

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

iPolytech Journal

Tom 30, № 3. 2026 / Vol. 30, No. 3. 2026



<https://ipolytech.elpub.ru>

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

iPolytech Journal

Том 30, № 3. 2026 / Vol. 30, No. 3. 2026



<https://ipolytech.elpub.ru>



НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

«iPolytech Journal» – научный 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**.

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

(Ранее действовавшие Свидетельства:

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

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

ПИ № ФС77-47902 от 22 декабря 2011 г.;

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

Учредитель и издатель:

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

Издательство / типография:

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

Адрес редакции:

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

SCHOLARLY JOURNAL

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

Periodicity: Quarterly.

Articles are published in Russian and English.

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

(previously valid certificates:

И No 0327 of September 19, 1997; ПИ No 77-13046 of July 15, 2002;

ПИ No ФС77- 42847 of November 26, 2010,

ПИ No ФС77-47902 of December 22, 2011;

ПИ No ФС77-62813 of August 18, 2015).

Founder and Publisher:

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

Publishers:

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

Editorial office:

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



Редакционная коллегия

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

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

ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

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

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

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

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

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

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

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

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

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

ДОНСКОЙ И.Г., д.т.н., ведущий научный сотрудник Лаборатории термодинамики, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (Иркутск, Россия)

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

ЗВЕРОВЩИКОВ А.Е., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» Пензенского государственного университета (Пенза, Россия)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СТРИЖАК П.А., член-корреспондент РАН, профессор, заведующий Лабораторией тепломассопереноса Томского политехнического университета (Томск, Россия)

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

СУНЬ Хуалин, профессор Цзянсуского университета (Чженьцзян, Китай)

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

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

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

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

ЦЗИЧЖУН Чжу, доктор философии, профессор факультета электроэнергетики Южно-Китайского технологического университета (Гуанчжоу, Китай)

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

Editorial Board

CHIEF EDITOR:

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

DEPUTIES OF CHIEF EDITOR:

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

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

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

MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:

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

Vladimir Yu. BAZHIN, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Metallurgy, Saint Petersburg Mining University named after the Empress Catherine II (Saint Petersburg, Russia)

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

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

Yury S. BOROVNIKOV, Dr. Sci. (Eng.), Rector, Novgorod State University n.a. Yaroslav-the-Wise (Veliky Novgorod, Russia)

Josef GAVLIK, Full Professor, Department of Production Technology and Automation, Krakow University of Technology (Krakow, Poland)

Igor G. DONSKOY, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher of the Thermodynamics Laboratory, Melentiev Energy Systems Institute SB RAS (Irkutsk, Russia)

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

Alexander E. ZVEROVSHCHIKOV, Dr. Sci. (Eng.), Full Professor, Head of the Mechanical engineering Technology Department Penza State University (Penza, Russia)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Mohammad Mehdi RASHIDI, Professor Tongji University, (China)

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

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

Pavel A. STRIZHAK, Corresponding Member of RAS, Full Professor, Head of Heat and Power Process Automation Department Tomsk Polytechnic University (Tomsk, Russia)

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

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

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

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

Aleksander G. FISHOV, Dr. Sci. (Eng.), Full 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)

Zhu JIZHONG, PhD, Professor School of Electric Power Engineering South China University of Technology (Guangzhou, China)

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



Содержание

Машиностроение

- Зайдес С.А., Чан Т.З.** Определение геометрических параметров деформирующего инструмента для дорнования трубчатых деталей..... 400
- Корнеев В.С., Корнеев С.А.** Экспериментальная оценка феноменологической модели гипервязкоупругости эластичных элементов машин 412
- Лицин К.В., Басков С.Н., Морковник Д.А.** Повышение эффективности работы мультимодальной системы управления главным гидрораспределителем штамповочного пресса в тяжёлых условиях эксплуатации 427
- Овсянников В.Е., Путилова У.С., Лопатин Б.А., Кузнецова Е.М.** Использование сигналов виброакустики для оптимизации режимов точения на станках с числовым программным управлением..... 442

