптимизации генерирующих систем на основе ГЭС по многокритериальным моделям в условиях неопределенности начальной информации возможно на основе теории принятия решений⁵ [1]. Доступностью и возможностью получения исходной информации определяются используемый математический аппарат и способ решения.

Целью работы является разработка подхода для принятия решений в части системы генерации при вводе мощностей малых ГЭС (МГЭС) в Республике Тыва с учетом надежности.

ОЦЕНКА ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА РЕКИ БОЛЬШОЙ ЕНИСЕЙ

Чтобы оценить возможности развития малой гидрогенерации электроэнергии, а также определить перспективные места строительства гидроэлектростанций, необходимо оценить гидроэнергетический потенциал рек Республики Тыва.

В центральной части Республики при слиянии двух рек (Большой Енисей и Малый Енисей) образовался Верхний Енисей (рис. 1). Бассейн Большого Енисея перспективен для строительства малых ГЭС, поскольку он имеет большой гидроэнергетический потенциал и протекает в районах с децентрализованным электроснабжением (Тоджинский, Бий-Хемский районы).

Места строительства малых ГЭС выбирают с учетом подходящих условий. На рис. 1 видно, что наиболее подходящим расположением являются створы 5–10 (легкодоступные места строительства, близкое расположение населенных пунктов, а также дизельных электростанций (ДЭС)).

Для створов 5, 6 и 7 рассчитаны величины среднегодовых расходов воды Q , при выбранном значении напора (табл. 1) по методу линейного учета [2].

Из анализа гидроэнергетических ресурсов Республики Тыва следует, что параметры рек (скорость потока, глубина, секундный расход) являются переменными и зависящими от многих факторов (помесячное распределение осадков, температурный режим и др.). Также водотоки характеризуются большими сезон-

⁵Тремясов В.А., Криденко Т.В. Теория принятия решений в электроэнергетике: учеб. пособ. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2020. 126 с.

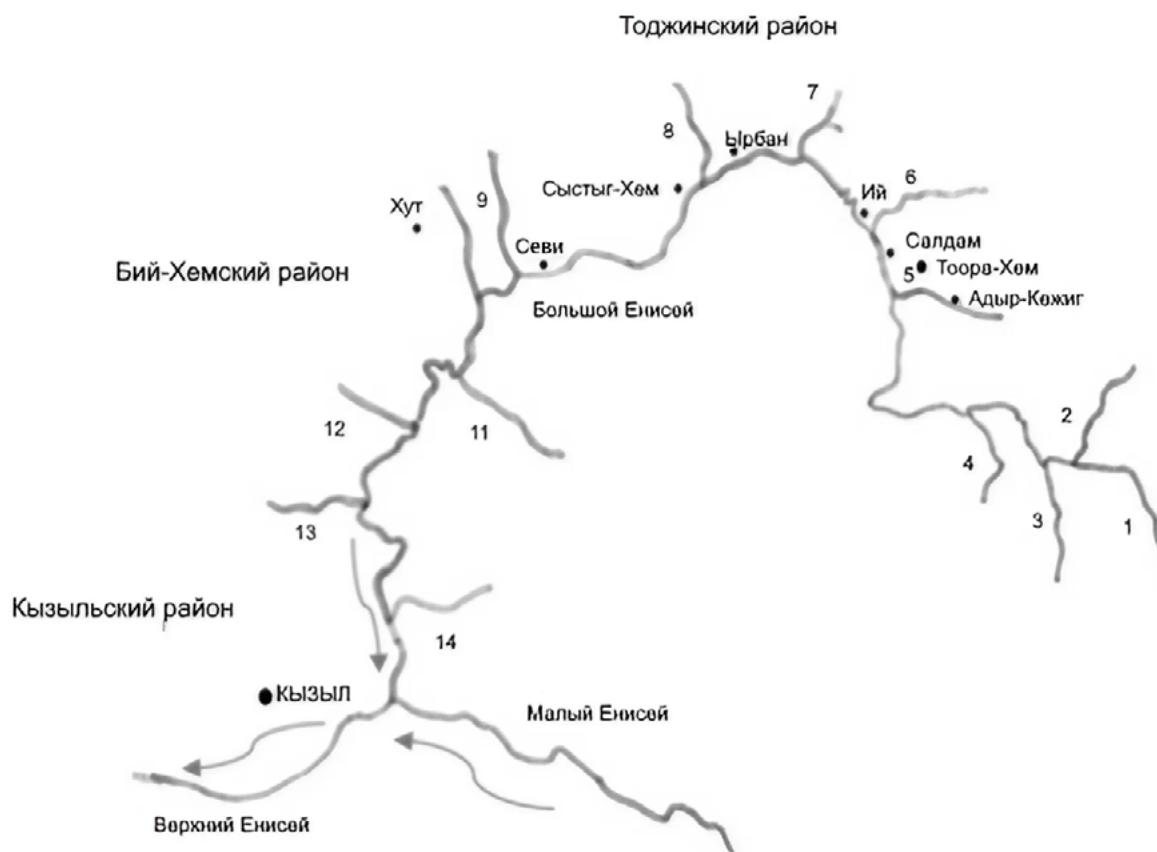


Рис. 1. Речная сеть бассейна реки Большой Енисей
Fig. 1. The river network of the Bolshoy Yenisei river basin

ными изменениями параметров. Так, скорость потока изменяется в диапазоне в 2–4 раза; глубина – в 1,3–2 раза; секундный расход – до 50 раз.

Закон их распределения близок к нормальному, а параметры рассеяния весьма стабильны. Коэффициент вариации скорости колеблется от 0,11 до 0, 25, а коэффициент вариации секундного расхода – от 0,15 до 0,3.

Таблица 1. Рассчитанные значения среднегодовых расходов воды в створах

Table 1. Calculated values of average annual water flow in sections

№ створа <i>i</i>	Створ	Модуль среднегодового стока <i>m</i> , л/(с·км ²)	Площадь водо-сборной поверхности бассейна <i>F</i> , км ²	Рассчитанный среднегодовой расход воды в створе, <i>Q_i</i> , м ³ /с
5	Тоора-Хем	12,25	2768	33,9
6	Ий	11,35	1031	11,7
7	Хамсара	12,35	4754	58,7

Целесообразно рассмотреть створ 5 для снабжения электроэнергией селений Тоджинского района, поскольку выбранный створ имеет малый расход воды и большие уклоны русла. Предлагается для создания напора применить отвод части стока реки. Отвод воды из реки возможно выполнить, использовав в качестве искусственного водовода левобережную протоку реки Большой Енисей. Водовод для создания хранения воды необходимо расширить и углубить, а также оградить дамбой для создания напора. Наиболее оптимальной будет схема с искусственно созданным водоемом, аккумулирующим объем воды. В соответствии с этим, сброс воды из реки осуществляется в бассейн, расположенный ниже по течению, который функционирует как водохранилище.

В часы потребления малой мощности МГЭС вода аккумулируется в специальном резервуаре для снижения пиковых нагрузок.

При описанной выше схеме напор составит 8–11 м. Эксплуатация описанной выше МГЭС способствует использованию малой пропускной способности водозаборного канала. При этом обеспечивается равномерная доставка воды в аккумулирующий водоем.

НЕЧЕТКАЯ МЕТОДИКА ПРИНЯТИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ГЕНЕРИРУЮЩИХ СИСТЕМ МАЛЫХ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Принятие технического решения – это проблема выбора стратегических решений, которая часто характеризуется множественными, конфликтующими и несоизмеримыми критериями. Критерии способны иметь количественный и качественный характер. Может существовать большое количество критериев и некоторые из них оказывают гораздо большее влияние на окончательную оценку. Такая оценка носит многоокритериальный анализ.

Принятие технического решения генерирующих систем МГЭС разделяется на два этапа: предварительное составление и отбор вариантов системы генерации от МГЭС и окончательная оценка с помощью теории нечетких множеств (ТНМ).

ТНМ преобразует различные критериальные показатели с помощью функции принадлежности (исчисляемые критерии), или составления таблицы принадлежностей экспертами или лицами, принимающими решение на этапе планирования (неисчисляемые критерии) [3, 4].

Многоокритериальные подходы способны решать вопросы, содержащие различные противоречивые оценки в форме интегрированной оценки (свертка критериальных свойств), преобразующие основные количественные или качественные показатели системы генерации от МГЭС в единый критерий эффективности.

Ниже представлены свертки многоокритериальных оценок [4]:

– средняя арифметическая линейная форма свертки

$$F_{\text{ср.А}}^* = \sum_{i=1}^n v_i e_{ij} \text{ при } \sum_{i=1}^n v_i = 1; \quad (1)$$

– мультипликативная форма

$$F_M^* = \prod_{i=1}^n (e_{ij})^{v_i} \text{ при } \sum_{i=1}^n v_i = 1; \quad (2)$$

– аддитивная форма свертки

$$F_A^* = \sqrt{\left[\sum_{i=1}^n v_i e_j \right]^2} \text{ при } \sum_{i=1}^n v_i = 1; \quad (3)$$

– средняя гармоническая форма свертки

$$F_\Gamma^* = \left(\sum_{i=1}^n \frac{v_i}{e_{ij}} \right)^{-1} \text{ при } \sum_{i=1}^n v_i = 1, \quad (4)$$

где F^* – оценочный функционал, представленный единственным комплексным (скалярным) критерием; e_{ij} – оценка i -го частного критерия в j -м варианте; n – число частных критериев оценки в рассматриваемой задаче; v_i – весомость частного критерия.

Выбор формы свертки определяется самостоятельно. Метод облегчает сравнение различных значений путем преобразования в нечеткие числа из диапазона [0:1].

В качестве оптимального варианта системы генерации от МГЭС выбирается тот, у которого достигается наибольшая оценка эффективности по выражениям (1)–(4).

Для формирования относительных оценок весомости критериальных свойств (КС) v_i систем генерации от МГЭС целесообразней использовать метод ранговой корреляции [5].

Определение эффективности e_i для j -го КС выполняется на основе рассчитанных показателей свойств у сравниваемых вариантов или посредством экспертной оценки.

Показатели, описывающие существенные свойства системы генерации от малой ГЭС, имеют разный характер и размерность. С помощью функции принадлежности необходимо устранить различную размерность путем нормирования.

Основной характеристикой нечетких множеств являются их функции принадлежности. На практике используются такие функции, как треугольные, трапециевидные, гауссовые, колоколообразные и некоторые другие типы функций [6]. Каждая из этих типов функций характеризуется рядом параметров, которые могут быть использованы для построения функции принадлежности конкретного нечеткого множества. Соответственно, тип функции принадлежности важен для конкретной задачи, поскольку он влияет на систему нечеткого вывода. Единственное условие, которому должна удовлетворять функция, это то, что она обязана варьироваться от 0 до 1.

Для определения значений параметров функции принадлежности конкретного нечеткого множества используются различные подходы построения [3]. В данной работе применен метод экспертных оценок, основанный

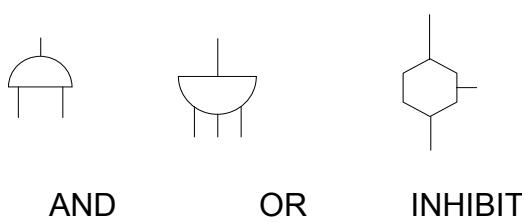
на определении и измерении численных значений КС.

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ ГЕНЕРАЦИИ ОТ МГЭС «ТООРА-ХЭМ»

Одной из проблем оценки надежности рассматриваемой системы электроснабжения от МГЭС является использование упрощенного подхода к такой оценке и получение завышенных величин показателей надежности. Для количественной оценки надежности малых гидроэлектростанций был предложен целый ряд методов [7–10], которые не учитывают отказ гидроагрегатов (ГА) по причине дефицита гидроресурсов. В [11,12] используется марковский подход, учитывающий влияние гидрологических условий на работу малых ГЭС. Однако при значительном числе элементов число линейных уравнений становится недопустимо большим.

Задача адекватного моделирования надежности системы генерации МГЭС, которая позволяет учитывать отказы используемого оборудования, а также брать в расчет незапланированные отключения ГА из-за дефицита гидроресурсов (межень, пересыхание, частичное промерзание реки), может быть решена с помощью кинетической теории дерева отказов (ДО) [13].

Анализ надежности системы генерации МГЭС с помощью кинетической теории ДО представляет собой графическую модель, позволяющую описывать отказы, которые могут возникнуть в системе, и то, как эти отказы взаимодействуют, вызывая отказ системы в целом. На рис. 2 указаны стандартные или статические операторы, позволяющие учесть отказы ГА, выключателей, трансформаторов и другого оборудования МГЭС.



*Рис. 2. Статические операторы дерева отказов
Fig. 2. Static operators of the fault tree*

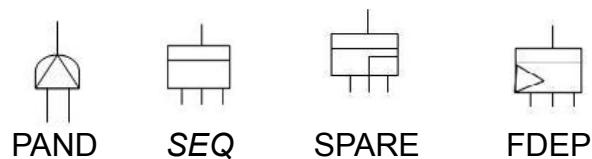
Операторы **AND** и **OR** позволяют учитывать исполнения входных событий, влияющих на возникновение выходного события.

Отказы ГА по причине отсутствия расположенной энергии водного потока реки позволяют

учесть статический оператор **INHIBIT** («Запрет» выходное событие возникает, если происходит входное событие, в то время как также происходит условное событие, отображаемое справа от оператора). Если происходит промерзание реки в зимний период, а также преобладает низкий уровень воды в реке в осенний или весенний период, работа ГА должна быть прекращена (полный отказ агрегата). Условное (ограничительное) событие определяется с помощью ряда наблюдений водотока за год в месте расположения МГЭС.

При анализе надежности в используемой модели не учитывается только изменение нагрузки системы как внешнего фактора окружающей среды в связи с тем, что интенсивность отказов ГА не зависит от нагрузки.

Моделировать работу ГА, выключателей и силовых трансформаторов системы генерации МГЭС и их взаимодействие, а также их функциональные зависимости или зависимости отказов, возможно с использованием динамических операторов (см. рис. 1).



*Рис. 3. Динамические операторы дерева отказов
Fig. 3. Dynamic operators of the fault tree*

Оператор **PAND** (приоритетное И) используют, если все входные события выполняются слева направо.

SEQ (строгая последовательность возникновения входных событий). Выходное событие возникнет только, если выходные события происходят в строго определенном порядке.

SPARE (состояние резерва) моделирует оборудование системы, которое может быть заменено одним или несколькими резервными элементами. Когда основное оборудование выходит из строя, активируется первый резервный элемент. По условию, запасные элементы упорядочены слева направо.

FDEP (функциональная зависимость) выходное событие является фиктивным и никогда не происходит, но когда происходит триггерное событие слева, все остальные входные события также происходят.

В кинетической теории динамические операторы требуют применения

дополнительных методов для их анализа [14–17]. Поскольку в автономной системе генерации МГЭС имеется небольшое количество оборудования, отказы которого необходимо учесть, для представления динамических операторов подходит марковская модель [18].

Количественная оценка кинетического ДО позволяет получить информацию о завершающем (конечном) событии – отказ системы генерации от МГЭС. К такому показателю относится коэффициент простоя системы ($K_{\text{п}}^*$):

$$K_{\text{п}(\text{cc})} \approx \sum_{i=1}^{N_c} (q_i^* + q_i^{*\text{оп}})$$

где q_i – вероятность существования i -го МСО; $q_i^{*\text{оп}}$ – вероятность существования i -го МСО при включении k -го динамического оператора; N_c – число минимальных сечений отказов в кинетическом ДО.

Информацией об основных событиях являются показатели надежности отдельных элементов системы генерации МГЭС: интенсивность отказов – λ_j , 1/год; интенсивность восстановлений – μ_j , 1/год, тогда коэффициент простоя элемента системы генерации от МГЭС при $t \rightarrow \infty$ и при $\lambda_j / \mu_j \ll 1$ равен

$$q_j(t) = \frac{\lambda_j}{\lambda_j + \mu_j} \approx \frac{\lambda_j}{\mu_j}. \quad (6)$$

Вероятность существования i -го МСО в кинетическом ДО определяется по формулам:

– при отсутствии в i -м МСО k -го динамического оператора

$$q_i^{*\text{оп}} = \prod_{k=1}^m q_k^{\text{оп}} \prod_{j=1}^n q_j; \quad (7)$$

– при включении в i -е МСО k -го динамического оператора

$$q_i^{*\tilde{i}} = \prod_{k=1}^m q_k^{\tilde{i}} \prod_{j=1}^n q_j. \quad (8)$$

Кинетическая теория ДО для расчета надежности системы генерации от МГЭС реализована с помощью интегрированной среды разработки программ Lazarus, использующая язык Free Pascal⁶. Программа позволяет определять минимальные сечения построенного ДО, дает информацию об основном событии каждого минимального сечения, а также информацию о каждом сечении дерева и о завершающем событии – отказ системы.

Произведем расчет надежности с учетом гидрологических условий Тоджинского района Республики Тыва для различных вариантов схемы выдачи мощности от МГЭС с помощью кинетической теории ДО. На рис. 2 приведена схема выдачи мощности от МГЭС для первого варианта (5хГА по 500 кВт).

МГЭС расположена на расстоянии 22 км от Большого Енисея на реке Бий-Хем. Передача мощности в населенные пункты выполняется на напряжении 35 кВ. Повышательная трансформаторная подстанция (ТП) 10/35 кВ с двумя трансформаторами по 1000 кВ·А установлена на МГЭС. Понизительная ТП размещена в селах. ДЭС является резервным источником питания при отказах в работе малых ГЭС.

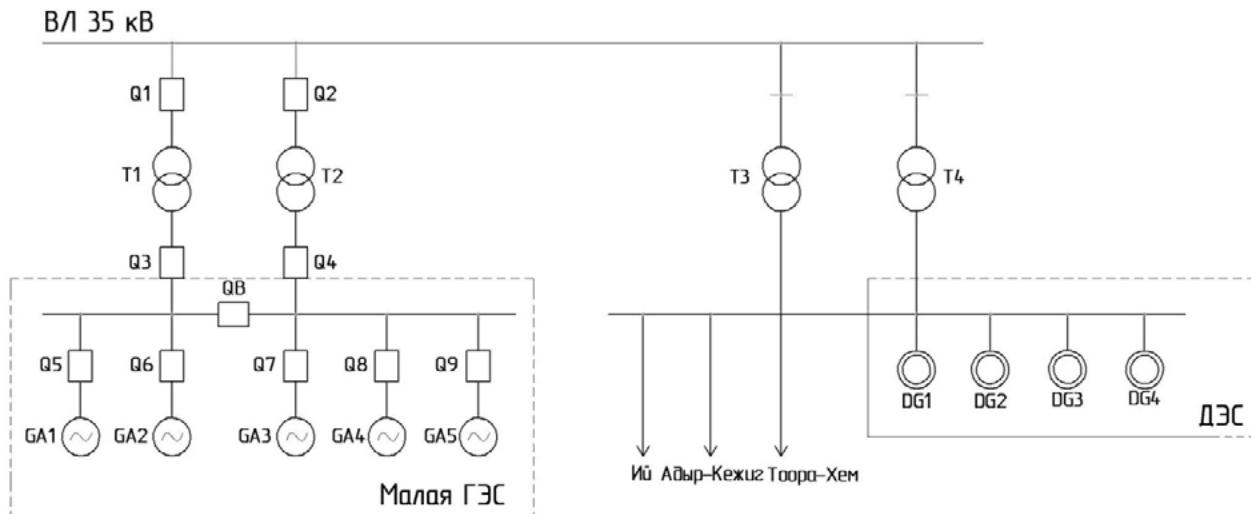


Рис. 4. Система генерации от малых гидроэлектростанций
Fig. 4. Small hydroelectric power plant generation system

ДО для варианта системы генерации от МГЭС с пятью ГА по 500 кВт приведено на рис. 5. Конечным событием ДО является «Отказ системы генерации МГЭС».

Показатели надежности оборудования МГЭС представлены в табл. 2 [19].

Таблица 2. Показатели надежности системы генерации малых гидроэлектростанций

Table 2. Reliability indicators of the small hydroelectric power plant generation system

Элемент системы	Интенсивность отказов λ , 1/год	Интенсивность восстановления μ , 1/год
Гидроагрегат	0,1	50
Трансформатор 35 кВ	0,012	125
Выключатель 10 кВ	0,030	769,23
Дизельные генераторы	0,025	66,7

Таблица 3. Результаты оценки надежности вариантов системы выдачи мощности от малых гидроэлектростанций

Table 3. Reliability assessment results of power output system variants of small hydropower plants

Показатель y_i	Мощность ГА N_j , кВт		
	500	630	800
Число агрегатов n^b_j	5	4	3
Коэффициент простоя, K_n	$2,789 \cdot 10^{-6}$	$2,790 \cdot 10^{-6}$	$3,566 \cdot 10^{-6}$

В табл. 3 приведены результаты оценки надежности различных вариантов системы выдачи мощности от МГЭС для сел Тоджинского района Республики Тыва.

ВЫБОР ТЕХНИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ СИСТЕМЫ ГЕНЕРАЦИИ ОТ МАЛОЙ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ «ТООРА-ХЕМ»

Электроснабжение поселков Тоорах-Хем, Адыр-Кежиг и Ий Тоджинского района Республики Тыва в настоящее время осуществляется за счет нескольких ДГ, расположенных в селении Тоора-Хем, общей мощностью 2400 кВ (рис. 6).

Предложены три варианта состава малой МГЭС с установленной мощностью не меньше вечернего зимнего максимума нагрузки потребителей поселков. На малой ГЭС предлагается установить пропеллерные турбины компании

«ИНСЭТ» [20]: пять ГА мощностью по 500 кВт, четыре ГА мощностью по 630 кВт и три ГА мощностью по 800 кВт.

Для технико-экономического расчета трех вариантов МГЭС исходными данными являются:

- 1) среднее потребление электрической энергии за год – $W_{\text{потреб}} = 8399 \text{ МВт}\cdot\text{ч}/\text{год}$;
- 2) средняя выработка электрической энергии за год с учетом надежности работы МГЭС, $W_{\text{МГЭС}}$, для трех вариантов, соответственно: 6359; 7424 и 7961 МВт·ч/год;
- 3) стоимость оборудования МГЭС, $C_{\text{МГЭС}}$, тыс. руб.

Определим приемлемый вариант состава МГЭС сверткой многокритериальных экспертных оценок в контексте неопределенности.

Группой компетентных лиц в области проектирования и эксплуатации ГЭС сформулирован массив показателей, на основе которых осуществляется сравнение альтернативных вариантов:

- 1) максимум экономичности технического решения МГЭС;
- 2) максимум надежности функционирования МГЭС;
- 3) минимальный срок строительства МГЭС;
- 4) минимум объема строительно-монтажных работ (СМР);
- 5) максимум технического совершенства МГЭС.

При вычислении весомостей КС необходимо придерживаться следующих условий:

По методу С.Н. Черникова [21], система неравенств (9) свертывается относительно v_5 . После шага III получим $v_5 \leq 1/5$.

Аналогичной процедурой свертывания

$$\begin{aligned} v_1 < v_2 + v_3, v_1 \geq v_3 + v_4, v_2 < v_3 + v_4, v_2 \geq v_3 + v_5, \\ v_3 \geq v_4 + v_5, v_1 + v_2 + v_3 + v_4 + v_5 = 1. \end{aligned} \quad (9)$$

системы неравенств (9) относительно v_4 , v_3 , v_2 и v_1 получаем следующее:

$$\begin{aligned} 0 < v_4 < 1/4; 1/6 < v_3 < 1/3; \\ 1/4 < v_2 < 1/2; 0 < v_1 < 5/12. \end{aligned} \quad (10)$$

Условиям (10) могут удовлетворять большое количество различных вариантов весомостей КС. Поэтому по (10) необходимо проверить

⁶Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018660562 Российской Федерации.

Программа расчета надежности автономного ВДК / Т.В. Кривенко, В.А. Тремясов; правообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет». № 2018618137; заявлено 30.07.2018; опубликовано 24.08.2018.

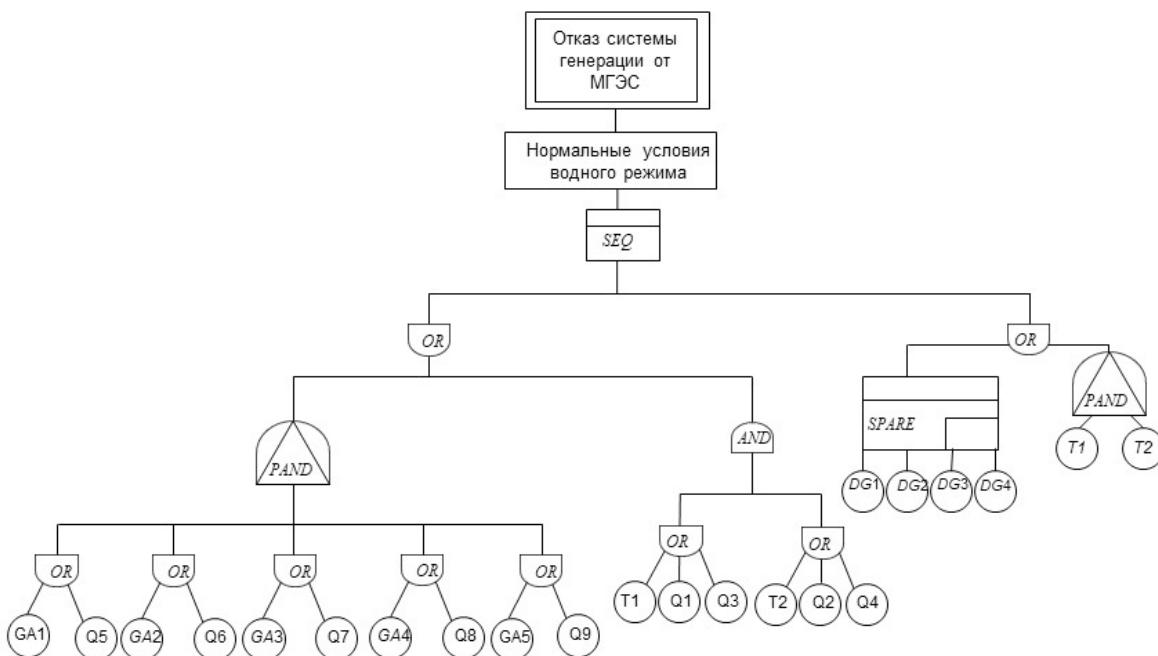


Рис. 5. Дерево отказов для I варианта схемы генерации от малой гидроэлектростанции (5xГА по 500 кВт)
Fig. 5. Fault tree for the I variant of the generation scheme from a small hydroelectric power plant (five 500 kW hydro units)

оценки, данные лицами, расчитывающими КС. Приняты три альтернативных варианта весовых коэффициентов, которые удовлетворяют условиям выше (табл. 4).

Таблица 4. Варианты весомостей КС
Table 4. Variants of weighting criteria properties

№ варианта	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5
I	0,1	0,2	0,2	0,25	0,25
II	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3
III	0,1	0,15	0,2	0,3	0,25

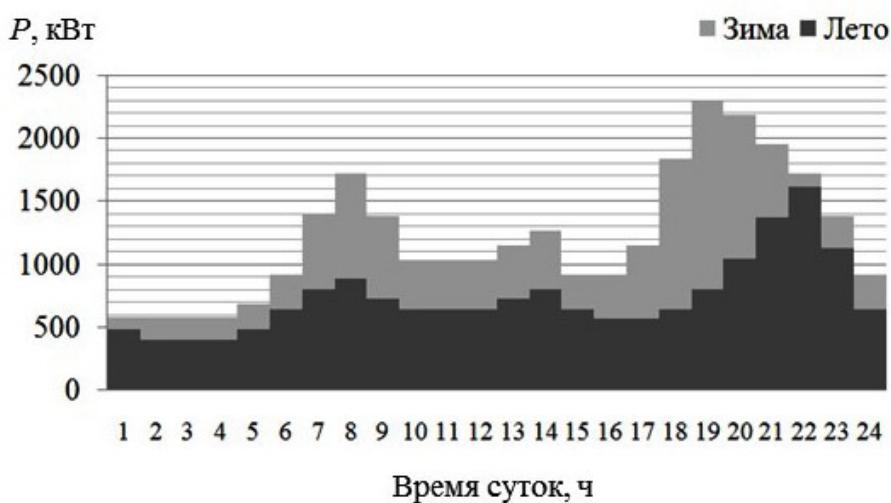


Рис. 6. Суточные графики суммарной нагрузки поселков
Fig. 6. Daily graphs of the total load of settlements

Лицами, выполняющими оценку альтернатив и взвешивание критериев, также определены технико-экономические показатели y_i МГЭС для пяти КС, назначены способы для их измерений и оценки e_{ik} (табл. 5):
 КС 1 – минимум приведенных затрат (3), тыс. руб/год;

КС 2 – минимум коэффициента простоя системы генерации МГЭС, K_n , о.е.;
 КС 3 – минимум срока строительства МГЭС, $T_{\text{ст}}$, лет;
 КС 4 – минимум объема СМР МГЭС $O_{\text{СМР}}$, m^3 ;
 КС 5 – минимум влияния МГЭС на окружающую среду, Q .

Таблица 5. Технико-экономические показатели y_i малых гидроэлектростанций**Table 5.** Technical and economic indicators y_i of small hydropower stations

Показатель	Мощность ГА N_j , кВт		
	500	630	800
Количество ГА n_j	5	4	3
Экономичность технического решения 3, тыс. руб/год	60 334	53 246	46 816
Надежность функционирования K_n	$2,789 \cdot 10^{-6}$	$2,790 \cdot 10^{-6}$	$3,565 \cdot 10^{-6}$
Срок строительства малой ГЭС $T_{\text{стп}}$, лет	1	1,5	1,75
Объем строительно-монтажных работ малой ГЭС $O_{\text{СМР}}$, м ³	7 200	7 560	7 500
Влияние малой ГЭС на окружающую среду Q , (место в порядке убывания КС)	3	2	1

Функция принадлежности $\mu(x)$ позволяет ранжировать критерии в порядке их важности. Наименее важным критериям присваивается минимальное значение, наиболее важным – максимальное. Вес критериев может быть рассчитан путем нормализации суммы баллов к единице. Таким образом, $\mu(x) = 1$ для оптимального варианта состава оборудования МГЭС и $\mu(x) = 0$ – для неоптимального варианта.

В работе выбор формы $\mu(x)$ выполнялся эксперты путем посредством установки правил поведения функции принадлежности [22] и реализовывался для групп факторов:

- показателей надежности (коэффициент простоя);
 - стоимостных показателей (приведенные затраты);
 - показателей СМР (сроки, объемы СМР).
- Функция принадлежности может быть пре-

образована следующим образом:

где X_i – критерий; X_{\min} , X_{\max} – наиболь-

$$\mu(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } X_i \leq X_{\min} \\ \frac{1}{1 + \left(\frac{X_i - X_{\min}}{\frac{X_{\max} - X_{\min}}{2}} \right)^2}, & \text{если } X_i > X_{\min} \end{cases} \quad (11)$$

шее и наименьшее значения критерия. Нормирование частных критериев по (11) выполнялось с помощью компьютерной программы Fuzzi, разработанной для сравнения вариантов на основе ТНМ.

Расчет численных значений $\mu(x)$ для каждого из 5 критериев к оптимальным приведен в табл. 6. А также приведены оценки эффективности вариантов, расчет которых производился по формулам (1), (2) и (4) для ф1, ф2, ф3, соответственно.

Вычисления показывают, что третий вариант состава малой ГЭС является оптимальным, в его составе три гидроагрегата мощностью по 800 кВт каждый. Для первого и второго вариантов оценки ф1, ф2, ф3, ниже, чем для третьего варианта, что свидетельствует о недопустимости принятия вариантов с наихудшими оценками частных критериев эффективности свойств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из трех предлагаемых вариантов состава МГЭС выбран оптимальный для селений Тоджинского района Республики Тыва посредством метода многокритериальной оптимизации с учетом надежности работы оборудования МГЭС и неопределенности части исходной информации. Результаты можно представить следующим образом:

- оптимальным является состав МГЭС с тремя ГА мощностью 800 кВ каждый;

Таблица 6. Расчет обобщенного критерия для каждого j -го варианта системы генерации малых гидроэлектростанций**Table 6.** Calculation of the generalized criterion for each j -th variant of the small hydropower plant generation system

Вариант	Нормированные значения частных критериев μ_x					Оценки j			Оценки j	
	1	2	3	4	5	I	II	III	j	j
1	0,94	1	1	1	0,33	0,83	0,79	0,83	0,75	0,66
2	0,97	1	0,88	0,99	0,67	0,89	0,87	0,89	0,88	0,86
3	1	1	0,77	0,99	1	0,95	0,95	0,95	0,95	0,94

– для оптимального варианта приведенные затраты составляют 46 816 тыс. руб/год, что гораздо меньше, чем у двух других предложенных вариантов;

– из кинетической теории ДО K_p для третьего варианта равен $3,565 \cdot 10^{-6}$, что говорит о достаточно высокой надежности;

– срок строительства системы генерации МГЭС с 3 ГАх800 кВ составляет 1,75 лет;

– объем строительно-монтажных работ для оптимального варианта равен 7500 м³.

При реализации предложенного стро-

ительства малой ГЭС для обеспечения электроэнергией селений Тоджинского района Республики Тыва достигаются следующие результаты:

– ДЭС будет полностью заменена на малую ГЭС, покрывающую нагрузку до 2500 кВт;

– ДГ будет применяться в качестве вспомогательного источника питания при аварийных ситуациях на малой ГЭС или в случае увеличения нагрузки более 2500 кВт;

– уменьшатся годовые затраты на покупку и доставку топлива для ДГ.

Список источников

1. Долгов П.П., Щавелев Д.С. Многокритериальные задачи в гидроэнергетике и водном хозяйстве // Труды ЛПИ им. М.И. Калинина. 1981. № 375. С. 9–12.
2. Котельников В.И., Чупикова С.А. Расчет гидроэнергетического потенциала рек на территории Тывы с помощью ГИС // Международный журнал экспериментального образования. 2015. № 3-3. С. 455–459.
3. Kovalenko I.V. Tretyasov V.A., Belov V.G. Intelligent control support for reconstruction of electrical circuits of station and substations // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1889. Iss 4. P. 042048. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1889/4/042048>.
4. Тремясов В.А., Григорьева О.А., Кенден К.В. Многокритериальный подход к выбору площадок для размещения солнечно-дизельных систем генерации // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 5. С. 601–610. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-601-610>.
5. Азгальдов Г.Г., Райхман Э.П. О квалиметрии. М.: Изд-во стандартов, 1973. 282 с.
6. Ismibayli R., Guliyeva P., Ahmadli N. On the construction of membership functions for fuzzy sets associated with // RT&A. 2022. Vol. 17. Iss. 4. P. 367–371.
7. Тремясов В.А., Кенден К.В., Кривенко Т.В. Оценка надежности системы генерации малых ГЭС в изолированных энергосистемах // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: сб. тр. IIIV междунар. науч.-техн. конф. (г. Благовещенск, 27 мая 2015 г. – 29 мая 2012 г.). Благовещенск: АмГУ, 2015. С. 143–147. EDN: VAILDL.
8. Majeed A.R., Sadiq N.M. Availability & Reliability Evaluation of Dokan Hydro Power Station // IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America. 2006. <http://doi.org/10.1109/TDCLA.2006.311494>.
9. Sapkota D., Bajracharya T.R., Luintel M.C. Reliability and availability evaluation of Sunkoshi hydro power station // Proceedings of IOE graduate Conference. 2014. Vol. 2. P. 197–202.
10. Sharma R., Bhatrai N. Reliability based maintenance in hydropower: a case study of Bijaypur-i small hydropower plant // Journal of innovations in engineering education. 2020. Vol. 3. Iss. 1. P. 123–130. <http://doi.org/10.3126/jiee.v3i1.34333>.
11. Ale T.O., Olufeagba B.J., Oyeleye M.O. A Markov model of generator performance at the Kainji hydro-power station in Nigeria // International Journal of Electrical and Computer Engineering. 2023. Vol. 13. Iss. 4. P. 3585–3592. <http://doi.org/10.11591/ijecce.v13i4.pp3585-3592>.
12. Кенден К.В. Оценка надежности системы генерации малых ГЭС на примере Тоджинского района // Вестник Тувинского государственного университета. Технические и физико-математические науки. 2020. № 2. С. 31–40. <https://doi.org/10.24411/2221-0458-2020-10032>. EDN: UCAJIC.
13. Тремясов В.А., Кривенко Т.В. Анализ надежности автономного гибридного энергокомплекса на основе возобновляемых источников энергии // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2017. № 1. С. 43–51.
14. Huang Chin-Yu, Chang Yung-Ruei. An improved decomposition scheme for assessing the reliability of embedded systems by using dynamic fault trees // Reliability Engineering & System Safety. 2007. Vol. 92. Iss. 10. P. 1403–1412. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2006.09.008>.
15. Amari S., Dill G., Howald E. A new approach to solve dynamic fault trees // Annual Reliability and Maintainability Symposium (Tampa, 27–30 January 2003). Tampa: IEEE, 2003. P. 374–379.
16. Bobbio A., Portinale L., Minichino M., Ciancamerla E. Improving the analysis of dependable systems by mapping fault trees into Bayesian networks // Reliability Engineering & System Safety. 2001. Vol. 71. Iss. 3. P. 249–260. [http://doi.org/10.1016/S0951-8320\(00\)00077-6](http://doi.org/10.1016/S0951-8320(00)00077-6).
17. Rao K.D., Gopika V., Rao V.V.S.S., Kushwaha H.S., Verma A.K., Srividya A. Dynamic fault tree analysis using Monte Carlo simulation in probabilistic safety assessment // Reliability Engineering & System Safety. 2009. Vol. 94. Iss. 4. P. 872–883. <http://doi.org/10.1016/j.ress.2008.09.007>.
18. Эндрени Дж. Моделирование при расчетах надежности в электроэнергетических системах / пер. с англ.; ред. Ю.Н. Руденко. М.: Энергоатомиздат, 1983. 336 с.
19. Тремясов В.А., Кенден К.В. Фотоэлектрические и гидроэнергетические установки в системах автономного электроснабжения: монография. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2017. 208 с.
20. Бляшко Я.И. Опыт МНТО «ИНСЭТ» по созданию и эксплуатации оборудования для микро- и МГЭС // Малая энер-

- гетика. 2004. № 1. С. 28–33.
21. Черников С.Н. Метод свертывания систем линейных неравенств // Успехи математических наук. 1964. Т. 19. № 5. С. 149–156.
22. Aida-Zade K.R., Guliyeva P.S., Ismibayli R.E. Analysis of the methods for constructing membership functions using expert data // Recent Developments and the New Directions of Research, Foundations, and Applications. Studies in Fuzziness and Soft Computing / eds. S.N. Shahbazova, A.M. Abbasov, V. Kreinovich, J. Kacprzyk, I.Z. Batyrshin. Cham: Springer, 2023. Vol 422. P. 361–365. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20153-0_29.

References

1. Dolgov P.P., Shchavelev D.S. Multicriteria problems in hydropower engineering and water management. In: *Trudy Leningradskogo politehnicheskogo instituta imeni M. I. Kalinina*. 1981;375:9-12. (In Russ.).
2. Kotel'nikov V.I., Chupikova S.A. GIS-based calculation of the hydropower potential of rivers in the territory of Tyva Republic. *Mezhdunarodnyj zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya = International Journal of experimental education*. 2015;3-3:455-459. (In Russ.).
3. Kovalenko I.V. Tremyasov V.A., Belov V.G. Intelligent control support for reconstruction of electrical circuits of station and substations. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1889(4):042048. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1889/4/042048>.
4. Tremyasov V.A., Grigorieva O.A., Kenden K.V. Multi-criteria approach to selecting sites for solar-diesel hybrid systems. *iPolytech Journal*. 2021;25(5):601-610. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-601-610>.
5. Azgaldov G.G., Reichman E.P. *On qualimetry*. Moscow: Izdatel'stvo standartov; 1973, 282 p. (In Russ.).
6. Ismibayli R., Guliyeva P., Ahmadli N. On the construction of membership functions for fuzzy sets associated with. *RT&A*. 2022;17(4):367-371.
7. Tremyasov V.A., Candyen K.V., Krivenko T.V. Articles poll reliability small hydroelectric generation system in isolated power supply system. In: *Energetika: upravlenie, kachestvo i effektivnost' ispol'zovaniya energoresursov: sbornik trudov IIIV mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii = Energy: management, quality and efficiency of energy resources use: collected works of the 8th international scientific and technical conference*. 27 May 2015 – 29 May 2012, Blagoveshchensk. Blagoveshchensk: Amur State University; 2015, p. 143-147. (In Russ.). EDN: VAILDL.
8. Majeed A.R., Sadiq N.M. Availability & reliability evaluation of Dokan hydro power station. In: *IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America*. 2006. <http://dx.doi.org/10.1109/TDCLA.2006.311494>.
9. Sapkota D., Bajracharya T.R., Luintel M.C. Reliability and availability evaluation of Sunkoshi hydro power station. In: *Proceedings of IOE graduate Conference*. 2014;2:197-202.
10. Sharma R., Bhatrai N. Reliability based maintenance in hydropower: a case study of Bijaypur-i small hydropower plant. *Journal of innovations in engineering education*. 2020;3(1):123-130. <http://doi.org/10.3126/jiee.v3i1.34333>.
11. Ale T.O., Olufeagba B.J., Oyeleye M.O. A Markov model of generator performance at the Kainji hydro-power station in Nigeria // *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2023. Vol. 13. Iss. 4. P. 3585–3592. <http://doi.org/10.11591/ijeee.v13i4.pp3585-3592>.
12. Kenden K.V. Estimation of reliability of small hydro power generation system (based on a sample of the Tozhu district). *Vestnik Tuvinskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie i fiziko-matematicheskie nauki*. 2020;2:31-40. <https://doi.org/10.24411/2221-0458-2020-10032>. EDN: UCAJIC.
13. Tremyasov V.A., Krivenko T.V. Reliability analysis of an autonomous hybrid power system based on renewable energy sources. *Elektrooborudovanie: ekspluataciya i remont*. 2017;1:43-51. (In Russ.).
14. Huang Chin-Yu, Chang Yung-Ruei. An improved decomposition scheme for assessing the reliability of embedded systems by using dynamic fault trees. *Reliability Engineering & System Safety*. 2007;92(10):1403-1412. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2006.09.008>.
15. Amari S., Dill G., Howald E. A new approach to solve dynamic fault trees. In: *Annual Reliability and Maintainability Symposium* 27–30 January 2003, Tampa. Tampa: IEEE; 2003, p. 374-379.
16. Bobbio A., Portinale L., Minichino M., Ciancamerla E. Improving the analysis of dependable systems by mapping fault trees into Bayesian networks. *Reliability Engineering & System Safety*. 2001;71(3):249-260. [http://doi.org/10.1016/S0951-8320\(00\)00077-6](http://doi.org/10.1016/S0951-8320(00)00077-6).
17. Rao K.D., Gopika V., Rao V.V.S.S., Kushwaha H.S., Verma A.K., Srividya A. Dynamic fault tree analysis using Monte Carlo simulation in probabilistic safety assessment. *Reliability Engineering & System Safety*. 2009;94(4):872-883. <http://doi.org/10.1016/j.ress.2008.09.007>.
18. Endreny J. Reliability modelling in electric power systems, 1983, 336 p. (Russ. ed.: *Modelirovaniye pri raschetah nadezhnosti v elektroenergeticheskikh sistemakh*. Moscow, Energoatomizdat; 1983, 336 p.)
19. Tremyasov V.A., Kenden K.V. *Photovoltaic and hydropower installations in stand-alone power supply systems: monograph*. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; 208 p. (In Russ.).
20. Blyashko Ya.I. Experience of the International Scientific and Technical Society "INSET" in the development and operation of equipment for micro- and small hydroelectric power stations. *Malaya energetika*. 2004;1:28-33. (In Russ.).
21. Chernikov S.N. A convolution method for the systems of linear inequalities. *Uspekhi matematicheskikh nauk*. 1964;19(5):149-156. (In Russ.).
22. Aida-Zade K.R., Guliyeva P.S., Ismibayli R.E. Analysis of the methods for constructing membership functions using expert data. In: Shahbazova S.N., Abbasov A.M., Kreinovich V., Kacprzyk J., Batyrshin I.Z. (eds.). *Recent Developments and the New Directions of Research, Foundations, and Applications. Studies in Fuzziness and Soft Computing*. Cham: Springer; 2023, vol 422, p. 361-365. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20153-0_29.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Кривенко Татьяна Витальевна,
к.т.н., доцент,
доцент кафедры «Электроэнергетика»,
Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, Россия
✉ tkrivenko@sfu-kras.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9458-047X>

Tatyana V. Krivenko,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Electric Power
Engineering, Siberian Federal University,
79, Svobodny pr., Krasnoyarsk 660041, Russia
✉ tkrivenko@sfu-kras.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9458-047X>

Тремясов Владимир Анатольевич,
к.т.н., доцент,
доцент кафедры «Электроэнергетика»,
Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, Россия
emf_tva@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8629-9549>

Vladimir A. Tremyasov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Electric Power
Engineering, Siberian Federal University,
79, Svobodny pr., Krasnoyarsk 660041, Russia
emf_tva@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8629-9549>

Кенден Карапыс Вадимовна,
к.т.н., доцент кафедры
«Общественные инженерные дисциплины»,
Тувинский государственный университет,
667000, г. Кызыл,
ул. Ленина, 36, Россия
kuca08@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0975-3303>

Kara-kys V. Kenden,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of General Engineering Disciplines,
Tuvan State University,
36 Lenin St., Kyzyl 667000, Russia
kuca08@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0975-3303>

Кожемякин Вячеслав Евгеньевич,
аспирант,
Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, Россия
slava-kozhemyakin@mail.ru

Vyacheslav E. Kozhemyakin,
Postgraduate Student,
Siberian Federal University,
79 Svobodny pr., Krasnoyarsk 660041, Russia
slava-kozhemyakin@mail.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 18.08.2023 г.; одобрена после рецензирования 06.09.2023 г.; принята к публикации 10.09.2023 г.

Information about the article

The article was submitted 18.08.2023; approved after reviewing 06.09.2023; accepted for publication 10.09.2023.

Научная статья

УДК 621.311.26: 621.311.68

EDN: LNPHGL

DOI: 10.21285/1814-3520-2023-3-539-551

ЭНЕРГЕТИКА



Идентификация параметров моделей фотоэлектрических преобразователей

С.Г. Обухов¹✉, И.А. Плотников², Г.Н. Климова³¹⁻³Томский национальный исследовательский политехнический университет, г. Томск, Россия

Резюме. Цель – разработка простого и эффективного способа идентификации параметров моделей фотоэлектрических преобразователей, доступного для широкого практического применения. В качестве базовой модели фотоэлектрического преобразователя принята экспоненциальная модель с одним диодом и пятью параметрами, которая обеспечивает простую интеграцию в популярный математический пакет схемотехнического моделирования MatLab/Simulink. Для идентификации параметров моделей фотоэлектрических преобразователей использовался оригинальный метод, основанный на поиске минимума среднеквадратичной ошибки между модельными и экспериментальными вольт-амперными характеристиками. Апробация предлагаемого метода проведена путем определения параметров моделей промышленных фотоэлектрических модулей, изготовленных по разным технологиям: тонкопленочного Shell ST40, монокристаллического Shell SP70 и поликристаллического Kyocera KC200GT. Разработана методика построения математических моделей фотоэлектрических преобразователей, позволяющая воспроизводить их электрические характеристики, которая легко реализуется в популярном табличном процессоре Excel с установленной надстройкой «Поиск решения». Установлено, что предлагаемый способ идентификации параметров моделей фотопреобразователей является универсальным и может использоваться для построения моделей фотоэлектрических модулей и солнечных элементов широкой номенклатуры. Показано, что модельные вольт-амперные характеристики рассматриваемых фотоэлектрических модулей хорошо согласуются с экспериментальными характеристиками в широком диапазоне изменения температуры и освещенности, соответствующих реальным условиям их эксплуатации. Показано, что математические модели фотоэлектрических преобразователей, параметры которых определены по предлагаемому методу идентификации, обеспечивают более высокую точность в отображении их электрических характеристик в сравнении с моделями, параметры которых идентифицированы с помощью других известных аналитических и численных методов. Таким образом, в результате проведенных исследований разработан простой и эффективный способ построения математических моделей фотоэлектрических преобразователей, не требующий применения программирования и разработки специализированных численных алгоритмов. Это позволяет использовать его для решения множества технических задач, связанных с проектированием и эксплуатацией фотоэлектрических систем.

Ключевые слова: фотоэлектрический преобразователь, математическая модель, идентификация параметров, эквивалентная схема замещения, вольт-амперная характеристика

Для цитирования: Обухов С.Г., Плотников И.А., Климова Г.Н. Идентификация параметров моделей фотоэлектрических преобразователей // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 3. С. 539–551. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-539-551>. EDN: LNPHGL.

POWER ENGINEERING

Original article

Parameter identification of photovoltaic converter models

Sergey G. Obukhov¹✉, Igor A. Plotnikov², Galina N. Klimova³¹⁻³National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Abstract. The work aims to develop a simple and effective method for identifying the parameters of photovoltaic converter (PV-cell) models for their wide practical application. An exponential model having one diode and five parameters is adopted as the basic model of the photovoltaic converter to facilitate its easy integration into MatLab/Simulink simulation software. To identify the parameters of models of photovoltaic converters, an original method based on finding the minimum of the root-mean-square error between model and experimental volt-ampere characteristics was used. The effectiveness of the method was confirmed by determining the parameters of different models of photovoltaic modules based on various technologies: thin-

film Shell ST40, monocrystalline Shell SP70, and polycrystalline Kyocera KC200GT. A developed technique for constructing mathematical models of photovoltaic converters in order to reproduce their electrical characteristics is presented. The solution is easily implemented in Excel spreadsheet software with the “Search for Solution” add-on installed. The proposed universal method for identifying the parameters of photoconverter models can be used to build models of a wide range of photovoltaic modules and solar cells. The model current-voltage characteristics of the considered photovoltaic modules are shown to be in good agreement with experimental characteristics across a wide range of temperature and insolation conditions corresponding to their actual operation. Higher accuracy is achieved when using the proposed identification method to determine the electrical parameters of mathematical models of photovoltaic converters than when using other well-known analytical and numerical methods. The result is a simple and effective method for constructing mathematical models of photovoltaic converters, which does not require the use of programming or the development of specialized numerical algorithms, allowing it to be used to solve many technical problems related to the design and operation of photovoltaic systems.

Keywords: photovoltaic converter, mathematical model, parameter identification, equivalent circuit, volt-ampere characteristic

For citation: Obukhov S.G., Plotnikov I.A., Klimova G.N. Parameter identification of photovoltaic converter models. *iPolytech Journal*. 2023;27(3):539-551. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-539-551>. EDN: LNPHGL.

ВВЕДЕНИЕ

В течение последних 10 лет фотоэлектрические станции (ФЭС) являются самым быстрорастущим источником выработки электроэнергии в мире. По данным последнего отчета Всемирной сети по возобновляемой энергетической политике XXI в. (REN21) установленная мощность ФЭС в 2021 г. достигла отметки в 942 ГВт, добавив 175 ГВт новых мощностей⁴. Очевидно, что уже в прошедшем 2022 г. фотоэнергетика успешно преодолела знаковый рубеж в 1 ТВт установленной мощности генерирующего оборудования. Весомыми стимулами к дальнейшему развитию рынка солнечной энергетики являются перспективные технологии электромобильного транспорта и производство «зеленого» водорода, что гарантирует высокую востребованность фотоэнергетики в будущем.

Основным компонентом ФЭС является солнечная батарея, состоящая из определенного набора фотоэлектрических модулей (ФМ), моделирование режимов которых в реальных условиях эксплуатации обеспечивает решение важных технических задач: выбор основных компонентов ФЭС, прогноз и повышение производительности, оптимизацию рабочих режимов и др. Для исследований режимов работы фотоэлектрических систем наибольшее распространение получили математические модели фотопреобразователей (ФП), построенные на основе эквивалентных электрических схем замещения. В зависимости от степени детализации описываемых физических процессов к данному классу моделей относятся модели с одним диодом (Single

Diode Model – SDM) [1, 2], модель с двумя диодами (Double Diode Model – DDM) [3, 4] и модель с тремя диодами (Triple Diode Model – TDM) [5]. Все модели ФП строятся на основе простейших элементов электротехники: источники тока, диоды и резисторы, однако количество элементов, а, соответственно, и число параметров моделей будут различными. Если для построения простейшей SDM-модели ФП необходимо определить 5 параметров, то более сложные DDM и TDM-модели требуют определения 7 и 9 параметров, соответственно.

Следует отметить, что применение более сложных моделей ФП не гарантирует повышения их точности, так как адекватность моделирования зависит не только от типа модели, а обусловлена, главным образом, достоверностью определения ее параметров. Проблема точной оценки параметров моделей ФП вызвана тем, что характеристическое уравнение вольт-амперной характеристики (ВАХ), связывающее параметры модели с током и напряжением ФП, является трансцендентным и нелинейным, при этом несколько параметров модели являются зависимыми от радиации и температуры. Высокая сложность и в то же время чрезвычайная важность научной проблемы точного определения параметров моделей ФП привели к созданию отдельного направления исследований в солнечной энергетике – идентификации параметров моделей ФМ и солнечных элементов (СЭ). Огромное количество статей по данной тематике, ежегодно публикуемых в периодических изданиях, свидетельствуют о том, что научная проблема идентификации парам-

⁴Renewables 2022 Global Status Report. Paris: REN21 Secretariat, 2022. 312 p. [Электронный ресурс]. URL: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022_Full_Report.pdf (23.03.2022).