Энергетика

- Айзенберг Н.И., Барахтенко Е.А., Майоров Г.С.** Кооперативные стратегии поведения активных потребителей в интегрированной централизованно-распределённой энергетической системе (на англ. яз.) 451
- Воронин В.А., Замарин Д.О.** Управление электропотреблением зарядных станций электромобилей как альтернатива реконструкции распределительных сетей 466
- Галеев В.Г., Донской И.Г., Козлов А.Г., Пензик М.В., Isa Y.M.** Численное исследование влияния условий термоподготовки черемховского угля на свойства топливных брикетов 481
- Гвоздяков Д.В., Зенков А.В., Мальцев Л.И.** Диспергирование водоугольных суспензий путём распыления пневматической форсункой с винтовой закруткой распыляющего газового агента 491
- Губин П.Ю., Валиев Р.Т., Верховзин А.М. Губин П.Ю., Валиев Р.Т., Верховзин А.М.** Генеративно-состязательные искусственные нейронные сети для решения задач управления режимами и планирования развития энергосистем 504
- Местников Н.П., Манусов В.З.** Исследование способа повышения энергоэффективности солнечных электростанций на основе комбинирования отражательных систем и дискретного позиционирования фотоэлектрических модулей 524

Металлургия

- Алейников С.А., Белоусова Н.В.** Изучение кинетики сорбции лития сорбентом на основе слоистого двойного гидроксида алюминия-лития 544
- Шипнигов А.А, Епифоров А.В., Минеева Т.С.** Термодинамическая оценка процесса одновременного выщелачивания золота и урана сернокислыми тиоцианатными растворами 558

Персоналия

- На взлёте мудрости. (К 80-летию профессора Б. И. Зельберга)** 572

Content

Mechanical engineering

- Zaides S.A., Tran Tuan Dung.** Geometric parameters of burnishing tools for tubular parts (In Russ.)..... 400
- Korneyev V.S., Korneyev S.A.** Experimental validation of a phenomenological hyperviscoelastic model for elastic machine elements (In Russ.)..... 412
- Litsin K.V., Baskov S.N., Morkovnik D.A.** Multimodal control of the main hydraulic directional control valve of a forging press under severe operating conditions (In Russ.) 427
- Ovsyannikov V.E., Putilova U.S., Lopatin B.A., Kuznetsova E.M., Maslov D.A.** Vibroacoustic signals for optimizing turning modes of CNC machines (In Russ.)..... 442

Power engineering

- Aizenberg N.I., Barakhtenko E.A., Mayorov G.S.** Cooperative behavior strategies of prosumers in an integrated centralized–distributed energy system..... 451
- Voronin V.A., Zamarin D.O.** Electric demand management for electric vehicle charging stations as an alternative to distribution network reinforcement (In Russ.)..... 466
- Galeev V.G., Donskoy I.G., Kozlov A.N., Penzik M.V., Isa Yu.M.** Numerical analysis of the effects of Cheremkhovo coal thermal pretreatment on fuel briquette properties (In Russ.) 481
- Gvozdyakov D.V., Zenkov A.V., Maltsev L.I.** Atomization of coal-water slurries using a pneumatic atomizer with helical swirl of the atomizing gas (In Russ.) 491
- Gubin P.Yu., Valiev R.T., Verkhozin A.M.** Generative adversarial networks for power system operation and expansion planning (In Russ.) 504
- Mestnikov N.P., Manusov V.Z.** Energy efficiency of solar power plants combining reflective systems and discrete tracking of photovoltaic modules (In Russ.) 524

Metallurgy

- Aleynikov S.A., Belousova N.V.** Lithium sorption kinetics on a sorbent based on lithium-aluminum layered double hydroxide (In Russ.) 544
- Shipnigov A.A., Epiforov A.V., Mineeva T.S.** Thermodynamic assessment of simultaneous gold and uranium leaching with acidic thiocyanate solutions (In Russ.) 558



Уважаемые читатели!

Предлагаем вашему вниманию выпуск научного журнала «iPolytech Journal». Журнал включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, утвержденный ВАК Министерства науки и высшего образования РФ (**Категория К-1**), в Единый государственный перечень научных изданий «Белый список» (**Уровень 2**).

«iPolytech Journal» индексируется и архивируется в международной базе Chemical Abstracts (CAS), включен в международный каталог периодических изданий «UlrichsPeriodicals Directory», в базу данных EBSCO, в Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU), представлен в электронной библиотеке «Cyberleninka», библиотеке Oxford, Directory of Open Access Journals (DOAJ), рассылается в Российскую книжную палату, ВИНТИ РАН. Каждой статье присваивается цифровой идентификатор **DOI**.

«iPolytech Journal» реферируется и рецензируется

Приглашаем вас к активному творческому сотрудничеству по научным направлениям:

- **Машиностроение**

- 2.5.2. Машиноведение
- 2.5.5. Технология и оборудование механической и физико-технической обработки
- 2.5.6. Технология машиностроения

- **Энергетика**

- 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы
- 2.4.3. Электроэнергетика
- 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

- **Металлургия**

- 2.6.2. Металлургия черных, цветных и редких металлов

Редколлегия

Dear Readers!

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

The journal is included in the List of Leading Scientific Journals and Publications approved by the Higher Attestation Commission (VAK) under the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Category K-1), in which the main scientific results of doctoral and candidate dissertations must be published. It is also included in the Unified State List of Scientific Publications, the White List (Level 2).

iPolytech Journal is indexed and archived in the international Chemical Abstracts Service (CAS) database. It is included in Ulrich's Periodicals Directory, the EBSCO database, and the Scientific Electronic Library (eLIBRARY.RU). It is available in the Cyberleninka electronic library and the Oxford University Library; it is indexed by Scientific Indexing Services (SIS) and included in the Directory of Open Access Journals (DOAJ). It is sent to the Russian Book Chamber and the All-Russian Institute for Scientific and Technical Information (VINITI) of the Russian Academy of Sciences. Each article is assigned a digital object identifier (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



Определение геометрических параметров деформирующего инструмента для дорнования трубчатых деталей

С.А. Зайдес^{1✉}, Туан Зунг Чан²

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

Резюме. Цель работы – по результатам оценки влияния геометрических параметров дорна на силовые характеристики процесса и качество обработки при дорновании трубчатых деталей выбрать рациональные параметры деформирующего инструмента. В работе использован метод конечных элементов в программе Ansys 19.1 R2 для моделирования процесса дорнования трубчатых деталей, выполненных из стали 45. В ходе исследований изучено влияние угла заборного конуса, ширины калибрующего пояска и угла обратного конуса на распределение остаточных напряжений, упругопластических деформаций и силы тяги. Установлено, что при величине угла заборного конуса равном 2° сила тяги является наибольшей из-за сил трения, а если более 4°, качество обработанных поверхностей ухудшается. Показано, что уменьшение ширины калибрующего пояска (менее 2 мм) нарушает стабильность деформирования, а увеличение ширины свыше 3 мм приводит к повышению сил трения и образованию задиров. Определено, что при отсутствии обратного конуса или при его малой величине (2°) происходит резкий рост силы тяги из-за концентрации давления на острой кромке деформирующего инструмента и увеличения площади контакта. Показано, что при значении угла обратного конуса равном 8° на поверхности начинается появляться микронеровность, что в долгосрочной перспективе приведет к ухудшению качества обрабатываемой поверхности. Таким образом, на основе комплексного анализа процесса дорнования определены рациональные геометрические параметры дорна при натяге 0,4 мм: ширина калибрующего пояска 2,5 мм, угол заборного конуса 4° и угол обратного конуса 4–6°. Данные параметры обеспечивают минимальное значение силы тяги (54,2–54,4 кН) при высокой точности профиля поверхности (отклонение ≈ 3,5 мкм).

Ключевые слова: дорнование, поверхностная пластическая деформация, остаточные напряжения, очаг деформации, калибрующий поясок, угол заборного конуса

Для цитирования: Зайдес С.А., Чан Туан Зунг. Определение геометрических параметров деформирующего инструмента для дорнования трубчатых деталей // iPolytech Journal. 2026. Т. 30. № 3. С. 400–412. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2026-3-400-412>. EDN: UEPSJT.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Geometric parameters of burnishing tools for tubular parts