метров моделей ФП остается актуальной и не имеет на сегодняшний день законченного решения.

Подробный обзор исследовательских статей по решению проблемы идентификации параметров моделей ФМ и СЭ приведен в работах [5–7]. Проведенный анализ опубликованных результатов исследований показывает, что для идентификации параметров моделей ФП применяются два основных подхода: на основе аналитических и численных методов расчета. Достоинствами аналитических методов является простота практической реализации, но необходимость применения упрощающих допущений неизбежно приводит к снижению точности моделей. Для реализации численных методов расчета используют как классические математические алгоритмы решения систем нелинейных уравнений: Ньютона–Рафсона, Левенберга–Марквардта и др., так и разнообразные метаэвристические алгоритмы. Достоинствами современных эволюционных алгоритмов является возможность многомерной оптимизации, некритичность к начальным условиям и высокое быстродействие. Однако идентификация параметров моделей ФП с помощью метаэвристических алгоритмов предопределяет необходимость владения программированием, а во многих случаях и специализированным программным обеспечением, что существенно ограничивает возможность их практического применения для большинства конечных пользователей.

Целью настоящих исследований является разработка простого и эффективного способа идентификации параметров моделей ФП, доступного для широкого практического применения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Модель фотоэлектрического преобразователя. Для проведения исследований в данной работе использовалась модель ФП, построенная на основе эквивалентной схемы замещения с одним диодом, рис. 1. Выбор SDM-модели обоснован тем, что при корректном выборе ее параметров она обеспечивает высокую точность моделирования электрических характеристик ФП при изменении уровней радиации и температуры [1, 8]. Кроме того, именно на основе SDM-модели реализован встроенный блок PV Array библиотеки Simscape в популярном математическом пакете MatLab/Simulink, который является

одним из самых популярных инструментов в научных исследованиях. Соответственно, полученные с помощью предлагаемого способа параметры моделей ФП могут быть легко интегрированы в данный программный комплекс.

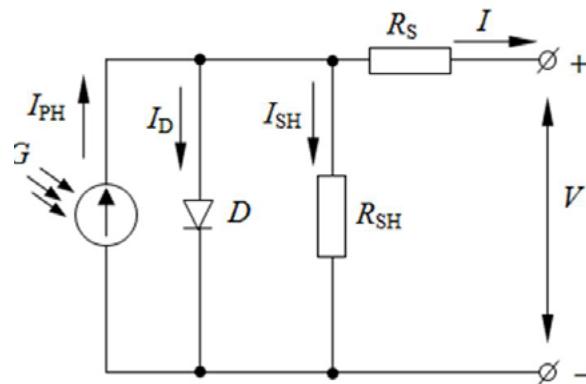


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения фотоэлектрического преобразователя
Fig. 1. Equivalent photoelectric converter replacement circuit

Вольт-амперная характеристика ФМ, состоящего из N_S последовательно соединенных СЭ, описывается уравнением:

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{q \cdot (V + I \cdot R_S)}{N_S \cdot A \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_S}{R_{sh}}, \quad (1)$$

где I , V – ток и напряжение на клеммах ФМ, А, В; I_{ph} – ток, генерируемый под действием солнечного излучения, или фототок, А; I_0 – обратный ток насыщения диода, А; q – заряд электрона, Кл; R_S , R_{sh} – последовательное и шунтирующее сопротивления ФМ, Ом; A – коэффициент идеальности диода; k – постоянная Больцмана, Дж/К; T – текущая рабочая температура ФП, К.

Выражение (1) определяет вольт-амперную характеристику ФМ, содержит пять неизвестных параметров (I_{ph} , I_0 , A , R_S , R_{sh}) и не имеет прямого аналитического решения.

Непосредственное влияние на ВАХ оказывают спектр и интенсивность солнечного излучения, температура, а также параметры самого ФМ, которые определяются его типом и конструктивным исполнением. Часть параметров ФМ можно определить с использованием данных технической спецификации, предоставляемой производителем ФМ, и полученных при стандартных условиях тестирования (Standard Testing Conditions – STC): интенсивность излучения $G_{STC} = 1000 \text{ Вт}/\text{м}^2$,

$$I_{\text{PH}} = \left[\frac{R_{\text{SH}} + R_s}{R_{\text{SH}}} I_{\text{SC_STC}} + k_1 \cdot (T - T_{\text{STC}}) \right] \cdot \frac{G}{G_{\text{STC}}} \quad (2)$$

$$I_0 = \frac{I_{\text{SC_STC}} + k_1 \cdot (T - T_{\text{STC}})}{\exp\left(\frac{V_{\text{OC_STC}} + k_v \cdot (T - T_{\text{STC}})}{A \cdot V_T}\right) - 1}, \quad (3)$$

солнечный спектр АМ – 1,5, температура $T_{\text{STC}} = 25^\circ\text{C}$. Для определения фототока и обратного тока насыщения диода можно использовать следующие выражения:

где $I_{\text{SC_STC}}$, $V_{\text{OC_STC}}$ – ток короткого замыкания (КЗ) и напряжение холостого хода (ХХ) ФМ при STC, A, B; G – интенсивность солнечного излучения, Вт/м²; k_1 , k_v – температурные коэффициенты тока КЗ и напряжения ХХ, А/К, В/К;

$$V_T = \frac{N_s \cdot k \cdot T}{q} \quad \text{– тепловое напряжение.}$$

Физическая природа R_{SH} определяется дефектами производства СЭ, создающими альтернативные каналы протекания светового тока. Особенно заметное влияние на форму ВАХ параллельное сопротивление оказывает при низкой интенсивности солнечного излучения, когда величина светового тока небольшая. Величина R_s определяется типом и геометрией СЭ и зависит от эмиттерного и контактных сопротивлений. Последовательное сопротивление практически не влияет на характеристики ФМ при разомкнутой цепи, однако определяет форму ВАХ вблизи точки напряжения холостого хода. Величина A характеризует качество $p-n$ -перехода и говорит о виде рекомбинации в СЭ. При наличии обычных механизмов рекомбинации $A = 1$, однако в реальных СЭ существуют и другие механизмы рекомбинации, вследствие чего для разных типов СЭ величина A может изменяться в достаточно широком диапазоне от 1 до 5 [9], для промышленных кремниевых ФП практический диапазон варьирования A составляет от 1 до 2 [10]. Вследствие того, что прямое измерение A, R_s и R_{SH} невозможно, задача точного определения их значений является основной целью идентификации параметров модели ФМ.

Краткий обзор методов идентификации параметров моделей фотоэлектрических преобразователей. В качестве исходных данных при идентификации параметров моделей ФМ и СЭ используют данные технической

спецификации и/или их ВАХ и вольт-ваттные (ВВХ) характеристики, полученные экспериментальным путем. Точность полученных параметров модели оценивается путем сравнения модельных ВАХ или ВВХ, построенных по основному характеристическому уравнению модели (для SDM это уравнение (1)) с экспериментальными кривыми. Среди множества используемых критериев оценки наиболее распространенными являются среднеквадратичная (RMSE) и средняя относительная (ARE) ошибки, которые для ВАХ определяются по следующим выражениям:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_{i,\text{exp}} - I_{i,\text{sim}})^2}, \quad (\text{A}) \quad (4)$$

$$\text{ARE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{(I_{i,\text{exp}} - I_{i,\text{sim}})}{I_{i,\text{exp}}} \right| \cdot 100, \quad (\%) \quad (5)$$

где $I_{i,\text{exp}}$, $I_{i,\text{sim}}$ – экспериментальные и модельные (расчетные) значения тока в точках кривой ВАХ, соответственно.

Основным подходом определения параметров модели ФП при использовании аналитических методов расчета является составление системы независимых уравнений с входящими в них искомыми переменными. Три уравнения получаются путем записи основного уравнения ВАХ для характерных точек: режимов КЗ, ХХ и точки максимальной мощности (ТММ). Полученная система уравнений дополняется четвертым уравнением производной по напряжению в ТММ. Для решения полученной системы уравнений предложено множество приемов и способов, подробно описанных в [6], отличающихся сложностью используемого математического аппарата и точностью.

Применение метаэвристических алгоритмов позволяет решить многофакторную задачу оптимизации с использованием только одного характеристического уравнения. В данном случае в качестве целевой функции используется значение ошибки, а критерием является ее минимизация. Следует отметить, что применение метаэвристических алгоритмов не гарантирует получения глобального экстремума целевой функции, и, соответственно, для получения адекватных конечных результатов необходима тщательная настройка их параметров. Подробный обзор и сравнитель-

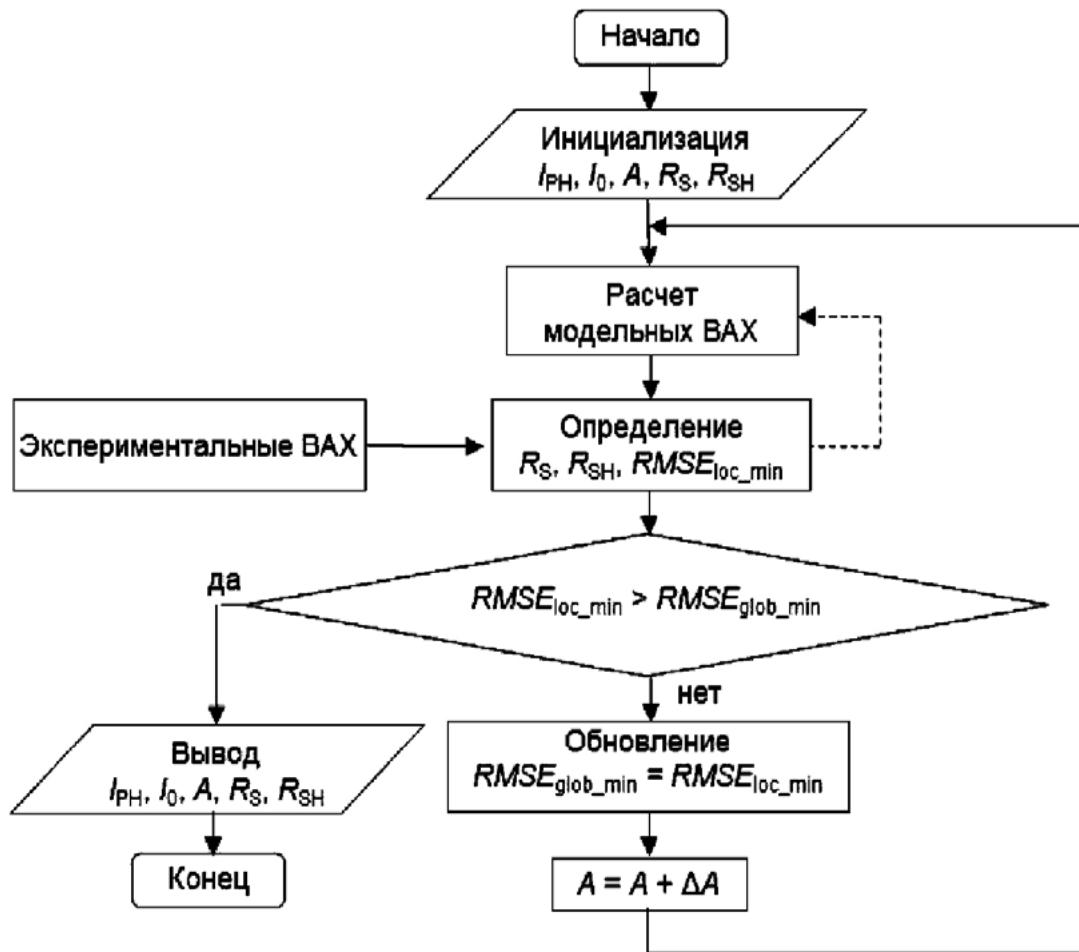


Рис. 2. Блок-схема алгоритма определения параметров модели фотоэлектрических преобразователей
Fig. 2. Block diagram of the algorithm for determining the parameters of the model of photovoltaic converters

ная оценка метаэвристических алгоритмов, используемых для идентификации параметров моделей ФП, приведены в работах [5, 7, 11].

Анализ работ по теме исследования показал, что в подавляющем большинстве случаев параметры модели A , R_s и R_{sh} принимают независимыми от солнечной инсоляции и температуры, а для их идентификации используют только данные технической спецификации ФМ и СЭ для режима STC. Такой подход обеспечивает максимально возможную простоту и минимизацию требуемых вычислительных ресурсов, однако использование для идентификации только одной ветви ВАХ приводит к тому, что погрешность модели существенно возрастает при изменении значений инсоляции и температуры.

Для устранения указанного недостатка авторы работ [12–14] предлагают использовать переменные значения параметров A , R_s и R_{sh} , которые определяются и корректируются с учетом внешних условий эксплуатации ФП. Данный подход позволяет улучшить точность модели, но приводит к значительному усложнению процедуры определения ее параметров

и неудобству последующего применения.

Предлагаемый способ идентификации параметров моделей фотоэлектрических преобразователей. В данной работе предлагается альтернативный способ определения параметров модели ФП, позволяющий пользователю решить данную задачу при минимальных временных затратах с достаточной для инженерных расчетов точностью.

Идея заключается в использовании для определения параметров модели не данных спецификации ФП для режима STC, а непосредственно семейства экспериментальных кривых ВАХ ФМ или СЭ при разных значениях инсоляции, которые многие производители приводят в паспортах технической спецификации. Предлагаемый способ основан на предположении, что в силу того, что форма кривой ВАХ ФП зависит от трех параметров SDM-модели (A , R_s и R_{sh}), то фиксированному значению одного из них будет соответствовать определенная пара значений других параметров, при которых величина среднеквадратичной ошибки (4) будет минимальной. Значение данной ошибки будет соответство-

вать локальному экстремуму целевой функции $-RMSE_{loc_min}$. Соответственно, дискретно изменяя в определенном диапазоне значения одного параметра, можно определить для его фиксированных значений два других параметра и $RMSE_{loc_min}$, а из полученной зависимости легко найти величину глобального экстремума $RMSE_{glob_min}$, которая и определяет значения всех искомых переменных. Так как параметр модели A оказывает меньшее влияние на форму ВАХ в сравнении с параметрами R_s и R_{sh} , именно его и целесообразно использовать в качестве фиксированного и дискретно изменяющегося параметра модели. Блок-схема предлагаемого способа идентификации

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
Данные технической спецификации											
8	$N_s =$		54	число последовательных СЭ в модуле							
9	$N_p =$		1	число параллельных СЭ в модуле							
10	$G_{STC} =$		1000	радиация при стандартных условиях, Вт/м ²							
11	$T_{STC} =$		298,15	температура при стандартных условиях, °К							
12	$V_{OC} =$		32,9	напряжение ХХ модуля, В							
13	$I_{SC} =$		8,21	ток КЗ модуля, А							
14	$A =$		0,95	фактор качества ФП (коэффициент идеальности диода)							
15	$V_{MPP} =$		26,3	напряжение в точке максимальной мощности, В							
16	$I_{MPP} =$		7,61	ток в точке максимальной мощности, А							
17	$k_T =$		0,00318	температурный коэффициент тока КЗ (А/°К)							
18	$k_V =$		-0,123	температурный коэффициент напряжения ХХ (В/°К)							
Расчет параметров схемы замещения ФМ при STC											
10	$V_{T_{STC}} =$		1,3879	тепловое напряжение ФМ при стандартной температуре							
11	$I_{PH_{STC}} =$		8,2257	фототок при STC, А							
12	$I_{0_{STC}} =$		1,1958E-10	обратный ток при стандартных условиях, А							
13	$R_s =$		0,2750	последовательное сопротивление, Ом							
14	$R_{sh} =$		143,600	шунтирующее сопротивление, Ом							
15	$\Pi_{\Phi} =$		0,24862	целевая функция - минимум RMSE, А							

Рис. 3. Внешний вид листа Excel с расчетными данными фотоэлектрического модуля Kyocera KC200GT

Fig. 3. The appearance of an Excel sheet with calculated data of the Kyocera KC200GT photovoltaic module

параметров моделей ФП показана на рис. 2.

Проведенная апробация предложенного способа определения параметров ФП на разных типах ФМ и СЭ показала, что расчетная зависимость $RMSE_{loc_min} = f(A)$ имеет явно выраженный экстремум, что обеспечивает надежное и точное определение глобального минимума целевой функции, а, соответственно, и параметров модели.

Для практической реализации предлагаемого способа требуется общедоступный табличный процессор MS Excel с установленной надстройкой «Поиск решения», в котором необходимо создать бланк с таблицей ввода данных технической спецификации ФП, рис. 3. Также необходимо создать расчетные

таблицы, в которых по заданным значениям напряжения (V) в точках ВАХ рассчитываются соответствующие им значения тока (I) идентифицируемого ФП. Расчетные таблицы должны обеспечивать решение уравнения (1) каким-либо из численных методов. В данной работе использовался метод Ньютона-Рафсона, который обеспечивает надежное определение значений тока за 2–3 итерации при нулевых начальных условиях. Общее число расчетных таблиц должно соответствовать количеству используемых для идентификации кривых ВАХ. Чаще всего в данных технической спецификации производитель приводит 5 кривых ВАХ для различных значений солнечной инсоляции ($G = 1000, 800, 600, 400$ и 200 Вт/м^2) и 3–5 кривых ВАХ для разных значений температур.

Важно отметить, что расчетные бланки MS Excel требуется разработать только один раз, и впоследствии их можно использовать для определения параметров моделей любых ФМ и СЭ, требующих идентификации.

Исходными данными для выполнения расчетов являются кривые ВАХ при различных значениях солнечной инсоляции из технической спецификации ФП, которые нужно предварительно оцифровать. В данной работе для оцифровки графиков использовалась программа GetData Graph Digitizer⁵, которая обеспечивает простой экспорт экспериментальных таблиц данных в MS Excel. В этой работе была выполнена оцифровка всех пяти доступных из технической спецификации кривых ВАХ с различными значениями солнечной радиации для исследуемых моделей ФМ. Для оцифровки каждой кривой использовалось 20 точек.

В представленном на рис. 3 бланке в ячейку C25 введена формула, в которой по уравнению (4) вычисляется значение целевой функции, определяющей локальный экстремум. При фиксированном значении параметра A (ячейка C14) запускается надстройка MS Excel «Поиск решения», в окне которой необходимо выбрать в качестве целевой функции ячейку C25, а в качестве изменяемых переменных ячейки с определяемыми параметрами – R_s и R_{sh} (ячейки C23 и C24).

⁵GetData Graph Digitizer - программа для оцифровки графиков и диаграмм [Электронный ресурс]. URL: <http://getdata-graph-digitizer.com/> (26.03.2023).

Таблица 1. Данные технической спецификации фотоэлектрических модулей
Table 1. Data of the technical specification of photovoltaic modules

Электрические характеристики/модель	Kyocera KC200GT	Shell SP70	Shell ST40
Технология	поликристаллический	моноцирсталический	тонкопленочный
Количество солнечных элементов, N_s	54	36	36
Напряжение холостого хода, V_{OC} (В)	32,9	21,4	23,3
Ток короткого замыкания, I_{SH} (А)	8,21	4,7	2,68
Напряжение в точке максимальной мощности, V_{MPP} (В)	26,3	16,5	16,6
Ток в точке максимальной мощности, I_{MPP} (А)	7,61	4,25	2,41
Температурный коэффициент тока КЗ, k_t (А/°C)	0,0032	0,002	0,00035
Температурный коэффициент напряжения ХХ, k_v (В/°C)	-0,123	-0,076	-0,1
Максимальная мощность в режиме STC, P_{max} (Вт)	200	70	40

Высокое быстродействие обеспечивает метод «Поиск решения нелинейных задач методом ОПГ», который и рекомендуется выбрать. После запуска на выполнение надстройки будут рассчитаны значения параметров R_s и R_{sh} , соответствующие данному локальному экстремуму. Дискретно изменяя значения параметра A, и несколько раз повторив описанную выше процедуру, легко найти конечное решение оптимизационной задачи.

Проведенные вычислительные эксперименты показали, что используемый метод решения не критичен к начальным условиям, и для выполнения расчетов достаточно задать следующие диапазоны изменения варьируемых переменных:

$$0 < R_s \leq 0.05 \cdot N_s ; \quad (6)$$

$$N_s \leq R_{sh} \leq 30 \cdot N_s .$$

Данный практический диапазон с запасом охватывает значения параметров всех типов используемых на сегодняшний день ФП.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для апробации предлагаемого способа идентификации параметров ФП было выбрано три модели ФМ, изготовленных по разной технологии, для которых опубликованы результаты аналогичных исследований [15–20]. Данные технической спецификации ФМ, отобранных для проведения исследований, приведены в табл. 1.

С помощью предложенного способа и по описанной выше методике были определены параметры моделей трех ФМ, которые представлены в табл. 2. Для проверки адекватности предлагаемого подхода в этой же таблице приводятся параметры моделей ФМ, полученные

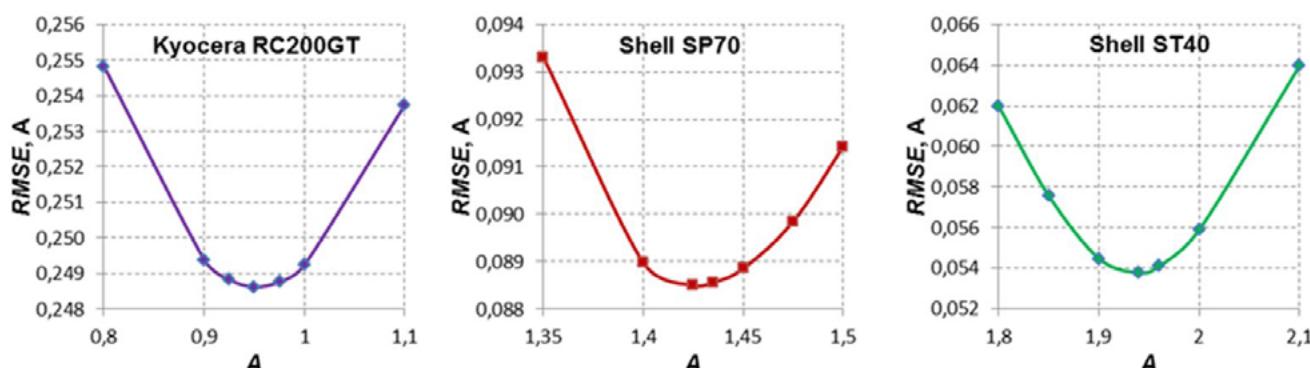


Рис. 4. Расчетные зависимости среднеквадратичной ошибки модели фотоэлектрических модулей от коэффициента идеальности диода

Fig. 4. Calculated dependences of the photovoltaic modules error of the photovoltaic modules model on the ideality coefficient of the diode

Таблица 2. Идентифицированные параметры моделей фотоэлектрических модулей**Table 2.** Identified parameters of photovoltaic module models

Тип ФМ	Метод	A	I_{PH} , А	I_0 , А	R_s , Ом	R_{SH} , Ом
Kyocera KC200GT	Хмаму [17]	0,984	8,230	$1,96 \cdot 10^{-10}$	0,351	500
	Вильяльва [15]	1,3	8,214	$9,83 \cdot 10^{-8}$	0,226	508,99
	Ван [16]	1,3	8,213	$9,83 \cdot 10^{-8}$	0,229	593,24
	Предлагаемый метод	0,95	8,226	$1,096 \cdot 10^{-10}$	0,275	143,60
Shell SP70	Хмаму [17]	0,981	4,722	$3,42 \cdot 10^{-10}$	0,386	163,10
	Вильяльва [15]	1,3	4,713	$8,76 \cdot 10^{-8}$	0,401	135,42
	Ван [16]	1,3	4,713	$8,76 \cdot 10^{-8}$	0,408	145,44
	Предлагаемый метод	1,425	4,704	$4,20 \cdot 10^{-7}$	0,429	568,58
Shell ST40	Хмаму [17]	1,1	2,685	$3,42 \cdot 10^{-10}$	1,400	7520
	Вильяльва [15]	1,6	2,683	$3,89 \cdot 10^{-7}$	1,345	1465,8
	Ван [16]	1,6	2,681	$3,89 \cdot 10^{-7}$	1,366	7301,6
	Предлагаемый метод	1,94	2,686	$6,18 \cdot 10^{-6}$	0,968	450,03

с помощью других известных методов: популярного численного метода, предложенного Вильяльвой [15], аналитического метода Вана [16] и комбинированного численно-аналитического метода на основе W-функции Ламберта Бен Хмаму [17].

На рис. 4 показаны расчетные зависимости RMSE соответствия модельных и экспериментальных ВАХ от коэффициента идеальности диода (A) для трех рассматриваемых фотоэлектрических модулей, полученные в результате поиска минимума целевой функции. Данные зависимости подтверждают гипотезу о существовании глобального экстремума целевой функции, а с учетом того, что исследования

проводены на ФМ, изготовленных по разной технологии, можно сделать вывод, что предлагаемый способ идентификации параметров моделей ФП является универсальным и может использоваться для построения моделей ФП широкой номенклатуры.

Анализ полученных результатов (см. табл. 2) показывает, что предложенный метод обеспечивает достаточно высокую корреляцию с известными методами в части определения параметров I_{PH} и I_0 , при этом значения других параметров (A , R_s , R_{SH}) могут существенно различаться. Объясняется это тем, что параметры I_{PH} и I_0 рассчитываются по формулам (2) и (3), и определяющее влияние на их величину оказы-

Таблица 3. Средняя относительная ошибка моделей фотоэлектрических модулей в реальных условиях окружающей среды**Table 3.** Average relative error of photovoltaic module models in real environmental conditions

Тип фотоэлектрических модулей	Условия среды	Средняя относительная ошибка, ARE (%)		
		Нтамоу[17]	Shin-ong [18]	предлагаемый метод
Kyocera KC200GT при $T = 25^\circ\text{C}$	$G = 1000 \text{ Вт/м}^2$	3,15	5,33	3,27
	$G = 800 \text{ Вт/м}^2$	1,68	6,90	4,16
	$G = 600 \text{ Вт/м}^2$	1,26	8,46	2,66
	$G = 400 \text{ Вт/м}^2$	4,35	5,49	4,69
Shell SP70 при $T = 25^\circ\text{C}$	$G = 1000 \text{ Вт/м}^2$	2,58	4,31	1,92
	$G = 800 \text{ Вт/м}^2$	1,50	3,29	1,65
	$G = 600 \text{ Вт/м}^2$	2,82	7,01	1,43
	$G = 400 \text{ Вт/м}^2$	3,02	5,64	1,21
Shell ST40 при $G = 1000 \text{ Вт/м}^2$	$T = 20^\circ\text{C}$	2,90	4,05	0,67
	$T = 30^\circ\text{C}$	3,05	3,74	1,08
	$T = 40^\circ\text{C}$	4,20	2,59	1,06
	$T = 50^\circ\text{C}$	5,06	7,67	2,63

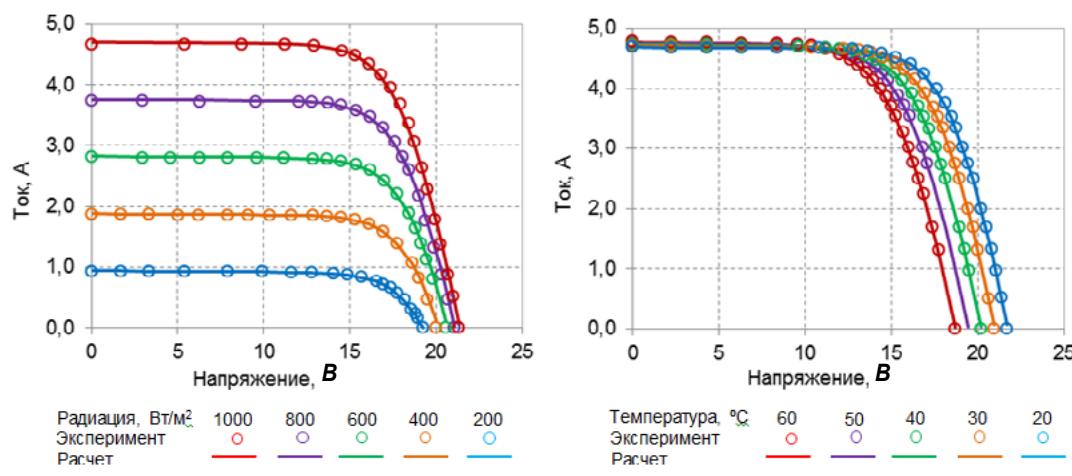
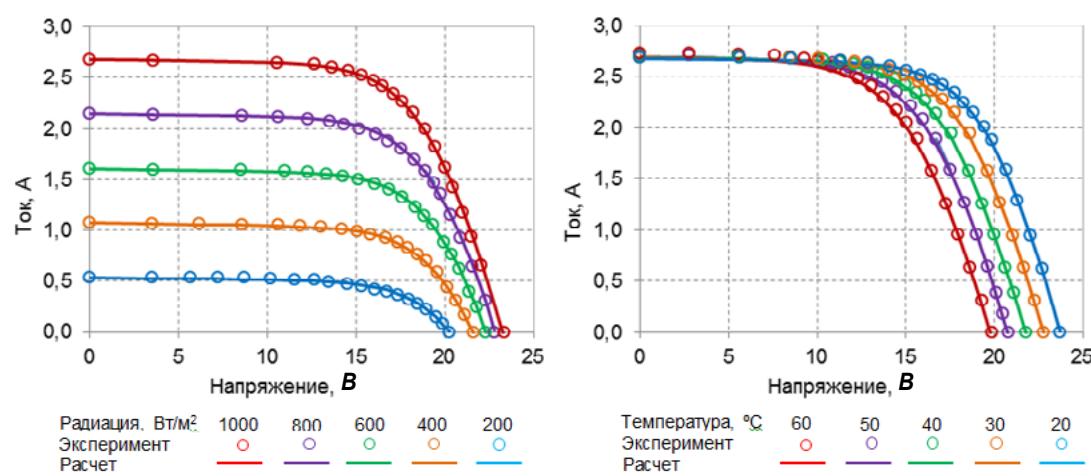
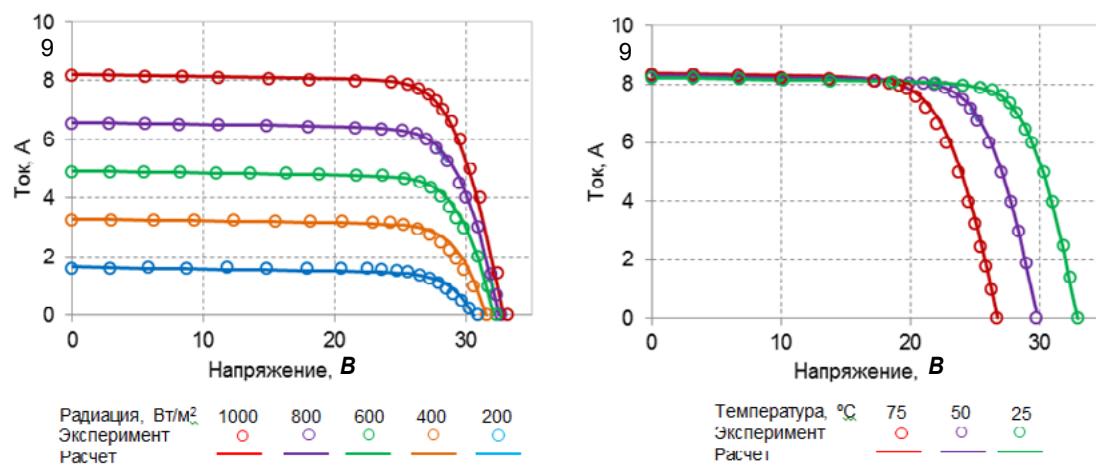


Таблица 4. Среднеквадратичная ошибка модели фотоэлектрического модуля Shell ST40 при изменении условий инсоляции, RMSE (A)**Table 4.** RMS error of the Shell ST40 photovoltaic module model when the insolation conditions change, RMSE (A)

Метод идентификации параметров модели	Солнечная инсоляция, G (Вт/м ²)				
	1000	800	600	400	200
Hmamou [17]	0,0669	0,0662	0,0256	0,0012	0,0232
Yahya-Khotbehsara [19]	0,0435	0,0359	0,0609	0,0724	0,0701
Babu's [20]	0,1334	0,0411	0,1342	0,1911	0,1707
Wang's [16]	0,0787	0,0344	0,0742	0,0985	0,1038
Предлагаемый метод	0,0199	0,0170	0,0092	0,0085	0,0101

вают данные технической спецификации ФМ при STC, которые во всех сравниваемых методах принимаются одинаковыми. А параметры A , R_s , R_{sh} определяются путем минимизации ошибки между модельными и экспериментальными ВАХ. И если в известных методах для сравнения используются только характеристические точки ВАХ при STC, то в предлагаемом методе используется все семейство ВАХ при разных условиях инсоляции. Отметим, что предлагаемый метод позволяет идентифицировать параметры модели ФП и по одной ВАХ, однако результаты вычислительных экспериментов показали, что точность модели при этом ухудшается.

В табл. 3 представлены средние относительные ошибки между модельными и экспериментальными характеристиками ФМ, рассчитанные по предлагаемому методу и методами, предложенными в работах Hmatou [17] и Shinong [18], в реальных условиях окружающей среды.

На рис. 5–7 представлены ВАХ рассматриваемых модулей при изменении освещенности и температуры. Маркерами на графиках обозначены экспериментальные данные, а линии соответствуют расчетным характеристикам.

Из рис. 5–7 видно, что модельные характеристики хорошо согласуются с экспериментальными в широком диапазоне изменения температуры и освещенности для всех рассматриваемых ФМ.

В табл. 4 приведены значения среднеквадратичной ошибки между модельными и экспериментальными значениями тока модуля Shell ST40 при изменении условий инсоляции, полученные различными методами идентификации параметров [16, 17, 19, 20].

Результаты сравнительной оценки моделей ФП с параметрами, определенными с помощью различных методов идентификации, показывают, что полученные в данной работе модели ФМ в целом обеспечивают более высокую точность моделирования ВАХ в широком диапазоне изменения внешних условий в сравнении с аналогами.

Важным достоинством предлагаемого метода является возможность идентификации параметров моделей ФП только по данным измерений ВАХ, что позволяет его использовать для определения параметров моделей ФП, по которым отсутствуют данные технической спецификации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены результаты исследований, посвященные разработке оригинального метода идентификации параметров моделей фотоэлектрических преобразователей. На основании сравнительного анализа известных видов математических моделей выбрана базовая структура экспоненциальной модели с одним диодом и пятью параметрами, обеспечивающая достаточно высокую точность моделирования электрических характеристик ФП в широком диапазоне изменения уровня радиации и температуры, а также простую интеграцию в популярный математический пакет схемотехнического моделирования MatLab/Simulink. Отличительной особенностью предлагаемого метода идентификации от известных является использование в качестве исходных данных семейства экспериментальных кривых ВАХ при разных значениях солнечной радиации, а в качестве критерия оптимизации минимум среднеквадратичной ошибки между модельными и экспериментальными ВАХ. Достоинством

такого подхода является возможность определения значений последовательного RS и параллельного RSH сопротивлений при фиксированном коэффициенте идеальности диода A с помощью табличного процессора MS Excel с установленной надстройкой «Поиск решения». Применение данной надстройки позволяет легко определить все неизвестные параметры модели без необходимости разработки программного кода и вычислительных алгоритмов, что обеспечивает доступность предлагаемого метода широкому кругу пользователей.

Результаты апробации предлагаемого метода идентификации на примере трех типов фотоэлектрических модулей Shell ST40, Shell SP70 и Kyocera KC200GT показали, что модельные ВАХ в широком диапазоне изменения

радиации и температуры хорошо согласуются с экспериментальными характеристиками, предоставленными производителями. Результаты сравнительной оценки погрешностей построенных моделей ФМ с другими известными моделями показали, что предлагаемый метод в целом обеспечивает более высокую точность моделирования, что позволяет его использовать для прогнозирования выработки электроэнергии фотоэлектрическими системами, анализа и оптимизации их рабочих режимов и т.п.

Направлением дальнейших исследований является изучение возможностей по повышению точности моделей ФП путем коррекции параметров A , R_s , R_{sh} в зависимости от значений солнечной радиации и температуры.

Список источников

1. Al-Subhi A. Efficient mathematical models for parameters estimation of single-diode photovoltaic cells // Energy Systems. 2022. <https://doi.org/10.1007/s12667-022-00542-3>.
2. Hmamou D.B., Elyaqouti M., Arjdal E.H., Saadaoui D., Lidaighbi S., Chaoufi J., et al. A novel hybrid numerical with analytical approach for parameter extraction of photovoltaic modules // Energy Conversion and Management: X. 2022. Vol. 14. P. 100219. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100219>.
3. Montalvo-Galicia F., Sanz-Pascual M.T., Rosales-Quintero P., Moreno-Moreno M. Solar cell parameter extraction method from illumination and dark I-V characteristics // Nanomaterials. 2022. Vol. 12. P. 1955. <https://doi.org/10.3390/nano12121955>.
4. Kumar M., Kumar A. An efficient parameters extraction technique of photovoltaic models for performance assessment // Solar Energy. 2017. Vol. 158. P. 192–206. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.09.046>.
5. El-Dabah M.A., El-Sehiemy R.A., Hasanien H.M., Saad B. Photovoltaic model parameters identification using Northern Goshawk Optimization algorithm // Energy. 2023. Vol. 262. Part B. P. 125522. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125522>.
6. Fahim S.R., Hasanien H.M., Turky R.A., Aleem S.H.E.A., Čalasan M. A Comprehensive review of photovoltaic modules models and algorithms used in parameter extraction // Energies. 2022. Vol. 15. P. 8941. <https://doi.org/10.3390/en15238941>.
7. Abbassi R., Abbassi A., Jemli M., Chebbi S. Identification of unknown parameters of solar cell models: a comprehensive overview of available approaches // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 90. P. 453–474. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.011>.
8. Gude S., Jana R.C., Laudani A., Thanikanti S.B. Parameter extraction of photovoltaic cell based on a multi-objective approach using nondominated sorting cuckoo search optimization // Solar Energy. 2022. Vol. 239. P. 359–374. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.05.007>.
9. Said S., Massoud A.M., Benammar M., Ahmed S. A matlab/simulink based photovoltaic array model employing simpowersystems toolbox // Journal of Energy and Power Engineering. 2012. Vol. 6. P. 1965–1975.
10. Humada A.M., Hojabri M., Mekhilef S., Hamada H.M. Solar cell parameters extraction based on single and double-diode models: a review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 56. P. 494–509. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.051>.
11. Bo Qiuyu, Cheng Wuqun, Khishe M., Mohammadi M., Mohammed A.H. Solar photovoltaic model parameter identification using robust niching chimp optimization // Solar Energy. 2022. Vol. 239. P. 179–197. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.04.056>.
12. Naeijian M., Rahimnejad A., Ebrahimi S.M., Pourmousa N., Gadsden S. A. Parameter estimation of PV solar cells and modules using Whippy Harris Hawks optimization algorithm // Energy Reports. 2021. Vol. 7. P. 4047–4063. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.06.085>.
13. Farah A., Belazi A., Benabdallah F., Almalaq A., Chtourou M., Abido M.A. Parameter extraction of photovoltaic models using a comprehensive learning Rao-1 algorithm // Energy Conversion and Management. 2022. Vol. 252. P. 115057. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115057>.
14. Humada A.M., Darweesh S.Y., Mohammed K.G., Kamil M., Mohammed S.F., Kasim N.K., et al. Modeling of PV system and parameter extraction based on experimental data: review and investigation // Solar Energy. 2020. Vol. 199. P. 742–760. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.068>.
15. Villalva M.G., Gazoli J.R., Filho E.R. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays // IEEE Transactions on Power Electronics. 2009. Vol. 24. Iss. 5. P. 1198–1208. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2009.2013862>.
16. Wang Gang, Zhao Ke, Shi Jiangtao, Chen Wei, Zhang Haiyang, Yang Xinsheng. An iterative approach for modeling photovoltaic modules without implicit equations // Applied Energy. 2017. Vol. 202. P. 189–198. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.050>.

apenergy.2017.05.149.

17. Hmamou D.B., Elyaqouti M., Arjdal E., Ibrahim A., Abdul-Ghaffar H.I., Aboelsaud R., et al. Parameters identification and optimization of photovoltaic panels under real conditions using Lambert W-function // Energy Reports. 2021. Vol. 7. P. 9035–9045. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.11.219>.
18. Shinong Wang, Qianlong Mao, Jie Xu, Yuan Ge, Shilin Liu. An improved mathematical model of photovoltaic cells based on datasheet information // Solar Energy. 2020. Vol. 199. P. 437–446. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.046>.
19. Yahya-Khotbehsara A., Shahhoseini A. A fast modeling of the double-diode model for PV modules using combined analytical and numerical approach // Solar Energy. 2018. Vol. 162. P. 403–409. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.047>.
20. Babu B.C., Gurjar S. A novel simplified two-diode model of photovoltaic (PV) module // IEEE Journal of Photovoltaics. 2014. Vol. 4. Iss. 4. P. 1156–1161. <http://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2014.2316371>.

References

1. Al-Subhi A. Efficient mathematical models for parameters estimation of single-diode photovoltaic cells. *Energy Systems*. 2022. <https://doi.org/10.1007/s12667-022-00542-3>.
2. Hmamou D.B., Elyaqouti M., Arjdal E.H., Saadaoui D., Lidaighbi S., Chaoufi J., et al. A novel hybrid numerical with analytical approach for parameter extraction of photovoltaic modules. *Energy Conversion and Management*: X. 2022;14:100219. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100219>.
3. Montalvo-Galicia F., Sanz-Pascual M.T., Rosales-Quintero P., Moreno-Moreno M. Solar cell parameter extraction method from illumination and dark I-V characteristics. *Nanomaterials*. 2022;12:1955. <https://doi.org/10.3390/nano12121955>.
4. Kumar M., Kumar A. An efficient parameters extraction technique of photovoltaic models for performance assessment. *Solar Energy*. 2017;158:192–206. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.09.046>.
5. El-Dabah M.A., El-Sehiemy R.A., Hasanien H.M., Saad B. Photovoltaic model parameters identification using Northern Goshawk Optimization algorithm. *Energy*. 2023;262(B):125522. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125522>.
6. Fahim S.R., Hasanien H.M., Turky R.A., Aleem S.H.E.A., Çalasan M. A Comprehensive review of photovoltaic modules models and algorithms used in parameter extraction. *Energies*. 2022;15:8941. <https://doi.org/10.3390/en15238941>.
7. Abbassi R., Abbassi A., Jemli M., Chebbi S. Identification of unknown parameters of solar cell models: a comprehensive overview of available approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018;90:453–474. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.011>.
8. Gude S., Jana R.C., Laudani A., Thanikanti S.B. Parameter extraction of photovoltaic cell based on a multi-objective approach using nondominated sorting cuckoo search optimization. *Solar Energy*. 2022;239:359–374. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.05.007>.
9. Said S., Massoud A.M., Benammar M., Ahmed S. A matlab/simulink based photovoltaic array model employing simpowersystems toolbox. *Journal of Energy and Power Engineering*. 2012;6:1965–1975.
10. Humada A.M., Hojabri M., Mekhilef S., Hamada H.M. Solar cell parameters extraction based on single and double-diode models: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016;56:494–509. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.051>.
11. Bo Qiuyu, Cheng Wuqun, Khishe M., Mohammadi M., Mohammed A.H. Solar photovoltaic model parameter identification using robust niching chimp optimization. *Solar Energy*. 2022;239:179–197. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.04.056>.
12. Naeijian M., Rahimnejad A., Ebrahimi S.M., Pourmousa N., Gadsden S. A. Parameter estimation of PV solar cells and modules using Whippy Harris Hawks optimization algorithm. *Energy Reports*. 2021;7:4047–4063. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.06.085>.
13. Farah A., Belazi A., Benabdallah F., Almalaq A., Chtourou M., Abido M.A. Parameter extraction of photovoltaic models using a comprehensive learning Rao-1 algorithm. *Energy Conversion and Management*. 2022;252:115057. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115057>.
14. Humada A.M., Darweesh S.Y., Mohammed K.G., Kamil M., Mohammed S.F., Kasim N.K., et al. Modeling of PV system and parameter extraction based on experimental data: review and investigation. *Solar Energy*. 2020;199:742–760. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.068>.
15. Villalva M.G., Gazoli J.R., Filho E.R. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2009;24(5):1198–1208. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2009.2013862>.
16. Wang Gang, Zhao Ke, Shi Jiangtao, Chen Wei, Zhang Haiyang, Yang Xinsheng. An iterative approach for modeling photovoltaic modules without implicit equations. *Applied Energy*. 2017;202:189–198. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.149>.
17. Hmamou D.B., Elyaqouti M., Arjdal E., Ibrahim A., Abdul-Ghaffar H.I., Aboelsaud R., et al. Parameters identification and optimization of photovoltaic panels under real conditions using Lambert W-function. *Energy Reports*. 2021;7:9035–9045. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.11.219>.
18. Shinong Wang, Qianlong Mao, Jie Xu, Yuan Ge, Shilin Liu. An improved mathematical model of photovoltaic cells based on datasheet information. *Solar Energy*. 2020;199:437–446. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.046>.

19. Yahya-Khotbehsara A., Shahhoseini A. A fast modeling of the double-diode model for PV modules using combined analytical and numerical approach. *Solar Energy*. 2018;162:403-409. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.047>.
20. Babu B.C., Gurjar S. A novel simplified two-diode model of photovoltaic (PV) module. *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2014;4(4):1156-1161. [http://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2014.2316371](https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2014.2316371).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Обухов Сергей Геннадьевич,
д.т.н., доцент,
профессор отделения электроэнергетики и
электротехники,
Национальный исследовательский Томский
политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия
✉ serob99@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7177-4036>

Плотников Игорь Александрович,
к.т.н., доцент,
доцент отделения электроэнергетики
и электротехники,
Национальный исследовательский Томский
политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия
igorplt@tpu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4777-1577>

Климова Галина Николаевна,
к.т.н., доцент,
доцент отделения электроэнергетики
и электротехники,
Национальный исследовательский Томский
политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия
gariki@tpu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6930-3603>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey G. Obukhov,
Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Professor of the Department of Electrical Power Engineering
and Electrical Engineering,
National Research Tomsk Polytechnic University,
30 Lenin Pr., Tomsk 634050, Russia
✉ serob99@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7177-4036>

Igor A. Plotnikov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Electrical Power
Engineering and Electrical Engineering,
National Research Tomsk Polytechnic University,
30 Lenin Pr., Tomsk 634050, Russia
igorplt@tpu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4777-1577>

Galina N. Klimova,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Electrical Power
Engineering and Electrical Engineering,
National Research Tomsk Polytechnic University,
30 Lenin Pr., Tomsk 634050, Russia
gariki@tpu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6930-3603>

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 10.04.2023 г.; одобрена после рецензирования 12.05.2023 г.; принята к публикации 27.06.2023 г.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 10.04.2023; approved after reviewing 12.05.2023; accepted for publication 27.06.2023.

Научная статья
УДК 621.311:621.331
EDN: PGNVMM
DOI: 10.21285/1814-3520-2023-3-552-564

ЭНЕРГЕТИКА



Моделирование электромагнитных влияний многопроводных тяговых сетей на трубопроводы

К.В. Суслов^{1✉}, А.В. Крюков², П.В. Илюшин³, А.В. Черепанов⁴, А.Е. Крюков⁵

^{1,2,5}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

¹Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», г. Москва, Россия

^{2,4}Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия

³Центр интеллектуальных электроэнергетических систем и распределенной энергетики Института энергетических исследований РАН, г. Москва, Россия

Резюме. Цель исследований – разработка цифровых моделей для определения электромагнитных влияний многопроводных тяговых сетей на трубопроводы. При разработке моделей использован подход, основанный на технологиях мультифазного моделирования режимов электроэнергетических систем. Данный подход позволяет адекватно учитывать все влияющие факторы, к числу которых можно отнести модули и фазы токов, протекающих по проводам контактных подвесок, линий электропередачи 6-10-25 кВ, проложенных на опорах контактной сети, и рельсовым нитям. Также возможно учитывать аналогичные параметры для напряжений в узловых точках многопроводной системы. К основным факторам относятся в том числе ширина сближения при прокладке труб параллельно трассе железной дороги, параметры траектории сближения при наличии непараллельных участков, электрические параметры грунтов на трассе сближения. По итогам проведенных исследований установлено, что электромагнитно несбалансированная тяговая сеть 25 кВ оказывает существенные влияния на параллельно расположенный трубопровод. Показано, что максимальные уровни наведенных напряжений в отдельных точках трубы лежат в диапазоне 300...700 В, что значительно превышает допустимый уровень в 60 В. Выявлено, что токи, протекающие по трубе и превышающие 20 А, могут оказывать негативное влияние на устройства противокоррозионной защиты. Для снижения электромагнитных влияний на трубопровод рекомендованы следующие способы: уменьшение длины участков трассы сближения трубы и железной дороги, увеличение расстояния между тяговой сетью и трубой, установка дополнительных заземлений; при этом соединение трубы с дополнительными заземлителями может осуществляться через фильтры, настроенные на частоту 50 Гц и включающие блоки конденсаторов для исключения сбоев в работе устройств защиты трубопровода. Таким образом, разработанные цифровые модели позволяют адекватно определять наведенные напряжения, создаваемые многопроводными тяговыми сетями, и токи, протекающие по трубам. Представленные модели позволяют осуществлять обоснованный выбор мероприятий, обеспечивающих безопасность обслуживания трубопровода

Ключевые слова: электроэнергетические системы, тяговые сети 25 кВ, электромагнитные влияния на трубопроводы

Благодарности: Исследования выполнены в рамках государственного задания «Проведение прикладных научных исследований» по теме «Разработка методов, алгоритмов и программного обеспечения для моделирования режимов систем тягового электроснабжения железных дорог постоянного тока и электромагнитных полей на тяговых подстанциях железных дорог переменного тока».

Для цитирования: Суслов К.В., Крюков А.В., Илюшин П.В., Черепанов А.В., Крюков А.Е. Моделирование электромагнитных влияний многопроводных тяговых сетей на трубопроводы // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 3. С. 552–564. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-552-564>. EDN: PGNVMM.

POWER ENGINEERING

Original article

Modelling of electromagnetic influences of multi-wire traction networks on pipelines

Konstantin V. Suslov^{1✉}, Andrey V. Kryukov², Pavel V. Ilyushin³,
Alexander V. Cherepanov⁴, Alexander E. Kryukov⁵

^{1,2,5}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

¹National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russia

^{2,4}Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

³Center for Intelligent Electric Power Systems and Distributed Energy of the Energy Research Institute of the RAS, Moscow, Russia

Abstract. In this work, digital models for determining the electromagnetic influences of multi-wire traction networks on pipelines are developed. When developing models, an approach based on multiphase behaviour simulation of electric power systems was used. This approach adequately addresses all the influencing factors, which include modules and phases of currents flowing through the overhead contact wire suspension, 6–10–25 kV power transmission lines laid on the supports of the overhead line, and lines of rails. In addition, it is possible to take into account similar parameters for stresses at the nodal points of a multi-wire system. Among the key factors are the railway clearance when laying pipes parallel to the railway track, railway clearance trajectory in the presence of non-parallel sections, and the electrical characteristics of the soil along the clearance route. The research results demonstrated that a 25 kV electromagnetically unbalanced traction network exerts significant influence on a pipeline running in parallel. It was shown that the maximum induced voltages at specific points along the pipe fall within the range of 300–700 V, which significantly exceeds the permissible level of 60 V. It was revealed that currents exceeding 20 A flowing through the pipe can have an adverse effect on anticorrosive protection devices. To mitigate electromagnetic impacts on the pipeline, the following measures are recommended: reducing the length of pipeline and railway clearance sections, increasing the gap between the traction network and the pipe, and installing an additional grounding source. The pipe can be connected to the supplementary grounding source through filters tuned to a frequency of 50 Hz, which involve capacitor units to prevent malfunctions during the operation of pipeline protection devices. Thus, the developed digital models allow the induced voltages generated by multi-wire traction networks and the currents flowing through the pipes to be adequately determined. These models offer an informed choice of measures that ensure the safety of pipeline maintenance.

Keywords: electric power systems, 25 kV traction networks, electromagnetic influences on pipelines

Acknowledgments: The research was carried out as a part of the state task "Implementation of applied scientific research" on the topic "Development of methods, algorithms and software for modeling the modes of traction power supply systems for DC railways and electromagnetic fields at traction substations for AC railways".

For citation: Suslov K.V., Kryukov A.V., Ilyushin P.V., Cherepanov A.V., Kryukov A.E. Modelling of electromagnetic influences of multi-wire traction networks on pipelines. *iPolytech Journal*. 2023;27(3):552-564. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-552-564>. EDN: PGNVMM.

ВВЕДЕНИЕ

Коренное отличие линий электропередачи трехфазного исполнения от однофазных тяговых сетей (ТС) состоит в электромагнитной неуравновешенности последних. Такая особенность ТС определяет значительные влияния [1] на проложенные вдоль трассы железной дороги металлические конструкции, типичным примером которых являются трубопроводы, с их помощью осуществляется транспорт жидких и газообразных продуктов. Электромагнитные влияния ТС могут индуцировать на деталях сооружения наведенные напряжения с уровнями, превосходящими допустимые по условиям электробезопасности [2]. Кроме того, наведенные напряжения могут создавать в дефектах изоляции труб повышенные плотности коррозионных токов [3]. Следует отметить, что в трехфазных линиях электропередач (ЛЭП) высокого напряжения электромагнитная неуравновешенность может проявляться в особых режимах, вызванных обрывами фаз, однофазными и двухфазными замыканиями и др.

Для обеспечения безопасной работы персонала на трубопроводе, расположенному в зоне повышенного электромагнитного влияния ТС, необходимо использовать организационные

и технические мероприятия, выбор которых в современных условиях должен базироваться на результатах компьютерного моделирования. Такое моделирование должно выполняться с помощью цифровых моделей, адекватно учитывающих все влияющие факторы, к числу которых можно отнести:

- модули и фазы токов, протекающих по проводам контактных подвесок, линий электропередачи 6-10-25 кВ, проложенных на опорах контактной сети, и рельсовым нитям;
- аналогичные параметры для напряжений в узловых точках ТС;
- ширина сближения при прокладке труб параллельно трассе железной дороги;
- параметры траектории сближения при наличии непараллельных участков;
- электрические параметры грунтов на трассе сближения.

Актуальность проблемы электромагнитной совместимости ТС, ЛЭП и трубопроводов подтверждается результатами анализа работ, посвященных ее решению. Основные теоретические положения и аналитические выражения, позволяющие рассчитывать наведенные напряжения, создаваемые ТС на металлических сооружениях, представлены в работах [4, 5]. Оценка влияния высших гар-

моник на уровнях электромагнитных влияний ТС на трубопроводы представлена в статье [6]. Вопросы оптимального проектирования трассы трубопровода вблизи высоковольтных линий электропередачи рассмотрены в работе [7]. Влияние электромагнитных полей ЛЭП на трубопроводы проанализировано в статье [8]. Задача экранирования трубопровода решена в работе [9], там же приведена методика определения наведенных потенциалов на деталях сооружения. В статье [10] представлена методика оценки напряжений, наведенных на трубопроводе, расположенным на небольшом расстоянии от ЛЭП сверхвысокого напряжения. Индуктивное воздействие воздушных ЛЭП на трубопроводы рассмотрено в работе [11]. Эффективные алгоритмы, обеспечивающие выполнение анализа электромагнитных влияний ЛЭП на трубопроводы для транспорта нефти и газа, описаны в статье [12]. Влияние электромагнитных полей на параллельный трубопровод рассмотрено в работе [13]. Задача определения наведенных напряжений на трубопроводах вследствие магнитного влияния ЛЭП решена в статье [14]. В работе [15] проанализированы уровни наведенных напряжений на трубопроводах, оборудованных изолирующими фланцами. Исследования, результаты которых приведены в статье [16], направлены на анализ электромагнитных полей ЛЭП 380 кВ, расположенной вблизи трубопроводов. Определению наведенных напряжений на деталях труб, расположенных вдоль линий электропередачи сверхвысокого напряжения, посвящена работа [17]. Анализ эффектов, возникающих из-за близости высоковольтных электрических сетей и трубопроводов, представлен в статье [18]. В работе [19] приведены результаты анализа электромагнитных воздействий ЛЭП ультравысокого напряжения на трубопроводы подземной прокладки. В статье [20] представлены результаты анализа взаимного электромагнитного влияния между линией электропередачи и подземным трубопроводом. Изучению процессов электромагнитной индукции в трубопроводах из-за влияния воздушных линий электропередачи высокого напряжения посвящена работа [21]. Методы уменьшения электромагнитного воздействия на подземный металлический трубопровод вблизи воздушной линии электропередачи переменного тока

рассмотрены в статье [22]. Исследованию создаваемых линиями электропередачи на подземном трубопроводе помех посвящена работа [23].

На основе анализа представленных выше публикаций можно сделать вывод о том, что в них даны решения важных задач по оценке наведенных напряжений на трубопроводах, расположенных в зонах электромагнитного влияния ЛЭП и тяговых сетей. Однако задачи изучения электромагнитных влияний (ЭМВ) тяговых сетей на протяженные металлические конструкции решены не в полном объеме. Кроме того, единая методика, позволяющая определять наведенные напряжения на деталях сооружения и токи, протекающие по трубопроводу, в рассмотренных работах не представлена. Для создания такой методики могут быть использованы методы мультифазного моделирования режимов электроэнергетических систем (ЭЭС) [24, 25]. Ниже приведены результаты решения задачи моделирования ЭМВ многопроводных тяговых сетей и ЛЭП на трубопроводы.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Представленный выше анализ публикаций, посвященных проблеме электромагнитной совместимости тяговых сетей, ЛЭП и трубопроводов, показывает, что вопросы адекватного определения электромагнитных влияний ТС и ЛЭП на протяженные металлические сооружения требуют дополнительного изучения. При этом наиболее актуальная задача заключается в создании цифровых моделей, удовлетворяющих следующим требованиям:

- адекватный учет всех факторов, влияющих на уровень ЭМВ;
- обеспечение приемлемой для практических целей точности для всех зон интеграла Карсона [25, 26];
- определение ЭМВ на основе расчета режима тяговой сети и питающей электроэнергетической системы [24].

Реализация таких моделей возможна с использованием методов мультифазного моделирования, реализованных в программном комплексе Fazonord [25]. Ниже представлены результаты моделирования электромагнитных влияний многопроводных тяговых сетей на трубопровод.

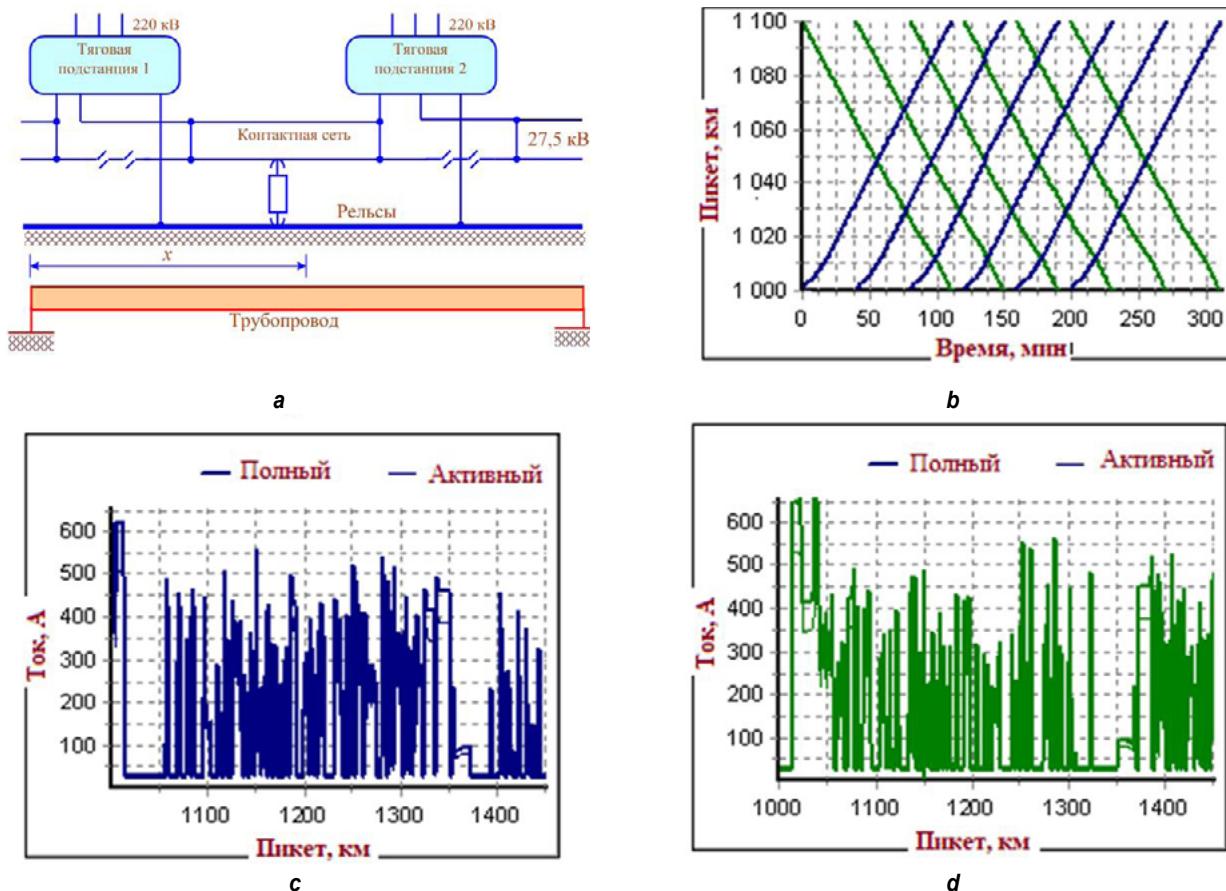


Рис. 1. Схема (а) сближения тяговых сетей с трубопроводом, график (б) движения и токовые профили поездов, следующих в четном (с) и нечетном (д) направлениях
 Fig. 1 Diagram of traction networks approaching the pipeline (a), graph of movement (b) and current profiles of trains traveling in even (c) and odd (d) directions

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование осуществлялось для следующих объектов:

- тяговой сети 25 кВ традиционной конструкции;
- перспективной тяговой сети с симметрирующими трансформаторами [27];
- многопутной тяговой сети железнодорожной станции.

Кроме того, представлены результаты моделирования объекта, включающего ЛЭП 220 кВ, тяговую сеть 25 кВ и линию электропередачи 25 кВ с заземленной фазой.

Тяговая сеть 25 кВ. Для СТЭ 25 кВ (рис. 1 а) типовой конструкции выполнено моделирование режимов работы с учетом наличия трубопровода с диаметром трубы 250 мм. Моделируемый участок включал три тяговых трансформатора и две межподстанционные зоны (МПЗ) протяженностью 50 км. Для анализа характера распределения наведенных напряжений вдоль трубы левая МПЗ была разбита на пять участков с длинами по 10 км. Внешняя сеть была представлена тремя линиями

электропередачи 220 кВ. Расстояние а от трубопровода до оси дороги (ширина сближения) принималось равным 100 м. При моделировании учитывалось распределенное заземление трубопровода с проводимостью 0,002 См/км.

Предполагалось, что по краям сооружения установлены стационарные заземляющие устройства с сопротивлением 1 Ом. Модели участков ТС, расположенных вблизи трубопровода, формировались в виде схем с цепочечной структурой. Этим обеспечивался корректный учет распределенности параметров.

Моделировалось движение шести поездов массой 5968 т в нечетном направлении и такого же количества поездов этой же массы в четном (рис. 1 а, б, с). Результаты моделирования представлены на рис. 2.

На рис. 2 а показаны временные зависимости наведенных напряжений для шести точек трубопровода, отвечающих разным координатам x оси, направленной параллельно трассе сближения (рис. 1 а). На рис. 2 б представлены аналогичные графики для токов, протекающих по трубе.

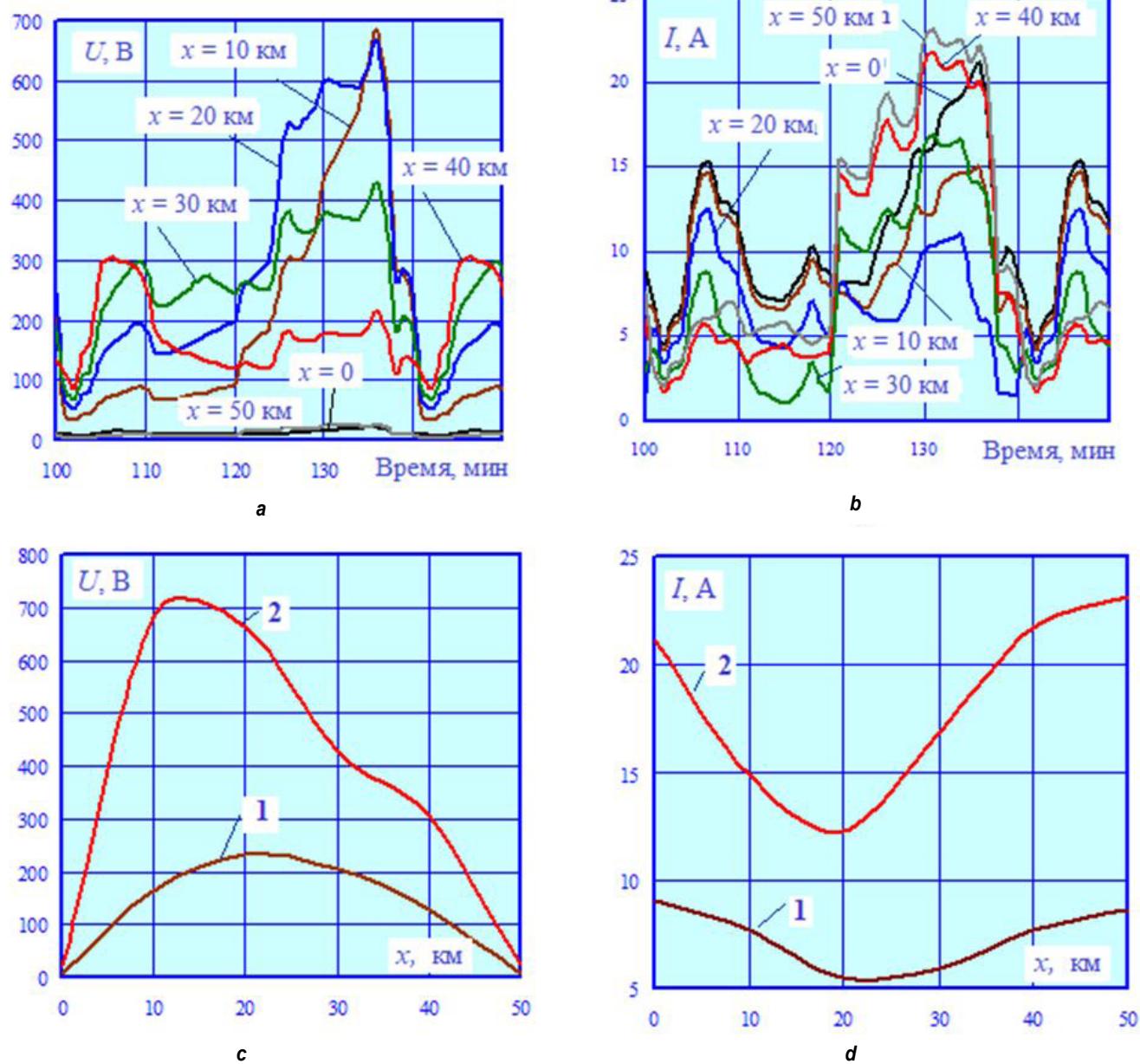


Рис. 2. Временные зависимости наведенных напряжений (а) и токов (б), протекающих по трубе, и зависимости максимальных и средних значений напряжений (с) и токов (д) от координаты x :
1 – средние значения; 2 – максимумы

Fig. 2 Time dependences of induced voltages (a) and currents (b) flowing through the pipe and dependences of the maximum and average values of voltages (c) and currents (d) on the x coordinate:
1 – average values; 2 – maxima

На рис. 2 с, д приведены графики зависимостей максимальных и средних значений напряжений и токов от координаты x . На этих рисунках приведены значения результирующих напряжений и токов, полученных с учетом

$$U = U_1 \sqrt{1 + \left(\frac{k_U}{100} \right)^2}; \quad I = I_1 \sqrt{1 + \left(\frac{k_I}{100} \right)^2},$$

где U_1, I_1 – напряжения (В) и токи (А) основной частоты 50 Гц; k_U, k_I – соответственно, суммарные коэффициенты гармоник напряжений и токов в процентах.

Анализ представленных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Электромагнитно несбалансированная тяговая сеть 25 кВ оказывает существенные электромагнитные влияния на параллельно проложенный трубопровод. Максимальные уровни наведенных напряжений в отдельных точках трубы лежат в диапазоне 300...670 В, а в точке, отвечающей координате $x = 10$ км, приближаются к 700 В, что значительно превышает допустимый уровень в 60 В [2]. Следует отметить, что такие наведенные напряжения получены при проводимости изоляции в $G = 0,002$ См/км, что характерно для сооружения с небольшим периодом эксплуатации. С течением времени этот параметр может существенно уменьшаться до 0,4 См/км [4]; при этом

распределенное заземление будет усиливаться, что приведет к заметному снижению наведенных напряжений. Так, например, расчеты при величине $G = 0,05 \text{ См/км}$ показывают, что максимум наведенного напряжения при прочих равных условиях уменьшается до величины в 170 В.

2. Токи, протекающие по трубе и превышающие 20 А, могут оказывать негативное влияние на устройства противокоррозионной защиты (ПКЗ).

3. Для снижения электромагнитных влияний ТС можно использовать следующие способы: уменьшение длины участков трассы сближения трубопровода и железной дороги (ЖД); увеличение расстояния между ЖД и трубой, установку дополнительных заземлений. При этом соедине-

ние трубы с дополнительными заземлителями может осуществляться через фильтры, настроенные на частоту 50 Гц и включающие блоки конденсаторов для исключения сбоев в работе устройств ПКЗ. Предлагаемая методика и разработанные цифровые модели позволяют выбирать наиболее рациональные мероприятия по снижению электромагнитных влияний тяговых сетей (СТЭ) традиционной конструкции.

Перспективная система тягового электроснабжения с симметрирующими трансформаторами. В этой СТЭ (рис. 3 а) опорные тяговые подстанции (ТП) оснащены симметрирующими трансформаторами, и расстояние между ними может достигать 300...350 км [27].

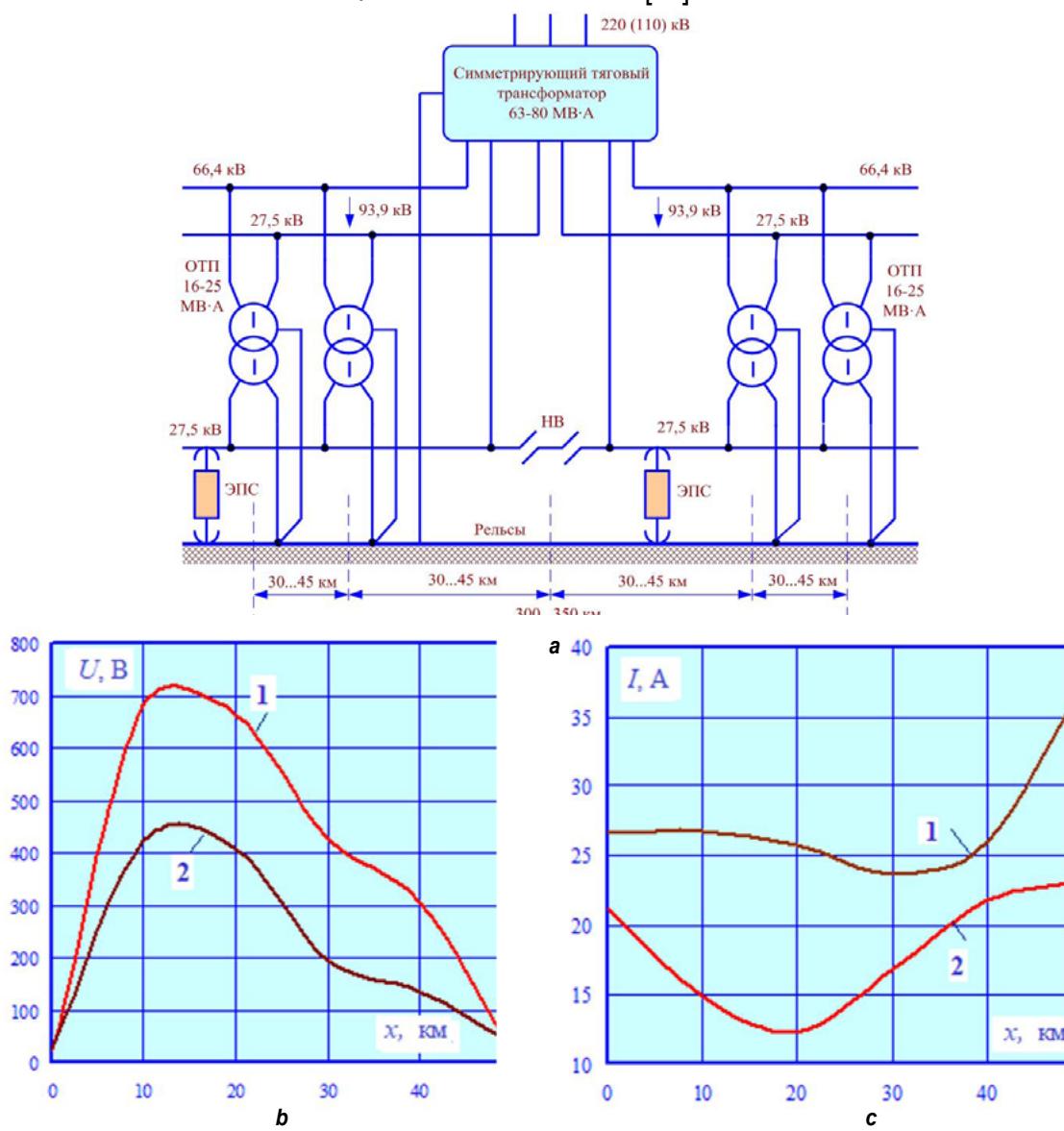


Рис. 3. Схема системы тягового электроснабжения с симметрирующими трансформаторами (а) и зависимости максимальных значений напряжений (б) и токов (с) от координаты x :
 1 – типовая система тягового электроснабжения 25 кВ; 2 – перспективная система тягового электроснабжения с симметрирующими трансформаторами; ОТП – однофазная тяговая подстанция;
 НВ – нейтральная вставка

Fig. 3 Diagram of the traction power supply system with balanced-to-unbalanced transformers (a) and the dependence of the maximum values of voltages (b) and currents (c) on the x-coordinate: 1 – typical 25 kV traction power supply system; 2 – advanced traction power supply system with balanced-to-unbalanced transformers; SPTS – single-phase traction substation; NL – neutral link

В тяговой сети устанавливаются однофазные трансформаторы с напряжениями обмоток 93,9/27,5 кВ, располагаемые на расстояниях 30...45 км. При моделировании были приняты размеры движения, аналогичные описанным в предыдущем разделе (рис. 1 *b, c, d*). На рис. 3 *b, c* приведены графики зависимостей максимальных и средних значений наведенных напряжений и токов, рассчитанных с учетом гармонических искажений, от координаты *x*.

На основе анализа представленных на рис. 3 *b, c* результатов можно сформулировать следующие выводы:

1. За счет размагничивающего действия питающих проводов в перспективной СТЭ имеет место более чем двукратное снижение максимумов наведенных напряжений в точках трубы, отвечающих координатам *x*, равным 30 и 40 км; в точках с координатами *x*, равными 10 и 20 км, наблюдается уменьшение напряжений в 1,6 раза. Напряжения по краям сооружения увеличиваются на 27...60%, но не превышают допустимых значений.

2. Максимумы токов, протекающих по трубе, увеличиваются по сравнению с ТС 25 кВ в 1,3...2,1 раза.

Моделирование результирующих электромагнитных влияний тяговой сети и высоковольтных линий электропередачи на трубопровод

Моделирование проводилось применительно к объекту (рис. 4 *a*), включающему ЛЭП 220 кВ, тяговую сеть 25 кВ и линию электропередачи 25 кВ с заземленной фазой (ЛЗФ). Расположение токоведущих частей в пространстве показано на рис. 4 *b*. Моделировалось движение шести поездов массой 6300 т в нечетном направлении (рис. 4 *c, d*). Результаты моделирования представлены на рис. 5–7.

Протяженность сближения была принята равной 10 км. Трасса была разбита на пять участков по 2 км. При моделировании учитывалось распределенное заземление трубопровода с проводимостью 0,002 См/км. Кроме того, по краям сооружения предполагалось

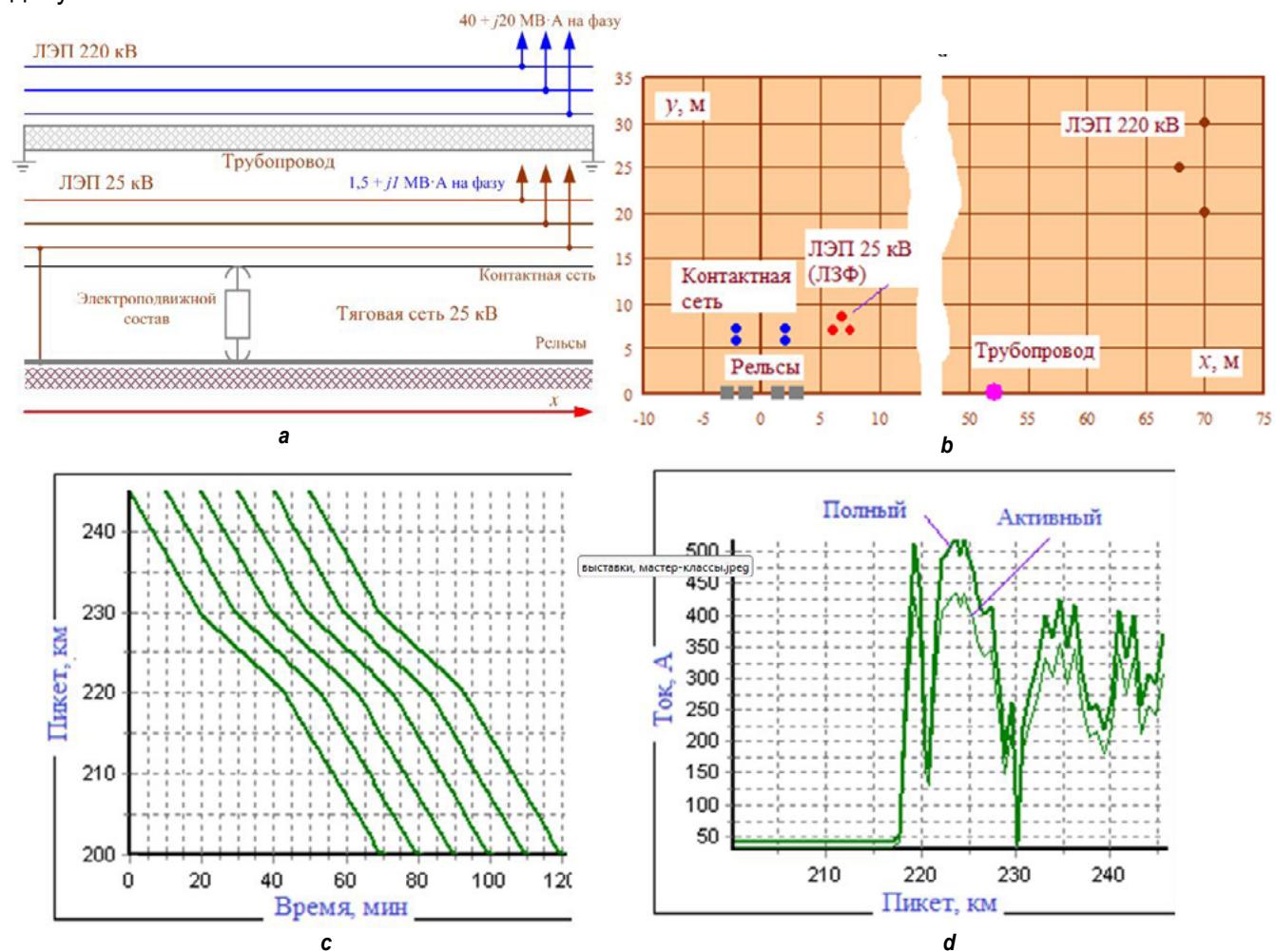


Рис. 4. Схема воздействия тяговой сети и линий электропередачи на трубопровод (а), координаты (б) расположения токоведущих частей, график движения (с) и токовый профиль (д) поезда массой 6300 т
Fig. 4 Diagram of the effect of the traction network and power lines on the pipeline (a), location coordinates of conductive parts (b), traffic schedule (c) and current profile (d) of a 6,300 t train

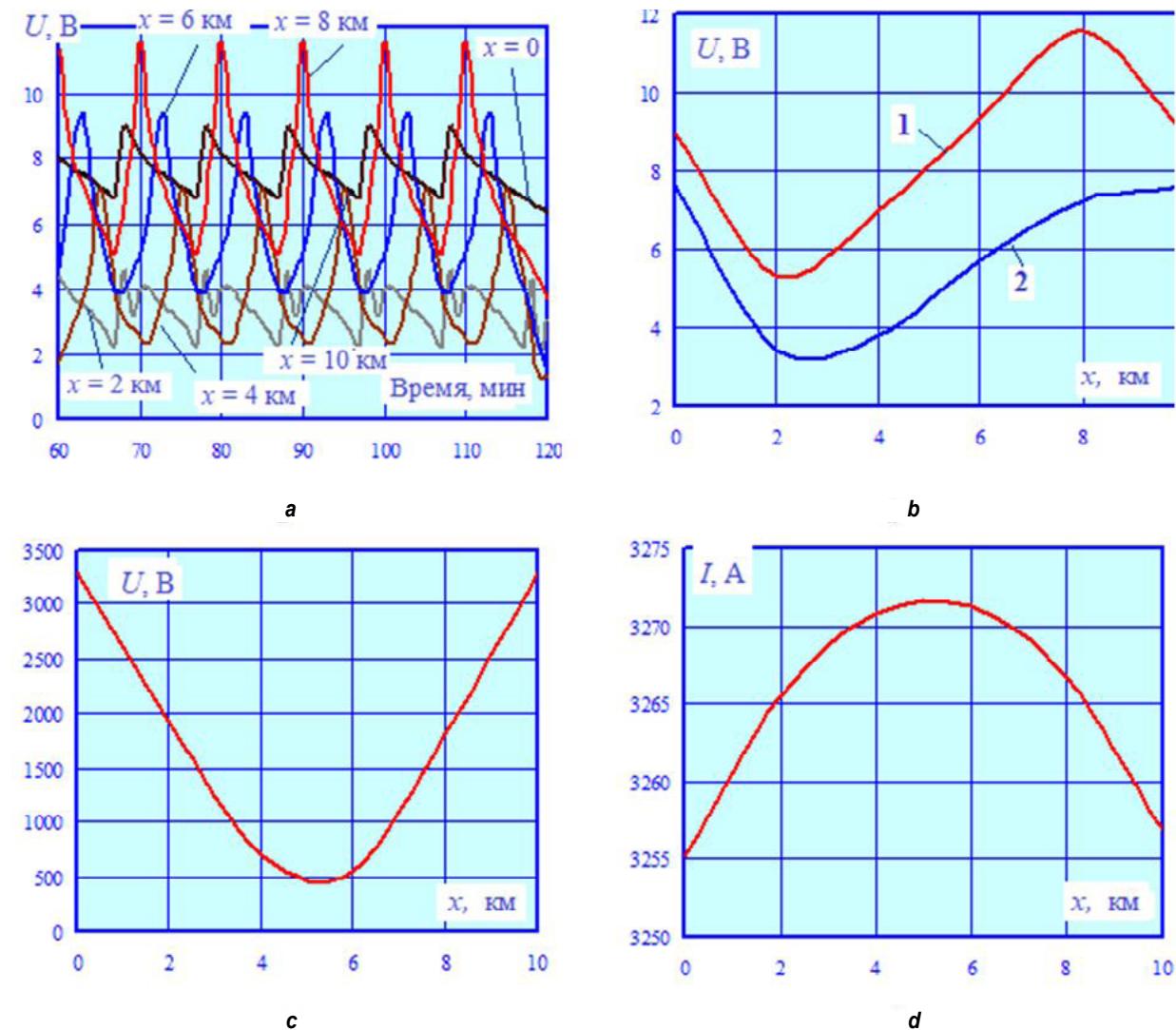


Рис. 5. Динамика изменений наведенных напряжений в нормальном режиме (а), зависимости (б) их максимальных и средних значений от координаты x ; зависимости максимумов наведенных напряжений (с) и токов (д), протекающих в трубе, от координаты x для режима однофазного короткого замыкания линий электропередачи 220 кВ: 1 – максимумы; 2 – средние значения

Fig. 5 Variation dynamics of induced voltages in normal operation conditions (a), dependences of their maximum and average values on the x coordinate (b); dependences of the maxima of induced voltages (c) and currents (d) flowing in the pipe on the x coordinate for the single-phase short circuit mode of a 220 kV transmission line: 1 –maxima; 2 – average values

галось наличие стационарных заземлений с сопротивлением 1 Ом. Для учета распределенности параметров при расчетах на частотах высших гармоник модели участков ТС с трубопроводом формировались в виде цепочечных схем.

Кроме описанного выше нормального режима работы СТЭ, осуществлялось моделирование следующих аварийных режимов:

- двухфазного, однофазного и двухфазного на землю КЗ на ЛЭП 220 кВ;
- однофазного КЗ на шинах 0,4 кВ подстанции, подключенной к ЛЗФ.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. В нормальном режиме тяговой сети и симметричных нагрузках ЛЭП 220 кВ и ЛЗФ

25 кВ максимумы наведенных напряжений не превышают допустимого предела [2] и лежат в диапазоне 5...12 В; аналогичный параметр для токов, протекающих по трубе, не превышает 9 А.

2. В аварийных режимах ЛЭП 220 кВ наведенные напряжения и токи существенно увеличиваются. При однофазном КЗ наибольшие наведенные напряжения наблюдаются на краях сооружения и достигают 3,3 кВ, что значительно превышает допустимое значение в 1000 В [2]. Близкие к указанным значениям величины токов и напряжений имеют место при двухфазном КЗ на землю.

3. Вследствие разной направленности токов двухфазного КЗ наведенные напряжения и токи значительно ниже величин, обозначенных в предыдущем пункте. Максимумы наведенных

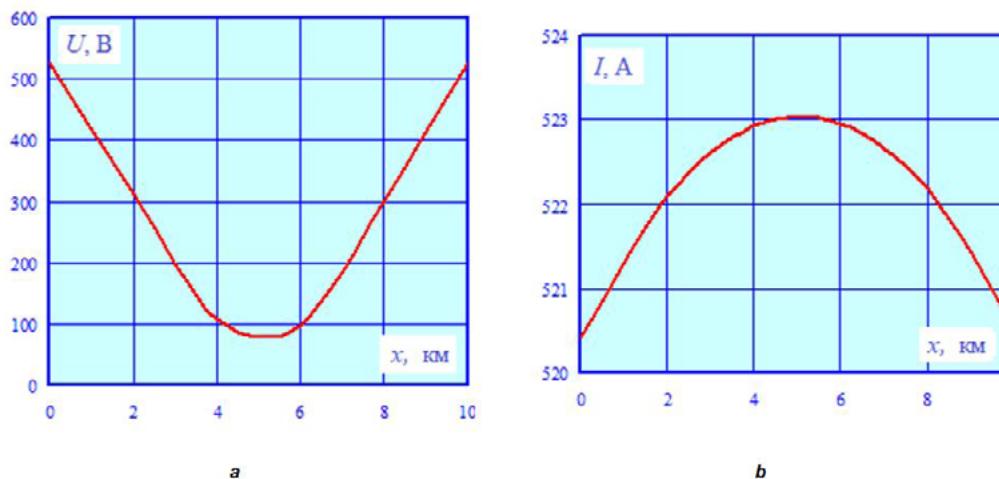


Рис. 6. Зависимости максимумов наведенных напряжений (а) и токов (б), протекающих в трубе, от координаты x для режима двухфазного короткого замыкания линий электропередачи 220 кВ
Fig. 6 Dependences of the maxima of induced voltages (a) and currents (b) flowing in the pipe, on the x coordinate for the two-phase short-circuit mode of a 220 kV transmission line

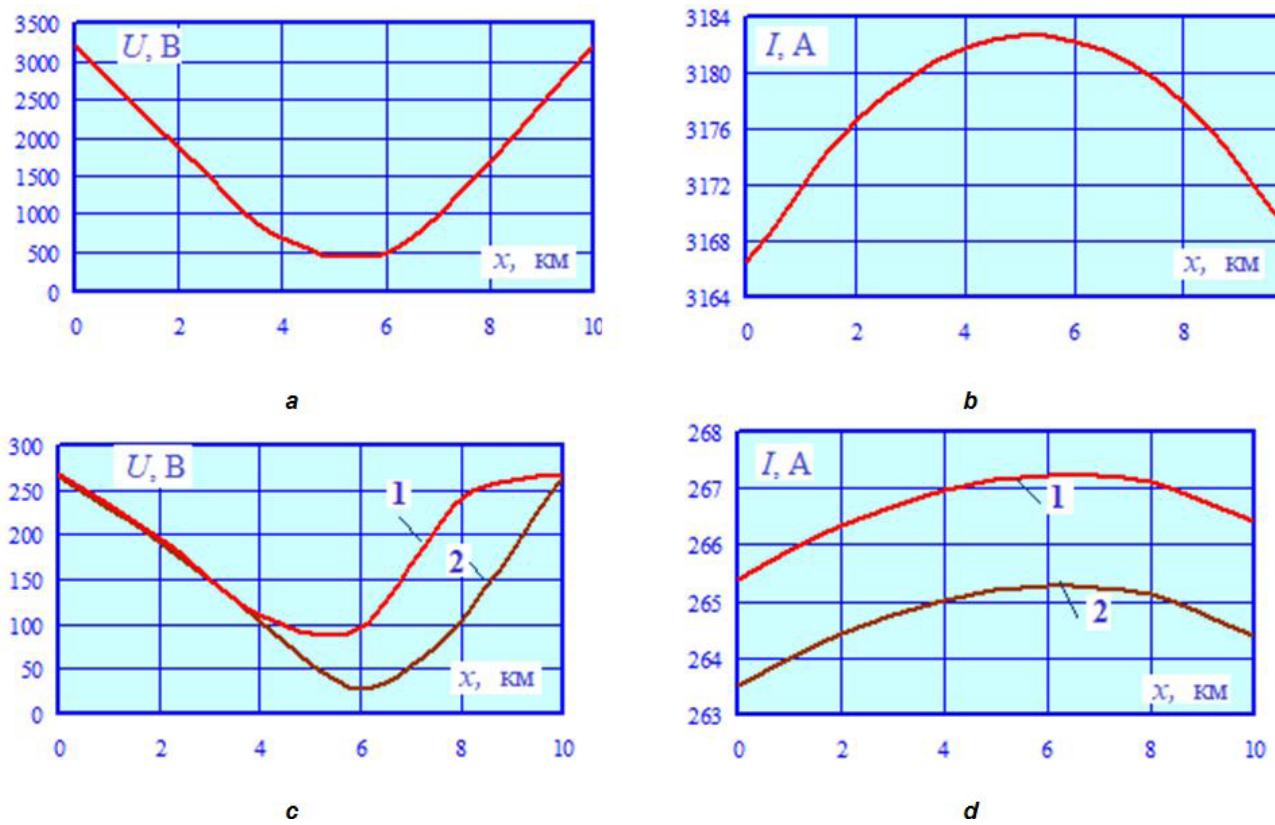


Рис. 7. Зависимости максимумов и средних значений наведенных напряжений (а) и токов (б), протекающих в трубе, от координаты x для режима двухфазного короткого замыкания на землю ЛЭП 220 кВ и для режима короткого замыкания на шинах 0,4 кВ подстанции (с, д), подключенной к линии заземленной фазы
Fig. 7 Dependences of the maxima and average values of the induced voltages (a) and currents (b) flowing in the pipe, on the x coordinate for the two-phase short circuit to the earth mode of the 220 kV power transmission line and for the short circuit mode on the 0.4 kV buses of the substation (c, d) connected to an earthed phase line

напряжений лежат в диапазоне 100...520 В и не выходят за допустимую границу. Максимумы токов, протекающих по трубе, находятся в пределах от 511 до 514 А.

4. При однофазном КЗ на шинах 0,4 кВ под-

станции, подключенной к линии с заземленной фазой, максимумы наведенных напряжений не превышают допустимого значения и лежат в пределах от 98 до 270 В. Аналогичному параметру для наведенных токов отвечает диапазон

265...267 А.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен метод, алгоритмы и цифровые модели, позволяющие определять наведенные напряжения на трубопроводах, расположенных в зонах электромагнитного влияния тяговых сетей и ЛЭП. Кроме того, на ее основе можно рассчитывать токи, протекающие по трубе. Методика отличается от известных системностью, многофункциональностью и универсальностью. Системный подход обеспечивается за счет того, что наведенные на трубопроводе напряжения и токи определяются на основе расчета режима сложной СТЭ в фазных координатах; при этом корректно учитывается внешняя сеть питающей ЭЭС. Кроме того, учитывается динамика изменения тяговых нагрузок во времени путем моделирования движения поездов по реальным профилям пути. Многофункциональность достигается за счет возможности моделирования не только режимных параметров, но и электромагнитных полей, создаваемых вблизи трубопровода. Универсальность обеспечивается возможностью моделирования тяговых сетей и ЛЭП

любых конструкций.

Возможен расчет электромагнитных влияний при сложных траекториях сближения ЛЭП и ТС, включающих непараллельные участки.

При моделировании учитываются все значимые факторы, влияющие на интенсивность электромагнитных влияний:

- модули и фазы токов и напряжений влияющей ЛЭП или ТС, определяемые режимом сложной системы тягового электроснабжения с учетом питающей ЭЭС;

- характер траектории и коридора сближения ЛЭП (ТС) и трубопровода: параллельное или косое сближение, пересекающиеся и сложные траектории, включающие параллельные и косые участки;

- способы заземления трубопровода и места расположения заземляющих устройств;

- длина участка сближения и сопротивление земли на его трассе;

- сопротивление изоляционных покрытий.

Методика корректно работает в ближней, промежуточной и дальней зонах интеграла Карсона. Методика обобщается на случай подземной прокладки трубопровода [28].

Список источников

1. Котельников А.В., Косарев А.Б. Электромагнитное влияние тяговых сетей переменного тока на металлические коммуникации // Электричество. 1992. № 9. С. 26–34.
2. Technische Richtlinien-71 (TRL-71). EMR-Technic Kathodischer Korrosionsschutz fur Erdgasfernleitungen. Р. 80.
3. Шамшетдинов К.Л. Особенности электрометрического контроля противокоррозионной защиты подземных трубопроводов в условиях влияния высоковольтных линий электропередач // Трубопроводный транспорт: теория и практика. 2008. № 1. С. 58–60.
4. Ратнер М.П. Индуктивное влияние электрифицированных железных дорог на электрические сети и трубопроводы. М.: Транспорт, 1966. 164 с.
5. Коннова Е.И., Косарев А.Б. Расчет электромагнитного влияния сетей переменного тока на металлические коммуникации // Вестник ВНИИЖТ. № 2. 1990. С. 17–19.
6. Charalambous C.A., Demetriou A., Lazari A.L., Nikolaidis A.I. Effects of electromagnetic interference on underground pipelines caused by the operation of high voltage ac traction systems: the impact of harmonics // IEEE Transactions on Power Delivery. 2018. Vol. 33. Iss. 6. Р. 2664–2672. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2018.2803080>.
7. Czumbil L., Micu D., Munteanu C., Stet D., Tomoioaga B. Optimal design of the pipeline right-of-way nearby high voltage transmission lines using genetic algorithms // 50th International Universities Power Engineering Conference. 2015. <https://doi.org/10.1109/UPEC.2015.7339841>.
8. Gupta A., Thomas M.J. Coupling of high voltage AC power lines fields to metallic pipelines // 9th International Conference on Electro Magnetic Interference and Compatibility (Bangalore, 23–24 February 2006). Bangalore, 2016.
9. Shahri A.S., Nair N.-K.C. Overhead shielding wire and induced potential on pipeline located close to high voltage transmission // Australasian Universities Power Engineering Conference. 2016. <https://doi.org/10.1109/AUPEC.2016.7749379>.
10. Alshahr A.S. Assessment of induced potential on metallic pipeline located nearby to EHV AC OHTL // IEEE 2nd International Conference on Signal, Control and Communication. 2021. <https://doi.org/10.1109/SCC53769.2021.9768375>.
11. Janda Z., Noháć K. Analysis of the inductive effects of overhead lines to close pipelines // Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering. 2014. <https://doi.org/10.1109/EPE.2014.6839430>.
12. Mu Wenzhe, Zhao Zhibin, Zhu Yongmei, Lei Xiaozhou. A rapid modeling for analysis the effect of transmission line to oil and gas pipeline // Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2016. Vol. 1. <https://doi.org/10.1109/APEMC.2016.7522916>.
13. Chai Chia Soon, Kadir M.Z.A.A., Izadi M., Jasni J., Gomes C. The effect of electromagnetic fields due to hv line on the parallel pipeline // IEEE International Conference on Power and Energy. 2014. <https://doi.org/10.1109/PECON.2014.7062407>.
14. Sawma E., Zeitoun B., Harmouche N., Georges S., Hamad M., Slaoui F.H. Electromagnetic induction in pipelines due to overhead high voltage power lines // International Conference on Power System Technology. 2010. <https://doi.org/10.1109/POWERCON.2010.5666086>.
15. Junyang Li Xun. Interference on buried pipeline with insulating flange near high voltage transmission line // 2nd IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference. 2018. <https://doi.org/10.1109/IMCEC.2018.8469489>.

16. Shwehdi M.H., Alaql M.A., Mohamed S.R. EMF Analysis for a 380kV transmission OHL in the vicinity of buried pipelines // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 3710–3717. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2961109>.
17. Shahri A.S.A., Nair N.-K.C. AC potential on pipelines nearby EHV power lines due to low frequency induction // Australasian Universities Power Engineering Conference (Wollongong, 27–30 September 2015). Wollongong: IEEE, 2015. <https://doi.org/10.1109/AUPEC.2015.7324828>.
18. Dawalibi F., Pinho A. Computerized analysis of power systems and pipelines proximity effects // IEEE Transactions on Power Delivery. 1986. Vol. 1. Iss. 2. P. 40–48. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.1986.4307932>.
19. Haifeng Sun, Pei Wang, Haojing Chang, Xiancang Ai, Tianlong E., Bonian Su, et al. Study on electromagnetic influence of 750 kV AC transmission lines on multiple buried pipelines // Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2016. <https://doi.org/10.1109/APEMC.2016.7522725>.
20. Liu Xing-Ting, Wang Wei, Yu Hua. Analysis of mutual electromagnetic influence between transmission line and buried pipeline // 4th International Conference on Information Science and Control Engineering. 2017. <https://doi.org/10.1109/ICISCE.2017.293>.
21. Alshahri A.S., Dinh Minh Thi Nguyet, Nair N.K.C. Induced voltage on pipeline located close to high voltage lines due to electromagnetic induction // Australasian Universities Power Engineering Conference. 2014. <https://doi.org/10.1109/AUPEC.2014.6966589>.
22. Lu Duo, Liu Chenlong, Qi Lei, Yuan Hui. Mitigation of electromagnetic influence on the buried metal pipeline near overhead AC transmission line // Sixth International Conference on Electromagnetic Field Problems and Applications. 2012. <https://doi.org/10.1109/ICEF.2012.6310384>.
23. Adamek M., Vostracky Z. Interference from transmission lines to buried pipelines // 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering. 2015.
24. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложннесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Иркутский ун-т, 2005. 273 с.
25. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Determination of the induced voltages when nonparallel power lines are adjacent to one another // Power Technology and Engineering. 2015. Vol. 49. Iss. 4. P. 304–309. <https://doi.org/10.1007/s10749-015-0620-4>.
26. Carson I.R. Wave propagation in overhead wires with ground return // Bell Systems Technical Journal. 1926. Vol. 5. Iss. 4. P. 539–554. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1926.tb00122.x>.
27. Василянский А.М., Мамошин Р.Р., Якимов Г.Б. Совершенствование системы тягового электроснабжения железных дорог, электрифицированных на переменном токе 27,5 кВ, 50 Гц // Железные дороги мира. 2002. № 8. С. 40–46.
28. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Определение собственных и взаимных сопротивлений в многопроводных системах, содержащих подземные провода // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2021. № 1. С. 184–191. [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2021.1\(69\).184-191](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2021.1(69).184-191).

References

1. Kotel'nikov A.V., Kosarev A.B. Electromagnetic influence of AC traction networks on metal communications. *Elektrichestvo*. 1992;9:26-34. (In Russ.).
2. Technische Richtlinien-71 (TRL-71). EMR-Technic Kathodischer Korrosionsschutz fur Erdgasfernleitungen. P. 80.
3. Shamshetdinov K.L. Features of electrometric control of underground pipeline corrosion protection under the influence of high-voltage power lines. *Truboprovodnyj transport: teoriya i praktika*. 2008;1:58-60. (In Russ.).
4. Ratner M.P. *Inductive influence of electrified railways on electrical networks and pipelines*. Moscow: Transport; 1966, 164p. (In Russ.).
5. Konnova E.I., Kosarev A.B. *Calculation of the electromagnetic influence of alternating current networks on metal communications*. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnoego transporta = Russian Railway Science Journal*. 1990;2:17-19. (In Russ.).
6. Charalambous C.A., Demetriou A., Lazaris A.L., Nikolaidis A.I. Effects of electromagnetic interference on underground pipelines caused by the operation of high voltage AC traction systems: the impact of harmonics. In: *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2018;33(6):2664-2672. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2018.2803080>.
7. Czumbil L., Micu D., Munteanu C., Stet D., Tomoioaga B. Optimal design of the pipeline right-of-way nearby high voltage transmission lines using genetic algorithms. In: *50th International Universities Power En-gineering Conference*. 2015. <https://doi.org/10.1109/UPEC.2015.7339841>.
8. Gupta A., Thomas M.J. Coupling of high voltage AC power lines fields to metallic pipelines. In: *9th International Conference on Electro Magnetic Interference and Compatibility*. 23–24 February 2006, Bangalore.
9. Shahri A.S., Nair N.-K.C. Overhead shielding wire and induced potential on pipeline located close to high voltage transmission. In: Australasian Universities Power Engineering Conference. 2016. <https://doi.org/10.1109/AUPEC.2016.7749379>.
10. Alshahr A.S. Assessment of induced potential on metallic pipeline located nearby to EHV AC OHTL. In: *IEEE 2nd International Conference on Signal, Control and Communication*. 2021. <https://doi.org/10.1109/SCC53769.2021.9768375>.
11. Janda Z., Noháć K. Analysis of the inductive effects of overhead lines to close pipelines. In: *Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering*. 2014. <https://doi.org/10.1109/EPE.2014.6839430>.
12. Mu Wenzhe, Zhao Zhibin, Zhu Yongmei, Lei Xiaozhou. A rapid modeling for analysis the effect of trans-mission line to oil and gas pipeline. In: *Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. 2016. Vol. 1. <https://doi.org/10.1109/APEMC.2016.7522916>.
13. Chai Chia Soon, Kadir M.Z.A.A., Izadi M., Jasni J., Gomes C. The effect of electromagnetic fields due to hv line on the parallel pipeline. In: *IEEE International Conference on Power and Energy*. 2014. <https://doi.org/10.1109/PECON.2014.7062407>.
14. Sawma E., Zeitoun B., Harmouche N., Georges S., Hamad M., Slaoui F.H. Electromagnetic induction in pipelines due to overhead high voltage power lines. In: *International Conference on Power System Technology*. 2010. <https://doi.org/10.1109/POWERCON.2010.5666086>.