Semen A. Zaides^{1✉}, Tuan Dung Tran²

^{1,2}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

Abstract. This study evaluates the effects of mandrel geometry on the force characteristics and surface quality of burnished tubular parts to determine appropriate parameters for the burnishing tool. The burnishing of Steel 45 tubular parts was simulated using the finite element method in ANSYS 19.1 R2. The effects of the lead angle, sizing land width, and back taper angle on the distributions of drawing force, residual stresses, and elastoplastic strains were investigated. At a lead angle of 2°, the drawing force reached its maximum due to friction, whereas angles greater than 4° impaired the quality of the machined surface. A reduction in the sizing land width to less than 2 mm resulted in unstable deformation, while widths greater than 3 mm increased friction and caused galling. In the absence of a back taper or at a small back taper angle of 2°, the drawing force increased sharply owing to the larger contact area and pressure concentration at the sharp edge of the burnishing tool. At a back taper angle of 8°, surface micro-irregularities began to develop, potentially impairing surface quality. Based on a comprehensive analysis of the burnishing process, the recommended mandrel geometry was established for an interference of 0.4 mm: a sizing land width of 2.5 mm, a lead angle of 4°, and a back taper angle of 4–6°. These parameters provide a minimum drawing force of 54.2–54.4 kN while maintaining high surface profile accuracy, with a deviation of approximately 3.5 µm.

Keywords: mandrel drawing, surface plastic deformation, residual stresses, deformation zone, drawing cylinder, lead taper angle

For citation: Zaides S.A., Tran Tuan Dung. Geometric parameters of burnishing tools for tubular parts. *iPolytech Journal*. 2026;30(3):400-412. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2026-3-400-412>. EDN: UEPSJT.

ВВЕДЕНИЕ

Механическая обработка внутренних поверхностей цилиндрических деталей резанием по сравнению с обработкой наружных поверхностей является технологически более сложным и трудоемким процессом. Особенно заметно это отличие проявляется при обработке длинномерных трубчатых деталей повышенной точности. Кроме того, процессы точения и шлифования не позволяют достичь высоких механических и эксплуатационных требований к качеству поверхностного слоя деталей машин [1–3].

В качестве отделочно-упрочняющих и калибрующих операций достаточно успешно зарекомендовали себя процессы дорнования отверстий [4], которые позволяют не только обеспечить заданную точность и стабильность диаметрального размера, но и сформировать упрочненный слой с остаточными напряжениями сжатия.

Изделия различных конструкций из трубчатых деталей нередко используются для работы в условиях повышенных нагрузок. Например, корпуса гидравлических цилиндров подвергаются внутреннему давлению в десятки и даже сотни МПа. Прочность материала таких изделий можно существенно повысить пластическим деформированием. Весьма эффективны составные конструкции корпусов, состоящие из 2-х и более концентрично посаженных друг от друга цилиндров, скрепленных внутренними силами упругости. Наиболее перспективным методом сборки составного корпуса является дорнование трубчатых деталей [5].

В настоящее время не только в России, но и во всем мире технология холодного дорнования трубчатых деталей широко исследуется и активно применяется в машиностроении. Методы изготовления деталей из трубчатых заготовок дорнованием в определенной степени могут быть сопоставимы с известным процессом формообразования профилей, таким как волочение, которое применяется для обработки наружных цилиндрических поверхностей. Дорнование направлено на достижение иных, чем, например, опера-

ция раздачи качественных и количественных показателей: высокопроизводительное изготовление точных отверстий с минимальной шероховатостью. Дорнование отверстий в трубчатых деталях позволяет существенно экономить материал за счет частичного или полного устранения растачивания [6–10].

Наряду с такими важными факторами при выборе инструмента для процесса дорнования, как свойства материала, величина натяга, скорость обработки и другие, геометрические параметры дорна являются одними из ключевых факторов, оказывающих наибольшее влияние на качество процесса дорнования. Величина угла заборного конуса α является одним из важнейших геометрических параметров дорна, он влияет на силу тяги при дорновании и микрогеометрию обработанной поверхности. Ширина калибрующего пояска b позволяет повысить точность обработки и предохраняет от быстрого износа рабочего инструмента. А угол обратного конуса α_1 не только предохраняет рабочую часть дорна от механических повреждений, но и влияет на качество поверхностного слоя [11, 12].

Несмотря на значимость геометрических параметров деформирующего инструмента, большое количество работ и исследований, посвященных углубленному исследованию процесса дорнования, выбор геометрических параметров дорна остается изученным недостаточно полно. Что касается угла заборного конуса α , то, если Ю.Г. Проскуряков [13] считает оптимальным диапазон угла заборного конуса $2-4^\circ$, то А.Н. Исаев [2] предлагает диапазон этого угла $4-8^\circ$. При данном в отношении ширины калибрующего пояска b и величины заднего угла α_1 имеется очень мало конкретных исследований, посвященных их оптимальным величинам. Чаще всего их принимают равными некоторым потенциально подходящим величинам, взятых из литературы или из заводской практики. С другой стороны, ранее метод конечных элементов не был столь широко развит, как в настоящее время, поэтому комплексная оценка геометрических параметров дорна

была затруднена и могла сопровождаться большими погрешностями. Исходя из этого достаточно актуально проведение системного исследования влияния геометрических параметров деформирующего инструмента для дорнования путем выбора их рациональных величин [14–16].

Цель работы: по результатам оценки влияния геометрических параметров дорна на силовые характеристики процесса и качество обработки при дорновании трубчатых деталей выбрать рациональные параметры деформирующего инструмента.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для достижения поставленной цели исследования и получения достоверных результатов о влиянии геометрических параметров деформирующего инструмента на процесс дорнования использован метод конечных элементов³ (МКЭ) в среде ANSYS Mechanical 19.2 R1 (модуль Static Structural). Поскольку процесс дорнования сопровождается интенсивным пластическим деформированием и значительным изменением формы, в решателе включена опция больших деформаций (Large Deflection). Это позволяет корректно моделировать геометрическую нелинейность

контактной задачи. Данный исследовательский подход дает комплексную оценку таких параметров, как сила тяги при дорновании, качество поверхности после обработки, величина максимальных временных и остаточных напряжений в стенке деталей.

На рис. 1 представлены основные элементы деформирующего инструмента (а) и 3D-модель процесса дорнования трубчатых деталей, реализуемого по схеме сжатия (б) заготовки. Основными геометрическими параметрами инструмента и заготовки являются i – натяг, мм; α , α_1 – углы заборного и обратного конуса, град; b – ширина калибрующего пояса, мм; L – длина заготовки, мм; $L_{\text{тол.}}$ – толщина заготовки, мм; $F_{\text{дор.}}$ – сила тяги при дорновании, Н.

Дорнование представляет собой обработку деталей в условиях осесимметричного поверхностного деформирования, поэтому в качестве образцов достаточно исследовать лишь четверть модели в продольном направлении [17, 18]. Это позволяет уменьшить затраты вычислительных ресурсов компьютерной техники и сократить время решения дифференциальных задач. Модель состоит из трех частей: дорн 4, трубчатая заготовка 5 и опора 6 – в соответствии со схемой сжатия цилиндра (рис. 1).

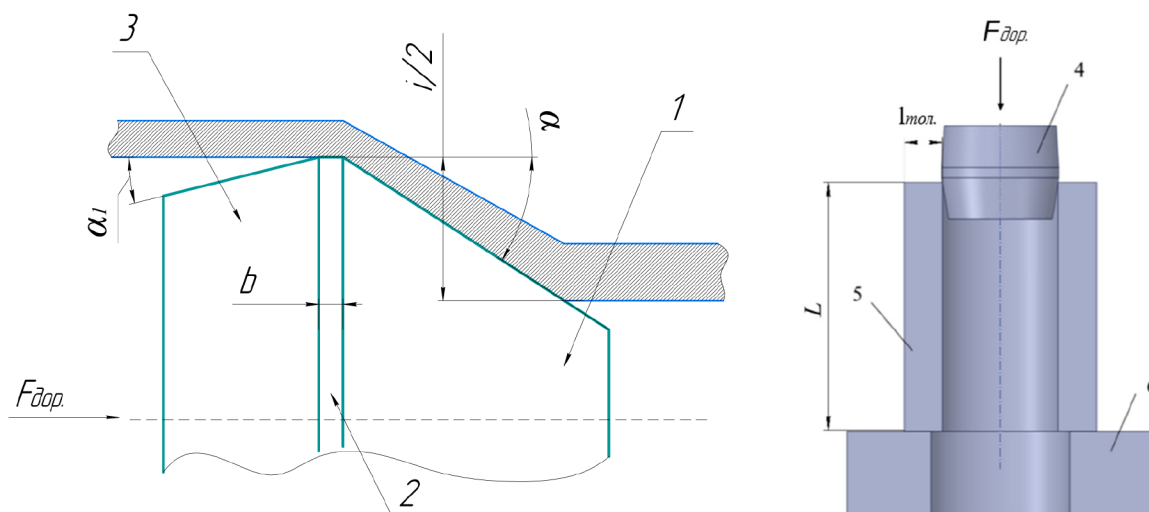


Рис. 1. Основные элементы деформирующего инструмента (а) и 3D-модель процесса дорнования трубчатых деталей (б): 1 – заборный конус; 2 – калибрующий пояс; 3 – обратный конус; 4 – дорн; 5 – трубчатая заготовка; 6 – опора; α , α_1 – углы заборного и обратного конуса; i – натяг; $F_{\text{дор.}}$ – сила тяги при дорновании