15. Junyang Li Xun. Interference on buried pipeline with insulating flange near high voltage transmission line. In: *2nd IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference*. 2018. <https://doi.org/10.1109/IMCEC.2018.8469489>.
16. Shwehdi M.H., Alaql M.A., Mohamed S.R. EMF Analysis for a 380kV transmission OHL in the vicinity of buried pipelines. In: *IEEE Access*. 2020;8:3710-3717. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2961109>.
17. Shahri A.S.A., Nair N.-K.C. AC potential on pipelines nearby EHV power lines due to low frequency induction. In: *Australasian Universities Power Engineering Conference*. 27–30 September 2015, Wollongong. Wollongong: IEEE; 2015. <https://doi.org/10.1109/AUPEC.2015.7324828>.
18. Dawalibi F., Pinho A. Computerized analysis of power systems and pipelines proximity effects. In: *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1986;1(2):40-48. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.1986.4307932>.
19. Haifeng Sun, Pei Wang, Haojing Chang, Xiancang Ai, Tianlong E., Bonian Su, et al. Study on electro-magnetic influence of 750 kV AC transmission lines on multiple buried pipelines. In: *Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. 2016. <https://doi.org/10.1109/APEMC.2016.7522725>.
20. Liu Xing-Ting, Wang Wei, Yu Hua. Analysis of mutual electromagnetic influence between transmission line and buried pipeline. In: *4th International Conference on Information Science and Control Engineering*. 2017. <https://doi.org/10.1109/ICISCE.2017.293>.
21. Alshahri A.S., Dinh Minh Thi Nguyet, Nair N.K.C. Induced voltage on pipeline located close to high voltage lines due to electromagnetic induction. In: *Australasian Universities Power Engineering Conference*. 2014. <https://doi.org/10.1109/AUPEC.2014.6966589>.
22. Lu Duo, Liu Chenlong, Qi Lei, Yuan Hui. Mitigation of electromagnetic influence on the buried metal pipe-line near overhead AC transmission line. In: *Sixth International Conference on Electromagnetic Field Problems and Applications*. 2012. <https://doi.org/10.1109/ICEF.2012.6310384>.
23. Adamek M., Vostracky Z. Interference from transmission lines to buried pipelines. In: *16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering*. 2015.
24. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. *Complex unbalanced modes of electrical systems*. Irkutsk: Irkutsk State University; 2005, 273 p. (In Russ.).
25. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Determination of the induced voltages when nonparallel power lines are adjacent to one another. *Power Technology and Engineering*. 2015;49(4):304-309. <https://doi.org/10.1007/s10749-015-0620-4>.
26. Carson I.R. Wave propagation in overhead wires with ground return. *Bell Systems Technical Journal*. 1926;5(4):539-554. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1926.tb00122.x>.
27. Vasilyanskij A.M., Mamoshin R.R., Yakimov G.B. Improvement of the traction power supply system for 27.5 kV, 50 Hz alternating current railways. *Zheleznye dorogi mira*. 2002;8:40-46. (In Russ.).
28. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Determination of self-impedances and mutual impedances in multi-wire systems containing underground wires. *Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie = Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2021;1:184-191. (In Russ.). [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2021.1\(69\).184-191](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2021.1(69).184-191).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Суслов Константин Витальевич,

д.т.н., профессор,
профессор кафедры электроснабжения и электротехники,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
профессор кафедры гидроэнергетики и
возобновляемых источников энергии,
Национальный исследовательский университет
«Московский энергетический институт»,
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1,
Россия
✉ dr.souslov@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0484-2857>

Крюков Андрей Васильевич,

д.т.н., профессор,
профессор кафедры электроснабжения и электротехники,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
профессор кафедры электроэнергетики транспорта,
Иркутский государственный университет путей сообщения,
профессор кафедры электроэнергетики транспорта,
Иркутский государственный университет путей сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия
and_kryukov@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Konstantin V. Suslov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Power Supply and Electrical
Engineering, School of Power Engineering,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
Professor of the Department of Hydropower Engineering
and Renewable Energy,
National Research University “Moscow Power Engineering
Institute”, 14, Krasnokazarmennaya St., Moscow 111250,
Russia
✉ dr.souslov@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0484-2857>

Andrey V. Kryukov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Power Supply
and Electrical Engineering,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
Professor of the Department of Electric
Power Engineering of Transport,
Irkutsk State Transport University,
15, Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia
and_kryukov@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>

Илюшин Павел Владимирович,
д.т.н.,
руководитель Центра интеллектуальных
электроэнергетических систем и распределенной
энергетики Института энергетических исследований РАН;
117186, г. Москва, ул. Нагорная, д. 31, корп. 2, Россия
ilyushin.pv@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5183-3040>

Черепанов Александр Валерьевич,
к.т.н., доцент,
доцент кафедры электроэнергетики транспорта,
Иркутский государственный университет путей
сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия
smart_grid@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7712-9537>

Крюков Александр Егорович,
аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
appleforevor@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3272-5738>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку
публикации.

Конфликт интересов

Суслов К.В. и Крюков А. В. являются членами
редакционной коллегии журнала «iPolytech Journal»
с 2015 года, но не имеют отношения к решению
опубликовать эту статью. Статья прошла принятую
в журнале процедуру рецензирования. Об иных
конфликтах авторы не заявляли.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 12.04.2023 г.;
одобрена после рецензирования 27.05.2023 г.; принятая к
публикации 10.06.2023 г.

Pavel V. Ilyushin,
Dr. Sci. (Eng.),
Head of the Center for Intelligent Electric Power
Systems and Distributed Energy of the Energy Research
Institute RAS; 31, Nagornaya St., Moscow 117186, Russia
ilyushin.pv@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5183-3040>

Aleksandr V. Cherepanov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Electric Power Engineering of Transport,
Irkutsk State Transport University,
15, Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia;
smart_grid@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7712-9537>

Aleksandr E. Kryukov,
Postgraduate Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
appleforevor@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3272-5738>

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

Konstantin V. Suslov and Andrey V. Kryukov have been
members of the editorial board of iPolytech Journal since
2015, but they have not been involved in decision-making
on acceptance of this article. The article was evaluated by
experts according to the Journal's peer review procedure.
The authors did not declare any other conflicts.

Information about the article

The article was submitted 12.04.2023; approved
after reviewing 27.05.2023; accepted for publication
10.06.2023.

Научная статья
УДК 621.316.1
EDN: TVYZCE
DOI: 10.21285/1814-3520-2023-3-565-573

ЭНЕРГЕТИКА



Метод прогнозирования и расчета электрической нагрузки коммунально-бытовых потребителей в условиях неопределенности

С.Ш. Таваров¹✉, А.И. Сидоров², И.Ф. Суворов³, А.Б. Святых⁴

^{1,2}Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

³Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия

⁴ООО «Ураленергосбыт», г. Челябинск, Россия

Резюме. Цель – исследование соответствия фактического электропотребления расчетному в распределительных электрических сетях с преобладанием коммунально-бытовых потребителей ряда городов Челябинской области. Для исследования соответствия между удельной электрической нагрузкой, установленной нормативной документацией, и фактической на одну квартиру по данным электропотребления в ряде городов Челябинской области проанализировано среднегодовое электропотребление коммунально-бытовыми потребителями с определенным количеством квартир за 2021–2022 гг. Анализ соответствия среднегодового электропотребления коммунально-бытовыми потребителями рассматриваемых объектов проводился на основе действующего метода расчета электрической нагрузки за рассматриваемый период согласно СП 256.1325800.2016. Определено расхождение между реальной электрической нагрузкой на квартиру и ее нормативным значением, установленным действующими в настоящее время нормативными документами, которое составило по электропотреблению от минус 48 до 300%. Для рассматриваемых 16 объектов принадлежности городов Челябинской области произведены сравнения расхождения фактической электрической нагрузки с установленными нормативными значениями. Расхождение между фактической и удельной нагрузками на квартиру составило для 6 квартир от минус 58 до 155%. Для повышения точности прогноза электропотребления в распределительных электрических сетях с преобладанием коммунально-бытовых потребителей и расчета электрических нагрузок предлагается новый показатель – обобщенный коэффициент неопределенности A_n , значения которого определены для рассматриваемого периода. Таким образом, с использованием предложенного коэффициента рекомендованы методы прогнозирования электропотребления в распределительных электрических сетях с преобладанием коммунально-бытовых потребителей и расчета электрических нагрузок. При применении разработанных методов отклонения в прогнозных расчетах в относительных величинах не превышают 10%.

Ключевые слова: электрическая нагрузка, электропотребление, обобщенный коэффициент неопределенности, удельная нагрузка

Для цитирования: Таваров С.Ш., Сидоров А.И., Суворов И.Ф., Святых А.Б. Метод прогнозирования и расчёта электрической нагрузки коммунально-бытовых потребителей в условиях неопределённости // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 3. С. 565–573. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-565-573>. EDN: TVYZCE.

POWER ENGINEERING

Original article

Method for forecasting and calculating the electrical load of municipal consumers under uncertainty

Saidjon Sh. Tavarov¹✉, Aleksandr I. Sidorov², Ivan F. Suvorov³, Andrey B. Svyatikh⁴

^{1,2}South-Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia

³Transbaikal State University, Chita, Russia

⁴Uralenergosbyt LLC, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The study addresses the conformity of actual electricity consumption to the calculated value in electric distribution networks in which municipal consumers predominate in several cities of the Chelyabinsk region. To study the conformity between the specific electrical load established by regulatory documents and the actual value per apartment according to power consumption data in several cities of the Chelyabinsk region, the average annual power consumption by municipal consumers with a specific number of apartments was analyzed over a period of 2021–2022. The correspondence

analysis of the average annual electricity consumption by municipal consumers in the studied facilities was carried out using the conventional method for calculating the electrical load over the given period following the guidelines outlined in SP 256.1325800.2016. The discrepancy between the actual electrical load on the apartment and its normative value established by the acting normative documents ranged from minus 48 to 300% with respect to electricity consumption. For the considered 16 objects located in the cities of the Chelyabinsk region, the discrepancy between the actual electrical load and the established normative values was compared. For 6 apartments, this discrepancy ranged from minus 58 to 155%. To improve the accuracy of forecasting electricity consumption and calculating electrical loads in electric distribution networks with a predominance of municipal consumers, methods using a new factor were recommended. This factor involves a generalized uncertainty coefficient A_p , whose values are determined for the considered period. When using the developed methods, relative deviations in the forecast calculations are less than or equal to 10%.

Keywords: electrical load, power consumption, generalized uncertainty coefficient, specific load

For citation: Tavarov S.Sh., Sidorov A.I., Suvorov I.F., Svyatikh A.B. Method for forecasting and calculating the electrical load of municipal consumers under uncertainty. *iPolytech Journal*. 2023;27(3):565-573. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-565-573>. EDN: TVYZCE.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, одним из показателей надежности городского электроснабжения является частота отказа, которая имеет прямую зависимость от электрической нагрузки. Эффективность же распределительной электрической сети оценивается по продолжительности недоотпуска электроэнергии – чем меньше, тем лучше, а также потерями электроэнергии.

В последние годы существенно возросло потребление электрической энергии в коммунально-бытовых электрических сетях, что обусловлено как объективными причинами (отсутствие или обеспечение газоснабжением, горячим теплоснабжением), так и субъективными (человеческим безразличием к состоянию бытовых электроприемников – включены они или своевременно отключены).

Такое положение дел привело к несоответствию между нормативным значением удельной электрической нагрузки на квартиру и фактическим [1–5].

Все это в определенной степени приводит к снижению надежности элементов распределительных электрических сетей напряжением 6–10 кВ, их меньшей энергоэффективности [6–17], а также сказывается на работе тех бытовых электроприемников, которые чувствительны к качеству электрической энергии, подаваемой непосредственно в квартиры.

Кроме того, несимметрия нагрузок в электрических сетях коммунально-бытового назначения ускоряет процесс старения изоляции в них, что может являться причиной пожаров.

Для решения указанной проблемы необходимо установить факторы, создающие неопределенность в прогнозировании электропотребления, предложить и обосновать новый метод прогнозирования и расчета электрической нагрузки, позволяющий повысить точность ее прогноза и расчета.

Однако прежде необходимо показать несоответствие между фактической и удельной электрической нагрузкой на квартиру.

За исходные параметры примем реальные значения электропотребления, полученные по приборам учета электроэнергии, установленным у коммунально-бытовых потребителей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования соответствия между удельной электрической нагрузкой, установленной нормативной документацией и фактической на одну квартиру по данным электропотребления в ряде городов Челябинской области проанализировано среднегодовое электропотребление коммунально-бытовыми потребителями с определенным количеством квартир за 2021–2022 гг., (рис. 1). Исходные данные рассматриваемых потребителей приведены в табл. 1.

Таблица 1. Данные рассматриваемых коммунально-бытовых потребителей

Table 1. Data of the household consumers under investigation

№ п/п	Объект принадлежности	Территориальная расположенность	Всего квартир
1	г. Троицк	мкр 2-й	41
2	г. Троицк	мкр 2-й	83
3	г. Троицк	мкр 2-й	60
4	г. Троицк	мкр 2-й	106
5	г. Миасс	ул. Победы	60
6	г. Миасс	ул. Уральская	55
7	г. Миасс	ул. Уральская	60
8	г. Миасс	ул. Уральская	56
9	г. Сатка	пр-кт Мира	76
10	г. Сатка	пр-кт Мира	75
11	г. Сатка	пр-кт Мира	74
12	г. Сатка	пр-кт Мира	72
13	г. Южноуральск	пр-кт Мира	64
14	г. Южноуральск	ул. Строителей	33
15	г. Южноуральск	ул. Строителей	64
16	г. Южноуральск	ул. Строителей	36

На основании полученной информации от Энергосбытовой организации рассматриваемые потребители, приведенные в табл. 1, относятся к категории без газоснабжения.

Согласно СП 256.1325800.2016, на одну квартиру для данных потребителей удельная электрическая нагрузка составляет 10 кВт/кв (киловатт на квартиру).

На рис. 1 показаны значения величин потребления электроэнергии с усреднением на 1 квартиру рассматриваемых коммунально-бытовых потребителей, приведенных в табл. 1.

По формуле (1) для рис. 1 рассчитана средняя мощность за определенный период рассматриваемых потребителей.

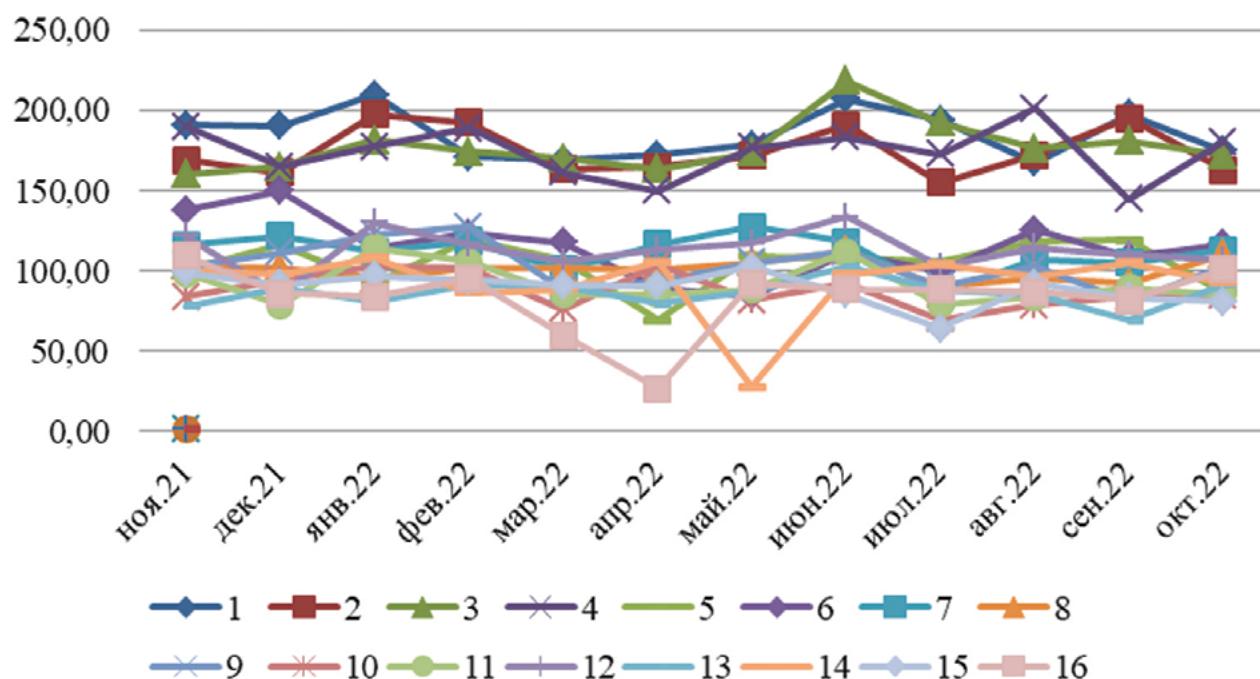


Рис. 1. Среднегодовое электропотребление с усреднением на 1 квартиру рассматриваемых коммунально-бытовых потребителей

Fig. 1. Average annual power consumption with averaging per 1 apartment of the household consumers under investigation

средняя мощность за определенный период рассматриваемых потребителей.

$$P_{\text{кв.}} = \frac{W_{\text{факт.}} \times N_j}{T_{\text{м.и}}} , \quad (1)$$

где $W_{\text{факт.}}$ – фактическое среднее электропотребление на одну квартиру, кВт·ч/мес; N_j – количество квартир, шт. (где j – порядковый номер в табл. 1); $T_{\text{м.и}}$ – число часов в i -м периоде.

Результаты представлены на рис. 2.

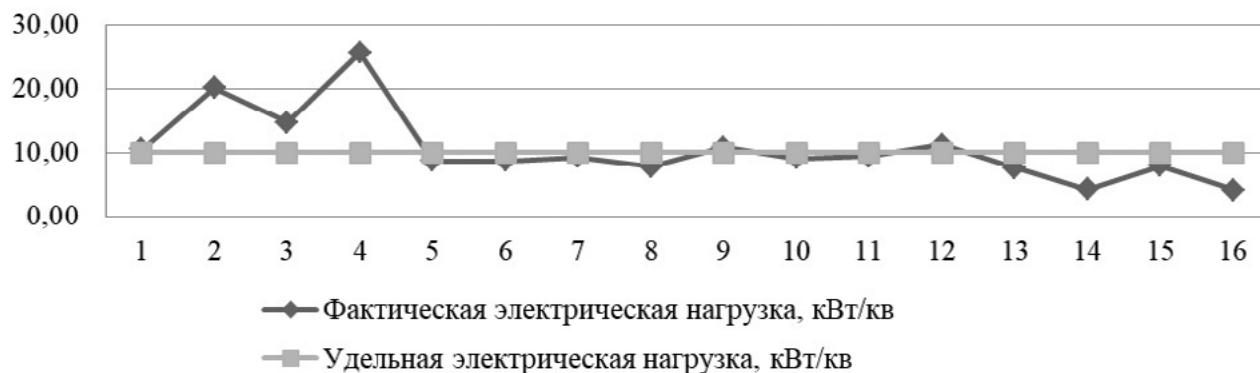


Рис. 2. Расхождение между фактической и удельной электрическими нагрузками на квартиру
Fig. 2. Discrepancy between the actual and specific electrical loads per apartment



Рис. 3. Расхождение результатов фактического электропотребления с проектным при заданной удельной электрической нагрузке на квартиру

Fig. 3. Discrepancy between the actual and design power consumption results for a given specific electrical load per apartment

Согласно рис. 3., относительная разница между фактическим и проектным электропотреблением, вытекающая из значений удельной электрической нагрузки на квартиру, находится в пределах от 48 до 300% в части потребителей. Но так как развитие видов электроприемников и потребность потребителей в них растет, то такая разница между удельными и фактическими значениями мощности будет только увеличиваться и распространяться на все виды многоквартирных жилых домов.

Таким образом, можно утверждать, что действующее значение удельной электрической нагрузки на квартиру не соответствует реальным условиям.

торы [17–20] (учет перепада высот над уровням моря и материальное положение владельцев квартир, и др.) при разработке удельной электрической нагрузки на квартиру, что позволило нам предложить новый так называемый обобщенный коэффициент неопределенности A_i . При этом необходимо отметить, что при определении A_i учитываются коммунально-бытовые потребители, получающие питание как от комбинированных источников (традиционных (T)), так и от одиночных источников (например, полностью на гидроэлектроэнергии или на возобновляемом источнике энергии – солнечные ветровые и т.п.) на электрической энергии (\mathcal{E}):

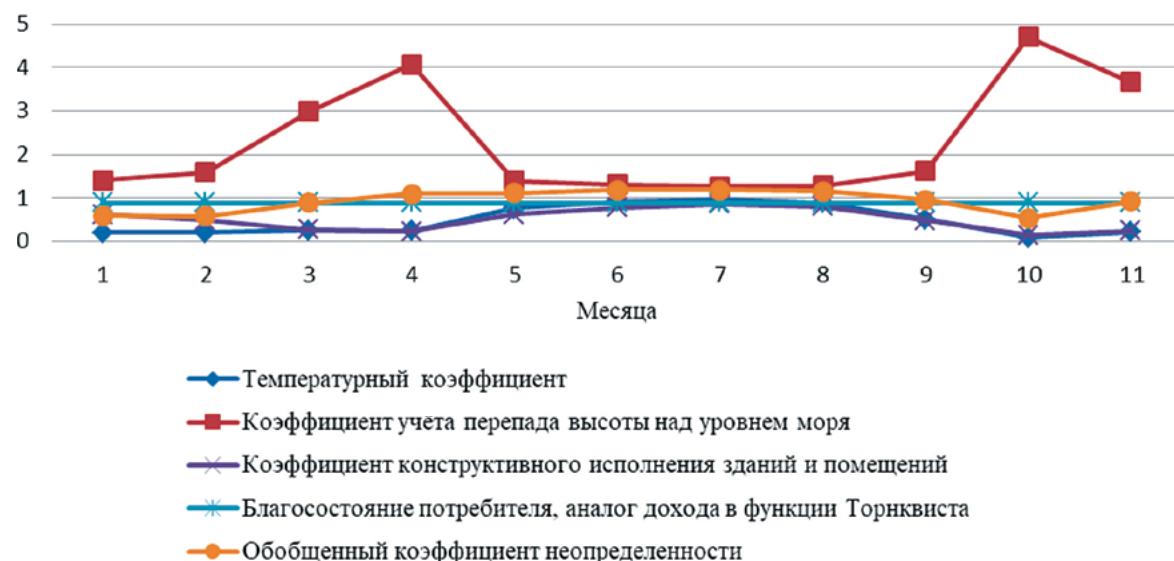


Рис. 4. Расчет обобщенного коэффициента неопределенности для рассматриваемых объектов
Fig. 4. Calculation of the generalized coefficient of uncertainty for the facilities under consideration

С применением ряда математических и модельных аппаратов (статистические и эконометрические модели для сбора и обработки данных по электропотреблению, модели для выявления факторов неопределенности, теории нечетких множеств, нейросетевые модели) были установлены ранее неучитываемые фак-

$$A_{i(T)} = (t_i \cdot h + c)/(s + k); \quad (2)$$

$$A_{i(\mathcal{E})} = (t_i \cdot h \cdot c)/(s \cdot k), \quad (3)$$

где t_i – температурный коэффициент (участвующий в метеорологический фактор);

h – коэффициент, учитывающий расположенност потребителей над уровнем моря; s – коэффициент, учитывающий конструктивное исполнение жилого дома; s – коэффициент материального(финансового) положения потребителя (благосостояния потребителя, аналог дохода функции Торнквиста); k – коэффициент, учитывающий различное количество электроприемников у потребителя [20].

Учитывая, что рассматриваемые нами потребители электроэнергии относятся к группе (T), сравнение проводим с использованием $A_{i(T)}$ обобщенного коэффициента неопределенности, который рассчитываем по уравнению (2).

С использованием интернет-ресурса были найдены среднемесячные температуры для рассматриваемых объектов – t_1 , t_2 и t_3 , где цифры 1 – температуры окружающего воздуха

в месте расположения потребителя; 2 – добавочная температура, учитывающая разность температур снаружи дома и внутри помещения; 3 – температура окружающего воздуха в точке 0 над уровнем моря.

В свою очередь, коэффициенты s и k были получены с помощью критерия Фишера.

На рис. 4 представлены расчеты A_i , для рассматриваемых объектов.

С использованием обобщенного коэффициента неопределенности предлагаем методы прогнозирования на основе учета предыдущего электропотребления и расчета электрических нагрузок коммунально-бытовых потребителей, см. выражения (4) и (5).

Метод расчета электрической нагрузки квартир с учетом обобщенного коэффициента неопределенности:

$$P_{(p), \text{кв.}} = \frac{W_{\text{пред.}}}{T_{M,i}} \times A_{i(T)} \quad (4)$$

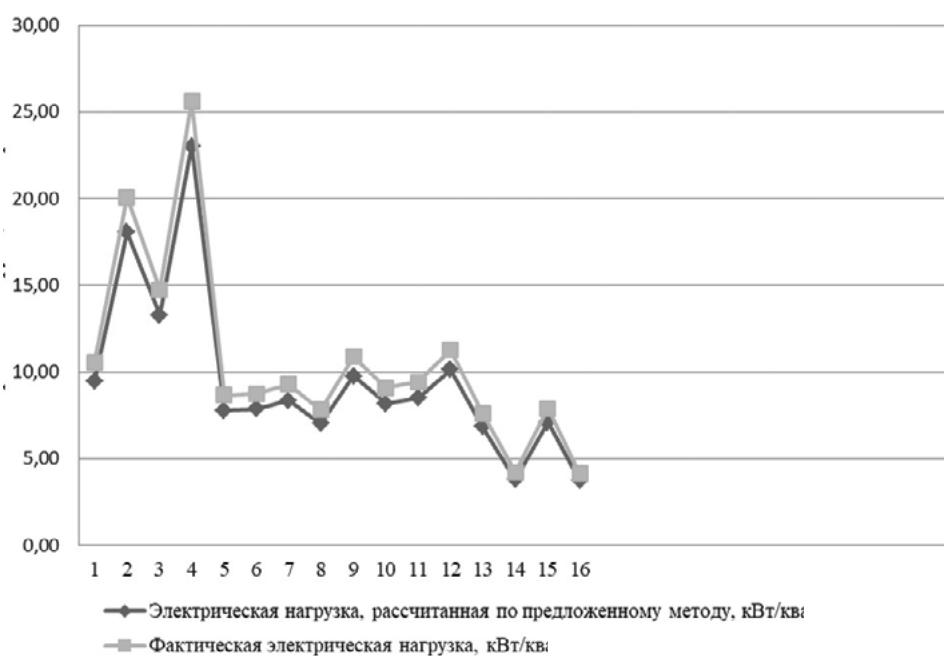


Рис. 5. Сравнение фактической электрической нагрузки с полученной по предложенному методу нагрузкой
Fig. 5. Comparison of the actual electrical load with the load obtained by the proposed method

где $W_{\text{пред.}}$ – данные, полученные от энергосбытовой организации, предыдущего электропотребления коммунально-бытовых потребителей, кВтч. (за аналогичный период предыдущего года).

Метод прогнозирования электропотребления коммунально-бытовыми потребителями с учетом обобщенного коэффициента неопределенности:

$$W_{\text{прог.}} = \frac{(P_{\text{кв.}} \times T_{M,i} \times N_j)}{A_{i(T)}} \quad (5)$$

где $P_{\text{кв.}}$ – расчетное значение электрической нагрузки, получаемое с учетом предложенного обобщенного коэффициента, кВт.

С применением формулы (4) по данным предыдущего электропотребления

коммунально-бытовыми потребителями были рассчитаны электрические нагрузки.

Достоинством приведенных выше методов является учет (с помощью обобщенного коэффициента) финансового положения разных слоев населения в рассматриваемых объектах, а также географическое нахождение потребителей на различных уровнях по отношению к нулевому (т.е. уровню моря).

Важность учета этих двух факторов для прогнозирования и расчета электрических нагрузок жилых домов заключается в следующем:

1. Неучет финансового положения потребителя приводит к частым созданиям потребителями несимметрии, превышающей установленные величины, при этом возрастания количества электроприемников резко увеличивает данную проблему.

2. Игнорирование перепада высот приводит к дополнительному увеличению электропотребления, обусловленного высокой влажностью над уровнем моря. Тем самым снова приводя к возрастанию первого

критерия (фактора).

Результаты расчетов сравнивались с фактическими значениями, определенными ранее и представленными на рис. 2.

Согласно рис. 5, расхождение между прогнозируемой нагрузкой и фактической не превысило 10%.

Далее, с применением формулы (5), спрогнозируем электропотребление коммунально-бытовыми потребителями для рассматриваемых объектов и сравним эти результаты с фактическими.

Результаты сравнения представим в виде зависимости рис. 6.

При использовании предлагаемого метода прогнозирования электропотребления по формуле (5) расхождение результатов составляет от 8 до 18 кВт·ч/кв, что в процентном отношении не превышает 10%.

Такой результат позволяет утверждать о высокой сходимости и тем самым обеспечить повышение показателей надежности и эффективности распределительной электрической сети.



Рис. 6. Сравнения фактического электропотребления с прогнозируемым, найденным с учетом обобщенного коэффициента неопределенности

Fig. 6. Comparison of the actual power consumption with the predicted one determined taking into account the generalized coefficient of uncertainty

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенного исследования фактического электропотребления ряда объектов с коммунально-бытовыми потребителями подтверждено, что действующие значения удельных электрических нагрузок для этих потребителей приводят к существенным расхождениям с фактическими значениями.

По электрической нагрузке от -58 до +155% и до электропотребления от -48 до 300%.

Для повышения точности расчета элек-

трических нагрузок предложено использовать обобщенный коэффициент неопределенности, а на его основе метод прогнозирования и расчет электрических нагрузок.

Показано, что при использовании предложенных методов расхождение между расчетным и фактическим электрических нагрузок не превышает 10%, а ошибочность прогнозируемого электропотребления находится в пределах от 8 до 18 кВт·ч/кв.

Список источников

1. Репкина Н.Г. Исследование факторов, влияющих на точность прогнозирования суточного электропотребления // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2015. № 2. С. 41–43. <https://doi.org/10.17213/0136-3360-2015-2-41-43>.
2. Солуянов Ю.И., Федотов А.И., Галицкий Ю.Я., Чернова Н.В., Ахметшин А.Р. Актуализация нормативных значений удельной электрической нагрузки многоквартирных домов в Республике Татарстан // Электричество. 2021. № 6. С. 62–71. <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2021-6-62-71>. EDN: RRSRRX.
3. Карпенко С.М., Карпенко Н.В. Эконометрическое моделирование энергопотребления с учетом влияния производственных факторов // Энергобезопасность и энергосбережение. 2020. № 1. С. 14–17. <https://doi.org/10.18635/2071-2219-2020-1-14-17>. EDN: EDVDXC.
4. Карпенко С.М., Карпенко Н.В. Анализ динамики и прогнозирование электропотребления на основе эконометрического моделирования // Энергобезопасность и энергосбережение. 2020. № 2. С. 20–25. <https://doi.org/10.18635/2071-2219-2020-2-20-25>. EDN: YUCPDM.
5. Валеев Г.С., Дзюба М.А., Валеев Р.Г. Моделирование суточных графиков нагрузок участков распределительных сетей напряжением 6–10 кВ городов и населенных пунктов в условиях ограниченного объема исходной информации // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2016. Т. 16. № 2. С. 23–29. <https://doi.org/10.14529/power160203>. EDN: WCZMFX.
6. Куликов А.Л., Илюшин П.В., Лоскутов А.Б., Севостьянов А.А. Выборочный контроль показателей качества электроэнергии в распределительных сетях с большой долей генерации на основе возобновляемых источников энергии // Электричество. 2022. № 7. С. 11–23. <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2022-7-11-23>. EDN: TBYSOJ.
7. Fezzi C., Mosetti L. Size matters: estimation sample length and electricity price forecasting // The Energy Journal. 2020. Vol. 41. Iss. 4. P. 231–254. <https://doi.org/10.5547/01956574.41.4.cfez>.
8. Goltsova T. E., Syntetos A. A., Van der Laan E. Forecasting for remanufacturing: the effects of serialization // Journal of Operations Management. 2019. Vol. 65. Iss. 5. P. 447–467. <https://doi.org/10.1002/joom.1031>.
9. Grushka-Cockayne Ya., Jose V.R.R. Combining prediction intervals in the M4 competition // International Journal of Forecasting. 2020. Vol. 36. Iss. 1. P. 178–185. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2019.04.015>.
10. Hewamalage H., Bergmeir C., Bandara K. Recurrent neural networks for time series forecasting: current status and future directions // International Journal of Forecasting. 2021. Vol. 37. Iss. 1. P. 388–427. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2020.06.008>.
11. Hong T., Pinson P. Energy forecasting in the big data world // International Journal of Forecasting. 2019. Vol. 35. Iss. 4. P. 1387–1388. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2019.05.004>.
12. Issi F., Kaplan O. The determination of load profiles and power consumptions of home appliances // Energies. 2018. Vol. 11. Iss. 3. P. 607. <https://doi.org/10.3390/en11030607>.
13. Nisha M. Demand side management for a household using resource scheduling // International CET Conference on Control, Communication, and Computing. 2018. <https://doi.org/10.1109/CETIC4.2018.8530929>.
14. Andrea G., Paoletti S., Vicino A. Models and techniques for electric load forecasting in the presence of demand response // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2014. Vol. 23. Iss. 3. P. 1087–1097. <https://doi.org/10.1109/TCST.2014.2361807>.
15. Opris I., Costinăș S., Ionescu C., Nistoran D. The household energy consumer in a smart metering environment // 9th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (Bucharest, 7–9 May 2015). Bucharest: IEEE, 2015. P. 43–48. <https://doi.org/10.1109/ATEE.2015.7133677>.
16. Kim Jangkyum, Han Jaesoo, Kim Nakyoung, Kim Minkyung, Choi Junkyun. Analysis of power usage at household and proper energy management // International Conference on Information and Communication Technology Convergence (Jeju, 17–19 October 2018). Jeju: IEEE, 2018. P. 450–456. <https://doi.org/10.1109/ICTC.2018.8539459>.
17. Senyuk M., Safaraliev M., Gulakhmadov, A., Ahyoev, J. Application of the conditional optimization method for the synthesis of the law of emergency control of a synchronous generator steam turbine operating in a complex-closed configuration power system // Mathematics. 2022. Vol. 10. Iss. 21. P. 3979. <https://doi.org/10.3390/math10213979>.
18. Tavarov S.S., Sidorov A.I., Kalegina Y.V. Model and algorithm of electricity consumption management for household consumers in the republic of Tajikistan // Mathematical Modelling of Engineering Problems. 2020. Vol. 7. Iss. 4. P. 520–526. <https://doi.org/10.18280/mmep.070403>.

19. Таваров С.Ш. Метод прогнозирования электропотребления бытовыми потребителями в условиях Республики Таджикистан // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2020. Т. 20. № 2. С. 28–35. <https://doi.org/10.14529/power200203>. EDN: HIOFYO.
20. Таваров С.Ш. Алгоритм обучения искусственной нейронной сети для факторного прогнозирования электропотребления бытового сектора // Электричество. 2022. № 3. С. 30–38. <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2022-3-30-38>. EDN: MDFRLG.

References

1. Repkina N.G. Research of factors affecting the accuracy prediction daily power consumption. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika*. 2015;2:41-43. (In Russ.). <https://doi.org/10.17213/0136-3360-2015-2-41-43>.
2. Soluyanov Yu.I., Fedotov A.I., Galitsky Yu.Ya., Chernova N.V., Akhmetshin A.R. Updating the standard specific electric loads of apartment buildings in the Republic of Tatarstan. *Elektrичество*. 2021; 6:62-71. (In Russ.).
<https://doi.org/10.24160/0013-5380-2021-6-62-71>. EDN: RRSRRX.
3. Karpenko S.M., Karpenko N.V. Econometric modeling of energy consumption based on influence of industry factors. *Energobezopasnost' i energosberezhenie = Energy Safety and Energy Economy*. 2020;1:14-17. (In Russ.).
<https://doi.org/10.18635/2071-2219-2020-1-14-17>. EDN: EDVDXC.
4. Karpenko S.M., Karpenko N.V. Analysis of dynamics and power consumption forecasting based on econometric modeling. *Energobezopasnost' i energosberezhenie = Energy Safety and Energy Economy*. 2020;2:20-25. (In Russ.).
<https://doi.org/10.18635/2071-2219-2020-2-20-25>. EDN: YUCPDM.
5. Valeev G.S., Dzyuba M.A., Valeev R.G. Modeling daily load curves of the elements of 6–10 kV urban power distribution networks under conditions of limited unput information. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika = Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2016;16;2:23-29. (In Russ.).
<https://doi.org/10.14529/power160203>. EDN: WCZMFX.
6. Kulikov A.L., Ilyushin P.V., Loskutov A.B., Sevost'yanov A.A. Selective monitoring of power quality indicators in distribution networks with a large share of RES generation. *Elektrичество*. 2022;7:11-23. (In Russ.).
<https://doi.org/10.24160/0013-5380-2022-7-11-23>. EDN: TBYSOJ.
7. Fezzi C., Mosetti L. Size matters: estimation sample length and electricity price forecasting. *The Energy Journal*. 2020;41(4):231-254. <https://doi.org/10.5547/01956574.41.4.cfez>.
8. Goltsos T. E., Syntetos A. A., Van der Laan E. Forecasting for remanufacturing: the effects of serialization. *Journal of Operations Management*. 2019;65(5):447-467. <https://doi.org/10.1002/joom.1031>.
9. Grushka-Cockayne Ya., Jose V.R.R. Combining prediction intervals in the M4 competition. *International Journal of Forecasting*. 2020;36(1):178-185. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2019.04.015>.
10. Hewamalage H., Bergmeir C., Bandara K. Recurrent neural networks for time series forecasting: current status and future directions. *International Journal of Forecasting*. 2021;37(1):388-427. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2020.06.008>.
11. Hong T., Pinson P. Energy forecasting in the big data world. *International Journal of Forecasting*. 2019;35(4):1387-1388. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2019.05.004>.
12. Issi F., Kaplan O. The determination of load profiles and power consumptions of home appliances. *Energies*. 2018;11(3):607. <https://doi.org/10.3390/en11030607>.
13. Nisha M. Demand side management for a household using resource scheduling. In: *International CET Conference on Control, Communication, and Computing*. 2018. <https://doi.org/10.1109/CETIC4.2018.8530929>.
14. Andrea G., Paoletti S., Vicino A. Models and techniques for electric load forecasting in the presence of demand response. In: *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2014;23(3):1087-1097. <https://doi.org/10.1109/TCST.2014.2361807>.
15. Opris I., Costinăş S., Ionescu C., Nistoran D. The household energy consumer in a smart metering environment. In: *9th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering*. 7–9 May 2015, Bucharest. Bucharest: IEEE; 2015, p. 43-48. <https://doi.org/10.1109/ATEE.2015.7133677>.
16. Kim Jangkyum, Han Jaesoeb, Kim Nakyoung, Kim Minkyung, Choi Junkyun. Analysis of power usage at household and proper energy management. In: *International Conference on Information and Communication Technology Convergence*. 17–19 October 2018, Jeju. Jeju: IEEE; 2018, p. 450-456. <https://doi.org/10.1109/ICTC.2018.8539459>.
17. Senyuk M., Safaraliev M., Gulakhmadov, A., Ahyoev, J. Application of the conditional optimization method for the synthesis of the law of emergency control of a synchronous generator steam turbine operating in a complex-closed configuration power system. *Mathematics*. 2022;10(21):3979. <https://doi.org/10.3390/math10213979>.
18. Tavarov S.S., Sidorov A.I., Kalegina Y.V. Model and algorithm of electricity consumption management for household consumers in the republic of Tajikistan. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*. 2020;7(4):520-526.
<https://doi.org/10.18280/mmep.070403>.
19. Tavarov S.Sh. Method for projecting household electricity consumption in the Republic of Tajikistan. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika = Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2020;20(2):28-35. (In Russ.). <https://doi.org/10.14529/power200203>. EDN: HIOFYO.
20. Tavarov S.Sh. Artificial neural network training algorithm for factor-based prediction of electricity consumption in the household sector. *Elektrичество*. 2022;3:30-38. (In Russ.). <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2022-3-30-38>. EDN: MDFRLG.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

Таваров Saidjon Ширазиевич,
к.т.н.,
доцент кафедры безопасности жизнедеятельности,
Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет),
454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, Россия
✉ tabarovsaid@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2875-2752>

Сидоров Александр Иванович,
д.т.н., профессор,
заведующий кафедрой безопасности
жизнедеятельности,
Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет),
454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, Россия
sidorovai@susu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5024-6728>

Суворов Иван Флегонович,
д.т.н., профессор,
профессор кафедры энергетики,
Забайкальский государственный университет,
672039, г. Чита, ул. Александро-Заводская, 30, Россия
ivan.suvorov.1947@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5024-6728>

Святых Андрей Борисович,
к.т.н.,
первый заместитель генерального директора ООО
«Уралэнергосбыт»,
454080, г. Челябинск, ул. Энтузиастов, 26А, Россия
svyatkh@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2875-2752>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 21.04.2023 г.; одобрена после рецензирования 30.05.2023 г.; принятая к публикации 04.07.2023 г.

Saidjon Sh. Tavarov,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Life Safety,
South Ural State University (National Research University),
76, Lenin pr., Chelyabinsk 454080, Russia
✉ tabarovsaid@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2875-2752>

Aleksandr I. Sidorov,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of the Department of Life Safety,
South Ural State University (National Research University),
76, Lenin pr., Chelyabinsk 454080, Russia
sidorovai@susu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5024-6728>

Ivan F. Suvorov,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Power Engineering,
Transbaikal State University,
30, Aleksandro-Zavodskaya St., Chita 672039, Russia,
ivan.suvorov.1947@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5024-6728>

Andrey B. Svyatkh,
Cand. Sci. (Eng.),
First Deputy General Director of Uralenergosbyt LLC,
26A, Entuziastov St., Chelyabinsk 454080, Russia
svyatkh@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2875-2752>

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 21.04.2023; approved after reviewing 30.05.2023; accepted for publication 04.07.2023.

МЕТАЛЛУРГИЯ



Научная статья
УДК 669.712
EDN: EHPZKW
DOI: 10.21285/1814-3520-2023-3-574-582

Повышение эффективности разложения алюминатного раствора за счёт приготовления и ввода активной затравки в процесс декомпозиции

К.Д. Алексеев^{1✉}, И.В. Логинова², И.Е. Четыркин³, И.С. Гостинская⁴

^{1,2}Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

^{3,4}РУСАЛ ИТЦ, г. Краснотурьинск, Россия

Резюме. Цель – определение оптимальных параметров приготовления и дозировки активной затравки (мелкодисперсного гидроксида алюминия) для стабилизации процесса разложения алюминатного раствора в процессе декомпозиции в цикле Байера. Лабораторные испытания были проведены на температурно-контролируемой врачающейся водяной бане фирмы «Intronics» (Австралия). Проведение гранулометрического анализа полученного гидроксида алюминия осуществляли с помощью системы автоматического анализа изображения ВидеоТест, с использованием микроскопа Axioskop-40 фирмы «Carl Zeiss» (Германия), оснащенного программой Image Analysis. Проведены лабораторные исследования по получению мелкодисперсного гидроксида алюминия (активной затравки) при смешивании щелочно-алюминатного раствора и производственно-оборотной воды в различных соотношениях. Установлена очередность заполнения растворов – сначала производственно-оборотная вода, затем охлажденный щелочно-алюминатный раствор. Определены оптимальные условия для получения активной затравки: время выдерживания раствора 48–72 ч при температуре 50°C и соотношении алюминатного раствора и оборотной воды 60 и 40%, соответственно. Проведены лабораторные исследования по дозированию полученной активной затравки в головные декомпозеры процесса декомпозиции. Показано, что использование активной затравки в непрерывном режиме декомпозиции позволяет стабилизировать гранулометрический состав промежуточного гидроксида алюминия. Установлено, что присутствие активной затравки позволяет снизить начальную температуру процесса декомпозиции с 62 до 58°C без изменения гранулометрического состава гидроксида алюминия. Помимо этого, было подтверждено положительное влияние введения активной затравки на увеличение степени разложения алюминатного раствора до 1,5%. Таким образом, по результатам проведенных исследований установлено, что использование нового метода приготовления и дозирования активной затравки в головные декомпозеры позволяет интенсифицировать процесс декомпозиции при производстве глинозема.

Ключевые слова: алюминатный раствор, активная затравка, фракционный состав, декомпозиция, глинозем, степень разложения

Для цитирования: Алексеев К.Д., Логинова И.В., Четыркин И.Е., Гостинская И.С. Повышение эффективности разложения алюминатного раствора за счёт приготовления и ввода активной затравки в процесс декомпозиции // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 3. С. 574–582. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-574-582>. EDN: EHPZKW.

METALLURGY

Original article

Improving decomposition efficiency of aluminate liquor through preparation and introduction of active seed during the decomposition process

Konstantin D. Alekseev^{1✉}, Irina V. Loginova², Igor E. Chetyrkin³,
Irina S. Gostinskaya⁴

^{1,2}Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

^{3,4}RUSAL ETC, Krasnoufimsk, Russia

Abstract. The aim is to determine the optimal parameters for the preparation and dosing of active seeding (finely dispersed aluminium hydroxide) to control the decomposition of aluminate liquor in the Bayer process. Laboratory tests were carried out on a temperature-controlled rotating water bath (Intronics, Australia). The granulometric analysis of the obtained aluminium hydroxide was carried out using the VideoTest image analysis system and a Carl Zeiss Axioskop-40 microscope (Germany) supplemented with Image Analysis software. Finely dispersed aluminium hydroxide (active seed) was obtained by mixing an alkaline aluminate solution and recycled water in various ratios. The filling order of solutions was determined – first, recycled water, followed by cooled alkaline aluminate solution. Optimal conditions for the preparation of active seeding were established: the solution was held for 48–72 hours at 50°C at an aluminate solution to recycle water ratio of 60% and 40%, respectively. The dosing of the obtained active seeding into the head decomposers was examined. It was demonstrated that using active seeding in continuous decomposition mode stabilises the particle-size distribution of the production-grade aluminium hydroxide. The presence of active seeding allowed the initial decomposition temperature to be reduced from 62°C to 58°C without altering the particle-size distribution of aluminium hydroxide. In addition, the study confirmed the positive effect of active seeding on increasing the degree of decomposition of the aluminate liquor up to 1.5%. Therefore, based on the research results, it was established that the use of the new method for preparing and dosing active seeding into the main decomposers leads to the intensification of the decomposition process in alumina production.

Keywords: aluminate solution, active seed, fractional composition, decomposition, alumina, decomposition degree

For citation: Alekseev K.D., Loginova I.V., Chetyrkin I.E., Gostinskaya I.S. Improving decomposition efficiency of aluminate liquor through preparation and introduction of active seed during the decomposition process. *iPolytech Journal*. 2023;27(3):574-582. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-574-582>. EDN: EHPZKW.

ВВЕДЕНИЕ

Производство алюминия продолжает развиваться быстрыми темпами, что обосновано прежде всего его ценными свойствами, разнообразием областей применения и большой распространённостью алюминийсодержащих руд в природе. Глинозем является основным сырьевым продуктом в производстве алюминия, поэтому вместе с увеличением выпуска алюминия происходит рост производства глинозема. В условиях возрастающих цен на сырье и энергоносители, роста требований к качеству продукции возникает необходимость в постоянном совершенствовании технологического процесса [1–3]. Более 90% глинозема во всем мире получают с помощью щелочного способа Байера [4]. Осаждение гидроксида алюминия из щелочного раствора, содержащего алюминат натрия, является основной стадией процесса Байера, ограничивающей общую скорость глиноземного производства [5, 6]. Было проведено множество исследований с целью выяснения механизма декомпозиции и возможных путей увеличения скорости процесса [7–12].

Технология производства глинозема отечественных предприятий характеризуется циклическим изменением гранулометрического состава гидроксида алюминия по всем фракциям (синусоидально). Вследствие этого происходят колебания по крупности частиц товарного глинозема, что негативно влияет на последующий процесс производства алюминия [13, 14]. Исключение таких колебаний по крупности товарного глинозема при существующем уровне оборудования и технологии не представляется допустимым, так как отсут-

ствует возможность контроля количества мелкодисперсных фракций при использовании получаемых на выщелачивании высокомодульных растворов.

В технологической схеме производства глинозема предусмотрено несколько блоков декомпозеров. Каждый блок имеет свою амплитуду изменения фракционного состава от крупного к мелкому и обратно. В цикле роста гидроксида, продолжающемся, в зависимости от затравочного отношения, от 60 до 90 сут, выделяют две стадии: стадию укрупнения и стадию измельчения. В период укрупнения (фракции «менее 45 мкм» находится на минимуме 4,0–4,5%) снижается удельная поверхность гидрата с 730–750 до 420–456 см²/г, что, в свою очередь, приводит к снижению степени разложения алюминатного раствора и съема Al₂O₃ при декомпозиции [15, 16]. При стадии измельчения происходит обратное явление, при этом образуется мелкодисперсный гидроксид алюминия с высоким содержанием фракции «менее 45 мкм» до 20–45%, который плохо классифицируется в гидросепараторах и ухудшает работу фильтрации – появляются «пустые» зоны, снижается производительность [17].

В цехе декомпозиции частицы затравки играют роль центров кристаллизации для гидроксида алюминия, выделяющегося при разложении алюминатного раствора [18, 19]. Следовательно, увеличение количества затравки способствует ускорению процесса декомпозиции. Однако необходимо учитывать, что затравка действует не столько своей массой, сколько поверхностью, а именно – чем больше и активнее поверхность, тем при

прочих равных условиях выше скорость разложения алюминатного раствора [20].

Таким образом, для увеличения степени разложения алюминатного раствора и съема Al_2O_3 при декомпозиции нужно иметь достаточное количество поверхности затравки, особенно в периоды укрупнения гидрата.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью исследования является разработка методики приготовления мелкодисперсного гидроксида алюминия (активной затравки) и его дозировки в процесс декомпозиции для стабилизации процесса разложения алюминатного раствора.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методика исследования получения активной затравки. В лабораторных условиях с целью определения оптимальных параметров приготовления активной затравки проведены исследования процесса разложения алюминатных растворов в периодическом режиме. Активную затравку готовили путем разложения гидрохимического алюминатного растворов участка выщелачивания без использования дополнительной затравки гидроксида алюминия.

Лабораторные испытания проводили на водяной бане фирмы «Intronics» (Австралия). Емкости заполняли раствором по схеме, представленной в табл. 1.

Условия приготовления активной затравки:

1. Объем пульпы составил 100 мл.
2. Время приготовления (№ опыта):

- 1, 5, 9, 13 – 24 ч;
- 2, 6, 10, 14 – 48 ч;
- 3, 7, 11, 15 – 72 ч;
- 4, 8, 12, 16 – 96 ч.

3. Температура – 50°C.

Таблица 1. Исходные данные для приготовления активной затравки

Table 1. Initial data for active seed preparation

№ опыта	Соотношение растворов, %	
	алюминатный гидрохимический раствор	вода обратная
1, 2, 3, 4	100	–
5, 6, 7, 8	80	20
9, 10, 11, 12	60	40
13, 14, 15, 16	50	50

По окончании опыта в гидратной пульпе анализировали следующие показатели:

- содержание твердой фазы, $\text{г}/\text{см}^3$;
- каустический модуль, ед.;
- гранулометрический состав с помощью программы ВидеоТест (разработчик ООО «АргусСофт» Россия, г. Санкт-Петербург).

Принцип действия программы ВидеоТест заключается в получении изображения исследуемого объекта с помощью телевизионной камеры высокого разрешения и оптического микроскопа для дальнейшей компьютерной обработки.

Результаты химического анализа на содержание твердой фазы, каустического модуля (аку) и концентрации исследуемых компонентов в полученных растворах представлены в табл. 2–5.

Таблица 2. Результаты определения характеристик и состава полученных растворов при соотношении 100–0%

Table 2. Results of determining the characteristics and composition of the obtained solutions at a ratio of 100-0%

Алюминатный раствор 100% – обратная вода 0%						
№ опыта	время, ч	$\Gamma_{\text{тв}}/\text{дм}^3$	$\text{Na}_2\text{O}_{\text{общ}}$	$\text{Na}_2\text{O}_{\text{ку}}$	$\text{Na}_2\text{O}_{\text{кб}}$	Al_2O_3
	исходный раствор	–	187,6	161,6	26,0	148,4
1	24	1,4	182,2	157,1	25,1	144,8
2	48	6,4	186,8	160,7	26,1	143,8
3	72	15,7	185,3	159,4	25,9	134,1
4	96	29,6	186,8	161,4	25,4	128,5
						2,07

Таблица 3. Результаты определения характеристик и состава полученных растворов при соотношении 80–20%

Table 3. Results of determining the characteristics and composition of the obtained solutions at a ratio of 80–20%

Алюминатный раствор 100% – обратная вода 0%						
№ опыта	время, ч	$\Gamma_{\text{тв}}/\text{дм}^3$	$\text{Na}_2\text{O}_{\text{общ}}$	$\text{Na}_2\text{O}_{\text{ку}}$	$\text{Na}_2\text{O}_{\text{кб}}$	Al_2O_3
	исходный раствор	–	154,3	132,5	21,8	121,9
5	24	1,7	145,0	125,2	19,8	113,2
6	48	18,7	149,6	129,1	20,5	101,5
7	72	45,8	154,3	132,7	21,6	82,1
8	96	64,0	156,6	134,8	21,8	72,9
						3,04

Таблица 4. Результаты определения характеристик и состава полученных растворов при соотношении 60–40%**Table 4.** Results of determining the characteristics and composition of the obtained solutions at a ratio of 60–40%

Алюминатный раствор 100% – оборотная вода 0%							
№ опыта	время, ч	$\Gamma_{\text{тв}}/\text{дм}^3$	$\text{Na}_2\text{O}_{\text{общ}}$	$\text{Na}_2\text{O}_{\text{ку}}$	$\text{Na}_2\text{O}_{\text{кб}}$	Al_2O_3	$\alpha_{\text{ку}}$
			исходный раствор	–	115,5	99,0	16,5
9	24	6,0	116,3	100,1	16,2	87,7	1,88
10	48	62,1	118,6	101,7	16,9	51,5	3,25
11	72	72,7	118,6	101,5	17,1	42,3	3,95
12	96	79,5	120,2	103,2	17,0	39,8	4,27

Таблица 5. Результаты определения характеристик и состава полученных растворов при соотношении 50–50%**Table 5.** Results of determining the characteristics and composition of the obtained solutions at a ratio of 50–50%

Алюминатный раствор 100% – оборотная вода 0%							
№ опыта	время, ч	$\Gamma_{\text{тв}}/\text{дм}^3$	$\text{Na}_2\text{O}_{\text{общ}}$	$\text{Na}_2\text{O}_{\text{ку}}$	$\text{Na}_2\text{O}_{\text{кб}}$	Al_2O_3	$\alpha_{\text{ку}}$
			исходный раствор	–	97,7	83,2	14,5
13	24	0,6	96,9	83,1	13,8	76,0	1,80
14	48	14,9	97,7	83,8	13,9	65,8	2,10
15	72	42,4	97,7	83,3	14,4	42,8	3,20
16	96	56,0	99,2	85,2	14,0	36,7	3,82

Гранулометрический состав полученного гидроксида алюминия из растворов с различным соотношением алюминатного раствора и оборотной воды определен с помощью программы ВидеоТесТ и представлен в табл. 6.