Fig. 1. Main elements of the deforming tool (a) and 3D model of the mandrel drawing of tubular parts (b): 1 – taper lead; 2 – drawing cylinder; 3 – back taper; 4 – mandrel; 5 – tubular workpiece; 6 – support; α , α_1 – lead and back taper angles; i – interference; $F_{\text{mand.}}$ – drawing force during mandrel drawing

³Паршин С.В. Конечно-элементное моделирование в решении прочностных задач машиностроения: учеб. пособ. Екатеринбург: УрФУ, 2024. 68 с. EDN: HWIZJZ.

Важным этапом при моделировании процесса дорнования является правильная передача свойств материала заготовки, опоры и самого дорна. Обычно материал дорна имеет модуль упругости в 2,5–3 раза выше, чем у материала заготовки. Поэтому дорн принят как абсолютно твердое тело (Rigid Body), его внутренние напряжения и деформации не учитывали. В качестве материала трубчатых заготовок и опор выбрана сталь 45 со следующими свойствами: плотность – 7850 кг/м³; модуль продольной упругости $E = 2,0 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$ [19, 20]. Упрочнение материала в процессе пластической деформации учитывали путем ввода механических свойств стали 45 в программу Ansys с помощью модели мультиматериального изотропного упрочнения. При выполнении имитационного анализа в программе Ansys построена конечно-элементная сетка для моделей. Процесс построения сетки был реализован на основе метода развертки (Sweep). Конечно-элементная сетка имела размер 0,2 мм для трубчатой заготовки и 2 мм для опоры, потому что результаты напряжений и деформаций в опоре не учитываются. В итоге в модели использованы 64882 элемента и 285512 узлов. Симметрия модели задана приложением опоры без трения (Frictionless Support) по поверхности, со стороны которой были отброшенные части модели. Кроме того, еще одним необходимым граничным условием является жесткая заделка (Fixed Support) нижней поверхности опоры для полного ограничения перемещений основания во всех направлениях.

В реальной технологии при дорновании стальных заготовок используются технологические масла (сурепное, льняное и др.). С использованием технологических масел коэффициент трения между дорном и заготовкой составляет 0,06–0,08 [14]. Поэтому в Ansys Static Structural также в контактной паре «инструмент – заготовка» задан тип тре-

ния (Frictional) со средним значением коэффициента трения 0,07. А контактная пара «заготовка – опора» задавалась как «контакт без разделения» (No Separation). Расчет выполнен за один шаг нагружения.

На рис. 2 представлены основные параметры цилиндрической поверхности детали после дорнования. После процесса дорнования (см. рис. 2) обработанная поверхность детали имеет микроотклонения с высотой δ (в мкм). После прохода дорна часть металла упруго восстанавливается, и эта упругая деформация приводит к тому, что полученный диаметр детали после обработки оказывается меньше диаметра дорна, поэтому величина остаточной радиальной деформации $\Delta d_3/2$, мм ($\Delta d_3/2 = r_{\text{ост}} - r_3$, где $r_{\text{ост}}$ – остаточный радиус, мм; r_3 – радиус заготовки, мм) будет меньше половины величины натяга $i/2$.

Основные данные процесса дорнования представлены в таблице.

Для оценки обобщенного напряженного состояния в разных точках детали определена интенсивность временных и остаточных напряжений (von – Mises) по осям O_z (осевые $\sigma_z^{\text{вр}}$, $\sigma_z^{\text{ост}}$), O_y (радиальные $\sigma_r^{\text{вр}}$, $\sigma_r^{\text{ост}}$), O_x (тангенциальные $\sigma_\phi^{\text{вр}}$, $\sigma_\phi^{\text{ост}}$) [21, 22]. При