Таблица 6. Гранулометрический состав полученного гидроксида алюминия
Table 6. Particle size distribution of the resulting aluminum hydroxide

Время, ч	80% – 20%				60% – 40%				50% – 50%				
	количество, %												
	менее 0,5 мкм	менее 0,5 мкм	более 45 мкм	менее 0,5 мкм	менее 7,5 мкм	более 45 мкм	менее 0,5 мкм	менее 0,5 мкм	более				
24	5,3	10,84	9,9	11,4	13,62	9,9	–	–	–				
48	8,1	11,26	3,3	14,5	11,39	12,3	12,8	12,98	6,2				
72	9,8	10,25	11,8	14,7	11,67	11,3	13,0	13,27	9,0				
96	8,8	11,23	16,3	6,6	11,16	27,8	8,7	22,39	10,5				

Анализируя данные по содержанию твердой фазы, концентрации компонентов в растворе и гранулометрическому составу полученного гидроксида алюминия можно сделать вывод, что самые оптимальные условия приготовления активной затравки – это раствор с соотношением «алюминатный раствор 60% – оборотная вода 40%», время приготовления – 48–72 ч.

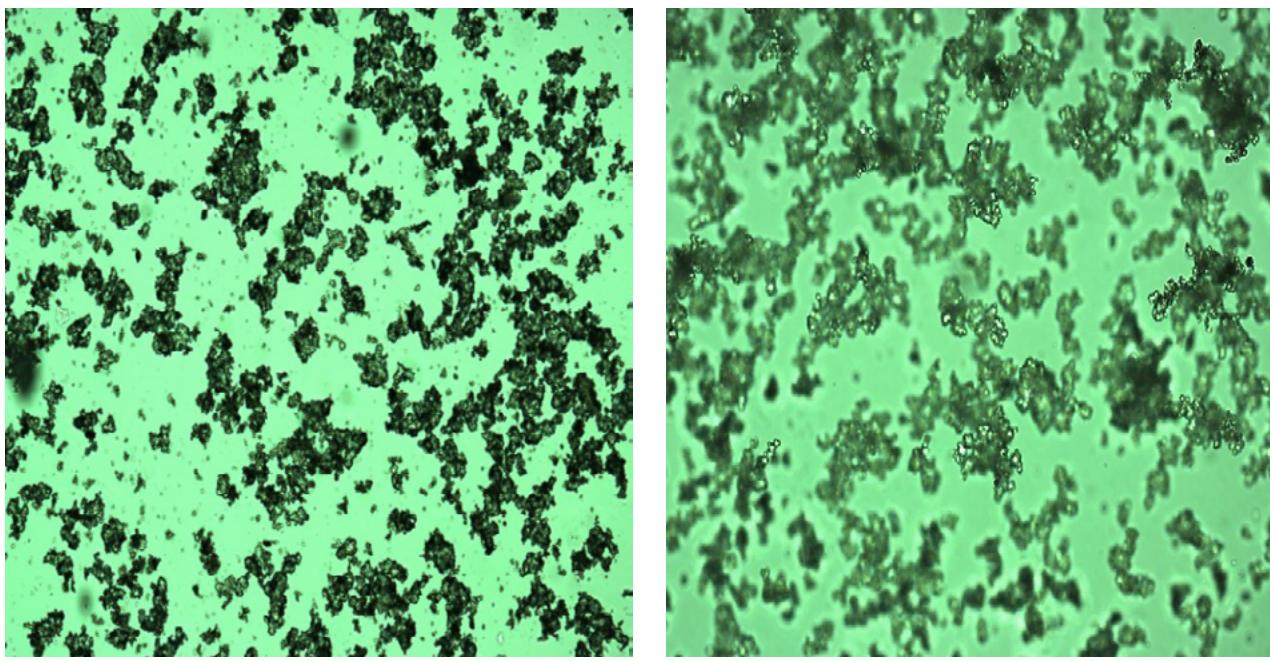
Увеличение времени приготовления активной затравки более 72 ч приводит к укрупнению частиц гидроксида алюминия, что подтверждается данными анализа гранулометрического состава, приведенного в табл. 6.

Во всех растворах при времени приготовления 96 ч относительно 72 ч наблюдается снижение количества фракций частиц «менее 0,5 мкм» (с 9,8–14,7–13,0% до 8,8–6,6–8,7%) и увеличение количества крупных фракций «более 45 мкм» (с 11,8–11,3–9,0% до 16,3–27,8–10,5%).

На рисунке (а, б) представлены фотографии полученной активной затравки из раствора с соотношением «алюминатный раствор 60% – оборотная вода 40%» при времени приготовления 72 и 96 ч.

Полученная активная затравка из раствора с соотношением «алюминатный раствор 60% – оборотная вода 40%» и временем приготовления 48–72 ч имеет следующие показатели:

- содержание твердой фазы на уровне 62,1–72,7 г/см³;
- каустический модуль раствора 3,25–3,95 ед.;
- содержание фракции «менее 0,5 мкм» 14,5–14,7%;
- количество фракции «менее 7,5 мкм» 11,39–11,67%.



Время приготовления: а – 72 ч; б – 96 ч
Preparation time: a – 72 hours; b – 96 hours

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДОЗИРОВКИ АКТИВНОЙ ЗАТРАВКИ В ПРОЦЕСС ДЕКОМПОЗИЦИИ

В лабораторных условиях с целью определения оптимальных параметров дозировки активной затравки в процесс декомпозиции проведены исследования процесса разложения алюминатных растворов в периодическом режиме. Активную затравку, полученную в лабораторных условиях, смешивали с пульпой, отобранный с головных декомпозеров участка декомпозиции в разном соотношении с изменением температурного профиля процесса разложения (табл. 7).

Лабораторные испытания проводили на водяной бане фирмы «Intronics».

Таблица 7. Исходные данные для дозировки активной затравки

Table 7. Initial data for active seed feeding

№ опыта	Temperaturный профиль 62–53°C (1 этап)		Temperaturный профиль 58–53°C (2 этап)	
	соотношение, %			
	пульпа декомпозера	активная затравка	пульпа декомпозера	активная затравка
1	100	0	100	0
2	97	3	97	3
3	95	5	95	5
4	93	7	93	7
5	90	10	90	10

Условия дозирования активной затравки в процесс декомпозиции:

- объем раствора – 100 мл;
- время декомпозиции – 37 ч;
- температурный профиль – 62–53°C;
- температурный профиль – 58–53°C.

По окончании опыта в полученной пульпе анализировали следующие показатели:

- содержание твердой фазы, г/см³;
- каустический модуль, ед.;
- гранулометрический состав гидроксида алюминия с помощью программы ВидеоТест.

Результаты исследования состава полученных растворов в первом этапе представлены в табл. 8 и 9, во втором этапе – в табл. 10 и 11.

Этап 1. Исходные данные.

Таблица 8. Результаты определения характеристик и состава исходных растворов в первом этапе

Table 8. Results of determining the characteristics and composition of feed solutions in the first stage

№ опыта	Соотношение, %	$\Gamma_{\text{тв}} / \text{ДМ}^3$	$\text{Na}_2\text{O}_{\text{общ}}$	$\text{Na}_2\text{O}_{\text{ку}}$	$\text{Na}_2\text{O}_{\text{кб}}$	Al_2O_3	$\alpha_{\text{ку}}$
–	активная затравка	62,1	118,6	101,7	16,9	51,5	3,25
–	пульпа декомпозера	747	178,3	148,5	29,8	122,4	2,00
1	100 – 0	747	178,3	148,5	29,8	122,4	2,00
2	97 – 3	728	177,5	148,3	29,2	119,8	2,04
3	95 – 5	715	175,2	145,8	29,4	117,3	2,04
4	93 – 7	703	174,4	145,6	28,8	115,3	2,08
5	90 – 10	684	170,5	141,9	28,6	112,2	2,08

Этап 1. Параметры декомпозиции (время разложения – 37 ч).

Таблица 9. Результаты определения характеристик и состава полученных растворов в первом этапе
Table 9. Results of determining the characteristics and composition of the obtained solutions in the first stage

№ опыта	Соотношение, %	$\Gamma_{\text{TB}}/\text{дм}^3$	$\text{Na}_2\text{O}_{\text{общ}}$	$\text{Na}_2\text{O}_{\text{ку}}$	$\text{Na}_2\text{O}_{\text{кб}}$	Al_2O_3	$\alpha_{\text{ку}}$	Степень разложения, %
1	100 – 0	838	183,7	156,6	27,1	90,2	2,86	30,1
2	97 – 3	831	181,4	153,8	27,6	85,7	2,95	31,0
3	95 – 5	899	180,6	152,7	27,9	85,2	2,95	30,6
4	93 – 7	784	177,5	150,0	27,5	82,6	2,99	30,5
5	90 – 10	920	177,5	150,4	27,1	82,1	3,01	31,0

Этап 2. Исходные данные.

Таблица 10. Результаты определения характеристик и состава исходных растворов во втором этапе
Table 10. Results of determining the characteristics and composition of the feed solutions in the second stage

№ опыта	Соотношение, %	$\Gamma_{\text{TB}}/\text{дм}^3$	$\text{Na}_2\text{O}_{\text{общ}}$	$\text{Na}_2\text{O}_{\text{ку}}$	$\text{Na}_2\text{O}_{\text{кб}}$	Al_2O_3	$\alpha_{\text{ку}}$
–	активная затравка	62,1	118,6	101,7	16,9	51,5	3,25
–	пульпа декомпозера	944	183,7	156,7	27,0	125,0	2,06
1	100 – 0	944	183,7	156,7	27,0	125,0	2,06
2	97 – 3	918	179,1	150,7	28,4	121,9	2,03
3	95 – 5	900	176,7	148,7	28,0	120,9	2,02
4	93 – 7	883	175,2	147,9	27,3	119,9	2,03
5	90 – 10	856	174,4	147,7	26,7	116,8	2,08

Этап 2. Параметры декомпозиции (время разложения – 37 ч).

Таблица 11. Результаты определения характеристик и состава полученных растворов во втором этапе
Table 11. Results of determining the characteristics and composition of the obtained solutions in the second stage

№ опыта	Соотношение, %	$\Gamma_{\text{TB}}/\text{дм}^3$	$\text{Na}_2\text{O}_{\text{общ}}$	$\text{Na}_2\text{O}_{\text{ку}}$	$\text{Na}_2\text{O}_{\text{кб}}$	Al_2O_3	$\alpha_{\text{ку}}$	Степень разложения, %
1	100 – 0	865	185,3	158,4	26,9	88,2	2,95	30,2
2	97 – 3	825	183,7	155,6	28,1	85,7	2,99	31,9
3	95 – 5	737	182,2	154,1	28,1	86,2	2,94	31,2
4	93 – 7	757	179,8	151,8	28,0	84,7	2,95	31,2
5	90 – 10	918	176,0	148,6	27,4	80,1	3,05	31,8

Гранулометрический состав гидроксида алюминия, определенный с помощью программы ВидеоТест, представлен в табл. 12.

Таблица 12. Гранулометрический состав полученного гидроксида алюминия

Table 12. Particle size distribution of the resulting aluminum hydroxide

Этап	№ опыта	Количественное распределение частиц, %				Весовое распределение частиц, %				
		-0,5 МКМ	-1,5 МКМ	-3,5 МКМ	-7,5 МКМ	-0,5 МКМ	-1,5 МКМ	-3,5 МКМ	-7,5 МКМ	-45 МКМ
1	1	22,89	27,99	29,09	9,24	0,0352	0,0886	0,1900	0,1434	19,58
	2	23,10	22,08	36,39	8,18	0,0322	0,0704	0,2345	0,1195	18,07
	3	19,09	26,55	31,38	10,53	0,0266	0,0782	0,1984	0,1535	17,82
	4	20,12	23,76	33,18	8,35	0,0314	0,0768	0,2256	0,1229	15,74
	5	25,58	27,45	27,76	8,11	0,0402	0,0888	0,1989	0,1287	18,41
2	1	22,18	27,16	28,90	8,47	0,0367	0,0928	0,1998	0,1273	14,82
	2	22,26	21,73	34,07	12,88	0,0282	0,0614	0,2040	0,1631	11,96
	3	20,73	23,90	30,23	10,94	0,0298	0,0718	0,1920	0,1631	11,90
	4	23,54	29,29	30,72	10,05	0,0313	0,0876	0,1948	0,1430	9,51
	5	18,48	26,17	30,97	9,84	0,0261	0,0814	0,1998	0,1494	16,27

Анализируя данные по содержанию твердой фазы, концентрации компонентов в растворе и гранулометрическому составу полученного гидроксида алюминия, можно сделать следующие выводы:

1. Увеличение дозировки активной затравки с 0% до 10% способствует увеличению степени разложения алюминатного раствора на 0,9% (с 30,1 до 31,0%) (см. табл. 9) и на 1,6% (с 30,2 до 31,8%) (см. табл. 11).

2. Снижение начальной температуры декомпозиции с 62 до 58°C при различной дозировке активной затравки позволяет увеличить степень разложения на 0,6–0,9% (см. табл. 9, 11).

3. В обоих этапах (температурный профиль 62–53°C и 58–53°C) при увеличении дозировки активной затравки с 0% до 10% отмечены

незначительные изменения содержания всех фракций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных исследований были определены оптимальные условия получения активной затравки – раствор с соотношением «алюминатный раствор 60% – обратная вода 40%», время приготовления 48–72 ч. Также было подтверждено положительное влияние дозировки активной затравки на увеличение степени разложения алюминатного раствора. Присутствие активной затравки позволяет снизить начальную температуру процесса декомпозиции с 62 до 58°C без изменения фракционного состава гидроксида алюминия.

Список источников

1. Александров А.В., Немчинова Н.В. Расчет ожидаемой экономической эффективности производства алюминия за счет увеличения применения глинозема отечественного производства // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 2. С. 408–450. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-408-420>.
2. Немчинова Н.В., Тютрин А.А., Бараускас А.Э. Анализ химического состава техногенных материалов производства первичного алюминия для поиска рациональных методов их переработки // Цветные металлы. 2019. № 12. С. 22–29. <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.12.03>.
3. Торопов Е.В., Макаров Д.П. Комплексное управление энерго- и ресурсосбережением металлургического производства: сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. (г. Екатеринбург, январь 2003 г.). Екатеринбург, 2003. С. 258–261.
4. Логинова И.В., Лоскутова А.И. Способ комплексной переработки высококремнистых бокситов // Инновации в материаловедении и металлургии: матер. III Междунар. интерактивной науч.-практ. конф. (г. Екатеринбург, 17–21 декабря 2013 г.). Екатеринбург: УрФУ, 2013. С. 59–61.
5. Aghazadeh V., Shayanfar S. Decomposition of aluminate solution for aluminum hydroxide precipitation by carbonation: a thermodynamic and experimental studies // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2021. P. 149–160.
6. Stephenson J.L., Kapraun C. Dynamic modeling of yield and particle size distribution in continuous Bayer precipitation // Essential Readings in Light Metals / eds. D. Donaldson, B.E. Raahauge. Cham: Springer, 2016. P. 891–897. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48176-0_123.
7. Shoppert A., Valeev D., Alekseev K., Loginova I. Enhanced precipitation of gibbsite from sodium aluminate solution by adding agglomerated active Al(OH)_3 seed // Metals. 2023. Vol. 13. Iss. 2. P. 193. <https://doi.org/10.3390/met13020193>.
8. Liu Guihua, Wu Guoyu, Chen Wei, Li Xiao-bin, Peng Zhihong, Zhou Qiusheng, et al. Increasing precipitation rate from sodium aluminate solution by adding active seed and ammonia // Hydrometallurgy. 2018. Vol. 176. P. 253–259. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2018.02.003>.

9. Gai Wei-Zhuo, Zhang Shi-Hu, Yang Yang, Sun Kexi, Jia Hong, Deng Zhen-Yan. Defluoridation performance comparison of aluminum hydroxides with different crystalline phases // Water Science and Technology Water Supply. 2022. Vol. 22. Iss. 4. P. 3673–3684. <https://doi.org/10.2166/ws.2022.012>.
10. Gai Wei-Zhuo, Zhang Xianghui, Yang Yang, Deng Zhen-Yan. Effect of crystalline phases of aluminum hydroxide catalysts on Al-water reaction // International Journal of Energy Research. 2020. Vol. 44. Iss. 6. 4969–4976. <https://doi.org/10.1002/er.5238>.
11. Zhang Baiyong, Pan Xiaolin, Yu Haiyan, Tu Ganfeng, Bi Shiwen. Effect of organic impurity on seed precipitation in sodium aluminate solution // Light Metals. The Minerals, Metals & Materials Series / eds. O. Martin. Cham: Springer, 2018. P. 41–47. https://doi.org/10.1007/978-3-319-72284-9_7.
12. Dash B., Tripathy B.C., Bhattacharya I.N., Das S.C., Mishra C.R., Mishra B.K. Precipitation of boehmite in sodium aluminate liquor // Hydrometallurgy. 2009. Vol. 95. Iss. 3-4. P. 297–301. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2008.07.002>.
13. Лайнер А.И. Производство глинозема. М.: Металлургиздат, 1961. 619 с.
14. Pan Zhaoshuai, Zhang Zhaozhi, Che Dong. Exploring primary aluminum consumption: new perspectives from hybrid CEEMDAN-S-Curve model // Sustainability. 2023. Vol. 15. Iss. 5. P. 4228. <https://doi.org/10.3390/su15054228>.
15. Dubovikov O.A., Brichkin B.N., Ris A.D., Sundurov A.V. Thermochemical activation of hydrated aluminosili-cates and its importance for alumina // Non-ferrous metals. 2018. No. 2. P. 11–16. <https://doi.org/10.17580/nfm.2018.02.02>.
16. Сибирзянов Н.А., Яценко С.П. Гидрохимические способы комплексной переработки боксита. Екатеринбург: УроСАН, 2006. 386 с.
17. Мазель В.А. Производство глинозема. М.: Металлургиздат, 1955. 430 с.
18. Андреев П.И., Шавло Р.А. Обжиг-магнитное обогащение гематит-бемитовых бокситов // Цветные металлы. 1973. № 7. 92–93.
19. Савченко А.И., Савченко К.Н. Декомпозиция и повышение качества гидроксида алюминия. Краснотурынск: ОАО «БАЗ», 1999. 156 с.
20. Минцис М.Я., Николаев И.В., Сиразутидинов Г.А. Производство глинозема. Новосибирск: Наука, 2012. 252 с.

References

1. Aleksandrov A.V., Nemchinova N.V. Calculation of the expected economic efficiency of aluminium production by increasing the use of domestic alumina. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(2):408-420. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-408-420>.
2. Nemchinova N.V., Tyutrin A.A., Barauskas A.E. Analysing the chemical composition of man-made materials resultant from the production of primary aluminium in order to find cost-effective recycling techniques. *Tsvetnye Metally*. 2019;12:22-29. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.12.03>.
3. Toropov E.V., Makarov D.P. Integrated management of energy and resource saving at metallurgical production. In: *Sbornik trudov Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii = Collected works of the International scientific and technical conference*. January 2003, Ekaterinburg. Ekaterinburg; 2003, p. 258-261. (In Russ.).
4. Loginova IV, Loskutova AI. Complex processing method of high-silicon bauxites. In: *Innovatsii v materialovedenii i metallurgii: materialy III Mezhdunar. interaktivnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii = Innovations in Materials Science and Metallurgy: Proceedings of the 3rd International interactive scientific and practical conference*. 17–21 December 2013, Yekaterinburg, Yekaterinburg: Publishing House of the Ural Federal University; 2013, p. 59–61. (In Russ.).
5. Aghazadeh V., Shayanfar S. Decomposition of aluminate solution for aluminum hydroxide precipitation by carbonation: a thermodynamic and experimental studies. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2021;149-160.
6. Stephenson J.L., Kapraun C. Dynamic modeling of yield and particle size distribution in continuous Bayer precipitation. In: Donaldson D., Raahauge B.E. (eds.). *Essential Readings in Light Metals*. Cham: Springer; 2016, p. 891-897. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48176-0_123
7. Shoppert A., Valeev D., Alekseev K., Loginova I. Enhanced precipitation of gibbsite from sodium aluminate solution by adding agglomerated active Al(OH)₃ seed. *Metals*. 2023;13(2):193. <https://doi.org/10.3390/met13020193>.
8. Liu Guihua, Wu Guoyu, Chen Wei, Li Xiao-bin, Peng Zhihong, Zhou Qiusheng, et al. Increasing precipitation rate from sodium aluminate solution by adding active seed and ammonia. *Hydrometallurgy*. 2018;176:253-259. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2018.02.003>.
9. Gai Wei-Zhuo, Zhang Shi-Hu, Yang Yang, Sun Kexi, Jia Hong, Deng Zhen-Yan. Defluoridation performance comparison of aluminum hydroxides with different crystalline phases. *Water Science and Technology Water Supply*. 2022;22(4):3673-3684. <https://doi.org/10.2166/ws.2022.012>.
10. Gai Wei-Zhuo, Zhang Xianghui, Yang Yang, Deng Zhen-Yan. Effect of crystalline phases of aluminum hydroxide catalysts on Al-water reaction. *International Journal of Energy Research*. 2020;44(6):4969-4976. <https://doi.org/10.1002/er.5238>.
11. Zhang Baiyong, Pan Xiaolin, Yu Haiyan, Tu Ganfeng, Bi Shiwen. Effect of organic impurity on seed precipitation in sodium aluminate solution. In: Martin O. (eds.). *Light Metals. The Minerals, Metals & Materials Series*. Cham: Springer; 2018, p. 41–47. https://doi.org/10.1007/978-3-319-72284-9_7.
12. Dash B., Tripathy B.C., Bhattacharya I.N., Das S.C., Mishra C.R., Mishra B.K. Precipitation of boehmite in sodium aluminate liquor. *Hydrometallurgy*. 2009;95(3-4):297-301. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2008.07.002>.
13. Liner A.I. *Production of alumina*. Moscow: Metallurgizdat; 1961, 619 p. (In Russ.).
14. Pan Zhaoshuai, Zhang Zhaozhi, Che Dong. Exploring primary aluminum consumption: new perspectives from hybrid CEEMDAN-S-Curve model. *Sustainability*. 2023;15(5):4228. <https://doi.org/10.3390/su15054228>.
15. Dubovikov O.A., Brichkin B.N., Ris A.D., Sundurov A.V. Thermochemical activation of hydrated aluminosili-cates and its importance for alumina. *Non-ferrous metals*. 2018;2:11-16. <https://doi.org/10.17580/nfm.2018.02.02>.

16. Sibiryanov N.A., Yacenko S.P. *Hydrochemical methods of bauxite complex processing*. Ekaterinburg: Ural Branch of the RAS; 2006, 386 p. (In Russ.).
17. Mazel V.A. *Alumina production*. Moscow: Metallurgizdat; 1955, 430 p. (In Russ.).
18. Andreev P.I., Shavlo R.A. Firing and magnetic concentration of hematite-boehmite bauxites. *Tsvetnye Metally*. 1973;7:92-93. (In Russ.).
19. Savchenko A.I., Savchenko K.N. *Decomposition and quality improvement of aluminum hydroxide*. Krasnoturinsk: JSC "BAZ"; 1999, p. 50-86. (In Russ.).
20. Mintsis M.Ya., Nikolaev I.V., Sirazutdinov G.A. *Alumina production*. Novosibirsk: Nauka; 2012, 252 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Алексеев Константин Дмитриевич,
аспирант,
Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия
✉ kostya.alekseev94@mail.ru

Логинова Ирина Викторовна,
д.т.н., профессор,
профессор кафедры металлургии цветных металлов,
Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия
i.v.loginova@urfu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1627-4634>

Четыркин Игорь Евгеньевич,
директор департамента
по технологии и техническому
развитию глиноземного производства,
ООО «РУСАЛ ИТЦ»
624440, г. Краснотурьинск, ул. Карла Маркса, 1, Россия
Igor.Chetyrkin@rusal.com

Гостинская Ирина Сергеевна,
менеджер по технологии белой стороны,
департамент по технологии и техническому
развитию глиноземного производства,
ООО «РУСАЛ ИТЦ»
624440, г. Краснотурьинск, ул. Карла Маркса, 1, Россия
Irina.Gostinskaya@rusal.com

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 09.06.2023 г.; одобрена после рецензирования 21.07.2023 г.; принята к публикации 01.08.2023 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Konstantin D. Alekseev,
Postgraduate Student,
Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
19, Mira St., Yekaterinburg 620002, Russia
✉ kostya.alekseev94@mail.ru

Irina V. Loginova,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Non-ferrous Metals Metallurgy, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 19, Mira St., Yekaterinburg 620002, Russia
i.v.loginova@urfu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1627-4634>

Igor E. Chetyrkin,
Director of the Department of Technology and Technical Development
of Alumina Production,
RUSAL ETC,
1, Karl Marx St., Krasnoturinsk 624440, Russia
Igor.Chetyrkin@rusal.com

Irina S. Gostinskaya,
Technology Manager of the white side,
Department of Technology and Technical Development of Alumina Production,
RUSAL ETC,
1, Karl Marx St., Krasnoturinsk 624440, Russia
Irina.Gostinskaya@rusal.com

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 09.06.2023; approved after reviewing 21.07.2023; accepted for publication 01.08.2023.

МЕТАЛЛУРГИЯ

Научная статья
УДК 621.923:621.922
EDN: ZJTACR
DOI: 10.21285/1814-3520-2023-3-583-597



Производство глинозёма: исторические этапы развития, проблемы и пути их решения. Часть 1.

В.Н. Бричkin¹, В.В. Васильев², Р.И. Максимова³

¹⁻³Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

Резюме. Цель – уточнение известных исторических этапов производства алюминия и глинозёма до перехода к современной отраслевой структуре с использованием электрометаллургического способа Эру-Холла и их технической значимости в контексте современного металлургического комплекса. Анализ исторических этапов формирования научного знания о глиноземе, алюминии и технологии их производства при использовании химических способов получения металлического алюминия, включая классификацию и технический анализ используемых технологических процессов, и их сырьевой базы. Показано, что формирование научного знания о глиноземе и алюминии преимущественно связано с практической потребностью использования квасцов и отчасти глинистых минералов. Высокая термодинамическая устойчивость соединений алюминия и отсутствие дешевых источников электроэнергии с момента целенаправленного поиска методов его получения в элементарном состоянии и практически до 90-х годов XIX в. являются причинами развития и применения металлотермических способов, пионером освоения которых стал Анри Сент-Клер Девиль и его коллеги. Установлено, что с 1854 по 1890 г. производство алюминия химическим способом было связано с использованием двойного хлорида ($\text{NaCl}\text{-}\text{AlCl}_3$), природного криолита или синтезированных фтористых солей. В качестве исходных материалов в этот период использовались готовые технические реагенты (сульфат алюминия, аммиачные квасцы, гидроксид алюминия) и природное сырье (криолит, боксит, глина), а добыча и переработка боксита были преимущественно связаны с производством квасцов и сульфата алюминия, потребляемых легкой промышленностью. Несмотря на ограниченный спрос в чистом оксиде алюминия на этапе металлотермического получения алюминия, движущей силой развития современных технологий производства глинозёма стала потребность в химической продукции, что обеспечило разработку и освоение технологических процессов переработки бокситов, составляющих основу металлургического комплекса с получением алюминия способом Эру-Холла.

Ключевые слова: производство глинозёма и алюминия, исторические этапы развития, сырье, технологии, исследования и разработки, проблемы и пути их решения.

Для цитирования: Бричkin В.Н., Васильев В.В., Максимова Р.И. Производство глинозёма: исторические этапы развития, проблемы и пути их решения. Часть 1 // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 3. С. 583–597. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-583-597>. EDN: ZJTACR.

METALLURGY

Original article

Alumina production: Historical development, issues, and solutions. Part 1.

Vyacheslav N. Brichkin¹, Vladimir V. Vasiliev², Regina I. Maksimova³

¹⁻³Saint-Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia

Abstract. This study focuses on documenting the historical stages of aluminium and alumina production prior to the transition to a modern industry structure, involving the Hall-Héroult electrometallurgical process, and their technical significance for the contemporary metallurgical complex. It highlights the significance of these stages in the development of scientific knowledge related to alumina, aluminium, and their production technology when using chemical methods for obtaining metallic aluminium. The analysis includes aspects, such as classification, technical evaluation of the processes, and the raw material base. It is shown that the formation of scientific knowledge regarding alumina and aluminium is

© Бричkin В.Н., Васильев В.В., Максимова Р.И. 2023

mainly associated with the practical need for using alum and, to some extent, clay minerals. Since the commencement of deliberate research into methods for aluminium production in its elemental state and virtually until the 1890s, aluminium was primarily produced using the metallothermal methods pioneered by Henri St. Clair Deville and his colleagues due to the high thermodynamic stability of aluminium compounds and the absence of affordable energy sources. It was found that from 1854 to 1890, the production of aluminium by chemical method was associated with the use of sodium aluminium chloride ($\text{NaCl}\cdot\text{AlCl}_3$), natural cryolite, or synthesised fluoride salts. Available technical reagents (aluminium sulphate, ammonia alum, and aluminium hydroxide), along with natural raw materials (cryolite, bauxite, and clay), were used as source materials in this period. The extraction and processing of bauxite were primarily associated with the production of alum and aluminium sulphate consumed by light industry. Although the demand for pure aluminium oxide was limited during the metallothermic production of aluminium, the driving force behind the advancement of modern technologies for alumina production was the demand for chemical products. This demand led to the development of technology for processing bauxite, which forms the foundation of the metallurgical complex in aluminium production using the Hall-Héroult electrometallurgical method.

Keywords: production of alumina and aluminum, historical stages of development, raw materials, technologies, research and development, problems and ways to solve them

For citation: Brichkin V.N., Vasiliev V.V., Maksimova R.I. Alumina production: Historical development, issues, and solutions. Part 1. *iPolytech Journal*. 2023;27(3):583–597. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-583-597>. EDN: Z-ITACR

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня производство алюминия представляет собой сложившуюся профессиональную сферу деятельности, в которую вовлечены многие тысячи специалистов, а потребителями ее продукции, бесспорно, является все население Земли, что позволило ввести в качестве одного из показателей экономической эффективности годовое потребление алюминия на душу населения^{4,5}. Хорошо известным фактором экономического благополучия государства является наличие собственного производства алюминия, которое стимулирует развитие национальных экономик, проявляется в расширении клуба стран, обладающих такими технологиями, и демонстрирует впечатляющий рост мирового производства и потребления алюминия^{4,5} [1–7]. Это позволяет говорить не только об инновационном и техническом феномене производства алюминия, но и культурно-историческом аспекте в контексте общих закономерностей, принципов и тенденций его развития. Часть возникающих при этом вопросов известна с достаточно ранних этапов получения алюминия, другие проявились заметно позже как отражение постиндустриального периода развития общества, но большинство из них не имеют простых технических решений в условиях реальной экономики, что вызывает необходимость проведения дальнейших систематических исследований и разработок [4–19]. Несмотря на значительное количество публикаций

по всему комплексу историко-технических аспектов производства глинозёма и алюминия, некоторые из них сохраняют известную ограниченность при рассмотрении, как в отечественной, так и зарубежной литературе, что вызывает необходимость внесения соответствующих уточнений. При этом заметные сложности возникают не только при анализе начальных этапов развития производства алюминия, но и относительно более поздних периодов, попытке преодоления которых посвящено данное исследование, основной задачей которого является уточнение известных исторических этапов производства алюминия и их технической значимости в контексте современного металлургического комплекса.

НАЧАЛЬНЫЕ ЭТАПЫ ИЗУЧЕНИЯ И ОТКРЫТИЯ АЛЮМИНИЯ

Глубина исторического отсчета для знакомства человечества со свойствами природных и синтезированных соединений алюминия практически не имеет ограничений, так как природные алюмосиликаты составляют основу земной коры и вольно или невольно люди сталкивались с соответствующими горными породами и минералами [20]. Это дает основание значительному количеству авторов отнести начальный период изучения и накопления информации о соединениях алюминия и их свойствах на многие сотни лет, а то и тысячулетия до нашей эры⁵ [2, 21].

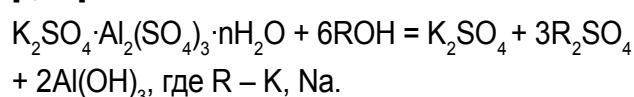
⁵History of aluminium // Wikipedia. [Электронный ресурс]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_aluminium (24.02.2023).

К сожалению, этот эмпирический этап достаточно далек по своим признакам и принципам от научных методов исследования и не позволяет выделить того первооткрывателя, который одним из первых проник в природу соединений алюминия. В этом отношении одно из ранних наблюдений, связанных с вяжущими свойствами природных алюмокалиевых квасцов, стало основанием для их латинского наименования «алюмен» (*alümen*) – вяжущий, а также их искусственного получения при переработке алюнитовых пород (фр. *alunite* – квасцы).

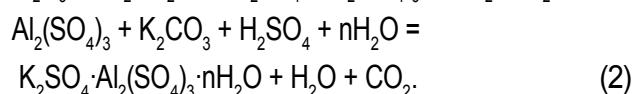
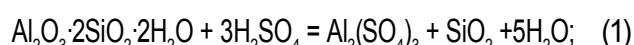
Именно массовое применение квасцов в качестве востребованного реагента при окрашивании тканей, выделке кож, травлении металлических поверхностей, в качестве антипирена при окраске деревянных конструкций для придания им огнестойкости, в медицине и в других целях обеспечили интерес к их составу среди исследователей эпохи Возрождения, а затем и эпохи Просвещения. Это обеспечило постепенное накопление и уточнение представлений о химической природе квасцов, что позволило целому ряду исследователей высказаться об оригинальной природе оксида неизвестного металла (земли) в их составе. Первым задокументированным упоминанием можно считать описание исследований, выполненных примерно в 1530 г. швейцарским алхимиком и универсальным естествоиспытателем эпохи высокого Возрождения Парацельсом⁶ (нем. *Philippus Aureolus Theophrastus Bombastus von Hohenheim*)⁵. Последователь Парацельса немецкий врач и химик Andreas Либавий (лат. *Andreas Libavius*) в 1595 г. показал идентичность кислоты в составе железного и медного купороса с кислотой в квасцах, но отличие в образующей их земле. По-видимому, близость этой земли по своим свойствам к компонентам глины, установленная Либавиусом, стала основанием для ее названия «глинозем» (нем. *das Tonerde* – глинистая земля). Последующие исследования в эпоху Просвещения позволили подтвердить отличие глинозёма по своей природе от кремнезема, извести и мела⁵.

В этой связи приоритет в синтезе и понимании оригинальной химической природы оксида алюминия может быть отдан немецкому врачу

и химику И.Г. Потту (нем. *Johann Heinrich Pott*), который в 1746 г., работая над усовершенствованием технологии производства фарфора на Майсенской мануфактуре в Саксонии, синтезировал гидроксид алюминия и показал его идентичность с землей в составе каолина⁵ [1, 22]:



Следующий существенный шаг был сделан немецким химиком А.С. Маргграфом (нем. *Andreas Sigismund Marggraf*), который в 1754 г. синтезировал квасцы с использованием глины, серной кислоты и поташа, что делает его одним из первооткрывателей химической природы глинозёма и по сути кислотного способа переработки алюмосиликатов⁵:

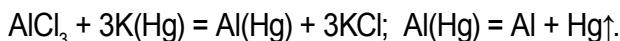


Правильная формула оксида алюминия (Al_2O_3) и, соответственно, глинозёма, была установлена немецким химиком Э. Мичерлихом (нем. *Eilhard Mitscherlich*) в 1821 г., что позволило шведскому химику Я.Берцелиусу (швед. *Jöns Jakob Berzelius*) установить атомный вес металла⁵ – 27.

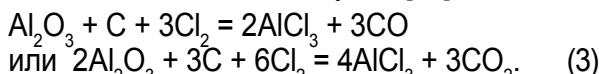
Таким образом, открытие глинозёма (оксида алюминия), его получение, изучение природы и свойств, безусловно, носит характер коллективного многолетнего исследования, которое в полной мере подготовило последующее выделение алюминия в элементарном состоянии. При этом необходимо обратить внимание на то, что отправной точкой в этих исследованиях были именно квасцы, измененное латинское наименование которых (*aluminum*) было предложено британским химиком, физиком, геологом и основателем электрохимии Хемфири Дэви (англ. *Humphry Davy*) в качестве названия еще неполученного нового металла (алюминия). Несмотря на использование гидроксида алюминия для электрохимического восстановления, Хемфири Дэви⁷ не удалось получить алюминий в виде индивидуального металла, так как в ходе высокотемпературного процесса образовался сплав с железным катодом. Прорыв в полу-

⁶Парацельс // Википедия (wikipedia.org). [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%B0%D1%80%D0%B0%D1%86%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D1%81> (28.02.2023).

нии металлического алюминия произошел в 1825 г. и был связан с использованием хлористого алюминия и амальгамы калия в опытах датского физика Ганса Эрстеда (дат. Hans Christian Ørsted), а предложенный им химический принцип восстановления алюминия на многие десятилетия определил технологию получения этого металла⁵ [1–3]:



При этом Эрстед использовал безводный хлористый алюминий, впервые полученный им в 1825 г. пропусканием хлора над нагретой смесью оксида алюминия и угля⁸ [23]:



До настоящего времени идут споры о чистоте полученного Гансом Эрстедом алюминия с учетом примеси непрореагировавшего калия и, соответственно, о первенстве его получения. Так как Эрстед не был обеспокоен приоритетом открытия, то в 1827 г. он

дал разрешение на проведение дальнейших исследований немецкому химику Фридриху Вёлеру (нем. Friedrich Wöhler), который стал пионером изучения свойств алюминия. Первоначальные неудачи Вёлера в получении алюминия по методу Эрстеда не остановили его, и он продолжил эксперименты, заменив амальгаму калия металлическим калием в качестве восстановителя. С учетом высокой занятости лишь в 1845 г. Вёлеру удалось получить алюминий в виде расплавленных блестящих шариков (нем. in geschmolzenen blanken Kugeln) общей массой 66 мг, что позволило изучить его физические и химические свойства⁹, рис. 1.

Этими исследованиями в значительной степени была подготовлена возможность укрупненного получения алюминия и создания коммерчески состоятельного производства в связи с рядом привлекательных свойств, которыми обладает алюминий.

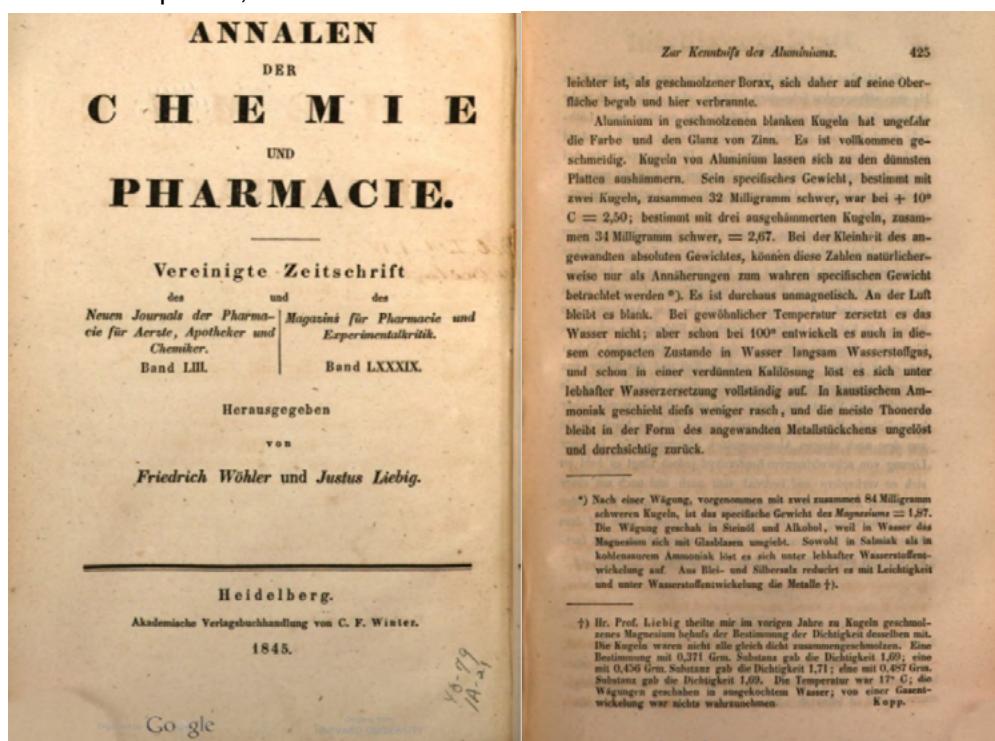


Рис. 1. Статья Фридриха Вёлера «Zur Kenntniss des Aluminiums», изданная в «Хрониках химии и фармацевтике» (нем. Annalen der Chemie und Pharmacie). О получении и изучении им металлического алюминия (по материалам – сноска 9)

Fig. 1. Friedrich Wöhler's article "Zur Kenntniss des Aluminiums" published in the Chronicles of Chemistry and Pharmaceutics (German: Annalen der Chemie und Pharmacie) on his production and study of metallic aluminum (based on footnote 9)

⁷Дэви Гемфри // Википедия (wikipedia.org) [Электронный ресурс]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D1%8D%D0%B2%D0%B8,_%D0%93%D0%B5%D0%BC%D1%84%D1%80%D0%B8 (24.02.2023).

⁸Annalen der Physik und Chemie / herausgegeben zu Berlin von J.C. Poggendorf. Leipzig: Verlag von Joh.

Ambrosius Barth, 1825. P. 132. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.digitale-sammlungen.de/en/view/bsb10130318?page=148,149> (28.02.2023).

⁹Wöhler F. Zur Kenntnis des Aluminiums // Annalen der Chemie und Pharmacie. Heidelberg: Akademische Verlagsbuchhandlung von C.F. Winter, 1845. Band 53. P. 422–426. [Электронный ресурс]. URL: <https://archive.org/details/annalen-derchemi53liebgoog>. (28.02.2023).

ПРОИЗВОДСТВО ГЛИНОЗЁМА В ЭПОХУ ХИМИЧЕСКОЙ (МЕТАЛЛОТЕРМИЧЕСКОЙ) ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА АЛЮМИНИЯ

Поскольку метод Вёлера не позволял производить значительное количество алюминия, то его стоимость оставалась исключительно высокой и почти в два раза превышала стоимость золота в начале 50-х годов XIX в. Пионером и идеологом нарождающегося производства алюминия стал французский химик Анри-Этьен Сент-Клер Девиль (фр. Henri Sainte-Claire Deville), который в последующем напишет [24]:

«Il y a quelques années, au moment où le hasard me faisait découvrir quelques-unes des propriétés si curieuses de l'aluminium, ma première pensée fut que j'avais mis la main sur ce métal intermédiaire dont la place serait faite dans les usages et les besoins des hommes, le jour où l'on connaîtrait le moyen de le faire sortir du laboratoire des chimistes pour le faire entrer dans l'industrie.»

«Несколько лет назад, когда случай заставил меня открыть некоторые из столь любопытных свойств алюминия, моей первой мыслью было, что я нашел этот промежуточный металл (между неблагородными металлами и драгоценными металлами, прим. автора), место которого будет занято в использовании и потребностях людей, в тот день, когда мы узнаем, как достать его из лаборатории химиков и использовать в промышленности.»

6 февраля 1854 г. Сент-Клер Девиль представил проект производства алюминия Парижской академии наук с докладом «Алюминий и его химические соединения» и заручился финансовой поддержкой в рамках комитета по научному обоснованию производства алюминия. На выделенные средства он успешно выполнил работы по получению алюминия электролизом расплава двойного хлорида ($\text{NaCl}\cdot\text{AlCl}_3$) и использованию натрия вместо калия в способе Эрстеда-Вёлера. Независимо от Девиля, в августе 1854 г. немецкий химик Роберт Вильгельм Бунзен (нем. Robert Wilhelm Bunsen) заявил об успешном опыте электролиза того же двойного хлорида, что стало основанием для именного названия такого метода Бунзена-Девиля. Развитие этого подхода было заявлено Девилем совместно с его сотрудником, горным инженером и химиком Луи Ле Шателье (фр. Louis Le Chatelier), в рамках английского

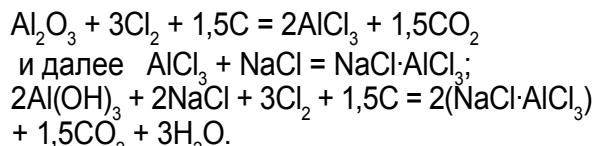
патента на получение алюминия путем электролиза криолита [3], но до промышленной реализации этих идей оставалось еще около трех десятилетий из-за отсутствия генерирующих мощностей и сетей для передачи электроэнергии.

Поэтому в дальнейшем Девиль сосредоточился на экономически приемлемом способе химического получения алюминия, разработка и освоение которого в период 1855–1860 выполнялась на казенные средства по распоряжению императора Наполеона III, а также средства инвесторов. С целью удешевления процесса и улучшения его показателей Девиль предложил использовать двойной хлорид ($\text{NaCl}\cdot\text{AlCl}_3$), обладающий большей устойчивостью и легкоплавкостью по сравнению с AlCl_3 , а также металлический натрий, менее опасный в производственных условиях и расход которого был почти в два раза меньше, чем калия [25]. Доработка и освоение технологических процессов получения алюминия выполнялась в 1855 г на химическом заводе в пригороде Парижа Жавель (фр. Javel) и в это же время на специально построенном заводе в Амфревиль-ла-Ми-Вуа (фр. Amfreville-la-Mi-Voie) близ Руана (Нормандия, Франция), а после его закрытия – в 1856 г. в пригороде Парижа на заводе химических продуктов в Ла Гласье (фр. la Glacier) и, наконец, с 1857 г. на заводе с увеличенной производительностью в Нантер (фр. Nanterre) также вблизи Парижа [24–26].

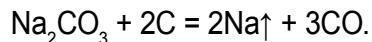
В результате этих исследований были разработаны и усовершенствованы ключевые технологические процессы металлотермического получения алюминия, включая производство глинозёма приемлемой чистоты, получение двойного хлорида ($\text{NaCl}\cdot\text{AlCl}_3$), металлического натрия, металлического алюминия, его сплавов и продуктов на их основе, которые производились обществом с ограниченной ответственностью «Поль Морен и К°» (фр. Paul Morin et C^{ie}) на заводе «Черная мельница» (фр. Moulin noir, Nanterre), рис. 2.

При этом в качестве исходного сырья для производства двойного хлорида использовали технический сульфат алюминия или аммиачные квасцы с гидрохимическим разделением компонентов в первом случае и термической диссоциацией во втором, включая многостадийную очистку гидроксида и оксида алюминия от примеси железа и других компонентов. Двойной хлорид получали хло-

рированием прокаленной смеси гидроксида алюминия с углем с последующим добавлением NaCl и плавлением смеси, либо в одну стадию с добавлением морской соли в исходную шихту.



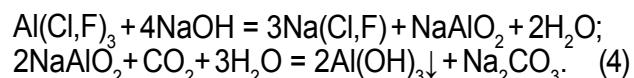
Вторым технологически необходимым компонентом является натрий и, соответственно, способ его получения, основанный на восстановлении соды углеродом с отгонкой и конденсацией паров натрия, а присутствие мела в шихте исключает ее оплавление, повышает пористость, скорость и полноту взаимодействия:



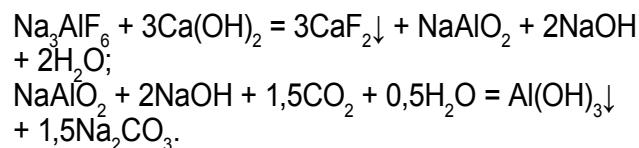
На заключительной стадии осуществляется восстановление алюминия, которое протекает в расплаве двойного хлорида на подине отражательной печи, а для лучшего сплавления (слияния) капель в расплав вводится фтористая соль, например флюорит, как наиболее дешевый компонент:



Для обработки невосстановленного алюминия шлак обрабатывали раствором каустической щелочи с его последующей фильтрацией, карбонизацией, отделением и промывкой осадка гидроксида алюминия, что позволяло вернуть алюминий и соду (после выпарки щелока и ее кристаллизации) в технологический процесс:



В качестве дополнительного источника алюминия Девиль использовал начавшиеся поставки криолита месторождения Ivittuut (эск. яз.) в Гренландии, переработка которого сочеталась с переработкой алюминиевых шлаков, также содержавших заметное количество фтористого алюминия, и включала обработку гашеной известью, отделение осадка и карбонизацию щелочного раствора:



В качестве самостоятельного источника

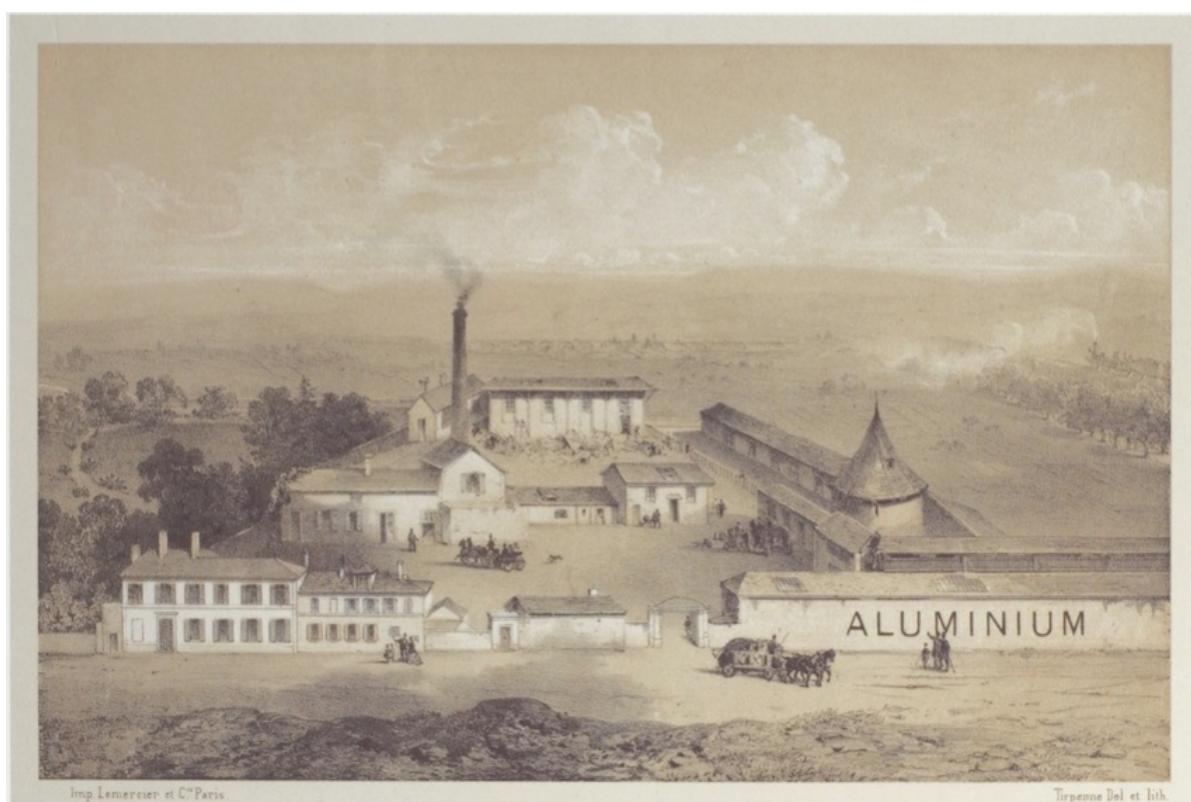


Рис. 2. Гравюра с алюминиевым заводом «Черная мельница» в Нантер, управляемым компанией «Поль Морен и Ко» (по материалам [25])

Fig. 2. Engraving of the Black Mill aluminum smelter in Nanterre, managed by Paul Morin & Co. (based on [25])

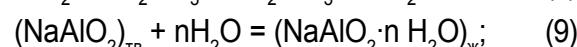
алюминия природный криолит был использован молодыми химиками и коллегами Девиля братьями Шарлем и Александром Тиссье (фр. Charles et Alexandre Tissier) на заводе в Амфревиль-ла-Ми-Вуа примерно с 1857 по 1865 г. Для понижения температуры процесса в качестве флюса использовали хлорид натрия, но получающийся по этому способу алюминий содержал большое количество примесей, включая кремний, а криолит представлял собой достаточно дорогое сырье, что привело к закрытию этого производства [24, 26]:



Вполне естественно, что работая над процессом получения алюминия, исследователи должны были обратить внимание на еще один доступный источник алюминия с содержанием оксида алюминия 55–60%, обнаруженный в 1821 г. горным инженером, минералогом и геологом Пьером Бертье (фр. Pierre Berthier) на юге Франции в регионе Ле-Бо-де-Прованс (фр. Les Baux-de-Provence) и описанный им по наименованию местности как боксит (фр. bauxite). К сожалению, одно из наиболее ранних упоминаний о возможности переработки боксита в работе [26] со ссылкой на публикацию 1847 г.¹⁰ не вполне точно, так как в ней говорится о возможности разложения NaCl и KCl водяным паром при температуре вишнево-красного каления с образованием соответствующих алюминатов в присутствии глинозёма (оксида алюминия) без упоминания об использовании боксита:

$2(\text{Na}, \text{K})\text{Cl} + \text{H}_2\text{O} + \text{Al}_2\text{O}_3 = 2(\text{Na}, \text{K})\text{AlO}_2 + 2\text{HCl}$. Таким образом, исследования, выполненные с 1855 по 1858 г. Луи Ле Шателье в рамках проекта Сент-Клер Девиля, привели к разработке термического способа получения глинозёма из боксита, который с полным правом можно отнести к передовым техническим решениям, определившим в последующие годы создание и развитие современной сырьевой базы производства алюминия. При этом технические аспекты производства глинозёма были опубликованы Луи Ле Шателье в патенте № 37682 (Франция) от 11 августа 1858 г., дополненного шестью свидетельствами в период с 1859 по

1861 г., а научные аспекты этой технологии были опубликованы Сент-Клер Девилем в статье «Аналитические исследования глиноzemистых материалов. О наличии ванадия в глиноземистой руде с юга Франции» (Анналы химии и физики, 3-я сер., т. LXI, март 1861 г., с. 309–345) [1, 2, 25]. Согласно первоначальной схеме производства, шихту из измельченного боксита и соды спекали в отражательной печи, затем спек выщелачивали теплой водой или слабым щелочным раствором от предыдущих операций промывки, а образующийся крепкий раствор подвергали нейтрализации углекислым газом (1), выделяющимся при воздействии соляной кислоты на известняк [1, 2, 25, 26]:



Понятно, что совокупность приведенных реакций спекания и выщелачивания (6)–(10) обеспечивает перевод алюминия в растворимую форму и его полное отделение от железа, что в меньшей степени касается кремнезема ввиду частичной растворимости метасиликата натрия.

Осажденный и промытый гидроксид имел следующий состав [26], %: $\text{Al}_2\text{O}_3 - 47,5$; $\text{H}_2\text{O} - 50,0$; $\text{Na}_2\text{CO}_3 - 2,5$. Затем гидроксид алюминия перерабатывался в сульфат алюминия и частично шел на производство алюминия. Начало освоения этой технологии было положено в 1860 г. на химическом заводе Анри Мерля (фр. Henri Merle) в Салендр на юге Франции (фр. Salindres, Gard), организованного в 1855 г. компанией «Compagnie des Produits Chimiques d'Alais et de la Camargue» (PCAC). В последующем компания получила неофициальное название по имени ее управляющего с 1877 по 1906 гг. А.Р. Пешине (фр. Alfred Rangod Pechiney), который после кончины Анри Мерля в течение трети века будет руководить техническим и коммерческим развитием компании PCAC, и более 15 лет будет нести исключительную ответственность за

¹⁰Tilghman R. Verfahren schwefelsaures und salzsäures Kali, schwefelsauren Baryt, Bittersalz etc. bei hoher Temperatur zur Gewinnung ihrer Basen mittelst Wasserdampf zu zersetzen, worauf sich Richard Tilghman, Chemiker in London, am 1. Febr. 1847 ein Patent ertheilen ließ // Polytechnische Journal, Jahrgang 1847. Band 106. Nr. XLIV. P. 196–202. [Электронный ресурс]. URL: <https://dingler.bbaw.de/articles/ar106044.html> (28.02.2023).

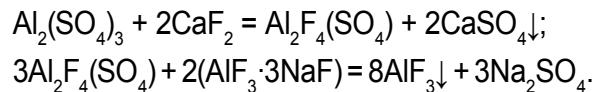
мировое производство алюминия. Таким образом, неопровергимый вклад разработчиков и организаторов первого в мире производства алюминия с полным правом позволяет дать именное название Ле Шателье – Морена термическому способу получения глинозёма из бокситов, а процессу химического получения алюминия в целом Девиля – Пешине [1]. С 1860 по 1890 г. компанией РСАС было произведено около 45 т алюминия, спрос на который оставался достаточно низким и поддерживался производством оригинальных ювелирных, бытовых и служебных изделий на заводе «Moulin noir» в Нантер [25].

Несмотря на существенную неопределенность спроса на алюминий в первые десятилетия его производства, внимание исследователей было сосредоточено на возможности дальнейшего улучшения показателей технологии Девиля – Пешине, что привело к целому ряду разработок, которые касались снижения затрат на получение металлического натрия, повышения технологических показателей химического восстановления алюминия и улучшения показателей производства глинозёма из боксита. В этой связи заметный интерес представляют разработки Курта Нетто из Дрездена (англ. Curt Netto, of Dresden), реализация которых была обеспечена специально созданной в 1888 г. компанией The Alliance Aluminium Company of London для производства металлического натрия, калия и алюминия [2, 26]. При этом снижение производственных затрат обеспечивалось использованием непрерывного процесса получения натрия путем частичного восстановления каустической щелочи древесным углем и последующим получением высококачественного алюминия при натриетермическом восстановлении криолита по реакции (5), высокая скорость протекания которой снижает загрязнение металла примесями:



Получению высокочистого алюминия посвящены разработки и Людвига Грабау (Ludwig Grabau, Hanover, Germany: «Process of manufacturing aluminium», US Patent 400,449; filed Nov. 19, 1887; patented April 2, 1889), использовавшего фтористый алюминий высокой чистоты и его подачу в расплавленный натрий, что обеспечило степень использования натрия 80÷90% и получение алюминия с содержанием примесей на уровне 0,5% в ходе промышлен-

ной реализации процесса на заводе в Трота (нем. Trotha, Halle, Deutschland) [2, 26]. При этом была использована оригинальная технология получения AlF_3 путем конверсии сульфата алюминия с использованием флюорита и криолита:



Заметное место в этом ряду исследований и разработок занимает способ, разработанный Николаем Николаевичем Бекетовым, выдающимся русским ученым-химиком, который 28 марта 1865 г. защитил докторскую диссертацию на тему «Исследования над влиянием вытеснения одних элементов другими», установив, что алюминий весьма полно вытесняется из криолита металлическим магнием. Этот процесс давал весьма благоприятные результаты и двадцать два года спустя получил промышленное осуществление на заводе в Руане и Хемелингене (нем. Hemelingen, Bremen, Deutschland) [21]. Согласно принятой технологии, магний получали электролизом расплавленного MgCl_2 и использовали его для тигельного восстановления гренландского криолита при температуре белого каления. С 1885 по 1890 г. таким способом было произведено 58000 кг алюминия, т.е. существенная доля алюминия, полученного химическими способами, о чем даже не упоминается в известной монографии Джозефа Ричардса (англ. Joseph William Richards) [26].

Существенное снижение стоимости металлического натрия было достигнуто при его получении по способу Г. Каствера (U. S. Pat. No. 342897, June 1, 1886. Hamilton Y. Castner, New York) с использованием процесса, который имеет следующую предполагаемую схему взаимодействия [26]:



Промышленная реализация этого процесса в сочетании с получением алюминия по способу Сент-Клер Девиля была осуществлена в 1888 г. на специально построенном заводе в Олдбери близ Бирмингема (англ. Oldbury near Birmingham, Great Britain). За три года его эксплуатации было произведено 115000 кг алюминия, что стало высшим достижением в развитии химической технологии получения алюминия, но завод не смог выдержать конкуренции с электролитическим производством

алюминия, и был закрыт в 1891 г. [2].

Таким образом, без учета продукции опытных производств и заводов с малой производительностью суммарный объем алюминия, полученного способом химического (металлотермического) восстановления до эпохи электролитического производства составил около 218000 кг. При этом в качестве основных источников алюминия были использованы разнообразные химические соединения и природное сырье, включая сульфат алюминия, аммиачные квасцы, фтористый алюминий, природный и синтетический криолит, боксит, а технологический процесс восстановления

[1–3]. Приведенные зависимости имеют устойчивую корреляцию мирового объема добычи боксита, выработки алюминия и расчетной потребности этого производства в сырье ($P_{бокс}$), которая определялась с учетом средних статистических данных по расходу глинозёма и его выходу на тонну боксита при переработке по способу Байера:

$$P_{бокс} = 1,91 \cdot 0,455 \cdot P_{Al} (\text{т/т}),$$

где 1,91 – средний расход глинозёма в процессе электролитического производства алюминия (т/т) при теоретическом расходе $102/54 = 1,89$ т/т по стехиометрии процесса $Al_2O_3 = 2Al + 1,5 O_2$; 102 и 54 – соответственно,

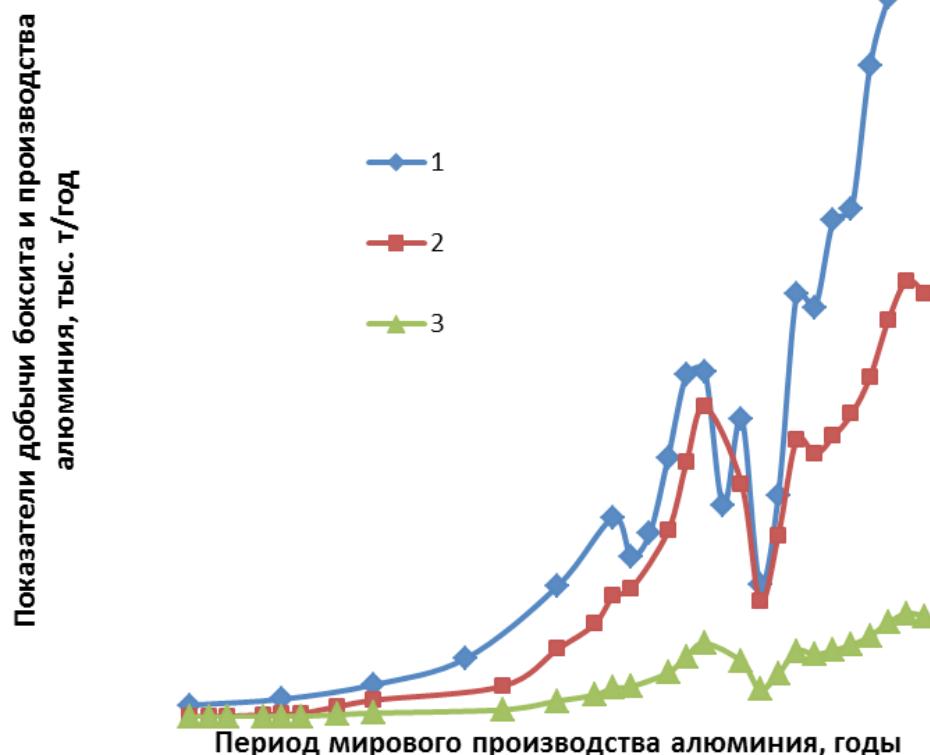


Рис. 3. Показатели мировой добычи боксита и производства алюминия в период 1890–1930 гг. по данным [1–3]:
1 – годовой объем добычи боксита; 2 – расчетная годовая потребность в боксите на производство алюминия;
3 – годовой объем производства алюминия

Fig. 3. Indicators of global bauxite mining and aluminum production in the period from 1890 to 1930 according to [1–3]:
1 – annual production of bauxite; 2 – estimated annual demand for bauxite in aluminum production;
3 – annual aluminum production

алюминия преимущественно базировался на использовании двойного хлорида ($NaCl \cdot AlCl_3$) и природного криолита. В этой связи заметный интерес представляет анализ изменения структуры сырьевых ресурсов при переходе к электролитическому производству алюминия, которое может быть условно отнесено к 1890 г. ввиду создания и расширения новых производств и закрытия заводов с химической технологией производства алюминия, рис. 3

молекулярная масса Al_2O_3 и двух молей Al ; 0,455 – выход глинозёма в способе Байера т/т боксита.

Следует обратить внимание на то, что в период становления электролитического производства (1890–1895 гг.) его потребность в исходном сырье находилась на уровне 2,5–5,0% от общего объема добываемого боксита, а в период 1900–1910 гг. уже составила около 50% мировой добычи боксита. Следовательно,

не только производство алюминия, но и другие химико-технологические процессы стали активными потребителями боксита и в конечном итоге стимулировали его переработку для производства химической и металлургической продукции. Примечательным является то, что распространенный сегодня процесс Байера для производства глинозёма разрабатывался австрийским химиком К.Й. Байером (нем. Karl Josef Bayer) как технология получения травильных реагентов, в которых остро нуждалась развивающаяся текстильная промышленность для окрашивания хлопчатобумажных тканей [27, 28]. В этом смысле конечной задачей было производство сульфата алюминия высокой чистоты, а осаждаемый при переработке боксита гидроксид алюминия, по сути, являлся прекурсором для его получения [29–31].

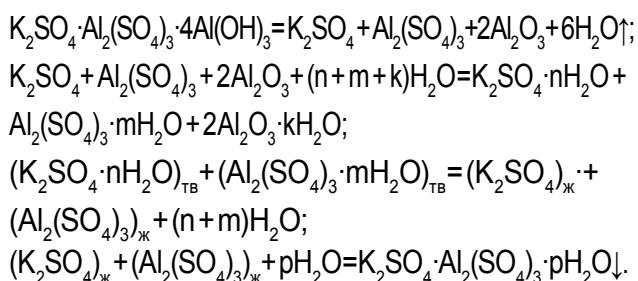
Как известно, первый крупный завод, работавший по этой технологии, былпущен в 1893 г. в Гардан (фр. Gardanne) на юге Франции и уже в 1895 г. приобретен Французской электрометаллургической компанией (фр. Société électrométallurgique française) для обеспечения своих предприятий глиноземом, что принципиально отличает электрометаллургию алюминия от ранее рассмотренных процессов его получения⁵ [1–3, 8, 21, 25, 26]. Этим альянсом глиноземного производства Байера и электрометаллургической технологии Эру-Холла (фр. Paul-Louis-Toussaint Héroult – англ. Charles Martin Hall) были обозначены ключевые элементы нового технологического процесса получения алюминия, который до настоящего времени определяет развитие данной отрасли металлургии^{4, 5} [1–8].

ВКЛАД РОССИЙСКИХ ИССЛЕДОВАТЕЛЕЙ И ПРЕДПРИНИМАТЕЛЕЙ В ОСВОЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ГЛИНОЗЁМА И АЛЮМИНИЯ

Первоначальный опыт отечественных предпринимателей в использовании алюминийсодержащего сырья, по сути, был продиктован уже известной тенденцией производства квасцов, а в последующем и сернокислого алюминия для потребностей текстильного, кожевенного, бумажного и др. производств [27, 28], что привело к освоению отечественной сырьевой базы глин и алюнитов

для их производства. Уже в 1825 г. в «Горном журнале» приведено описание фабрики для выварки квасцов из алюнитовой руды вблизи селения Заглика (Азербайджан)¹¹ [21, 32].

Сам процесс состоял из обжига руды, созревания огарка (перекристаллизации), его выщелачивания, собственно выварки (выпарки) и осаждения квасцов при охлаждении упаренного раствора, что можно описать следующими химическими взаимодействиями, составляющими основу современных способов комплексной переработки алюнитовой руды:



Во второй половине XIX в. многократно возрастает потребность в химической продукции, что приводит к росту объемов их производства и созданию крупных химических компаний и производств мирового уровня: «Товарищество П. Малютина и сыновья», «Завод химической продукции «Гиршман, Киевский и Шольце» в Варшаве», «Химический завод Шлиппе и компании» [33], «Товарищество Тентелевского завода», наконец «Товарищество химических заводов П.К. Ушакова и К°», которое, по сути, представляло собой целую химическую империю [21, 27, 28]. При этом и крупные, и более мелкие предприятия были многопрофильными с производством разнообразной химической продукции, включая минеральные и органические кислоты, соду, различные купоросы, квасцы, сульфат алюминия и др., а к концу XIX века и глинозем, производимый по способу Ле Шателье-Морена. В зависимости от имеющихся ресурсов технологические процессы на этих предприятиях могли достаточно сильно отличаться, используя в качестве исходного алюминийсодержащего сырья гренландский криолит (Завод химической продукции «Гиршман, Киевский и Шольце» в Варшаве), французский боксит («Товарищество Тентелевского завода» и «Товарищество химических заводов П.К. Ушакова и К°»), боро-

¹¹Некоторые минерало-статистические известия о Грузинском крае // Горный журнал. 1825. № 3. С. 3–13. [Электронный ресурс]. URL: <http://elib.uraic.ru/handle/123456789/6383?ysclid=llwe5kv5gs537769178> (24.02.2023).

вичскую или гжельскую глину соответственно на предприятиях Товарищества Тентелевского завода и Товарищества П. Малютина и сыновья [27, 28]. В полной мере это относится и к сырьевому обеспечению первого российского алюминиевого завода (1885–1889), устроенного вблизи г. Сергиев-Посад, и который работал по способу Сент-Клер Девиля, а затем Х. Розе (нем Heinrich Rose, немецкий химик и минералог), соответственно, используя процесс хлорирования глуховской глины (Черниговская губерния) для получения AlCl_3 , а в последующем гренландский криолит [34].

В тоже время научный интерес российских исследователей к алюминию и его соединениям был прежде всего связан с решением актуальных проблем физики, химии, физической химии и в конечном итоге химической технологии, в рамках развивающейся химико-металлургической школы России как части мирового научного сообщества. Необходимо отметить, что даже русское наименование «глинозем» ввел в употребление академик Яков Дмитриевич Захаров [35] (1765–1836) в рамках реформы химической номенклатуры веществ, которая выполнялась комиссией Академии наук под его руководством в 1808–1810 г. Хорошо известны исследования русского физика, академика Василия Владимировича Петрова (1761–1834) по электролизу и электротермическому восстановлению металлов, профессора Василия Ивановича Лапшина (1819–1888) в области электротермии и электролиза расплавленных сред, русского химика, академика Николая Николаевича Бекетова в области алюминотермического восстановления металлов [21]. Заметным явлением научной жизни конца XIX века стала подготовка и издание в 1893 г. первой научной монографии «Алюминий и его металлургия» [36] на русском языке, которая только на три года уступает первенство монографии «*Aluminium: Its History, Occurrence, Properties, Metallurgy and Applications, Including Its Alloys*» [26]. В области производства глинозёма заслуживающим внимание результатом является разработка русским инженером-химиком Д.А. Пеняковым усовершенствованного способа термической переработки боксита с заменой более дорогой соды сульфатом натрия и попутным производством соляной кислоты, а его эффективность была оценена в производственных условиях с учетом реализации процесса на трех заводах в Бельгии и Франции [1, 2, 21, 27]. И, конечно, исключительное значение для разви-

тия теории и практики мирового глиноземного производства имеют исследования и разработки К.И. Байера, выполненные в России по заданию таких крупных отечественных компаний как «Товарищество Тентелевского завода» и «Товарищество химических заводов П.К. Ушакова и К°», которые не только определили структуру современного производства алюминия, но и заложили основы теории алюминатных растворов, т.е. физико-химического учения, развитие которого не останавливается и в настоящее время [1, 2, 4–19, 37–42].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ исследований и разработок, выполненных в период становления производства алюминия и до завершения эпохи его получения химическими (металлотермическими) методами позволяет сделать следующие выводы:

1. На протяжении всего периода химического производства алюминия с 1854 по 1890 г. его получение было связано с использованием двойного хлорида ($\text{NaCl}\cdot\text{AlCl}_3$), природного криолита или синтезированных фтористых солей, при этом в качестве исходных материалов использовались готовые технические реагенты (сульфат алюминия, аммиачные квасцы, гидроксид алюминия) и природное сырье (криолит, боксит, глина).

2. Добыча и переработка боксита в этот период были преимущественно связаны с производством квасцов и сульфата алюминия, потребляемых легкой промышленностью, а в качестве прекурсора для их получения использовался гидроксид алюминия,рабатываемый на химических заводах, но при переходе к современному способу электролитического получения алюминия в конце XIX века, доля боксита для его производства уже составила более 50%.

3. Выполненные в России XIX века разработки позволяют говорить о полноценном участии отечественного научно-технического и предпринимательского сообщества в освоении наукоемких технологий производства глинозёма и алюминия, которые стали полноценной частью мировых достижений и заложили основы современной металлургии алюминия.

Список источников

1. Беляев А.И., Рапопорт М.Б., Хазанов Е.И. Алюминий. М.–Л.: НКТП Цветметиздат, 1932. 160 с.
2. Эдвардс Д., Фрери Ф., Джейфрис З. Алюминиевая промышленность. Алюминий и его производство. Москва–Ленинград–Свердловск: Гос. науч.-тех. изд. по черной и цвет. мет., 1933. 212 с.
3. Беляев А.И., Хазанов Е.И. Специальный курс. Электрометаллургия алюминия. М.–Л.: Глав. ред. лит-ры по цветной металлургии, 1937. 290 с.
4. Прокопьев И.В., Кальченко В.С., Калужский Н.А. Алюминиевая промышленность страны на рубеже 90-х годов // Цветные металлы. 1991. № 9. С. 4–7.
5. Калужский Н.А., Щеголев В.И. Научная и проектная база становления и развития отечественной металлургии легких металлов // Цветные металлы. 2003. № 7. С. 13–23.
6. Ланкин В.П. Научно-техническая деятельность АО ВАМИ по дальнейшему развитию и технологическому перевооружению промышленности легких металлов на этапе перехода к рыночной экономике // Цветные металлы. 2000. № 1. С. 4–6.
7. Сизяков В.М. Современное состояние и проблемы развития алюминиевой промышленности России // Записки Горного института. 2005. Т. 165. С. 163–169.
8. Горланов Е.С., Кавалла Р., Поляков А.А. Электролитическое производство алюминия. Обзор. Часть 2. Перспективные направления развития // Цветные металлы. 2020. № 2. С. 42–49.
9. Трушко В.Л., Уткин В.А., Бажин В.Ю. Актуальность и возможности полной переработки красных шламов глиноземного производства // Записки Горного института. 2017. Т. 227. С. 547–553. <https://doi.org/10.25515/PMI.2017.5.547>
10. Brichkin V.N., Vasiliev V.V., Bormotov I.S., Maksimova R.I. Production and recycling of limes in integrated mineral processing // Gornyi Zhurnal. 2021. Iss. 11. P. 88–94.
11. Халифа А.А., Бажин В.Ю., Устинова Я.В., Шалаби М.Э. Изучение особенностей кинетики процесса получения окатышей из красного шлама в потоке водорода // Записки Горного института. 2022. Т. 254. С. 261–270. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.18>.
12. Пиираинен В.Ю., Михайлов А.В., Баринкова А.А. Современный взгляд на решение проблем экологии Уральского алюминиевого завода // Цветные металлы. 2022. № 7. Р. 39–45.
13. Плягай И. Н., Кремчеев Э. А., Пасечник Л. А., Яценко С. П. Карбонизационный способ переработки отходов глиноземного производства – альтернативная технология извлечения редких металлов // Цветные металлы. 2020. № 10. С. 56–63.
14. Козырев Б.А., Сизяков В.М. Кучное выщелачивание красного шлама формиатным способом // Обогащение руд. 2021. № 4. С. 40–45. <https://doi.org/10.17580/or.2021.04.07>.
15. Kozyrev B.A., Sizyakov V.M., Arsentyev V.A. Principles of rational processing of red mud with the use of carboxylic acids // Non-ferrous Metals. 2022. Iss. 2. P. 30–34. <https://doi.org/10.17580/nfm.2022.02.05>.
16. Brichkin V.N., Fedorov A.T. Indicators and regularities of hydrolytic decomposition of metastable aluminate solutions in the $\text{Na}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{H}_2\text{O}$ system // Non-ferrous Metals. 2021. Iss. 2. P. 27–32.
17. Дубовиков О.А., Сундуров А.В. Кинетика выщелачивания термоактивированного боксита // Обогащение руд. 2021. № 4. С. 34–39. <https://doi.org/10.17580/or.2021.04.06>.
18. Голубев В.О., Литвинова Т.Е. Динамическое моделирование промышленного цикла кристаллизации гибсита // Записки Горного института. 2021. Т. 247. С. 88–101. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.10>.
19. Alekseev A.I., Kononchuk O.O., Goncharova M.V., Hippmann S., Bertau M. Recovery of CaCO_3 from the nepheline sludge of alumina production // Chemie-Ingenieur-Technik. 2019. Iss. 4. P. 1–9.
20. Вернадский В.И., Курбатов С.М. Земные силикаты, алюмосиликаты и их аналоги. Л.–М.: Глав. ред. геолого-разв. и геодез. литературы, 1937. 378 с.
21. Беляев А.И. Очерки по истории металлургии легких металлов. М.: Гос. науч.-тех. изд. по черной и цвет. мет., 1950. 142 с.
22. Engel M. Pott. Johann Heinrich // Neue Deutsche Biographie. Berlin: Duncker & Humblot, 2001. Vol. 20. P. 660–661. [Электронный ресурс]. URL: <https://daten.digitale-sammlungen.de/0001/bsb00016338/images/index.html?id=00016338&groesser=&fip=qrsweayasdaxdsydeayaenewqfsdr&no=&seite=675> (28.02.2023).
23. Ходалевич Г.Н., Жариков И.И. К вопросу о получении безводного хлористого алюминия из сибирских глин // Известия Сибирского Химико-Технологического Института. 1934. Т. 3. Вып. 1. С. 5–13. [Электронный ресурс]. URL: http://www.lib.tpu.ru/fulltext/v/Bulletin_TPU/1934/n3/a2_full.pdf (28.02.2023).
24. Henri Sainte-Claire Deville. De l'aluminium: ses propriétés, sa fabrication et ses applications. Mallet-Bachelier, 1859. 176 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://archive.org/details/delaluminiumsesp00sain/page/176/mode/2up>. (28.02.2023).
25. Plateau J., Renaux T. L'aluminium et Paul Morin au Moulin noir Nanterre, 1857–1890 // Société d'Histoire de Nanterre. 2007. Iss. 39. 136 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k9602016r/f1.image.r=nanterre.lang-FR> (24.02.2023).
26. Richards J.W. Aluminium: Its History, Occurrence, Properties, Metallurgy and Applications, Including Its Alloys. Philadelphia: Henry Carey Baird & Co, 1890. 511 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://archive.org/details/aluminiumitshis-00richrich/page/n7/mode/2up> (24.02.2023).
27. Лукьянов П.М. История химических промыслов и химической промышленности России до конца XIX века. М.–Л.: Академия Наук СССР, 1949. Т. 2. 732 с.
28. Сметанин С.И. История предпринимательства в России. М.: Палеотип; Логос, 2004. 196 с.
29. Минаев В.И. Разложение растворов многоосновных сернокислых солей алюминия хлопчатобумажным волокном (К вопросу об изучении явлений протравливания) // Известия Томского политехнического университета. 1925. Т. 46. № 1-3. С. 83–97. [Электронный ресурс]. URL: http://www.lib.tpu.ru/fulltext/v/Bulletin_TPU/1925/v46/a18_full.pdf (24.02.2023).

30. Кулев Л.П., Горизонтова Т.Н. О механизме лакообразования при ализариновом крашении // Известия Томского Ордена Трудового Красного Знамени политехнического института им. С.М. Кирова. 1956. Т. 83. С. 113–120. [Электронный ресурс]. URL: http://www.lib.tpu.ru/fulltext/v/Bulletin_TPU/1956/v83/11.pdf (24.02.2023).
31. Habashi F. Alumina production and the Textile industry // International Journal of Textile Science & Engineering. 2017. Iss. TSE-104. Р. 100004. <https://doi.org/10.29011/TSE-104/100004>.
32. Яковлев А. Химическое исследование грузинского квасцового камня // Горный журнал. 1825. № 5. С. 37–55. [Электронный ресурс]. URL: <http://elib.uraic.ru/handle/123456789/6385?ysclid=llwe8f0aa193631142> (24.02.2023).
33. Погожев А.В. Общий обзор фабрично-заводской промышленности и экономических условий населения Верейского уезда // Сборник статистических сведений по Московской губернии. М.: Издание Московского губернского земства, 1882. Т. III. Вып. III. Отдел первый. С. 1–166. [Электронный ресурс]. URL: https://viewer.rusneb.ru/ru/000199_000009_003613516?page=173&rotate=0&theme=white (24.02.2023).
34. Беляев А.И. Металлургия легких металлов. М.: Металлургия, 1970. 367 с.
35. Раскин Н.М. Яков Дмитриевич Захаров – физик и химик конца XVIII и начала XIX в. Л.: Наука, 1979. 109 с.
36. Жуков Н. Алюминий и его металлургия. М.: Изд. К.П. Карабасникова, 1893. 311 с. [Электронный ресурс]. URL: https://viewer.rusneb.ru/ru/000199_000009_003664709?page=1&rotate=0&theme=white (24.02.2023).
37. Luo Mengjie, Ye Junxiang, Xue Jin, Liu Chenglin, Song Xingfu, Yu Jianguo. Phase equilibrium in the ternary system $K_2O-Al_2O_3-H_2O$ at 323.15, 333.15, 343.15, and 353.15 K // Journal of Chemical & Engineering Data. 2020. Vol. 65. Iss. 7. P. 3463–3471. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.0c00017>.
38. Siziakova E.V., Ivanov P.V., Boikov A.V. Application of calcium hydrocarboaluminate for the production of coarse-graded alumina // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2019. Vol. 54. Iss. 1. P. 200–203.
39. Antropova I.G., Alekseeva E.N., Budaeva A.D. Integrated processing method for synnyrite with production of alumina and potassium sulfate // Journal of Mining Science. 2019. Vol. 55. Iss. 6. P. 1007–1012. <https://doi.org/10.1134/S1062739119066393>.
40. Герасимов А.М., Лазарева В.В., Арсентьев В.А. Воздействие СВЧ-нагрева на свойства слоистых алюмосиликатов // Обогащение руд. 2019. № 6. С. 15–19.
41. Gao Yajing, Liang Kai, Gou Yi, Wei Shun'an, Weifeng Shen, Cheng Fangqin. Aluminum extraction technologies from high aluminum fly ash // Reviews in Chemical Engineering. 2020. <https://doi.org/10.1515/revce-2019-0032>.
42. Azof F.I., Yang Yongxiang, Panias D., Kolbeinsen L., Safarian J. Leaching characteristics and mechanism of the synthetic calcium-aluminate slags for alumina recovery // Hydrometallurgy. 2019. Vol. 185. P. 273–290. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2019.03.006>.

References

1. Belyaev A.I., Rapoport M.B., Khazanov E.I. *Aluminum*. Moscow-Leningrad: *Tsvetmetizdat*; 1932, 160 p. (In Russ.).
2. Edwards D., Frery F., Jeffries Z. *Aluminum industry. Aluminum and its production*. Moscow-Leningrad-Sverdlovsk: Gosudarstvennoe nauchno-tehnicheskoe izdatel'stvo po chernoj i cvetnoj metallurgii; 1933, 212 p. (In Russ.).
3. Belyaev A.I., Khazanov E.I. *Special course. Electrometallurgy of aluminum*. M.-L.: Glavnaya redakciya literatury po cvetnoj metallurgii, 1937. 290 p. (In Russ.).
4. Prokopiev I.V., Kalchenko V.S., Kaluzhsky N.A. Aluminum industry in Russia at the early 1990s. *Tsvetnye Metally*. 1991;9:4-7. (In Russ.).
5. Kaluzhskij N.A., Shchegolev V.I. Scientific and design basis for domestic light metal metallurgy formation and development. *Tsvetnye Metally*. 2003;7:13-23. (In Russ.).
6. Lankin V.P. Scientific and technical activity of JSC All-Russian Aluminum-Magnesium Institute on further development and technological re-equipment of the light metals industry at the transition stage to a market economy. *Tsvetnye Metally*. 2000;1:4-6. (In Russ.).
7. Sizakov V.M. Modern state and problems of development of aluminum industry of Russia. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2005;165:163-169. (In Russ.).
8. Gorlanov E.S., Brichkin V.N., Polyakov A.A. Electrolytic production of aluminium. Review. Part 1. Conventional areas of development. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2020;2:42-49. (In Russ.).
9. Trushko V.L., Utkov V.A., Bazhin V.Y. Relevance and possibilities for complete processing of alumina production red muds. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2017;227:547-553. (In Russ.).
10. Brichkin V.N., Vasiliev V.V., Bormotov I.S., Maksimova R.I. Production and recycling of limes in integrated mineral processing. *Gornyi Zhurnal*. 2021;11:88-94. (In Russ.).
11. Khalifa A.A., Bazhin V.Y., Ustinova Y.V., Shalabi M.E. Study of the kinetics of the process of producing pellets from red mud in a hydrogen flow. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*. 2022;254:261-270. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.18>.
12. Piirainen V.Yu., Mikhaylov A.V., Barinkova A.A. The concept of modern ecosystem for the Ural aluminium smelter. *Tsvetnye Metally*. 2022;7:39-45. (In Russ.).
13. Pyagay I.N., Kremcheev E.A., Pasechnik L.A., Yatsenko S.P. Carbonization processing of bauxite residue as an alternative rare metal recovery process. *Tsvetnye Metally*. 2020;10:56-63. (In Russ.).
14. Kozyrev B.A., Sizakov V.M. Red mud heap leaching using the formate method. *Obogashchenie Rud*. 2021;4:40-45. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/or.2021.04.07>.
15. Kozyrev B.A., Sizakov V.M., Arsentiev V.A. Principles of rational processing of red mud with the use of carboxylic acids. *Non-ferrous Metals*. 2022;2:30-34. <https://doi.org/10.17580/nfm.2022.02.05>.
16. Brichkin V.N., Fedorov A.T. Indicators and regularities of hydrolytic decomposition of metastable aluminate solutions in the

- Na₂O – K₂O – Al₂O₃ – H₂O system. *Non-ferrous Metals*. 2021;2:27-32.
17. Dubovikov O.A., Sundurov A.V. Leaching kinetics of thermally activated bauxite. *Obogashchenie Rud*. 2021;4:34-39. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/or.2021.04.06>.
18. Golubev V.O., Litvinova T.E. Dynamic modeling of the industrial cycle of gibbsite crystallization. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2021;247:88-101. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.10>.
19. Alekseev A.I., Kononchuk O.O., Goncharova M.V., Hippmann S., Bertau M. Recovery of CaCO₃ from the nepheline sludge of alumina production. *Chemie-Ingenieur-Technik*. 2019;4:1-9.
20. Vernadsky V.I., Kurbatov S.M. *Earth silicates, aluminosilicates and their analogues*. Leningrad–Moscow: Main editorial office of geological exploration and geodetic literature; 1937, 378 p. (In Russ.).
21. Belyaev A.I. *Essays on the history of light metal metallurgy*. Moscow: Gosudarstvennoe nauchno-tehnicheskoe izdatel'stvo po chernoj i cvetnoj metallurgii; 1950, 142 p. (In Russ.).
22. Engel M. Pott. Johann Heinrich. Neue Deutsche Biographie. Berlin: Duncker & Humblot; 2001, vol. 20, p. 660-661. Available from: <https://daten.digitale-sammlungen.de/0001/bsb00016338/images/index.html?id=00016338&groesser=&fip=qrsweayadasxdsydeayaenewqfsdr&no=&seite=675> [Accessed 28th February 2023].
23. Khodalevich G.N., Zharikov I.I. On the issue of obtaining anhydrous aluminum chloride from Siberian clays. *Izvestiya Sibirskogo Khimiko-Tekhnologicheskogo Instituta*. 1934;3(1):5-13. http://www.lib.tpu.ru/fulltext/v/Bulletin_TPU/1934/n3/a2_full.pdf [Accessed 28th February 2023].
24. Henri Sainte-Claire Deville. De l'aluminium: ses propriétés, sa fabrication et ses applications. Mallet-Bachelier; 1859, 176 p. Available from: <https://archive.org/details/delaluminiumses00sain/page/176/mode/2up>. [Accessed 28th February 2023].
25. Plateau J., Renaux T. L'aluminium et Paul Morin au Moulin noir Nanterre, 1857-1890 // Société d'Histoire de Nanterre. 2007. Iss. 39. 136 p. Available from: <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k9602016r/f1.image.r=nanterre.langFR> [Accessed 24th February 2023].
26. Richards J.W. Aluminium: Its History, Occurrence, Properties, Metallurgy and Applications, Including Its Alloys. Philadelphia: Henry Carey Baird & Co; 1890, 511 p. Available from: <https://archive.org/details/aluminiumitshist00richrich/page/n7/mode/2up> [Accessed 24th February 2023].
27. Luk'yanov P.M. History of chemical crafts and Russian chemical industry until the end of the 19th century. Moscow-Leningrad: Akademiya Nauk SSSR; 1949, vol. 2, 732 p. (In Russ.).
28. Smetanin S.I. History of entrepreneurship in Russia. Moscow: Paleotip; Logos; 2004, 196 p. (In Russ.).
29. Minaev V.I. Decomposition of polybasic aluminum sulfate salt solutions by cotton fiber (To the study of etching phenomena). *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 1925;46(1-3):83-97. Available from: http://www.lib.tpu.ru/fulltext/v/Bulletin_TPU/1925/v46/a18_full.pdf [Accessed 24th February 2023].
30. Kulev L.P., Gorizontova T.N. On the mechanism of varnish formation during alizarin dyeing. *Izvestiya Tomskogo Ordona Trudovogo Krasnogo Znameni politekhnicheskogo instituta im. S.M. Kirova*. 1956;83:113-120. Available from: http://www.lib.tpu.ru/fulltext/v/Bulletin_TPU/1956/v83/11.pdf [Accessed 24th February 2023].
31. Habashi F. Alumina production and the Textile industry. *International Journal of Textile Science & Engineering*. 2017;TSE-104:100004. <https://doi.org/10.29011/TSE-104/100004>.
32. Yakovlev A. Chemical study of Georgian alum stone. *Gornyj zhurnal*. 1825;5:37-55. Available from: <http://elib.uraic.ru/handle/123456789/6385?ysclid=llwe8f0aaf193631142> [Accessed 24th February 2023].
33. Pogozhev A.V. An overview of the manufacturing industry and economic conditions of the Vereisky district population. In: *Sbornik statisticheskikh svedenij po Moskovskoj gubernii = Collection of statistical information on the Moscow province*. Moscow: Izdanie Moskovskogo gubernskogo zemstva; 1882, vol. 3, iss. 3, p. 1-166. Available from: https://viewer.rusneb.ru/ru/000199_000009_003613516?page=173&rotate=0&theme=white [Accessed 24th February 2023].
34. Belyaev A.I. *Metallurgy of light metals*. Moscow: Metallurgiya; 1970, 367 p. (In Russ.).
35. Raskin N.M. *Yakov Dmitrievich Zakharov – a physicist and chemist of the late 18th–early 19th centuries*. Leningrad: Nauka; 1979, 109 p. (In Russ.).
36. Zhukov N. *Aluminum and its metallurgy*. Moscow: izdatel'stvo K.P. Karabasnikova; 1893, 311 p. Available from: https://viewer.rusneb.ru/ru/000199_000009_003664709?page=1&rotate=0&theme=white [Accessed 24th February 2023].
37. Luo Mengjie, Ye Junxiang, Xue Jin, Liu Chenglin, Song Xingfu, Yu Jianguo. Phase equilibrium in the ternary system K₂O-Al₂O₃-H₂O at 323.15, 333.15, 343.15, and 353.15 K. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2020;65(7):3463-3471. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.0c00017>.
38. Siziakova E.V., Ivanov P.V., Boikov A.V. Application of calcium hydrocarboaluminate for the production of coarse-graded alumina. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2019;54(1):200-203. (In Russ.).
39. Antropova I.G., Alekseeva E.N., Budaeva A.D. Integrated processing method for synnyrite with production of alumina and potassium sulfate. *Journal of Mining Science*. 2019;55(6):1007-1012. <https://doi.org/10.1134/S1062739119066393>.
40. Gerasimov A.M., Lazareva V.V., Arsentьев V.A. Effects of microwave heating on layered aluminosilicate behaviour. *Obogashchenie Rud*. 2019;6:15-19. (In Russ.).
41. Gao Yajing, Liang Kai, Gou Yi, Wei Shun'an, Weifeng Shen, Cheng Fangqin. Aluminum extraction technologies from high aluminum fly ash. *Reviews in Chemical Engineering*. 2020. <https://doi.org/10.1515/revce-2019-0032>.
42. Azof F.I., Yang Yongxiang, Panias D., Kolbeinsen L., Safarian J. Leaching characteristics and mechanism of the synthetic calcium-aluminate slags for alumina recovery. *Hydrometallurgy*. 2019;185:273-290. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2019.03.006>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

Бричкин Вячеслав Николаевич,
д.т.н., профессор,
проректор по подготовке научных кадров,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, о-в Васильевский,
21 линия, 2, Россия
Brichkin_VN@pers.spmi.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1708-5624>

Васильев Владимир Викторович,
к.т.н., доцент,
декан факультета аспирантуры и докторантуре,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, о-в Васильевский,
21 линия, 2, Россия
Vasilev_VV@pers.spmi.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7767-0713>

Максимова Регина Игоревна,
аспирант,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, о-в Васильевский,
21 линия, 2, Россия
Maksimova_RI@pers.spmi.ru

Vyacheslav N. Brichkin,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Vice-Rector for Scientific Personnel Training
St. Petersburg Mining University,
2, 21 line, St. Petersburg 199106, Russia
Brichkin_VN@pers.spmi.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1708-5624>

Vladimir V. Vasiliev,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Dean of the Faculty of Postgraduate and Doctoral Studies,
St. Petersburg Mining University,
2, 21 line, St. Petersburg 199106, Russia
Vasilev_VV@pers.spmi.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7767-0713>

Regina I. Maksimova,
Postgraduate Student,
St. Petersburg Mining University,
2, 21 line, St. Petersburg 199106, Russia
Maksimova_RI@pers.spmi.ru

Вклад авторов
Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no 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 09.06.2023 г.; одобрена после рецензирования 21.07.2023 г.; принята к публикации 01.08.2023 г.

Information about the article

The article was submitted 09.06.2023; approved after reviewing 21.07.2023; accepted for publication 01.08.2023.

МЕТАЛЛУРГИЯ



Научная статья
УДК 621.923:621.922
EDN: DCKLDB
DOI: 10.21285/1814-3520-2023-3-598-610

Исследование процесса получения жидкого стекла из кремнегеля для использования в металлургии

И.Н. Пягай¹✉, В.М. Сизяков², Я.А. Свахина³, М.Е. Титова⁴, В.В. Мирошниченко⁵

¹⁻⁵Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

Резюме. Цель исследования – изучение возможности получения раствора силиката натрия (жидкого стекла) с использованием техногенного сырья для последующего применения в металлургической практике. Объектом исследования являлся промышленный отход производства фторида алюминия – кремнегель, представляющий собой тонкодисперсный порошок диоксида кремния с содержанием влаги более 55% масс. Кремнегель был подготовлен путем проведения его очистки с использованием низконконцентрированного раствора серной кислоты. Процесс получения жидкого стекла проводился с использованием системы реакторов HEL Auto-Mate Reactor System. Определение содержания кремния в растворе осуществлялось на анализаторе Shimadzu EDX-7000P рентгенофлуоресцентным методом. Для определения щелочи в полученном продукте был использован титриметрический метод анализа. Проведение предварительного процесса очистки позволило получить кремнегель с содержанием аморфного диоксида кремния более 98% масс. По результатам исследования были установлены оптимальные параметры процесса получения жидкого стекла: температура – 100°C, время процесса – 4,5 ч, скорость перемешивания – 300 об/мин и концентрация исходного щелочного раствора – от 10 до 17,5% масс. Полученный раствор жидкого стекла имел массовое содержание диоксида кремния от 16,65 до 23,77% масс. и силикатный модуль от 2,72 до 3,16, что удовлетворяет требованиям товарной продукции, реализуемой в различных отраслях промышленности. На основе проведенных экспериментов предложены оптимальные параметры процесса получения жидкого стекла из техногенного сырья – кремнегеля. Жидкое стекло с полученными характеристиками в дальнейшем может быть использовано в качестве связующего материала в металлургических процессах.

Ключевые слова: жидкое стекло, силикат натрия, кремнегель, фторид алюминия, отходы, кремниевый модуль

Для цитирования: Пягай И.Н., Сизяков В.М., Свахина Я.А., Титова М.Е., Мирошниченко В.В. Исследование процесса получения жидкого стекла из кремнегеля для использования в металлургии // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 3. С. 598–610. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-598-610>. EDN: DCKLDB.

METALLURGY

Original article

Study of the process of obtaining water glass from silica gel for use in metallurgy

Igor N. Pyagay¹✉, Victor M. Sizakov², Yana A. Svakhina³, Marina E. Titova⁴,
Vladimir V. Miroshnichenko⁵

¹⁻⁵Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

Abstract. This study explores the possibility of producing a sodium silicate solution (liquid glass) using industrial raw materials for subsequent use in metallurgical practice. The object of the study was industrial waste from the production of aluminium fluoride, i.e., silica gel, which comprises a fine powder of silicon dioxide with a moisture content of over 55 wt %. Silica gel was purified using a low-concentration solution of sulfuric acid. The synthesis of liquid glass was carried out using the HEL Auto-Mate Reactor System. The silicon content in the solution was determined by X-ray fluorescence method using the Shimadzu EDX-7000P analyzer. To determine the alkali content in the resulting product, a titrimetric analysis method was used. The preliminary purification process allowed silica gel with an amorphous silica content of over 98 wt % to be obtained. The optimal parameters of the liquid glass production were defined: temperature – 100°C, process time – 4.5 hours,

© Пягай И.Н., Сизяков В.М., Свахина Я.А., Титова М.Е., Мирошниченко В.В., 2023

mixing speed – 300 rpm, and the concentration of the initial alkaline solution – from 10 to 17.5 wt %. The resulting liquid glass solution had a mass content of silicon dioxide from 16.65 to 23.77 wt % and a silicate module from 2.72 to 3.16, which meets the requirements of marketable products for various industries. Based on the experimental results, optimal parameters for the production of liquid glass using industrial raw materials, i.e., silica gel, are proposed. Liquid glass with the defined characteristics can be further used as a binder in metallurgical processes.

Keywords: water glass, sodium silicate, silica gel, aluminum fluoride, waste, silica modulus

For citation: Pyagay I.N., Sizyakov V.M., Svakhina Y.A., Titova M.E., Miroshnichenko V.V. Study of the process of obtaining water glass from silica gel for use in metallurgy. *iPolytech Journal*. 2023;27(3):598-610. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-598-610>. EDN: DCKLDB.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день мировой рынок силиката натрия разделен на четыре региона – Северную Америку, Европу, Азиатско-Тихоокеанский регион и Латинскую Америку. Наибольшая доля рынка принадлежит Азиатско-Тихоокеанскому региону, а именно – Китаю⁶. Китай является крупнейшим экспортером. В 2018 г. Китай экспорттировал силикат натрия как в жидким, так и в твердом виде в количестве 304 тыс. т. В тот же год Польша экспорттировала порядка 182 тыс. т силиката натрия, Германия – 93 тыс. т, Европейский Союз – 82 тыс. т и 65 тыс. т – Египет. Российская Федерация же в 2018 г. закупила у ряда стран около 30 тыс. т силиката натрия на общую сумму 7 млн долл⁷.

Товарный силикат натрия доступен как в твердой, так и в жидкой форме. Благодаря своим свойствам, а именно – показателям высокой термостойкости, водостойкости и стабильности в щелочных растворах, силикат натрия нашел применение в различных отраслях промышленности, таких как металлургическая, текстильная, бумажная, строительная, химическая, автомобильная и фармацевтическая [1–3].

Низкая стоимость и нетоксичность жидкого стекла (ЖС) обуславливает его применение в металлургии в качестве ингибитора коррозии углеродистой стали [4]. Жидкое стекло образует на поверхности металла силикатную пленку, состоящую из связей Si-O-Si, в результате чего коррозионное воздействие на металл замедляется [5]. Другим способом применения жидкого стекла в металлургии является его использование в качестве связующего материала для грануляции отходов производства кремния, содержащих более 85% масс. кремнезема. Авторами работ [6–8] была предложена методика окомкования шихты,

в состав которой входит пыль и шлам газоочистки, с использованием жидкого стекла в качестве связующего материала. Процесс производства кремния в руднотермических печах карбогидратным восстановлением кварцитов сопровождается образованием большого количества кремнийодержащей пыли и шлама, которые могут быть повторноозвращены в технологический цикл. Поскольку кремнезем в данных отходах представлен сферическими частицами со средним диаметром 100 нм, то его использование в качестве сырья требует предварительной грануляции (окомкования), чтобы избежать уноса материала при повторной термообработке.

Большой спрос на силикат натрия имеет строительная промышленность, где силикат натрия в твердой форме используют в качестве источника щелочи для получения геополимеров или щелочных активированных вяжущих из угольной летучей золы [9, 10]. Геополимеры на основе жидкого стекла разрабатываются как экологически чистые бетонные смеси, способные заменить портландцемент, сократить выбросы углекислого газа в атмосферу и продлить срок эксплуатации данных материалов в агрессивных средах [11–13].

Жидкий силикат натрия широко используется в химической промышленности как исходное сырье для получения аморфного диоксида кремния и молекулярных сит (цеолитов). Наночастицы диоксида кремния, полученные из силиката натрия по золь-гель технологии, могут применяться в фармацевтической промышленности и биотехнологии [14–16]. Для получения цеолитов жидкое стекло используется как источник кремния при получении исходного алюмосиликатного геля [17]. Цеолиты типа А, полученные на основе жидкого стекла, широко применяют в производстве синтетических моющих

⁶Sodium Silicate Market // Mordor Intelligence [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/sodium-silicate-market> (17.01.2023).

⁷World Integrated Trade Solution [Электронный ресурс]. URL: <https://wits.worldbank.org/trade/comtrade/en/country/RUS/year/2018/tradeflow/Imports/partner/ALL/product/283919> (17.01.2023).



Рис. 1. Прогноз мирового рынка силиката натрия с 2023 до 2033 г
Fg. 1. Global market forecast for sodium silicate from 2023 to 2033

средств за счет своей высокой ионообменной способности [18, 19]. Согласно анализу рынка, ожидается, что к концу 2023 г. применение силиката натрия в производстве моющих средств, где используется преимущественно жидкий раствор (жидкое стекло), будет доминировать с долей мирового рынка почти 24,3% (рис. 1)⁸.

На территории Российской Федерации растворимый силикат натрия (силикат-глыбу),

из которого в дальнейшем получают жидкое стекло, производят менее десяти предприятий. Наиболее востребованным на рынке является растворимый силикат натрия, выпускаемый в соответствии ГОСТ Р 50418-92⁹ с содержанием диоксида кремния от 70,7 до 76,7% масс. и силикатным модулем от 2,6 до 3,6 в зависимости от направления использования [20]. Основной отечественный рынок производителей представлен тремя предпри-

Таблица 1. Производители жидкого стекла в России
Table 1. Water glass producers in Russia

Производитель	Объем производства, тыс. т/год	Характеристики товарного жидкого стекла			
		ρ , г/см ³	Содержание соединений в пересчете на оксиды, % масс.		μ_{Si}
			Na ₂ O	SiO ₂	
АО «Кубаньжелдормаш» (г. Армавир, Краснодарский край)	3,6	1,36–1,47	8,7–12,2	24,3–31,9	2,6–3,0
ЗАО «Торговый дом «Стеклопродукт» (г. Рязань, Рязанская область)	–	H: 1,48–1,52 C: 1,46–1,48 B: 1,41–1,43	H: 11,5–13,5 C: 11,1–12,3 B: 9,5–11,0	H: 29,0–31,0 C: 29,0–33,0 B: 29,5–32,0	H: 2,4–2,6 C: 2,8–3,0 B: 3,1–3,3
ООО НПО «Силикат» (г. Бокситогорск, Ленинградская область)	13,2	1,30–1,60	–	–	2,0–3,5
НПП «Алектич» (г. Батайск, Ростовская область)	4,2	1,40–1,48	–	–	2,7–3,5
ООО «УМК» (г. Усолье-Сибирское, Иркутская область)	–	1,30–1,50	7,9–13,8	22,7–36,7	2,3–3,6
ПК «Промстеклоцентр» (г. Екатеринбург, Свердловская область)	–	1,10–1,60	–	–	1,4–3,5
АО «Салаватстекло» (г. Салават, Респ. Башкортостан)	–	1,36–1,50	–	–	1,5–3,6
ООО ПО «СиблКЗ» (г. Новосибирск, Новосибирская область)	–	1,30–1,45	8,7–12,2	24,3–31,9	2,6–3,0

Примечания: Н – низкомодульное ЖС; С – стандартное ЖС; В – высокомодульное ЖС; ρ – плотность полученного ЖС при 20°C; μ_{Si} – кремниевый модуль.

⁸Market Research Survey. Rockville, 2022. 170 р.

⁹ГОСТ Р 50418-92. Силикат натрия растворимый. Технические условия. Введ. 01.01.1994.

ятиями: ОАО «Салаватстекло», ООО «Стекло», ЗАО «Скопинский строительный комбинат». Данные по производителям непосредственно жидкого стекла представлены табл. 1.