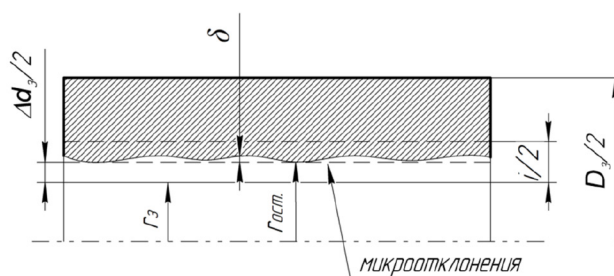


Рис. 2. Основные параметры цилиндрической поверхности детали после дорнования r_3 – начальный радиус детали; $r_{\text{ост}}$ – радиус детали после дорнования; $\Delta d_3/2$ – остаточная радиальная деформация; δ – высота микроотклонений

Fig. 2. Main parameters of the cylindrical surface of the part after mandrel drawing r_p – initial radius of the part; r_{res} – part radius after mandrel drawing; $\Delta d_p/2$ – residual radial deformation; δ – height of micro-microdeviations

Данные процесса дорнования
Mandrel drawing data

Данные процесса	Величина параметров
Внутренний диаметр детали d_3	30 мм
Наружный диаметр детали D_3	50 мм
Длина детали L	60 мм
Натяг i	0,4 мм
Скорость дорнования	60 мм/с

этом напряженное состояние по Мизесу при использовании главных напряжений определено по интенсивности временных $\sigma_i^{вп}$ и остаточных $\sigma_i^{ост}$ напряжений (1):

$$\sigma_i^{вп} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \left[(\sigma_z^{вп} - \sigma_\phi^{вп})^2 + (\sigma_\phi^{вп} - \sigma_r^{вп})^2 + (\sigma_r^{вп} - \sigma_z^{вп})^2 \right]}. \quad (1)$$

По аналогичной формуле определена интенсивность остаточных напряжений ($\sigma_i^{ост}$). Интенсивность относительной деформации ε_i рассчитывается с учетом трех компонент, соответствующих главным направлениям цилиндрической системы координат: осевой ε_z (по оси O_z), радиальной ε_r (по оси O_y), тангенциальной ε_ϕ (по оси O_x). Величина ε_i определяется по формуле (2) [23, 24]:

$$\varepsilon_i = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \left[(\varepsilon_z - \varepsilon_\phi)^2 + (\varepsilon_\phi - \varepsilon_r)^2 + (\varepsilon_r - \varepsilon_z)^2 \right]}. \quad (2)$$

ВЕРИФИКАЦИИ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ

Для верификации точности метода моделирования и оценки влияния размеров сетки на результаты расчета выполнено сравнение величин диаметральных остаточных деформаций по отверстию в зависимости от относительного натяга $i/d_3 = 1,33\%$ при размере сетки 0,1 мм, 0,2 мм с экспериментальными данными Ю.Г. Проскурякова [13] для стали 45. При этом, несмотря на применение в эксперименте многозубых дорнов, величина диаметральных остаточных деформаций по отверстию происходит после выхода из очага деформации наибольшего зуба инструмента, так как величина остаточных деформаций не зависит от числа зубьев, а только от общего натяга дорнования. Это обуславливает минимальное расхождение данных значений с результатами, полученными на модели с одним зубом. На рис. 3 представлены результаты сравнения.

Анализ рис. 3 показывает, что отклонение результатов расчета радиальных остаточных деформаций по отверстию цилиндра в зависимости от относительного натяга $i/d_3 = 1,33\%$ для стали 45 при размерах сетки 0,2 мм, 0,1 мм и по экспериментальным данным Ю.Г. Проскурякова не превышает 3 %. Это позволяет сделать вывод о высокой достоверности выбранного метода моделирования и полученных результатов.

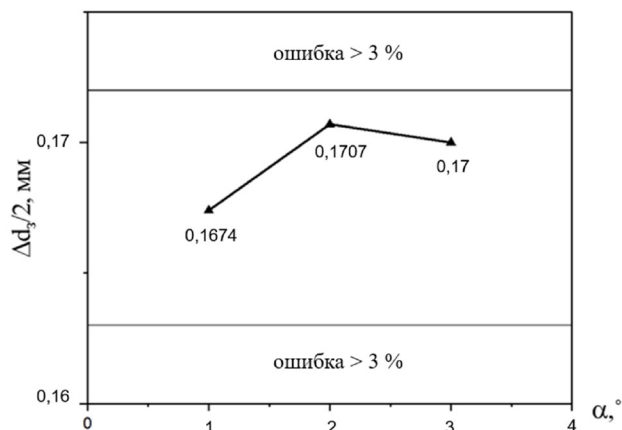


Рис. 3. График результатов оценки сходимости и достоверности метода исследования при относительном натяге $i/d_3 = 1,33\%$: 1 – при размере сетки 0,2 мм; 2 – при размере сетки 0,1 мм; 3 – по экспериментальным данным Ю.Г. Проскурякова [13]