Существующие технологии производства силикат-глыбы имеют ряд недостатков, в число которых входит энергоемкость, длительность и многостадийность процесса [21]. При получении 100 кг продукта необходимо использовать порядка 76 кг песка и 44 кг соды, а также провести процесс нагрева шихты до температуры 1300–1400°C. Полученную силикат-глыбу использует ряд предприятий для производства небольших партий жидкого

стекла для удовлетворения собственных нужд путем растворения силикат-глыбы во вращающихся или стационарных автоклавах. Единичная мощность цехов в данном случае не превышает порядка 15–20 тыс. т/год. По причине сложности данного процесса на сегодняшний день активно идет работа по созданию экономически более эффективной технологии с применением нетрадиционных источников кремнийсодержащего сырья [22]. Получение жидкого стекла из вторичных ресурсов, таких как отходы ферросилициевой промышленности, опоки, золы рисовой шелухи, ограничено содержанием сторонних

Таблица 2. Получение жидкого стекла из вторичного сырья
 Table 2. Water glass production from recycled resources

Источник	Исходное сырье	Содержание компонентов в исходном сырье, % масс.	Параметры процесса получения жидкого стекла		Характеристики полученного жидкого стекла			
			время, ч	температура, °C	ρ , г/см³	содержание соединений в пересчете на оксиды, % масс.		μ_{Si}
						SiO_2	Na_2O	
[23]	Отход производства ферросилиция - микрокремнезем	β -SiC + графит: 6-14 SiO_2 (аморфный): 86-94	–	63–65	1,27–1,40	–	–	1,00–4,00
[24]	Фракционированный кварцевый песок	SiO_2 : 95-98 H_2O : 0,1-1,5 ReO : 1,7-2,83	3–8	200–250	–	–	–	2,00–3,60
[25]	Порошок кизельгуря	SiO_2 : 87-92 Остатки органических соединений: более 10	0,25–0,5	90–95	1,39–1,41	28,10–28,90	9,54–9,68	2,90–3,00
[26]	Продукт разложения серпентинита соляной кислотой	SiO_2 (аморфный): 84,4 MgO : 7,34 CaO : 2,86 $Fe_2O_3 + Al_2O_3$: 2,08	0,25–1,0	90–95	1,40–1,42	28,03–29,67	9,71–9,95	2,90–3,00
[27]	Зола рисовой шелухи	SiO_2 : 90-94 MgO : 0,8-1,0 CaO : 0,5-1,1 Fe_2O_3 : 0,2-0,5 Al_2O_3 : 0,5-1,5 C: 3-4	1–2	80–120	–	28–33	13,00–16,00	1,90–2,30
[28]	Опока	SiO_2 : 84 Al_2O_3 : 5,62 $Fe_2O_3 + FeO$: 2,91 CaO : 0,97	1–3	90–95	1,18–1,44	11,07–35,56	3,23–11,74	2,62–3,94
[29]	Кремнесодержащая ферропыль	SiO_2 : 93,31 K_2O : 1,5 Al_2O_3 : 1,20 FeO : 1,12 $MgO + CaO$: 1,41 $SO_3 + N_2O$: 1,35	1	105	1,42–1,45	–	–	3,00
[30]	Продукт разложения нефелинового концентрата азотной кислотой	SiO_2 : 77	0,25–1	40–80	1,35–1,39	24,3–29,3	8,20–10,30	2,90–3,43

примесей, а также недостатком теоретических данных исследуемых процессов. Данные по получению жидкого стекла из вторичных ресурсов, известных на сегодняшний день, представлены в табл. 2.

Из всех известных нетрадиционных источников сырья для получения жидкого стекла наибольший интерес представляет кремнегель, поскольку содержит в пересчете на сухое вещество до 70% масс. аморфного диоксида кремния. При этом чистый аморфный диоксид кремния представляет большую ценность для различных отраслей промышленности [31, 32].

Кремнегель является остатком производства двух технологических процессов: производства фторида алюминия и производства минерального удобрения – суперфосфата [33, 34]. Так, например, при производстве фторида алюминия на 1 т товарной продукции образуется от 0,85 до 2,85 т гидратированного кремнегеля с содержанием влаги более 40% масс. [35]. В то время как доля кремнегеля, поступающего в отвалы с предприятий по производству фосфорных удобрений, небольшая и составляет 1,6–1,8 кг на 1 т суперфосфата¹⁰. Промышленный кремнегель практически не используется в производстве, и в отвалы с российских предприятий ежемесячно

направляется более 45 тыс. т отходов [36]. При этом аналогичные производства действуют на территориях других стран, например, Беларуси и стран Прибалтики.

Как и всевозможные отходы предприятия, кремнегель содержит большое количество исходных примесей. Содержание соединений фтора и алюминия в составе кремнегеля достигает порядка 30% масс. в пересчете на сухое вещество [37]. Примеси фтора в нем представлены преимущественно в виде фторид- и кремнефторид-ионов, где на долю кремнефторид-ионов (SiF_6^{2-}) приходится около 20% масс. от общего содержания фторсодержащих соединений.

Как известно, получение силиката натрия путем растворения кремнесодержащих соединений в растворе щелочи ингибируется в присутствии кремнефторидионов, и при концентрации данных примесей в количестве более 3% масс. процесс растворения прекращается [38]. Примеси алюминия в свою очередь не оказывают влияния на процесс получения жидкого стекла, поскольку они способны растворяться в щелочных растворах с образованием комплексных соединений, но их содержание в пересчете на Al_2O_3 в готовом ЖС, согласно ГОСТ 13078-2021¹¹, не должно превышать значений более 0,2–0,9% масс. Исходя из этого, разработка оптимального способа приготовления жидкого стекла из кремнегеля требует стадии очистки

Таблица 3. Получение жидкого стекла из кремнегеля
Table 3. Water glass production from silica gel

Источник	Подготовительная стадия обработки исходного кремнегеля	Реагент для получения жидкого стекла	Параметры процесса получения жидкого стекла		Характеристики полученного жидкого стекла			
			T, °C	время, мин	ρ, г/см ³	содержание соединений в пересчете на оксиды, % масс	μ _{Si}	
						SiO ₂	Na ₂ O	
[39]	Обработка раствором гидроксида натрия концентрацией 22–28% масс.	вода	90–95	20	1,39–1,45	34,36–35,85	11,94–13,12	2,61–3,00
[40]	Обработка кальцийсодержащим соединением	раствор NaOH (30–40% масс.)	температура кипения	20	1,22–1,39	20,70–26,75	6,90–9,50	2,80–3,10
[41]	Без стадии предварительной обработки	раствор NaOH (120 г/см ³)	75–90	330–450	1,15–1,19	–	–	2,64–4,30
[42]	Ультразвуковая обработка	сухой NaOH	92	15–18	1,38	24,60	10,20	2,50
[43]	Без стадии предварительной обработки	раствор NaOH концентрацией 40% масс.	92–98	35–60	–	25,74	13,20	2,00–3,50

¹⁰Голубин А.К., Никонорова С.П., Саханова Г.В. Туркевич С.Г., Шканов С.И., Варламов А.Р. и др. Сборник удельных показателей образования отходов производства и потребления // Экологический консалтинг. 2008. № 4 (32). С. 12–59

¹¹ГОСТ 13078-2021. Стекло натриевое жидкое. Технические условия. Введ. 05.01.2021.

исходного сырья от примесей.

В современной литературе ранее уже были описаны различные способы получения жидкого стекла путем растворения кремнегеля в растворе гидроксида натрия (табл. 3).

Большая часть способов включает стадию предварительной очистки кремнегеля для удаления нежелательных примесей соединений фтора и алюминия, а также стадию механической или химической активации с целью аморфизации исходного сырья. Однако большинство предложенных методов не дало положительных результатов при повторе эксперимента с исследуемым кремнегелем, в связи с чем была проведена работа по поиску оптимальных параметров получения жидкого стекла из исследуемого сырья. В качестве подготовки кремнегеля был выбран метод очистки, ранее предложенный сотрудниками Санкт-Петербургского горного университета [44]. В работе было показано, что кислотная очистка промышленного кремнегеля растворами серной или соляной кислот позволяет получить продукт с высоким содержанием аморфного диоксида кремния. Положительные результаты были получены при использовании раствора серной кислоты концентрацией 1% масс., что позволило получить продукт с содержанием аморфного диоксида кремния порядка 99,8% масс., с практически полным удалением наиболее нежелательных соединений фтора. Очищенный таким способом кремнегель может использоваться в приготовлении ЖС.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования с предприятия АО «Апатит» (Вологодская область), расположенном в г. Череповец, был отобран промышленный отход производства фторида алюминия – кремнегель. Кремнегель представлял собой тонкодисперсный порошок диоксида кремния с содержанием влаги около 55% масс.

Очистка кремнегеля от примесных соединений проводилась путем обработки кремнегеля раствором серной кислоты концентрацией 1% масс., при температуре 95°C в течение 1 ч при постоянном перемешивании. В результате процесса очистки примеси фтора удалялись с газообразными продуктами в виде паров кремнефтористой кислоты и фтороводорода, а примеси алюминия переходили в раствор в виде сульфата алюминия. Очищенный кремнегель промывали дистил-

лированной водой до нейтрального значения pH промывных вод и сушили при температуре 105°C в течение 3 ч.

Получение раствора силиката натрия проводили путем растворения очищенного кремнегеля в растворе гидроксида натрия в изотермических условиях при постоянной скорости перемешивания на установке HEL Auto-Mate Reactor System. Кремнегель равными порциями вносили в предварительно нагретый раствор гидроксида натрия и перемешивали до полного растворения в течение 4,5 ч. По окончании процесса полученный раствор фильтровали под вакуумом и анализировали. [45].

Анализ содержания соединений кремния в пересчете на диоксид кремния в полученных растворах проводили на приборе Shimadzu EDX 7000P рентгенофлуоресцентным методом при помощи калибровочных кривых, для построения которых был использован государственный стандартный образец ионов кремния (ГСО 8212-2002¹²). Для определения содержания щелочи в полученных растворах был использован титrimетрический метод анализа, где в качестве индикатора был применен 1%-й раствор фенолфталеина.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Химический состав подготовленного кремнегеля представлен в табл. 4.

В ходе исследования процесса получения жидкого стекла растворением очищенного кремнегеля в модельном щелочном растворе была выполнена серия опытов для установления оптимального времени процесса, при котором в полученном растворе силиката натрия наблюдалось бы максимальное значение содержания соединений кремния (в пересчете на SiO₂) (рис. 2). В соответствии с полученными результатами, при увеличении времени процесса до 4,5 ч содержание соединений кремния достигало 18,65% масс. Увеличение продолжительности процесса более 5 ч являлось неэффективным, поскольку концентрация растворенного диоксида кремния возрастала незначительно.

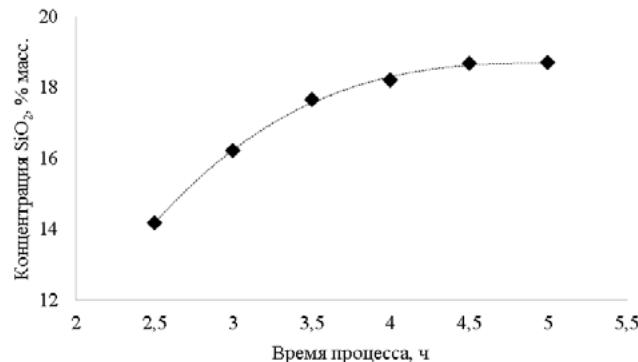
Исходя из ранее полученных данных в опубликованных специализированных источниках, известно, что температура растворения кремнегеля в щелочном растворе варьируется от

¹²ГСО 8212-2002. Описание типа стандартного образца. Стандартный образец состава раствора кремния (Приложение к свидетельству № 5408). М.: Эколого-аналитическая ассоциация «Эко-аналитика», 2018.

Таблица 4. Химический состав высушенного кремнегеля

Table 4. Chemical composition of dehydrated silica gel

Компонент	SiO ₂	F	Al ₂ O ₃	SO ₃	Cl	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	H ₂ O
После сушки при температуре 105°C в течение 3 ч									
Содержание, % масс.	76,306	11,927	8,618	0,079	0,022	0,031	0,009	0,008	3,000
После процесса очистки 1%-м раствором серной кислоты									
Содержание, % масс.	99,780	0,030	0,120	—	—	0,040	0,030	—	—

Рис. 2. Зависимость содержания соединений кремния (в пересчете на SiO₂) в полученном растворе жидкого стекла от времени процессаFg. 2. Dependence of silicon compound content (in terms of SiO₂) in the obtained water glass solution on process time

75 до 100°C. В настоящей работе была проведена серия экспериментов с рассмотрением трех основных точек (рис. 3 и 4) получения жидкого стекла путем растворения подготовленного очищенного кремнегеля в чистых модельных щелочных растворах с содержанием гидроксида натрия 12,5 и 15% масс.

Результаты экспериментов показали, что повышение температуры процесса до 100°C ведет к получению раствора ЖС с содержанием соединений кремния (в пересчете на SiO₂) около 22,5% масс. Кремниевый модуль в данном случае достигает значения 2,75, что является удовлетворительным при рассмотрении дальнейшего использования получаемого раствора.

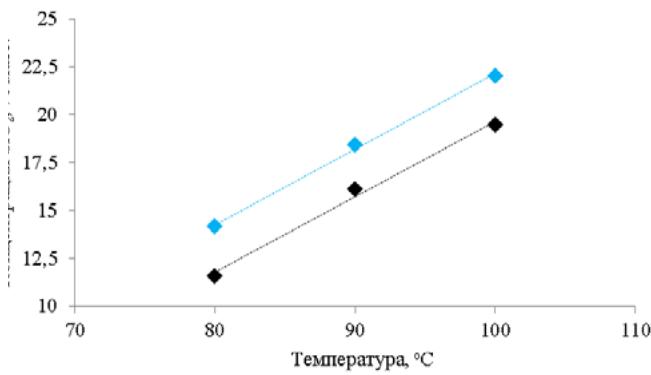
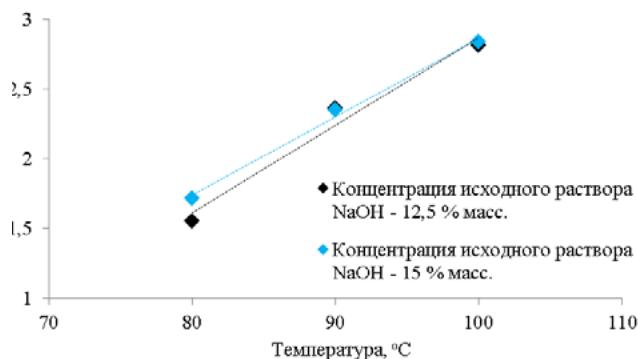
Рис. 3. Зависимость содержания соединений кремния (в пересчете на SiO₂) в полученном растворе жидкого стекла от температуры процессаFg. 3. Dependence silicon compound content (in terms of SiO₂) in the obtained water glass solution on process temperature

Рис. 4. Зависимость кремниевого модуля жидкого стекла от температуры процесса

Fg. 4. Dependence silicon modulus of water glass on process temperature

Эксперименты по влиянию скорости перемешивания реакционной смеси на содержание соединений кремния в жидкоком стекле и его кремниевый модуль (рис. 5) показали, что скорость перемешивания незначительно влияет на процесс, и при изменении значения в диапазоне от 300 до 700 об/мин кремниевый модуль получаемого раствора практически не изменяется. Таким образом, опираясь на полученные данные о растворимости и величине кремниевого модуля, для дальнейшего исследования была выбраны: время процесса получения жидкого стекла — 4,5 ч, температура — 100°C и скорость перемешивания — 300 об/мин.

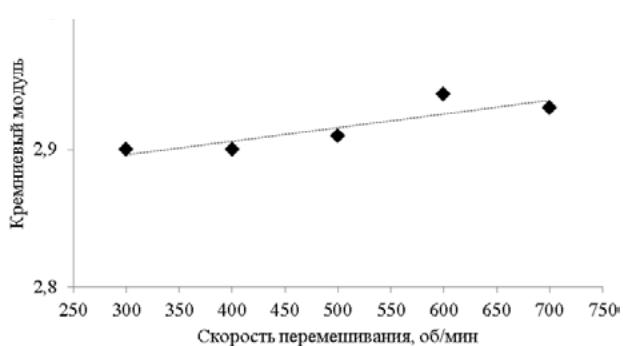


Рис. 5. Зависимость кремниевого модуля получаемого раствора жидкого стекла от скорости перемешивания (температура процесса — 100°C, время процесса — 4,5 ч)

Fg. 5. Dependence of silicon modulus of the obtained water glass solution on the mixing speed (process temperature - 100°C, process time - 4.5 h)

Дальнейшая часть исследований была посвящена изучению влияния исходной концентрации модельного щелочного раствора на характеристики получаемого жидкого стекла. В ходе экспериментов было получено ЖС при ранее определенных параметрах процесса и концентрации щелочи в исходной реакционной смеси от 5 до 20% масс. (рис. 6 и 7).

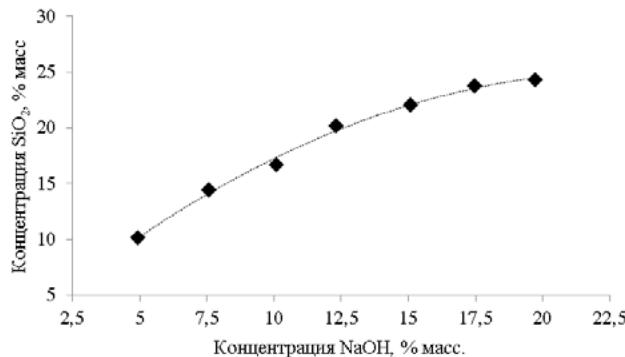


Рис. 6. Зависимость содержания соединений кремния (в пересчете на SiO₂) в полученном жидким стекле от исходной концентрации используемой щелочи
 Fg. 6. Dependence silicon compound content (in terms of SiO₂) in the obtained water glass from the initial concentration of the used alkali

Исследование зависимости характеристик жидкого стекла от концентрации модельного щелочного раствора показало, что увеличение содержания гидроксида натрия в реакционной среде до 20% масс. позволяет получить жидкое стекло с содержанием соединений кремния в пересчете на SiO₂ более 24% масс. Однако одновременно с этим величина кремниевого модуля по мере возрастания концентрации щелочи в модельном растворе снижается до значения 2,41, что делает полученное жидкое стекло непригодным к использованию в промышленных целях. Наиболее оптимальные результаты наблюдались при концентра-

ции гидроксида натрия в исходном растворе от 10 до 17,5% масс., что соответствовало содержанию соединений кремния (в пересчете на SiO₂)

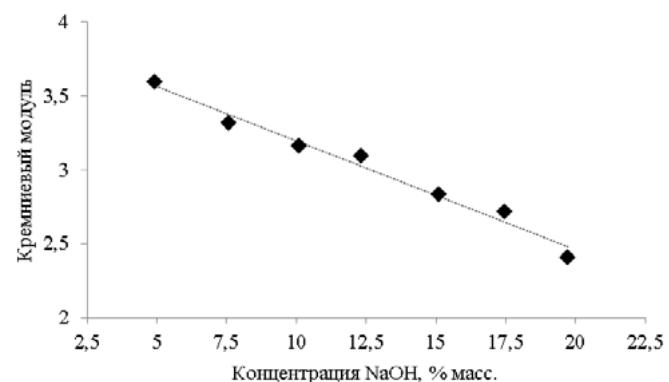


Рис. 7. Зависимость кремниевого модуля полученного жидкого стекла от исходной концентрации используемой щелочи
 Fg. 7. Dependence silicon modulus of the obtained water glass from the initial concentration of the used alkali

от 16,65 до 23,77% масс. при величине кремниевого модуля от 3,16 до 2,72. По мере увеличения содержания растворенных веществ плотность полученного жидкого стекла пропорционально возрастала от 1,12 до 1,37 г/см³ (табл. 5).

Увеличение концентрации гидроксида натрия в модельном растворе, соответственно, ведет к возрастанию щелочи в получаемом растворе жидкого стекла, что объясняется образованием силиката натрия в процессе растворения кремнегеля. Концентрация свободной щелочи у исходного модельного раствора, безусловно, выше, чем у полученного раствора жидкого стекла (рис. 8). Это явление связано с образованием щелочных комплексных силикатов, находящихся в устойчивой форме в нейтральной области pH.

Таблица 5. Характеристики полученного жидкого стекла в зависимости от исходной концентрации щелочного раствора (температура процесса – 100°C, время растворения – 4,5 ч, скорость перемешивания – 300 об/мин)
 Table 5. Characteristics of the obtained water glass depending on the initial concentration of alkaline solution (process temperature - 100°C, dissolution time - 4.5 hours, stirring speed - 300 rpm)

№ опыта	Концентрация исходного щелочного раствора, % масс.	Отношение компонентов SiO ₂ /Na ₂ O в исходной реакционной среде (моль/моль)	Характеристики полученного раствора силиката натрия (жидкого стекла)		
			содержание соединений в пересчете на оксиды, % масс.		ρ, г/см ³
			SiO ₂	Na ₂ O	
1	5,0	1,89	10,2	2,9	1,12
2	7,5	1,93	14,4	4,5	1,19
3	10,0	1,85	16,7	5,5	1,24
4	12,5	1,73	20,1	6,7	1,26
5	15,0	1,59	22,0	8,0	1,31
6	17,5	1,52	23,8	9,1	1,34
7	20,0	1,38	24,3	10,4	1,37

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данной работы были исследованы основные параметры процесса получения натриевого жидкого стекла из отходов производства фтористого алюминия, предварительно очищенного от примесей соединений фтора и алюминия раствором серной кислоты (концентрацией 1% масс.) в течение 1 ч при температуре 95°C. В ходе исследования очищенный кремнегель подвергался растворению в чистом модельном растворе гидроксида натрия до образования раствора силиката натрия с кремниевым модулем от 2,72 до 3,16 при содержании соединений кремния в полученном растворе в пересчете на SiO_2 от 16,65 до 23,77% масс.

По итогам проделанной работы были определены оптимальные параметры процесса получения жидкого стекла: температура – 100°C, время процесса – 4,5 ч, скорость перемешивания – 300 об/мин: концентрация исходного щелочного раствора составила от 10 до 17,5% масс. Полученное жидкое стекло с данным кремниевым модулем наиболее приближено по характеристикам к товарному продукту и может быть использовано в различных металлургических процессах.

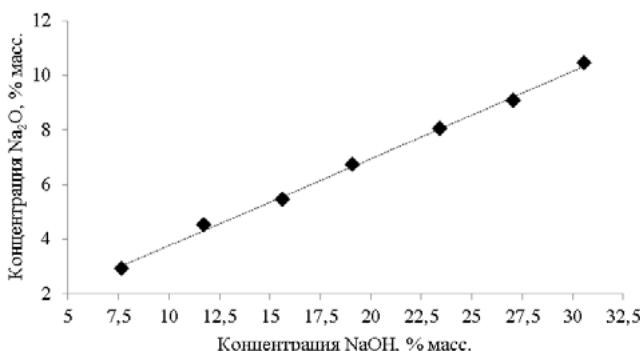


Рис. 8. Зависимость содержания щелочи (в пересчете на Na_2O) полученного жидкого стекла от исходного модельного щелочного раствора

Fg. 8. Dependence of alkali content (in terms of Na_2O) of the obtained water glass on the initial model alkaline solution

В соответствии с полученными результатами, приведенными в табл. 5, для получения из очищенного кремнегеля раствора силиката натрия с близкими к промышленному жидкому стеклу параметрами (кремниевый модуль от 2,7 до 3,2), предварительные параметры концентрации щелочи находятся в диапазоне от 10,0 до 17,5% масс.

Список источников

1. Luling C., Rucker-Gramm P., Weilandt A., Beuscher J., Nagel D., Schneider J., et al. Advanced 3D textile applications for the building envelope // Applied Composite Materials. 2022. Vol. 29. Iss. 1. P. 343–356. <https://doi.org/10.1007/s10443-021-09941-8>.
2. Bakatovich A., Gaspar F. Composite material for thermal insulation based on moss raw material // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 228. P. 116699. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116699>.
3. Słonina M., Dziurka D., Smardzewski J. Experimental research and numerical analysis of the elastic properties of paper cell cores before and after impregnation // Materials. 2020. Vol. 13. Iss. 9. P. 2058. <https://doi.org/10.3390/ma13092058>.
4. Zhang Bingru, He Chengjun, Chen Xi, Tian Zhipeng, Li Fengting. The synergistic effect of polyamidoamine dendrimers and sodium silicate on the corrosion of carbon steel in soft water // Corrosion Science. 2015. Vol. 90. P. 585–596. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.10.054>.
5. Yang Jie, Li Zhongheng, Shi Jinfa, Yan Zhenwei. Study on the corrosion inhibition performance of sodium silicate and polyaspartic acid for 35CrMo steel // International Journal of Electrochemical Science. 2023. Vol. 18. Iss. 4. P. 100042. <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2023.100042>.
6. Немчинова Н.В., Минеев Г.Г., Тютрин А.А., Яковлева А.А. Разработка технологии руднотермической плавки окискованной шихты из техногенного сырья для производства кремния // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 12. С. 948–954. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-12-948-954>.
7. Немчинова Н.В., Леонова М.С., Тютрин А.А. Экспериментальные работы по плавке окомкованной шихты в производстве кремния // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 1. С. 209–217. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-1-209-217>.
8. Nemchinova N.V., Leonova M.S., Tyutrin A.A., Bel'skii S.S. Optimizing the charge pelletizing parameters for silicon smelting based on technogenic materials // Metallurgist. 2019. Vol. 63. Iss. 1-2. P. 115–122. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00800-3>.
9. Rasuli M.I., Tajunnisa Yu., Yamamura A., Shigeishi M. A consideration on the one-part mixing method of alkali-activated material: problems of sodium silicate solubility and quick setting // Heliyon. 2022. Vol. 8. Iss. 1. P. e08783. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e08783>.
10. Дубовиков О.А., Белоглазов И.И., Алексеев А.А. Особенности применения пылеугольного топлива в комбинированных процессах химического обогащения // Обогащение руд. 2023. Вып. 6. С. 32–38. <https://doi.org/10.17580/or.2022.06.06>.
11. Tong K.T., Vinai R., Soutsos M.N. Use of Vietnamese rice husk ash for the production of sodium silicate as the activator for alkali-activated binders // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 201. P. 272–286. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.025>.
12. Villaquirán-Caicedo M.A. Studying different silica sources for preparation of alternative waterglass used in preparation of binary geopolymers binders from metakaolin/boiler slag // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 227. P. 116621. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.08.002>.

13. Criado M., Vicent M., García-Ten F.J. Reactivation of alkali-activated materials made up of fly ashes from a coal power plant // Cleaner Materials. 2022. Vol. 3. P. 100043. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100043>.
14. Yadav M., Dwibedi V., Sharma S., George N. Biogenic silica nanoparticles from agro-waste: Properties, mechanism of extraction and applications in environmental sustainability // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2022. Vol. 10. Iss. 6. P. 108550. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108550>.
15. Supiyani, Agusnar H., Sugita P., Nainggolan I. Preparation sodium silicate from rice husk to synthesize silica nanoparticles by sol-gel method for adsorption water in analysis of methamphetamine // South African Journal of Chemistry. 2022. Vol. 40. P. 80–86. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2022.02.001>.
16. Hwang Jongkook, Lee Jin Hyung, Chun Jinyoung. Facile approach for the synthesis of spherical mesoporous silica nanoparticles from sodium silicate // Materials Letters. 2021. Vol. 283. P. 128765. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128765>.
17. Krachuamram S., Chanapattharapol K.C., Kamonsuttipaijit N. Synthesis and characterization of NaX-type zeolites prepared by different silica and alumina sources and their CO₂ adsorption properties // Microporous and Mesoporous Materials. 2021. Vol. 310. P. 110632. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2020.110632>.
18. Котова О.Б., Шабалин И.Л., Котова Е.Л. Фазовые трансформации в технологиях синтеза и сорбционные свойства цеолитов из угольной золы уноса // Записки Горного института. 2016. Т. 220. С. 526–531. <https://doi.org/10.18454/pmi.2016.4.526>.
19. Koohsaryan E., Anbia M., Maghsoodlu M. Application of zeolites as non-phosphate detergent builders: a review // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2020. Vol. 8. Iss. 5. P. 104287. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104287>.
20. Фиговский О.Л., Кудрявцев П.Г. Жидкое стекло и водные растворы силикатов, как перспективная основа технологических процессов получения новых нанокомпозиционных материалов // Инженерный вестник Дона. 2014. Т. 47. № 2. С. 124–134.
21. Бондаренко Д.О., Бондаренко Н.И., Бессмертный В.С., Изофатова Д.И., Дюмина П.С., Волошко Н.И. Энергосберегающая технология получения силикат-глыбы для производства жидкого стекла // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. Vol. 2. Iss. 10. С. 111–115. https://doi.org/10.12737/article_59cd0c60148053.59501281.
22. Александрова Т.Н. Комплексная и глубокая переработка минерального сырья природного и техногенного происхождения: состояние и перспективы // Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 503–504.
23. Пат. № 2430018, Российская Федерация, СО1В 33/32. Способ получения жидкого стекла / Р.В. Петрунин, В.В. Русина, С.А. Львова, Е.В. Корда. Заявитель и патентообладатель: Братский государственный университет. Заявл. 23.11.2009; опубл. 27.09.2011. Бюл. № 27.
24. Пат. № 2220906, Российская Федерация, СО1В 33/32. Способ получения жидкого стекла / М.И. Балабанов, В.Д. Петрухин. Заявитель и патентообладатель: М.И. Балабанов, С.А. Кальфа, С.М. Леденев, В.Д. Петрухин. Заявл. 06.06.2002; опубл. 10.01.2004.
25. Пат. № 2548097, Российская Федерация, СО1В 33/32. Способ изготовления жидкого стекла / А.С. Цатурян, Б.Е. Красавцев, В.Б. Симкин, Э.А. Александрова, Б.Л. Александров. Заявитель и патентообладатель: Кубанский государственный аграрный университет. Заявл. 30.09.2013; опубл. 10.04.2015. Бюл. № 10.
26. Пат. № 2285665, Российская Федерация, СО1В 33/32. Способ получения жидкого стекла / А.А. Щелконогов, Н.Б. Овчинникова, Р.Г. Фрейдлина, А.И. Гулякин, Л.Н. Сабуров, С.А. Яковлева, М.В. Дудина. Заявитель и патентообладатель: Открытое акционерное общество «Асбестовский магниевый завод» (ОАО «АМЗ»). Заявл. 11.01.2005; опубл. 20.10.2006. Бюл. № 29.
27. Пат. № 2160707, Российская Федерация, СО1В 33/32. Способ получения высокочистого жидкого стекла / В.В. Виноградов, Д.В. Виноградов, А.А. Балков. Заявитель и патентообладатель: В.В. Виноградов, Д.В. Виноградов, А.А. Балков. Заявл. 29.06.1998; опубл. 20.12.2000.
28. Пат. № 2188793, Российская Федерация, СО1В 33/32. Способ получения жидкого стекла / Е.А. Никифоров, В.П. Елагин. Заявитель и патентообладатель: Е.А. Никифоров. Заявл. 16.06.2001; опубл. 10.09.2002.
29. Пат. № 2047559, Российская Федерация, СО1В 33/32. Способ получения жидкого стекла / В.И. Кочкин, Н.И. Пузачев, Н.И. Столярова. Заявитель и патентообладатель: В.И. Кочкин, Н.И. Пузачев, Н.И. Столярова. Заявл. 14.07.1992; опубл. 10.11.1995.
30. Пат. № 2480409, Российская Федерация, СО1В 33/32. Способ получения жидкого стекла / М.В. Таук, И.И. Николаева, Т.Н. Черкасова. Заявитель и патентообладатель: Открытое акционерное общество «Акрон». Заявл. 26.10.2011; опубл. 27.04.2013. Бюл. № 12.
31. Артюшевский Д.И., Горшнева Е.А., Георгиева Э.Ю. Получение ценных продуктов из отходов производства фторида алюминия // Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований: тр. V Конгресса с междунар. участием и Конференции молодых ученых «ТЕХНОГЕН-2021» (г. Екатеринбург, 23–26 ноября 2021 г.). Екатеринбург: Институт металлургии УрО РАН, ООО Универсальная типография «Альфа Принт», 2021. С. 110–111. <https://doi.org/10.34923/technogen-ural.2021.17.61.028>.
32. Bazhin V.Y., Glaz'ev M.V. Combined refractory materials with addition of technogenic waste for metallurgical assemblies // Refractories and Industrial Ceramics. 2021. Vol. 61. Iss. 2. P. 644–648. <https://doi.org/10.1007/s11148-021-00535-2>.
33. Пщелко Н.С. Использование наноразмерных гидрофобизирующих покрытий для получения электретов на основе диоксида кремния // Записки Горного института. 2018. Т. 230. С. 146–152. <https://doi.org/10.25515/pmi.2018.2.146>.
34. Дубовиков О.А., Сундуров А.В. Кинетика выщелачивания термоактивированного боксита // Обогащение руд. 2021. № 4. С. 34–39. <https://doi.org/10.17580/or.2021.04.06>.
35. Терещенко И.М., Дормешкин О.Б., Жих Б.П., Кравчук А.П. Комплексная переработка кремнегеля – многотоннажного отхода химических производств // Нефтехимия – 2018: матер. I Междунар. науч.-техн. форума по химическим

- технологиям и по нефтегазопереработке (г. Минск, 27–30 ноября 2018 г.). Минск: БГТУ, 2018. Ч. 1. С. 83–86.
36. Позин М.Е. Технология минеральных солей (удобрений, пестицидов, промышленных солей, оксидов и кислот): монография. Ч. 1; 4-е изд. (испр.). Л.: Химия, 1974. 768 с.
37. Бажин В.Ю., Двойников М.В., Глазьев М.В., Куншин А.А. Исследование свойств тампонажных растворов с добавкой отхода производства фтористого алюминия // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2020. Iss. 3. С. 39–42. [https://doi.org/10.33285/0130-3872-2020-3\(327\)-39-42](https://doi.org/10.33285/0130-3872-2020-3(327)-39-42).
38. Мамченков Е.А., Акаев О.П., Акаева Т.К. Исследование температурно-временных характеристик взаимодействия модифицированного кремнегеля с гидроксидом натрия // Химия в интересах устойчивого развития. 2015. Т. 23. № 1. С. 97–102.
39. Пат. № 2660040, Российская Федерация, СО1В 33/32. Способ получения жидкого стекла / Е.А. Мамченков, С.И. Мамченкова, А.В. Мамченков. Заявитель и патентообладатель: Мамченков Е.А. Заявл. 22.02.2017; опубл. 04.07.2018. Бюл. № 19.
40. Пат. № 2022925, Российская Федерация, СО1В 33/32. Способ получения жидкого стекла / Г.Н. Алексеева, В.П. Харитонов, Э.М. Рычкова, И.В. Макарова, А.С. Захаров. Заявитель: Пермский филиал Научно-производственно-го объединения Государственный институт прикладной химии. Патентообладатель: Алексеева Г.Н. Заявл. 04.03.1991; опубл. 15.11.1994.
41. Пат. № 2036145, Российская Федерация, СО1В 33/32. Способ получения жидкого стекла / В.П. Тунгусов, Н.И. Горшков. Заявитель: Всесоюзный научно-исследовательский и проектный институт алюминиевой, магниевой и электродной промышленности. Патентообладатель: Акционерное общество «Всероссийский алюминиево-магниевый институт». Заявл. 26.11.1992; опубл. 27.05.1995.
42. Пат. № 22980, Республика Беларусь, СО1В 33/32. Способ получения натриевого жидкого стекла / И.М. Терещенко, Б.П. Жих, А.П. Кравчук. Заявитель и патентообладатель: Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет». Заявл. 22.12.2018; опубл. 30.06.2020.
43. Пат. № 11706, Республика Беларусь, СО1В 33/32. Способ получения жидкого стекла / М.И. Кузьменков, В.В. Заранский. Заявитель и патентообладатель: Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет». Заявл. 19.01.2006; опубл. 30.04.2009.
44. Pyagay I.N., Shaidulina A.A., Konoplin R.R., Artyushevskiy D.I., Gorshneva E.A., Sutyaginsky M.A. Production of amorphous silicon dioxide derived from aluminum fluoride industrial waste and consideration of the possibility of its use as $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ catalyst supports // Catalysts. 2022. Vol. 12. Iss. 2. P. 162. <https://doi.org/10.3390/catal12020162>.
45. Пат. № 2023105153, Российская Федерация. Способ получения жидкого стекла / И.Н. Пягай, Я.А. Свахина. Заявитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». Заявл. 07.03.2023.

References

1. Luling C., Rucker-Gramm P., Weilandt A., Beuscher J., Nagel D., Schneider J., et al. Advanced 3D textile applications for the building envelope. *Applied Composite Materials*. 2022;29(1):343–356. <https://doi.org/10.1007/s10443-021-09941-8>.
2. Bakatovich A., Gaspar F. Composite material for thermal insulation based on moss raw material. *Construction and Building Materials*. 2019;228:116699. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116699>.
3. Słonina M., Dziurka D., Smardzewski J. Experimental research and numerical analysis of the elastic properties of paper cell cores before and after impregnation. *Materials*. 2020;13(9):2058. <https://doi.org/10.3390/ma13092058>.
4. Zhang Bingru, He Chengjun, Chen Xi, Tian Zhipeng, Li Fengting. The synergistic effect of polyamidoamine dendrimers and sodium silicate on the corrosion of carbon steel in soft water. *Corrosion Science*. 2015;90:585–596. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.10.054>.
5. Yang Jie, Li Zhongheng, Shi Jinfa, Yan Zhenwei. Study on the corrosion inhibition performance of sodium silicate and polyaspartic acid for 35CrMo steel. *International Journal of Electrochemical Science*. 2023;18(4):100042. <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2023.100042>.
6. Nemchinova N.V., Mineev G.G., Tjutrin A.A., Jakovleva A.A. Development of ore-thermal melting technology for agglomerated charge containing technogenic raw material in silicon production. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017;60(12):948–954. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-12-948-954>.
7. Nemchinova N.V., Leonova M.S., Tyutrin A.A. Experimental works on pelletized charge smelting in silicon production. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2017;21(1):209–217. (In Russ.). 10.21285/1814-3520-2017-1-209-217.
8. Nemchinova N.V., Leonova M.S., Tyutrin A.A., Bel'skii S.S. Optimizing the charge pelletizing parameters for silicon smelting based on technogenic materials. *Metallurgist*. 2019;63(1-2):115–122. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00800-3>.
9. Rasuli M.I., Tajunnisa Yu., Yamamura A., Shigeishi M. A consideration on the one-part mixing method of alkali-activated material: problems of sodium silicate solubility and quick setting. *Heliyon*. 2022;8(1):e08783. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e08783>.
10. Dubovikov O.A., Beloglazov I.I., Alekseev A.A. Specific features of the use pulverized coal fuel in combined chemical processing. *Obogashchenie rud*. 2023;6:32–38. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/or.2022.06.06>.
11. Tong K.T., Vinai R., Soutsos M.N. Use of Vietnamese rice husk ash for the production of sodium silicate as the activator for alkali-activated binders. *Journal of Cleaner Production*. 2018;201:272–286. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.025>.
12. Villaquirán-Caicedo M.A. Studying different silica sources for preparation of alternative waterglass used in preparation of binary geopolymers binders from metakaolin/boiler slag. *Construction and Building Materials*. 2019;227:116621. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.08.002>.

13. Criado M., Vicent M., García-Ten F.J. Reactivation of alkali-activated materials made up of fly ashes from a coal power plant. *Cleaner Materials*. 2022;3:100043. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100043>.
14. Yadav M., Dwibedi V., Sharma S., George N. Biogenic silica nanoparticles from agro-waste: Properties, mechanism of extraction and applications in environmental sustainability. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2022;10(6):108550. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108550>.
15. Supiyani, Agusnar H., Sugita P., Nainggolan I. Preparation sodium silicate from rice husk to synthesize silica nanoparticles by sol-gel method for adsorption water in analysis of methamphetamine. *South African Journal of Chemistry*. 2022;40:80-86. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2022.02.001>.
16. Hwang Jongkook, Lee Jin Hyung, Chun Jinyoung. Facile approach for the synthesis of spherical mesoporous silica nanoparticles from sodium silicate. *Materials Letters*. 2021;283:128765. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128765>.
17. Krachuamram S., Chanapattharapol K.C., Kamonsuttipaijit N. Synthesis and characterization of NaX-type zeolites prepared by different silica and alumina sources and their CO₂ adsorption properties. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2021;310:110632. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2020.110632>.
18. Kotova O.B., Shabalin I.L., Kotova E.L. Phase transformations in synthesis technologies and sorption properties of zeolites from coal fly ash. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*. 2016;220: 526-531. (In Russ.). <https://doi.org/10.18454/pmi.2016.4.526>.
19. Koohsaryan E., Anbia M., Maghsoodlu M. Application of zeolites as non-phosphate detergent builders: a review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2020;8(5):104287. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104287>.
20. Figovskii O.L., Kudryavtsev P.G. Water glass and water silicate solutions as a promising basis for technological production processes of new nanocomposite materials. *Inzhenernyj vestnik Doma*. 2014;47(2):124-134. (In Russ.).
21. Bondarenko D.O., Bondarenko N.I., Bessmertnyy V.S., Izofatova D.I., Dyumina P.S., Voloshko N.I. Energy-saving technology of producing silicate-clod for liquid glass production. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. Shuhova = Bulletin of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov*. 2017;2(10):111-115. (In Russ.). https://doi.org/10.12737/article_59cd0c60148053.59501281.
22. Aleksandrova T.N. Complex and deep processing of mineral raw materials of natural and technogenic origin: state and prospects. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*. 2022;256:503-504. (In Russ.).
23. Petrunin RV, Rusina VV, L'vova SA, Korda EV. *Water glass production method*. Patent RF, no. 2430018; 2009. (In Russ.)
24. Balabanov M.I., Petrukhin V.D. *Water glass production method*. Patent RF, no. 2220906; 2002. (In Russ.).
25. Tsaturyan A.S., Krasavtsev B.E., Simkin V.B., Aleksandrova E.A., Aleksandrov B.L. *Method of water glass production*. Patent RF, no. 2548097; 2013. (In Russ.).
26. Shchelkonogov A.A., Ovchinnikova N.B., Freidlina R.G., Gulyakin A.I., SAburov L.N., Yakovleva S.A., Dudina M.V. *Method of water glass production*. Patent RF, no. 2285665; 2005. (In Russ.).
27. Vinogradov V.V., Vinograd V.D., Balkov A.A. *Production method of high-purity water glass*. Patent RF, no. 2160707; 1998. (In Russ.).
28. Nikiforov E.A., Elagin V.P. *Method of water glass production*. Patent RF, no. 2188793; 2001. (In Russ.).
29. Kochkin V.I., Puzachev N.I., Stolyarova N.I. *Method of water glass production*. Patent RF, no. 2047559; 1992. (In Russ.).
30. Tauk M.V., Nikolaeva I.I., Cherkasova T.N. *Method of water glass production*. Patent RF, no. 2480409; 2011. (In Russ.).
31. Artyushevskii D.I., Gorshneva E.A., Georgieva E.Y. Obtaining valuable products from aluminum fluoride production waste. In: *Fundamental'nye issledovaniya i prikladnye razrabotki protsessov pererabotki i utilizatsii tekhnogenennykh obrazovanii: trudy V Kongressa s mezhdunarodnym uchastiem i Konferentsii molodykh uchenykh "Tekhnogen-2021" = Fundamental research and applied developments of recycling and utilization processes of technogenic formations: Proceedings of the 5th Congress with international participation and the Conference of young scientists "Technogen-2021".* 23–26 November 2021, Ekaterinburg. Ekaterinburg: Institute of Metallurgy, Ural Branch RAS, LLC Universal Printing House "Alfa Print", 2021; p. 110-111. (In Russ.). <https://doi.org/10.34923/technogen-ural.2021.17.61.028>.
32. Bazhin V.Y., Glaz'ev M.V. Combined refractory materials with addition of technogenic waste for metallurgical assemblies. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2021;61(2):644-648. <https://doi.org/10.1007/s11148-021-00535-2>.
33. Pshchelko NS. Use of nano-dimensional hydrophobic coatings for obtaining electrets based on silicon dioxide. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*. 2018;230:146-152. (In Russ.). <https://doi.org/10.25515/pmi.2018.2.146>.
34. Dubovikov O.A., Sundurov A.V. Leaching kinetics for thermally activated bauxite. *Obogashchenie rud*. 2021;4:34-39. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/or.2021.04.06>
35. Tereshchenko I.M., Dormeshkin O.B., Zhikh B.P., Kravchuk A.P. Complex recycling of silica gel – a large-tonnage waste of chemical production. In: *Neftekhimiya - 2018: Materialy I Mezhdunarodnogo nauchno-tehnicheskogo foruma po khimicheskim tekhnologiyam i po neftegazo-pererabotke = Petrochemistry – 2018: Proceedings of I International Science and Technology Forum on Chemical Engineering and Oil and Processing*. 27–30 November 2018, Minsk. Minsk: Belarusian State Technological University; 2018, vol. 1, p. 83-86. (In Russ.).
36. Pozin M.E. *Technology of mineral salts (fertilizers, pesticides, industrial salts, oxides and acids): monograph*. Part 1; 4th ed. (revised). Leningrad: Chemistry; 1974, 768 p. (In Russ.).
37. Bazhin V.Yu., Dvoinikov M.V., Glaz'ev M.V., Kunshin A.A. Investigation of the properties of cement slurries with the addition of aluminum fluoride production waste. *Stroitel'stvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i more = Onshore and offshore oil and gas well construction*. 2020;3:39-42. (In Russ.). [https://doi.org/10.33285/0130-3872-2020-3\(327\)-39-42](https://doi.org/10.33285/0130-3872-2020-3(327)-39-42).
38. Mamchenkov E.A., Akaev O.P., Akaeva T.K. Investigation of temperature-time characteristics of the interaction of modified silica gel with sodium hydroxide. *Khimiya v interesakh ustoičivogo razvitiya = Chemistry for Sustainable Development*. 2015;23:97-102. (In Russ.).
39. Mamchenkov E.A., Mamchenkova S.I., Mamchenkov A.V. *Method of water glass production*. Patent RF,

no. 2660040; 2017. (In Russ.).

40. Alekseeva G.N., Kharitonov V.P., Rychkova E.M., Makarova I.V., Zakharov A.S. Method of water glass production. Patent RF, no. 2022925; 1991. (In Russ.).

41. Tungusov V.P., Gorshkov N.I. Method of water glass production. Patent RF, no. 2036145; 1992. (In Russ.).

42. Tereshchenko I.M., Zhikh B.P., Kravchuk A.P. Method of sodium water glass production. Patent BY, no. 22980; 2018. (In Russ.).

43. Kuz'menkov M.I., Zaranskii V.V. Method of water glass production. Patent BY, no. 11706; 2006. (In Russ.).

44. Pyagay I.N., Shaidulina A.A., Konoplin R.R., Artyushevskiy D.I., Gorshneva E.A., Sutyaginsky M.A. Production of amorphous silicon dioxide derived from aluminum fluoride industrial waste and consideration of the possibility of its use as $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ catalyst supports. Catalysts. 2022;12(2):162.
<https://doi.org/10.3390/catal12020162>.

45. Pyagay I.N., Svakhina Ya.A. Method of water glass production. Patent Application RF, no. 2023105153; 2023. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пягай Игорь Николаевич,

д.т.н., старший научный сотрудник,
директор Научного центра «Проблем переработки
минеральных и техногенных ресурсов»,
Санкт-Петербургский горный университет, 199106,
г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О, д. 2., Россия,
✉ igor-pya@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2575-934X>

Сизяков Виктор Михайлович,

д.т.н., профессор,
научный руководитель Научного центра «Проблем
переработки минеральных и техногенных ресурсов»,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О, д. 2., Россия
kafmet@spmi.ru
<https://orcid.org/0009-0006-6531-6331>

Свахина Яна Андреевна,

инженер Научного центра «Проблем переработки
минеральных и техногенных ресурсов»,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О, д. 2., Россия
y_svakhina@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0000-7376-0156>

Титова Марина Евгеньевна,

магистрант,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О, д. 2., Россия
marina-titova-2000@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0003-6846-2367>

Мирошниченко Владимир Викторович,

студент,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О, д. 2., Россия
vovamir02@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0009-7024-3036>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 14.05.2023 г.; одобрена после рецензирования 29.05.2023 г.; принятая к публикации 11.06.2023 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Igor N. Pyagay,

Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher,
Director of the Scientific Center
"Processing problems of mineral and technogenic
resources", Saint Petersburg Mining University, 2, 21th line,
Vasilievsky Island, Saint Petersburg 199106, Russia
✉ igor-pya@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2575-934X>

Viktor M. Sizyakov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of Research of the Scientific Center "Processing
problems of mineral and technogenic resources",
Saint Petersburg Mining University, 2, 21th line, Vasilievsky
Island, Saint Petersburg 199106, Russia
kafmet@spmi.ru
<https://orcid.org/0009-0006-6531-6331>

Yana A. Svakhina,

Engineer of the Scientific Center
"Processing problems of mineral and technogenic resources",
Saint Petersburg Mining University, 2, 21th line, Vasilievsky
Island, Saint Petersburg 199106, Russia,
y_svakhina@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0000-7376-0156>

Marina E. Titova,

Master's Degree student,
Saint Petersburg Mining University, 2, 21th line, Vasilievsky
Island, Saint Petersburg 199106, Russia,
marina-titova-2000@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0003-6846-2367>

Vladimir V. Miroshnichenko,

Student,
Saint Petersburg Mining University, 2, 21th line, Vasilievsky
Island, Saint Petersburg 199106, Russia
vovamir02@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0009-7024-3036>

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 14.05.2023; approved
after reviewing 29.05.2023; accepted for publication
11.06.2023.

Научная статья
УДК 622.7:553.556:622.353.4.004
EDN: RMKJNV
DOI: 10.21285/1814-3520-2023-3-611-621

МЕТАЛЛУРГИЯ



Гидрометаллургическая переработка золошлаковых отходов

К.К. Размахнин¹✉, А.Н. Хатькова², Л.В. Шумилова³, Т.С. Номоконова⁴

¹⁻⁴Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия

Резюме. Цель – оценка возможности гидрометаллургической переработки золошлаковых отходов с целью извлечения из них редких и редкоземельных элементов. В качестве объекта исследований были принятые золошлаковые отходы Читинской ТЭЦ-2. Для определения химического элементного состава продуктов сжигания угля использовалась атомно-эмиссионная спектрометрия с индуктивно связанным плазмой. С целью предварительной концентрации редких и редкоземельных элементов проводилась электромагнитная сепарация на магнитных сепараторах золошлаковых отходов класса крупности $-0,5+0,3$ мм, $-0,3+0,1$ мм. Для выщелачивания редких и редкоземельных элементов из исследуемых образцов изучалась возможность применения в качестве выщелачивающих агентов серной, соляной и азотной кислот, а также царской водки, при одновременном использовании ультразвукового воздействия. Установлено, что электромагнитная сепарация золошлаковых отходов классов крупности $-0,5+0,3$ мм и $-0,3+0,1$ мм позволяет в существенной степени концентрировать редкие и редкоземельные элементы в магнитной фракции: титан (до 25%), циркон (до 33%), иттрий (до 50%), лантан (до 150%), церий (до 5%). Определено, что с ростом продолжительности ультразвуковой обработки при выщелачивании металлов из золошлаковых отходов серной кислотой наблюдается равномерное увеличение содержания галлия в 7,25 раза (с 0,008 до 0,058 г/дм³); при разложении царской водкой также наблюдается концентрирование этого же элемента в 3 раза (с 0,008 до 0,024 г/см³), причем ультразвуковая обработка позволяет добиться незначительного увеличения концентрации; при выщелачивании серной кислотой (продолжительность ультразвукового воздействия 5 минут) наблюдается повышение содержания рубидия в 4 раза (с 0,108 до 0,457 мг/дм³). Таким образом, наиболее эффективным для извлечения редких и редкоземельных элементов из золошлаковых отходов Читинской ТЭЦ-2 является кислотное выщелачивание в комбинации с электромагнитной сепарацией и ультразвуковой активацией пульпы.

Ключевые слова: золошлаковые отходы, электромагнитная сепарация, гидрометаллургическая переработка, ультразвуковая обработка, редкие и редкоземельные элементы

Финансирование: Работа выполнена при поддержке проекта РНФ 22-17-00040 «Научное обоснование и разработка экологически чистых безотходных технологий переработки природного и техногенного минерального сырья» (2022–2023 гг.).

Для цитирования: Размахнин К.К., Хатькова А.Н., Шумилова Л.В., Номоконова Т.С. Гидрометаллургическая переработка золошлаковых отходов // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 3. С. 611–621. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-611-621>. EDN: RMKJNV.

METALLURGY

Original article

Hydrometallurgical processing of ash and slag waste

Konstantin K. Razmakhnin¹✉, Alisa N. Khatkova², Lidia V. Shumilova³,
Tatiana S. Nomokonova⁴

¹⁻⁴Transbaikal State University, Chita, Russia

Abstract. This work assesses the possibility of hydrometallurgical processing of ash and slag waste in order to extract rare and rare earth elements. The ash and slag waste from the Chita CHPP-2 combined heat and power plant was used as a research object. Inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy (ICP-AES) was used to determine the elemental chemical composition of coal combustion products. To preconcentrate rare and rare earth elements, magnetic separators were used to isolate the $-0.5+0.3$ mm and $-0.3+0.1$ mm grain size fractions of ash and slag waste. The leaching of rare and rare earth elements from the studied samples was investigated using sulfuric, hydrochloric, and nitric acids, as well as an aqua regia solution, in combination with simultaneous ultrasonic exposure. It was determined that electromagnetic separation of the $-0.5+0.3$ mm and $-0.3+0.1$ mm grain size fractions of ash and slag waste significantly concentrates rare and rare earth elements in the magnetic fraction, including titanium (up to 25%), zircon (up to 33%), yttrium (up to 50%), lanthanum (up to 150%), and cerium (up to 5%). It was determined that an increase in the duration of ultrasonic treatment during the leaching of metals from ash and slag waste with sulfuric acid resulted in a uniform 7.25-fold increase

in gallium content (from 0.008 to 0.058 g/dm³). Additionally, when decomposed with aqua regia, a 3-fold concentration of the same element was observed (from 0.008 to 0.024 g/cm³), while ultrasonic treatment offered only a slight increase in concentration. When leaching with sulfuric acid (the duration of ultrasonic exposure is 5 minutes), a 4-fold increase in the rubidium content was observed (from 0.108 to 0.457 mg/dm³). Therefore, the most effective method for extracting rare and rare earth elements from the ash and slag waste of Chita CHPP-2 involves acid leaching combined with electromagnetic separation and ultrasonic pulp leaching.

Keywords: ash and slag waste, electromagnetic separation, hydrometallurgical processing, ultrasonic treatment, rare and rare earth elements

Funding: The work was supported by the Russian Science Foundation project 22-17-00040 «Scientific substantiation and development of environmentally friendly waste-free technologies for processing natural and technogenic mineral raw materials» (2022–2023).

For citation: Razmakhnin K.K., Khatkova A.N., Shumilova L.V., Nomokonova T.S. Hydrometallurgical processing of ash and slag waste. *iPolytech Journal*. 2023;27(3):611-621. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-611-621>. EDN: RMKJNV.

ВВЕДЕНИЕ

Сжигаемые на теплоэлектростанциях и котельных промышленных предприятий угли являются источником образования и накопления значительных объемов золошлаковых отходов, представляющих собой минеральное сырье, содержащее такие компоненты, как золото, серебро, редкие и редкоземельные элементы и т.д. [1–3]. Объемы образования золошлаковых отходов в России достигают ежегодно до 85–90 млн т при не превышающей 5% доле их переработки. Наибольшим процентом переработки отходов сжигания углей характеризуются такие страны, как Япония (доля утилизации золошлаковых отходов (ЗШО) достигает 100%) [2], Китай (доля утилизации ЗШО – 70,1%) [3], Индия (доля утилизации ЗШО составляет 67%) [4].

При сжигании энергетических углей образуются ЗШО, состоящие из продуктов термического воздействия и окисления компонентов золы, а также несгоревшего угля и различных органических соединений [5]. В результате промышленного сжигания углей происходит образование ряда отличающихся по составу и размеру золошлаков: зола-унос (тонкодисперсный материал крупностью 3,5–100 мкм); шлак (сплавленные агрегаты золы размером 0,3–30 мм); ЗШО (смесь шлака и золы-уноса) [6]. При этом образование ЗШО зависит от технологии сжигания угля, его химического состава и зольности, а также от способа удаления в отвал, складирования и хранения [7, 8]. Вместе с тем в составе ЗШО содержится большое количество ценных компонентов, зачастую представляющих промышленный интерес. К таким компонентам следует отнести Al₂O₃, SiO₂, MgO, CaO, Na₂O, Fe₂O, K₂O, TiO₂ и др. [9].

Анализ мирового и отечественного опыта [10–12] по промышленному использованию ЗШО позволил сделать вывод о том, что продукты сжигания углей являются техногенными месторождениями минерального сырья, переработка которых позволит получить широкий перечень товарной продукции.

Наиболее важным фактором для вовлечения ЗШО в переработку (с целью извлечения из них ценных компонентов) является информация об их физико-химических и физико-механических свойствах, минеральном и химическом составах, дисперсности и влажности [13, 14]. В настоящее время наиболее распространенными методами переработки ЗШО, с учетом их свойств, являются гравитационные методы обогащения и магнитная сепарация, позволяющие извлекать золото, серебро, железо и кремнезем [15]. В результате проведения экспериментальных исследований по изучению возможности обогащения золошлаковых отходов методом тяжелосреднего разделения установлено, что такие элементы, как германий, скандий, цирконий, иттрий и другие, накапливаются в основном в легких фракциях. Данный эффект стоит связывать с органическим веществом [16, 17]. Вместе с тем в некоторых странах (КНР, Япония, Индия) для извлечения ценных компонентов из золошлаковых отходов применяются гравитационные методы обогащения в комбинации с гидрометаллургическим способом переработки.

Следует отметить, что в России данная комбинированная технология широко не применяется. Переработка ЗШО в основном ограничивается гравитационным методом, применение которого не позволяет эффективно извлекать из них редкие и ред-

коземельные элементы [18, 19]. Показатель извлечения данных элементов из ЗШО с применением методов гравитации в России не превышает 12–15% [18, 19]. В связи с этим возникает необходимость разработки эффективной технологии переработки ЗШО с целью извлечения редких и редкоземельных элементов. При этом, исходя из передового мирового опыта, наиболее перспективным является гидрометаллургический метод в комбинации с гравитационными методами и магнитной сепарацией [1, 20, 12]. Следует отметить, что распределение редких и редкоземельных элементов в ЗШО обусловлено в большей степени генезисом сжигаемых углей, а на эффективность их извлечения оказывают определяющее влияние минерало-технологические свойства ЗШО.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объекта исследований были

Таблица 1. Усреднений химический состав геосистемы «уголь-зола-золошлак» Читинской ТЭЦ-2

Table 1. Averaged chemical composition of the Chita TPP-2 «coal-ash-slag» geosystem

Элемент	ТЭЦ-2		
	ХУ ТЭЦ-2, %	З ТЭЦ-2, %	ЗШУ ТЭЦ-2, %
SiO ₂	53,30	50,49	51,77
CaO	9,70	14,02	12,21
Al ₂ O ₃	20,30	20,58	21,89
MgO	2,80	1,87	1,77
MnO	0,03	0,02	0,01
Fe ₂ O ₃	3,10	8,53	9,13
FeO	4,58	6,99	4,57
K ₂ O	1,90	1,34	3,34
TiO ₂	0,60	0,78	0,65
BaO	–	0,67	1,01
P ₂ O ₅	3,10	1,11	1,04
SO ₃	4,67	0,84	0,76

Представленные в табл. 1 данные свидетельствуют о том, что химический состав образующихся в результате сжигания углей золы и золошлака, полученных на разных станциях и этапах, может существенно отличаться, на что влияют характеристики исходного угля, условия его хранения, а также способ сжигания.

приняты ЗШО Читинской ТЭЦ-2. Усредненные химический и элементный составы данных ЗШО представлены в табл. 1 и 2, соответственно [1]. На Читинской ТЭЦ-2 золошлаковые отходы образуются при пылевидном сжигании углей. Образуемые ЗШО представлены агрегатами слипшихся частиц дегидратированного глинистого сланца и содержат частицы кварца, полевых шпатов и аморфные карбонаты кальция. Образование крупных и мелких фракций ЗШО обусловлено происходящими в процессе сжигания фазовыми превращениями минеральных составляющих угля, вступающими в сложные химические взаимодействия друг с другом.

В табл. 1 представлен химический состав следующих минеральных продуктов: угля, сжигаемого на Читинской ТЭЦ-2 (ХУ), золы с котлоагрегата № 4 марки Е-42/40 ТЭЦ-2 (З), золы-уноса с золошлакового озера ТЭЦ (ЗШУ).

Для определения химического элементного состава продуктов сжигания угля использовалась атомно-эмиссионная спектрометрия с индуктивно связанный плазмой (ИСП-АЭС) на спектрометре EXPEC 6000 (Focus Photonics inc., КНР). Результаты элементного анализа ЗШО представлены в табл. 2.

Таблица 2. Усредненный элементный анализ золошлаковых отходов Читинской ТЭЦ-2**Table 2.** Averaged elemental analysis of Chita TPP-2 ash and slag waste

Элемент	Содержание в ЗШУ ТЭЦ-2, г/т	Элемент	Содержание в ЗШУ ТЭЦ-2, г/т	Элемент	Содержание в ЗШУ ТЭЦ-2, г/т
Al	91910,01	Cu	62,83	Pb	34,65
As	89,33	Fe	40855,79	S	2993,50
Ba	1392,51	K	18366,54	Zr	110,18
Be	8,43	La	41,25	Sc	3,83
Rb	5,76	Li	44,23	Sn	86,49
Ca	64117,53	Mg	15016,86	Sr	1450,67
Cd	4,41	Mn	1214,67	Ti	3046,80
Co	23,88	Mo	14,27	V	71,89
Cr	105,27	Ni	82,53	W	110,18
Y	29,40	Zn	36,87	Ce	12,02
P	601,21	Ga	4,27	Ge	172,52

ПЕРЕРАБОТКА ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ ЧИТИНСКОЙ ТЭЦ-2

Методика проведения эксперимента по изучению возможности гидрометаллургической переработки ЗШО Читинской ТЭЦ-2 заключалась в следующем. Пробы ЗШО классифицировались по классам крупности (-2+1 мм, -1+0,5 мм, -0,5+0,3 мм, -0,3+0,1 мм) и подвергались электромагнитному обогащению с последующей гидрометаллургической переработкой классов с наиболее высоким содержанием редких и редкоземельных элементов (-0,5+0,3 мм, -0,3+0,1 мм). Анализ мирового и отечественного опыта переработки ЗШО показал, что наиболее часто на практике применяются комбинированные гравитационно-гидрометаллургические схемы их переработки, включающие также флотационные процессы [18, 19]. Однако применение процессов флотации в переработке золошлаковых отходов не всегда является рациональным и экономически оправданным, что обусловлено трудностью подбора реагентов, а также сложностью и дороговизной аппаратурного оформления применяемых технологий. В соответствии с этим проведены исследования по изучению возможности извлечения редких и редкоземельных элементов из золошлаковых отходов Читинской ТЭЦ-2 с применением электромагнитной сепарации в комбинации с гидрометаллургической переработкой получаемой магнитной фракции. Выщелачивание проводилось с применением предварительной ультразвуковой (УЗ) обработки с целью

активации пульпы и повышения извлечения ценных компонентов в продуктивный раствор. Для выщелачивания редких и редкоземельных элементов изучалась возможность применения в качестве выщелачивающих агентов серной, соляной и азотной кислот, а также раствора царской водки (ЦВ).

Электромагнитную сепарацию ЗШО проводили в двух режимах (сухом и мокром) на лабораторных магнитных сепараторах 138 СЭМ и МБС-Л (Россия). При этом результаты проведенных исследований не показали существенного различия в эффективности сухого и мокрого магнитного способов обогащения ЗШО. В данном случае наиболее перспективным следует считать мокрое обогащение золошлаковых отходов с размещением оборудования для обогащения непосредственно на их выходе в золошлакохранилище.

Методика проведения исследований по гидрометаллургической переработке магнитной фракции ЗШО заключалась в следующем: 12 подготовленных навесок ЗШО массой по 10 г разбавлялись дистиллированной водой массой 90 мл. При этом общий объем пробы составил 100 мл, Т:Ж = 1:10. В каждую из проб добавлялось по 100 мл кислоты: серной – 93,6–95,6% масс.; азотной – 65% масс.; соляной – 35% масс., а также смеси азотной и соляной кислот тех же концентраций в соотношении 1:3 по объему.

Далее проводилась ультразвуковая обработка пульпы (смеси воды и магнитной фракции ЗШО) в установке УЗДН-1 (ГК «Гранат», Россия)

при частоте 22 кГц. Продолжительность ультразвукового воздействия составляла 5–10 мин, температура пульпы поддерживалась на уровне 25°C. Выщелачивание проводилось в стеклянной емкости с мешалкой. Различным условиям проведения исследований соответствовали определенные обозначения проб ЗШО Читинской ТЭЦ-2 (табл. 3). Содержание редких и редкоземельных элементов в ЗШО приведено в табл. 4–6.

Таблица 3. Обозначение проб золошлаковых отходов при выщелачивании

Table 3. Labeling of ash and slag waste samples during leaching

Обозначение пробы	Кислота	Время обработки, мин
0-N	HNO_3	0
5-N		5
10-N		10
0-Cl	HCl	0
5-Cl		5
10-Cl		10
0-S	H_2SO_4	0
5-S		5
10-S		10
0-ЦВ	$\text{HNO}_3 + \text{HCl}$ (царская вода)	0
5-ЦВ		5
10-ЦВ		10

После ультразвуковой обработки пробы выпаривались до состояния влажных солей с последующей фильтрацией. В результате проведения эксперимента получены два продукта (концентрата): твердый остаток и слив (жидкая фаза), которые подвергались анализу (определению элементного состава) на рентгенофлюоресцентном спектрометре DF-5708 (КНР) с целью оценки степени извлечения металлов в продуктивный раствор.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные экспериментальные исследования по электромагнитной сепарации ЗШО Читинской ТЭЦ-2 позволили получить продукты с содержанием достаточно большой группы металлов (табл. 4). На основании полученных данных можно сделать вывод о том, что в магнитной фракции накапливаются все присутствующие в сжигаемых углях редкие и редкоземельные элементы. Наиболее эффективно переходят в магнитный продукт такие элементы, как титан, лантан, циркон и гал-

лий. В этой связи магнитную фракцию следует рассматривать как коллективный концентрат редких и редкоземельных металлов для последующей промышленной переработки. При этом выход магнитной фракции при разделении ЗШО на электромагнитном сепараторе составил 23%, что является вполне высоким показателем. Следовательно, учитывая достаточно большие запасы и объемы накопленных и вновь образуемых ЗШО на Читинской ТЭЦ-2, можно сделать вывод о высокой перспективности применения электромагнитной сепарации для их переработки и возможности получения тысяч тонн магнитного концентрата, представляющего собой продукцию с высоким содержанием редких и редкоземельных элементов [21, 22].

Таблица 4. Результаты электромагнитной сепарации золошлаковых отходов Читинской ТЭЦ-2

Table 4. Results of electromagnetic separation of Chita TPP-2 ash and slag waste

Элемент	Содержание, г/т	
	золошлаковые отходы	магнитная фракция
Ti	1500–3000	2000–4000
Ga	20	20–25
Ge	2	3
Rb	1	2
Sr	7	8
Y	20	20–40
Zr	200	150–300
La	40	70–100
Ce	0,5	1

Результаты проведенных исследований показали, что электромагнитная сепарация ЗШО классов крупности -0,5+0,3 мм и -0,3+0,1 мм позволяет в достаточной степени концентрировать редкие и редкоземельные элементы в магнитной фракции: титан (до 25%), циркон (до 33%), иттрий (до 50%), лантан (до 150%), церий (до 50%). Кроме того, магнитная фракция ЗШО может рассматриваться в качестве сырьевого источника Fe_2O_3 [22–24], т.к. содержит более 37% данного оксида. Немагнитная фракция характеризуется достаточно высоким содержанием оксида алюминия, что позволяет сделать вывод о перспективности ее использования в качестве сырья для глиноземного производства.

Объемы образования ЗШО, а также возможность концентрации редких и редкоземельных

элементов в продуктах электромагнитной сепарации, обусловливают рациональность и необходимость их дальнейшей переработки методом выщелачивания (гидрометаллургической переработки), результаты которого представлены в табл. 5 и 6.

Таблица 5. Количественное содержание редких и редкоземельных элементов до и после выщелачивания азотной и соляной кислотами

Table 5. Quantitative content of rare and rare earth elements before and after leaching with nitric and hydrochloric acids

Элемент, содержание, мг/дм ³	0-N	5-N	10-N	0-Cl	5-Cl	10-Cl
Ti, 3,110	2,456	1,240	1,240	3,246	2,402	2,100
Ga, 0,008	0,011	0,011	0,011	0,032	0,047	0,049
Ge, 0,207	0,207	0,207	0,207	0,207	0,207	0,207
Rb, 0,108	0,028	0,019	0,013	0,089	0,103	0,103
Sr, 0,726	0,054	1,131	1,201	0,068	0,068	0,068
Y, 0,006	0,007	—	—	0,007	—	—
Zr, 11,588	363,000	10,412	—	299,000	105,000	32,257

Знак «—» обозначает, что элемент находится за пределом обнаружения.

По данным, представленным в табл. 5, можно сделать следующие выводы:

– при кислотном выщелачивании соляной кислотой без УЗ обработки наблюдается увеличение содержание титана в 1,04 раза (с 3,110 до 3,324 мг/дм³);

– при кислотном выщелачивании азотной кислотой (с/без УЗ обработки) наблюдается увеличение содержание галлия в 1,4 раза (с 0,008 до 0,011 мг/дм³) (см. рис. 1); выщелачивание соляной кислотой дает увеличение содержания этого же элемента в 4, 5,9, 6,1 раза с увеличением времени УЗ обработки;

– количественное содержание германия

остается неизменным (под воздействием азотной и соляной кислот);

– при кислотном выщелачивании азотной кислотой (время УЗ обработки составляет 5 мин) количественное содержание стронция увеличивается в 1,65 раза (с 0,726 до 1,201 мг/дм³);

– при кислотном выщелачивании азотной кислотной без УЗ обработки наблюдается увеличение содержания циркония в 31,32 раза (с 11,588 до 363,000 мг/дм³); выщелачивание соляной кислотой дает увеличение содержания этого же элемента в 25 раз (с 11,588 до 299,000 мг/дм³).

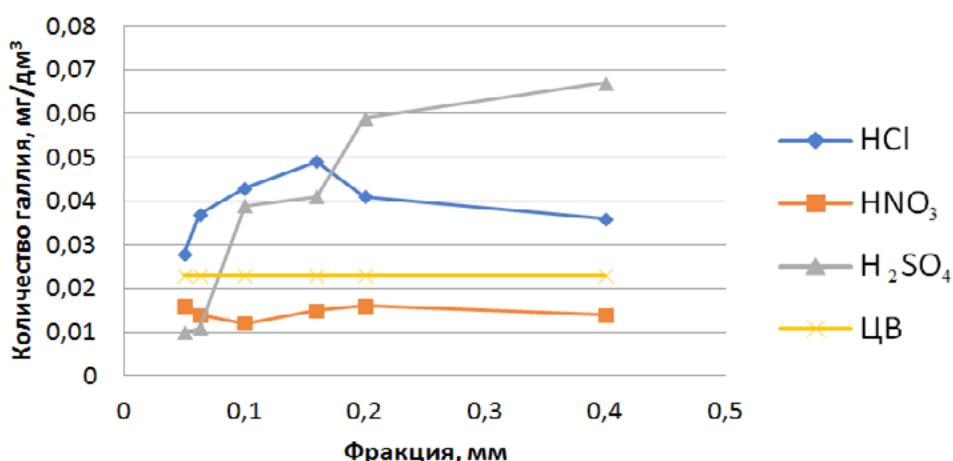


Рис. 1. График извлечения галлия по фракциям в разных типах кислотного выщелачивания
Fig. 1. Graph of gallium recovery by fractions in different types of acid leaching

Из данных, представленных на рис. 1, галлия достигается при выщелачивании его серной кислотой.

Таблица 6. Количественное содержание редких и редкоземельных элементов до и после выщелачивания серной кислотой и царской водкой

Table 6. Quantitative content of rare and rare earth elements before and after leaching with sulfuric acid and aqua regia

Элемент и его со- д содержание, мг/дм ³	0-С	5-С	10-С	0-ЦВ	5-ЦВ	10-ЦВ
Ti, 3,110	5,220	4,499	4,999	4,330	4,020	4,017
Ga, 0,008	0,044	0,057	0,058	0,022	0,024	0,024
Ge, 0,207	0,207	0,207	0,207	0,207	0,207	0,207
Rb, 0,108	0,119	0,457	0,369	0,071	0,048	0,022
Sr, 0,726	0,059	0,059	0,059	4,060	3,996	4,030
Y, 0,006	0,034	—	—	0,020	0,014	0,007
Zr, 11,588	544,000	147,879	103,257	43,000	47,259	44,025
La, 0,055	—	—	—	0,219	0,287	0,247
Ce, 0,052	—	—	—	0,212	0,194	0,222

Представленные в табл. 6 данные позволяют сделать следующие выводы:

– при выщелачивании серной кислотой (без УЗ воздействия) наблюдается увеличение содержания титана в 1,6 раза (с 3,110 до 5,220 мг/дм³); при царско-водочном разложении (без УЗ обработки) наблюдается увеличение концентрации этого же элемента в 1,4 раза (с 3,110 до 4,330 мг/дм³);

– при выщелачивании серной кислотой наблюдается равномерное увеличение содержания галлия с ростом времени УЗ обработки в 5,5, 7,1 и 7,25 раза (с 0,008 до 0,044, 0,057 и 0,058 мг/дм³); при царско-водочном разложении также наблюдается концентрирование этого же элемента в 3 раза (с 0,008 до 0,024 мг/дм³), причем обработка в ультразвуковой ванне дает незначительное увеличение концентрации;

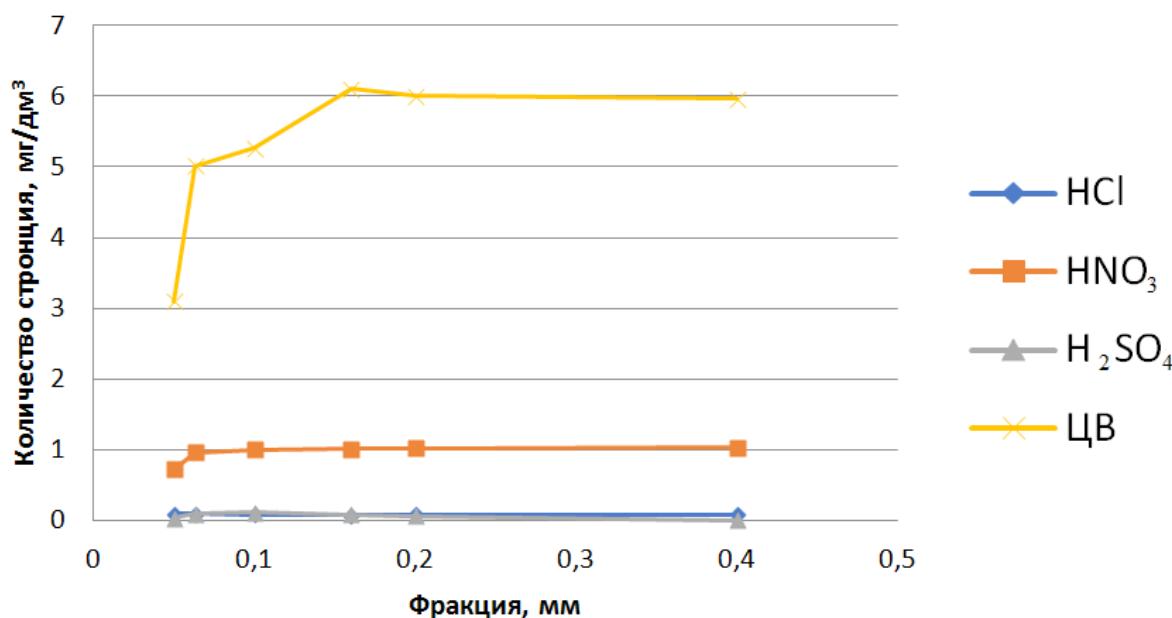


Рис. 3. Степень извлечения титана из золошлаковых отходов Читинской ТЭЦ-2
Fig. 3. Recovery degree of titanium from Chita TPP-2 ash and slag waste

Из представленных на рис. 3 данных следует, что наивысшая степень извлечения титана достигается при времени обработки азотной кислотой 5 и 10 минут серной кислотой,

соответственно. Данные рис. 4 показывают, что наиболее высокая степень извлечения рубидия достигается при времени обработки серной кислотой 10 мин.

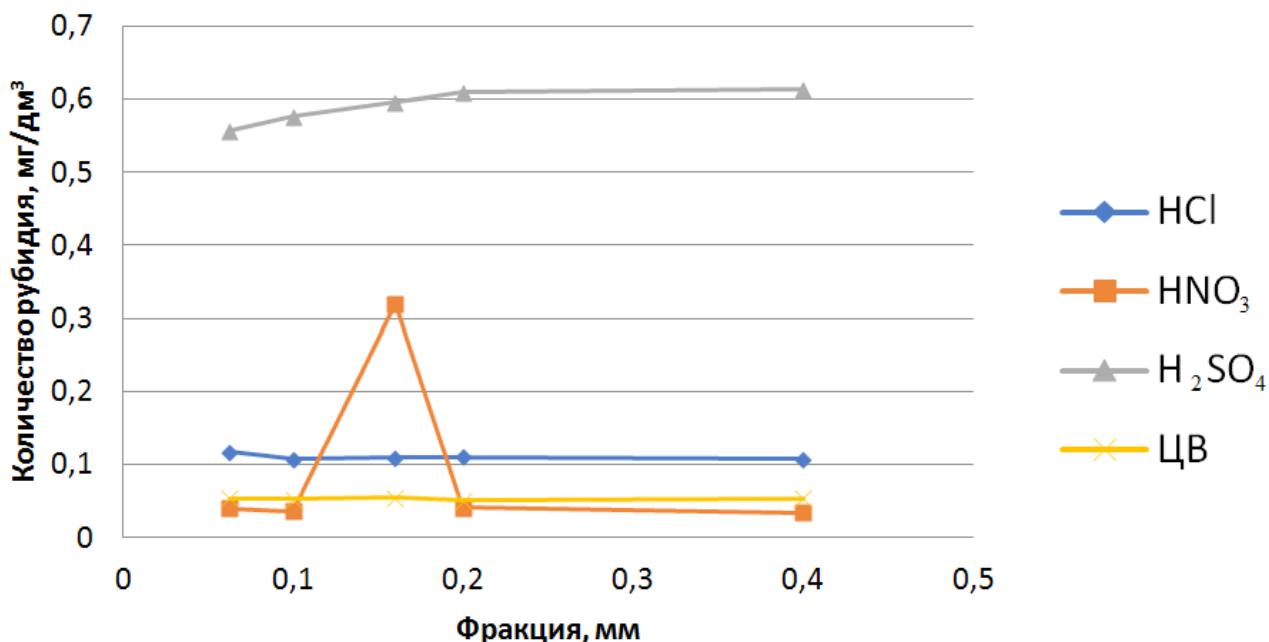


Рис. 4. График извлечения рубидия по фракциям в разных типах кислотного выщелачивания
Fig. 4. Graph of rubidium recovery by fractions in different types of acid leaching

Таким образом, в результате проведения исследований определена возможность гидрометаллургической переработки ЗШО, образующихся на Читинской ТЭЦ-2 при сжигании углей. При этом наиболее эффективным для извлечения редких и редкоземельных элементов из ЗШО является кислотное выщелачивание в сочетании с электромагнитной сепарацией и УЗ обработкой. В связи с этим в Забайкальском крае имеются все необходимые предпосылки для решения проблемы промышленного извлечения редких и редкоземельных элементов из ЗШО, в частности Читинской ТЭЦ-2. Немагнитная фракция, получаемая в результате электромагнитной сепарации ЗШО, как правило, содержит такие цветные металлы, как свинец, медь, цинк, а также благородные металлы (золото, серебро), что позволяет рассматривать ее в качестве потенциального источника данных элементов. Вместе с тем продукты переработки ЗШО могут найти широкое применение в строиндустрии (производстве цемента, бетона, гравия, кирпича и керамзита), в резинотехнической, текстильной и лакокрасочной промышленности, а также при производстве пластмасс и кровельных материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные экспериментальные исследования показали, что ЗШО Читинской ТЭЦ-2 могут быть использованы в качестве минерального сырья для получения редких и редкоземельных элементов посредством применения комбинированной схемы переработки, включающей электромагнитную сепарацию и кислотное выщелачивание с предварительной ультразвуковой обработкой пульпы. Вместе с тем с применением электромагнитной сепарации возможно получение железосодержащего концентрата и полиметаллического немагнитного продукта с перспективой дальнейшей металлургической переработки. При этом получаемые в результате переработки ЗШО побочные продукты, согласно имеющемуся мировому опыту, могут найти широкое применение в строиндустрии. Достигаемый при комплексной переработке ЗШО экологический эффект позволит существенным образом снизить техногенную нагрузку на окружающую среду района расположения золоотвала, а также в значительной степени повысить экономическую эффективность работы Читинской ТЭЦ-2, в том числе за счет предотвращенного ущерба от деградации почв и земель.

Список источников

1. Мязин В.П. Методы сепарации зольных уносов сжигания углей Восточного Забайкалья для извлечения из них редких элементов // Химия твердого топлива. 2006. № 1. С. 75–80.
2. Золотова И.Ю. Бенчмаркинг зарубежного опыта утилизации продуктов сжигания твердого топлива угольных ТЭС // Инновации и инвестиции. 2020. № 7. С. 123–128.
3. Heidrich C., Feuerborn H.-J., Weir A. Coal combustion products: a global perspective // VGB Powertech. 2013. Iss. 12. P. 46–52.
4. Sharma V., Akhai S. Trends in utilization of coal fly ash in India: a review // Journal of Engineering Design and Analysis. 2019. Vol. 2. Iss. 1. P. 12–16.
5. Шаванов Н.Д., Коновалова Н.А., Панков П.П., Руш Е.А. Изучение состава и свойств золошлаковых смесей с целью их утилизации в строительной индустрии // Актуальные проблемы техносферной безопасности: сб. тез. науч. трудов IV Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов, молодых учёных, преподавателей (г. Ульяновск, 20–25 мая 2022 г.). Ульяновск: УлГТУ, 2022. С. 134–137.
6. Бесполитов Д.В., Коновалова Н.А., Дабижка О.Н., Панков П.П., Руш Е.А. Влияние механоактивации золы уноса на прочность грунтобетонов на основе отходов производства // Экология и промышленность России. 2021. Т. 25. № 11. С. 36–41. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2021-11-36-41>.
7. Márquez A.J.C., Filho P.C.C., Rutkowski E.W., Isaac R.L. Landfill mining as a strategic tool towards global sustainable development // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 226. P. 1102–1115. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.057>.
8. Chang Huimin, Tan Haobo, Zhao Yan, Wang Ying, Wang Xuemei, Li Yanxia, et al. Statistical correlations on the emissions of volatile odorous compounds from the transfer stage of municipal solid waste // Waste Management. 2019. Vol. 87. P. 701–708. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.03.014>.
9. Sözer H., Sözen H. Waste capacity and its environmental impact of a residential district during its life cycle // Energy Reports. 2020. Vol. 6. P. 286–296. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.01.008>.
10. Енджиевская И.Г., Василовская Н.Г., Дубровская О.Г., Баранова Г.П., Чудаева А.А. Влияние механоактивации на стабилизацию свойств золы-уноса // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2018. Т. 11. № 7. С. 842–855.
11. Fan Jianguo, Wang Dongyuan, Qian Duo. Soil-cement mixture properties and design considerations for reinforced excavation // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2018. Vol. 10. Iss. 4. P. 791–797. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.03.004>.
12. Matinde E., Simate G.S., Ndlovu S. Mining and metallurgical wastes: a review of recycling and re-use practices // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2018. Vol. 118. Iss. 8. P. 825–844. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2018/v118n8a5>.
13. Konovalova N.A., Pankov P.P., Petukhov V., Fediuk R., Amran M., Vatin N.I. Structural formation of soil concretes based on loam and fly ash, modified with a stabilizing polymer additive // Materials. 2022. Vol. 15. Iss. 14. P. 4893. <https://doi.org/10.3390/ma15144893>.
14. Semenov P.A., Uzunian A.V., Davidenko A.M., Derevschikov A.A., Goncharenko Y.M., Kachanov V.A., et al. First study of radiation hardness of lead tungstate crystals at low temperatures // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2007. Vol. 582. Iss. 2. P. 575–580. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2007.08.178>.
15. Sharonova O.M., Yumashev V.V., Solovyov. L.A., Anshits A.G. The fine high-calcium fly ash as the basis of composite cementing material // Magazine of Civil Engineering. 2019. Iss. 7. P. 60–72. <https://doi.org/10.18720/MCE.91.6>.
16. Fulekar M.H., Dave J.M. Disposal of fly ash—an environmental problem // International Journal of Environmental Studies. 1986. Vol. 26. Iss. 3. P. 191–215. <https://doi.org/10.1080/00207238608710257>.
17. Satpathy H.P., Patel S.K., Nayak A.N. Development of sustainable lightweight concrete using fly ash cenosphere and sintered fly ash aggregate // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 202. P. 636–655. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.034>.
18. Власова В., Артемова О., Фомина Е. Определение направлений эффективного использования отходов ТЭС // Экология и промышленность России. 2017. Т. 21. № 11. С. 36–41. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2017-11-36-41>.
19. Худякова Л.И., Залуцкий А.В., Палеев П.Л. Использование золошлаковых отходов тепловых электростанций // XXI век. Техносферная безопасность. 2019. № 4. С. 375–391. <https://doi.org/10.21285/2500-1582-2019-3-375-391>.
20. Мязин В.П., Мязина В.И., Размахнин К.К., Шумилова Л.В. Исследования техногенных образований ТЭК Забайкалья как сложных геосистем и нетрадиционных источников минерального сырья // Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов: матер. междунар. науч.-практ. конф. (г. Чита, 23–27 ноября 2017 г.). Чита: ЗабГУ, 2017. Т. 1. С. 152–159.
21. Ling Yifeng., Wang Kejin, Li Wengui, Shi Guyu, Lu Ping. Effect of slag on the mechanical properties and bond strength of fly ash-based engineered geopolymers composites // Composites Part B: Engineering. 2019. Vol. 164. P. 747–757. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.01.092>.
22. Krechetov P., Chernitsova O., Sharapova A., Terskaya E. Technogenic geochemical evolution of chernozems in the sulfur coal mining areas // Journal of Soils and Sediments. 2019. Vol. 19. P. 3139–3154. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2010-7>.
23. Barabanshchikov Yu., Fedorenko I., Kostyrya S., Usanova K. Cold-bonded fly ash lightweight aggregate concretes with low thermal transmittance: review // International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies / eds. V. Murgul, M. Pasetti. Cham: Springer, 2019. Vol. 983. P. 858–866. https://doi.org/10.1007/978-3-030-19868-8_84.
24. Арбузов С.И., Ершов В.В., Пощупов А.А., Рихванов Л.П. Редкие элементы в углях Кузнецкого бассейна. Кемерово: ТПУ, 1999. 248 с.

References

1. Myazin V.P. Separation methods of coal combustion fly ash from Eastern Transbaikalia to recover rare elements. *Himiya tverdogo topliva = Solid Fuel Chemistry*. 2006;1:75-80. (In Russ.).
2. Zolotova I.Yu. Benchmarking best practices of coal combustion product utilization. *Innovacii i investicii*. 2020;7:123-128. (In Russ.).
3. Heidrich C., Feuerborn H.-J., Weir A. Coal combustion products: a global perspective. *VGB Powertech*. 2013;12:46-52.
4. Sharma V., Akhai S. Trends in utilization of coal fly ash in India: a review. *Journal of Engineering Design and Analysis*. 2019;2(1):12-16.
5. Shavanov N.D., Konovalova N.A., Pankov P.P., Rush E.A. Studying composition and properties of ash and slag mixtures for their disposal in construction industry. In: *Aktual'nye problemy tekhnosfernoj bezopasnosti: sbornik tezisov nauchnyh trudov IV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii studentov, aspirantov, molodyh uchonykh, prepodavatelej = Actual problems of technospheric safety: collected abstracts of scientific papers of the 4th International scientific and practical conference of students, postgraduate students, young scientists, teachers*. 20–25 May 2022, Ul'yanovsk. Ul'yanovsk: Ulyanovsk State Technical University; 2022, p. 134-137. (In Russ.).
6. Bespolitov D.V., Konovalova N.A., Dabizha O.N., Pankov P.P., Rush E.A. Influence of the mechanical activation of fly ash on strength of ground concrete based on waste production // *Ecology and Industry of Russia*. 2021;25(11):36-41. (In Russ.). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2021-11-36-41>.
7. Márquez A.J.C., Filho P.C.C., Rutkowski E.W., Isaac R.L. Landfill mining as a strategic tool towards global sustainable development. *Journal of Cleaner Production*. 2019;226:1102-1115. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.057>.
8. Chang Huimin, Tan Haobo, Zhao Yan, Wang Ying, Wang Xuemei, Li Yanxia, et al. Statistical correlations on the emissions of volatile odorous compounds from the transfer stage of municipal solid waste. *Waste Management*. 2019;87:701-708. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.03.014>.
9. Sözer H., Sözen H. Waste capacity and its environmental impact of a residential district during its life cycle. *Energy Reports*. 2020;6:286-296. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.01.008>.
10. Endzhievskaya I.G., Vasilovskaya N.G., Dubrovskaya O.G., Baranova G.P., Chudaeva A.A. The effect of mechanical activation on the stabilization of ash properties of Krasnoyarsk CHP. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii = Journal of Siberian Federal University. Engineering Technologies*. 2018;11(7):842-855. (In Russ.).
11. Fan Jianguo, Wang Dongyuan, Qian Duo. Soil-cement mixture properties and design considerations for reinforced excavation. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2018;10(4):791-797. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.03.004>.
12. Matinde E., Simate G.S., Ndlovu S. Mining and metallurgical wastes: a review of recycling and re-use practices. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2018;118(8):825-844. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2018/v118n8a5>.
13. Konovalova N.A., Pankov P.P., Petukhov V., Fediuk R., Amran M., Vatin N.I. Structural formation of soil concretes based on loam and fly ash, modified with a stabilizing polymer additive. *Materials*. 2022;15(14):4893. <https://doi.org/10.3390/ma15144893>.
14. Semenov P.A., Uzunian A.V., Davidenko A.M., Derevschikov A.A., Goncharenko Y.M., Kachanov V.A., et al. First study of radiation hardness of lead tungstate crystals at low temperatures. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2007;582(2):575-580. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2007.08.178>.
15. Sharonova O.M., Yumashev V.V., Solovyov. L.A., Anshits A.G. The fine high-calcium fly ash as the basis of composite cementing material. *Magazine of Civil Engineering*. 2019;7:60-72. <https://doi.org/10.18720/MCE.91.6>.
16. Fulekar M.H., Dave J.M. Disposal of fly ash—an environmental problem. *International Journal of Environmental Studies*. 1986;26(3):191-215. <https://doi.org/10.1080/00207238608710257>.
17. Satpathy H.P., Patel S.K., Nayak A.N. Development of sustainable lightweight concrete using fly ash cenosphere and sintered fly ash aggregate. *Construction and Building Materials*. 2019;202:636-655. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.034>.
18. Vlasova V., Artemova O., Fomina E. Determination of directions for the effective use of TPP waste. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and Industry of Russia*. 2017;21(11):36-41. (In Russ.). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2017-11-36-41>.
19. Khudyakova L.I., Zalutsky A.V., Paleev P.L. Use of ash and slag waste of thermal power plants. *XXI vek. Tekhnosfernaya bezopasnost' = XXI century. Technosphere Safety*. 2019;4:375-391. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2500-1582-2019-3-375-391>.
20. Myazin V.P., Myazina V.I., Razmakhnin K.K., Shumilova L.V. Studying technogenic formations of the Transbaikal fuel and energy company as complex geosystems and unconventional sources of mineral raw materials. In: *Kulaginskie chteniya: tekhnika i tekhnologii proizvodstvennyh processov: materialy mezdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Kulagin readings: equipment and technologies of production processes: proceedings of the international scientific and practical conference*. 23–27 November 2017, Chita. Chita: Transbaikal State University; 2017, vol. 1, p. 152-159. (In Russ.).
21. Ling Yifeng., Wang Kejin, Li Wengui, Shi Guyu, Lu Ping. Effect of slag on the mechanical properties and bond strength of fly ash-based engineered geopolymers composites. *Composites Part B: Engineering*. 2019;164:747-757. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.01.092>.
22. Krechetov P., Chernitsova O., Sharapova A., Terskaya E. Technogenic geochemical evolution of chernozems in the sulfur coal mining areas. *Journal of Soils and Sediments*. 2019;19:3139-3154. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2010-7>.
23. Barabanshchikov Yu., Fedorenko I., Kostyrya S. Usanova K. Cold-bonded fly ash lightweight aggregate concretes with low thermal transmittance: review. In: Murgul V., Pasetti M. (eds.). *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies*. Cham: Springer; 2019, vol. 983, p. 858-866. https://doi.org/10.1007/978-3-030-19868-8_84.

24. Arbuzov S.L., Ershov V.V., Potzeluyev A.A., Rikhvanov L.P. *Rare elements in Kuznetsk basin coals*. Kemerovo: Tomsk Polytechnic University; 1999, 248 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Размакнин Константин Константинович,
д.т.н., доцент,
доцент кафедры техносферной безопасности,
Забайкальский государственный университет,
672039, г. Чита, ул. Александро-Заводская, 30, Россия
✉ constantin-const@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0003-2944-7642>

Хатькова Алиса Николаевна,
д.т.н., профессор,
профессор кафедры химии,
Забайкальский государственный университет,
672039, г. Чита, ул. Александро-Заводская, 30, Россия
alisa1965.65@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6527-0026>

Шумилова Лидия Владимировна,
д.т.н., доцент,
профессор кафедры водного хозяйства,
экологической и промышленной безопасности,
Забайкальский государственный университет,
672039, г. Чита, ул. Александро-Заводская, 30, Россия
shumilovalv@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5991-9204>

Номоконова Татьяна Сергеевна,
аспирант,
Забайкальский государственный университет,
672039, г. Чита, ул. Александро-Заводская, 30, Россия
krutikova_1995@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0002-9096-864X>

Вклад авторов

Размакнин К.К. осуществлял научное руководство исследованиями, провел общее редактирование текста рукописи.
Хатькова А.Н. осуществила подбор списка литературных источников по тематике исследования. Шумилова Л.В. провела математическую обработку экспериментальных данных.
Номоконова Т.С. провела эксперименты и обобщила полученные результаты.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 08.07.2023 г.; одобрена после рецензирования 23.08.2023 г.; принята к публикации 11.09.2023 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Konstantin K. Razmakhnin,
Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of
Technosphere Safety, Transbaikal State University,
30, Aleksandro-Zavodskaya St., Chita 672039, Russia
✉ constantin-const@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0003-2944-7642>

Alisa N. Khatkova,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Chemistry,
Transbaikal State University,
30, Aleksandro-Zavodskaya St., Chita 672039, Russia
alisa1965.65@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6527-0026>

Lidia V. Shumilova,
Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Professor of the Department of Water Management,
Environmental and Industrial Safety,
Transbaikal State University,
30, Aleksandro-Zavodskaya St., Chita 672039, Russia
shumilovalv@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5991-9204>

Tatiana S. Nomokonova,
Postgraduate Student,
Transbaikal State University,
30, Aleksandro-Zavodskaya St., Chita 672039, Russia
krutikova_1995@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0002-9096-864X>

Contribution of the authors

Razmakhnin K.K. performed the scientific supervision of the research, carried out the general editing of the text of the manuscript.
Khatkova A.N. selected the list of literary sources on the subject of the study.
Shumilova L.V. performed mathematical processing of experimental data.
Nomokonova T.S. conducted experiments and summarized the results obtained.

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 08.07.2023; approved after reviewing 23.08.2023; accepted for publication 11.09.2023.

ПЕРСОНАЛИЯ

Профессор Александр Иннокентьевич Промптов*К 95-летию со дня рождения*

Александр Иннокентьевич Промптов – заслуженный деятель науки и техники РСФСР, один из известных специалистов России в области теории резания металлов, остаточных напряжений деталей машин при их механической обработке, технологии машиностроения.

Родился Александр Иннокентьевич в городе Иркутске 8 сентября 1928 года. По окончании школы в 1944 году поступил в Иркутский горно-металлургический институт на специальность «Горная электромеханика», в котором в 1948 году была открыта остродефицитная для страны специальность «Технология машиностроения». В составе первых 16 выпускников 1949 года этой специальности оказался и Александр Иннокентьевич путем перевода на последнем курсе обучения. Диплом с отличием позволил ему продолжить обучение в аспирантуре Томского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института под руководством знаменитого отечественного ученого резальщика профессора А.М. Розенберга. В апреле 1954 года А.И. Промптов успешно защитил кандидатскую диссертацию на тему: «Динамика скоростного фрезерования сталей торцовыми фрезами».

В мае 1954 года он принят в Иркутский горно-металлургический институт на должность ассистента кафедры Технологии машиностроения, где в то время уже работали первые с момента основания кафедры преподаватели Н.А. Гарбуз, В.М. Махнев, А.Л. Пискунов. Через 2 года Александр Иннокентьевич получил ученое звание доцента.

С момента прихода на работу в родной вуз Александр Иннокентьевич постоянно проявлял высокую гражданскую активность, организаторские способности и прекрасные деловые качества. В мае 1955 года он назначается деканом вечернего факультета. В июне 1961 года его переводят на должность проректора по учебной работе, которую он занимал до ноября 1965 года. В этот период на нем лежали также обязанности председателя строительной приемочной комиссии. При его непосредственном участии были построены и введены в действие 9 учебных корпусов и 4 студенческих общежития. Одновременно с этой работой в 1963 году он избирается заведующим кафедрой технологии машиностроения, металлорежущих станков и инструментов. После разделения последней в 1965 году возглавляет кафедру металлорежущих станков и инструментов, которой бессменно руководит до 1999 года. С июля 1983 года по май 1991 года он проректор по научной работе.

Входя в состав ректората Иркутского политехнического института, Александр Иннокентьевич активно участвовал в его развитии. Он является одним из основателей кафедр машиностроительного профиля в нашем университете. Благодаря его убежденности и логике при принятии решений, в Иркутском техническом вузе были организованы кафедры металлорежущих станков и инструментов, самолетостроения, машин и аппаратов химических производств, роботов и робототехнических систем, оборудования и автоматизации машиностроения; организована подготовка специалистов в области технологий машиностроения и автоматизации машиностроительных производств; созданы и оснащены учебные и научно-исследовательские лаборатории.

Важнейшим постоянным участком деятельности Александра Иннокентьевича было заведо-

вание кафедрой в течение 36 лет. Как заведующий кафедрой, к исполнению своих обязанностей относился с огромной ответственностью и никогда и никому другому не перепоручал их. Это касалось и формирования учебных планов, и организации учебного процесса, и распределения нагрузки, и обеспечения качества учебного процесса, ну и, естественно, организаций и проведения сотрудниками кафедры научных исследований. Он всегда проявлял огромную заботу в создании трудового коллектива, роста его профессиональной квалификации, воспитания в сотрудниках ответственного отношения к работе, чуткости и внимательности к студентам, умелой организации учебного процесса, совершенствования и расширения материальной базы лабораторий.

Наряду с административной работой профессор А.И. Промптов постоянно занимался преподаванием: читал студентам лекции по дисциплинам «Теория резания металлов», «Проектирование и производство металлорежущего инструмента», «Инструментальное обеспечение автоматизированных производств», «Качество поверхности, обработанной резанием», «Технологические остаточные напряжения», руководил курсовым и дипломным проектированием, принимал участие в работе государственных экзаменационных комиссий. А.И. Промптов обладает лучшими профессиональными качествами педагога: требовательностью, широкой эрудицией, кристальной честностью и чутким отношением к студентам, к которым всегда обращается на «Вы».

Неотъемлемой частью трудовой деятельности Александра Иннокентьевича является научная работа, которой он посвятил всю свою жизнь. Докторскую диссертацию на тему «Остаточные напряжения и деформации при обработке маложестких деталей резанием» защитил в 1975 году. Ученое звание профессора ему присвоено в 1978 году. Он с воодушевлением вовлекал в волшебный мир научных исследований студентов, сотрудников кафедры, работников машиностроительных предприятий. Под его руководством подготовлено и защищено 22 кандидатских и 7 докторских диссертаций, выполнен комплекс работ по внедрению общемашиностроительных нормативов резания при различных видах обработки. Профессор А.И. Промптов основал новое научное направление – «Повышение эксплуатационных свойств деталей машин технологическими методами». Список его научных трудов и учебно-методических разработок включает более 160 наименований. Методические разработки А.И. Промптова, его монографии и сегодня не потеряли актуальности, и многие годы используются преподавателями и студентами при изучении азов технологии машиностроения, являясь основой при освоении дисциплин профессионального блока для будущих технологов и конструкторов.

Будучи коммунистом с 1961 года, Александр Иннокентьевич много времени отдавал общественной работе. Неоднократно избирался членом партбюро первичной парторганизации, членом парткома института, членом бюро Свердловского райкома партии, членом секции «Теории резания и высокопроизводительного инструмента» научного совета «Технология механосборочного производства в машиностроении» при ГКНТ СССР, членом технико-экономического совета при Иркутском обкоме КПСС. По его инициативе при нашем университете был создан и долго функционировал диссертационный совет по научным специальностям «Технология машиностроения» и «Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки», где он исполнял обязанности председателя.

Заслуги А.И. Промптова в научно-педагогической и общественной деятельности отмечены орденами «Знак Почета» и «Дружба народов», Орденом Почета, почетным знаком им. В.И. Татищева «За пользу Отечеству», медалями «За трудовую доблесть», «Ветеран труда» и «В память 350-летия Иркутска», многочисленными грамотами. А.И. Промптов – Почетный профессор ИрГТУ, а в 1991 г. ему присвоено звание «Заслуженный деятель науки и техники РСФСР».

Александр Иннокентьевич Промптов до выхода на заслуженный отдых был бессменным членом редколлегии журнала «Вестник Иркутского государственного технического университета» (ныне «iPolytech Journal»), заместителем главного редактора журнала по направлению «Машиностроение и машиноведение».

Друзья, коллеги и ученики тепло поздравляют Александра Иннокентьевича со славным юбилеем и желают юношеского задора, крепкого здоровья и творческого долголетия!

Уважаемые коллеги!

**Мы приглашаем Вас к участию в нашем журнале в качестве
авторов, рекламодателей и читателей и сообщаем требования
к статьям, принимаемым к публикации**

I. Статья представляется в электронном и распечатанном видах. Рекомендуемый объем статьи не менее 10 000 знаков.

К статье прилагаются:

1. Экспертное заключение.
2. Название рубрики, в которой должна быть размещена Ваша статья; УДК; название статьи; реферат (аннотация), количество слов в реферате – не менее 200; ключевые слова (4-5); сведения об авторах: название учреждения, его адрес; фамилия, имя, отчество (полностью); ученая степень; звание и должность; контактный телефон и e-mail (вся информация предоставляется одним файлом).
3. Статья должна иметь личную подпись автора; на статьях адъюнктов и аспирантов должна стоять также подпись научного руководителя.

II. Текст статьи, сведения об авторах, реферат, ключевые слова, адрес учреждения, контактный телефон и E-mail должны быть также представлены по электронной почте: pgp@istu.edu в виде файла с расширением *.DOC – документа, построенного средствами Microsoft Word 97 или последующих версий.

При наборе статьи в Microsoft Word рекомендуются следующие установки:

- 1) параметры страницы и абзаца: отступы сверху и снизу – 2 см; слева и справа – 2 см; табуляция – 2 см; ориентация – книжная;
- 2) шрифт – Times New Roman, размер – 12, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;
- 3) при вставке формул использовать **Microsoft Equation 3** при установках: элементы формулы выполняются курсивом; для греческих букв и символов назначать шрифт Symbol, для остальных элементов – **Times New Roman**. Размер символов: обычный – **12 пт**, крупный индекс – 7 пт, мелкий индекс – 5 пт, крупный символ – 18 пт, мелкий символ – 12 пт. Все экспликации элементов формул необходимо также выполнять в виде формул;
- 4) рисунки, вставленные в текст, должны быть выполнены с разрешением 300 dpi, B&W – для черно-белых иллюстраций, Grayscale – для полутона, максимальный размер рисунка с надписью: ширина 150 мм, высота 245 мм и представлены в виде файла с расширением *.BMP, *.TIFF, *.JPG, должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. Схемы, графики выполняются во встроенной программе MS Word или в MS Excel, с приложением файлов (представляемые иллюстрации должны быть четкими и ясными во всех элементах);
- 5) библиографические ссылки должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ Р7.05 2008.

Внимание! Публикация статьи является бесплатной.

«iPolytech Journal» включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, в DOAJ, международный каталог периодических изданий «UlrichsPeriodicals Directory», EBSCO, в Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU), представлен в Научной электронной библиотеке «КиберЛенинка» (CYBERLENINKA), рассыпается в Российскую книжную палату, ВИНИТИ РАН.

**Статьи, опубликованные в журнале «iPolytech Journal», реферируются и рецензируются.
Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям.**

По вопросам публикации статей обращаться: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Д-215.
Телефон: **(3952) 40-57-56** – Привалова Галина Петровна, ответственный секретарь.
Факс: **(3952) 405-100**, e-mail: pgp@istu.edu

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

iPolytech Journal

Том 27, № 3. 2023 / Vol. 27, № 3. 2023



Редактор Я.В. Макшанцева
Дизайнер В.Г. Лисицын
Ответственный секретарь
Г.П. Привалова
Перевод на английский язык
Tomas A. Beavitt,
Н.Г. Поповой, В.В. Батицкой
Верстка В.Г. Дмитриев

Выход в свет 30.09.2023 г.
Формат 60x90/8.
Бумага офсетная. Печать трафаретная.
Усл. печ. л. 22.
Тираж 500 экз. Номер по реестру 105 / 3н.

Издание распространяется **бесплатно**