Fig. 3. Graph of the results of convergence and validity assessment of the research method at a relative interference fit of $i/d_3 = 1,33\%$: 1 – with the mesh size of 0.2 mm; 2 – with the mesh size of 0.1 mm; 3 – according to the experimental data of Yu. G. Proskuryakov [13]

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Заборный конус. Сила тяги при дорновании $F_{дор.}$ имеет большое практическое значение, так как позволяет должным образом выбрать конструктивные размеры технологического оборудования, рассчитать на прочность рабочий инструмент, проверить прочность и устойчивость обрабатываемых деталей. При этом правильный выбор рационального угла заборного конуса α помогает обеспечить оптимальную величину силы тяги $F_{дор.}$ при дорновании. На рис. 4 представлена зависимость силы тяги $F_{дор.}$ от исследуемых углов заборного конуса α , которая показывает, что минимальное значение силы тяги $F_{дор.}$ достигается при угле $\alpha = 4^\circ$ ($F_{дор.} = 54,385$ кН).

Следует отметить, что при малом угле α , составляющем 2° , сила тяги $F_{дор.}$ при дорновании ($F_{дор.} = 61,36$ кН) оказывается больше, чем при $\alpha = 4^\circ$. Это подтверждает тот факт, что при уменьшении угла заборного конуса α до определенного предела площадь контакта между инструментом и поверхностью детали существенно увеличивается, и как следствие, возрастает сила трения, что требует повышения силы тяги для его преодоления. В то же время при увеличении α с 6 до 8° сила тяги $F_{дор.}$ пропорционально возрастает из-за образования дополнительных сдвигов металла в направлении движения инструмента.

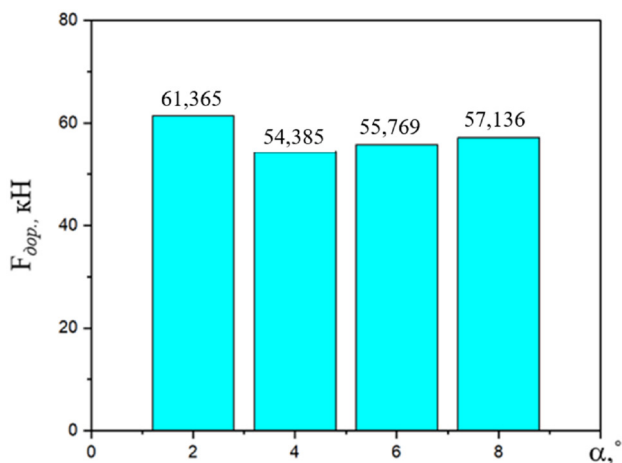


Рис. 4. Гистограммы зависимости силы тяги $F_{дор}$ при дорновании от величины угла заборного конуса α при натяге $i = 0,4$ мм

Fig. 4. Histograms of the dependence of the drawing force F_{mand} during mandrel drawing on the lead taper angle α at the interference fit of $i = 0.4$ mm

Одним из важнейших преимуществ обработки трубчатых деталей методом дорнования является обеспечение высокой точности обработанной поверхности детали, которая в некоторых случаях значительно выше по сравнению с традиционными методами обработки резанием. Однако при неправильном выборе угла заборного конуса дорна α может быть спровоцировано чрезмерное деформирование поверхностного слоя, что в итоге приведет к увеличению геометрических погрешностей. На основе результатов конечно-элементного моделирования представляется возможным достоверно оценить качество деформируемой обработанной поверхности. На рис. 5 показан характер радиальной деформации внутренней поверхности $\Delta d_3/2$, мм трубчатых деталей после полного выхода дорна из зоны контактного взаимодействия.

Поскольку в процессе дорнования из-за перемещения металла и начального взаимодействия дорна с торцом краевые участки трубчатой детали подвергаются значительной деформации, оценке радиальной деформации подлежал лишь участок поверхности, отстоящий от обоих торцов на расстоянии 10 мм.

По рис. 5 видно, что уровень радиальной остаточной деформации $\Delta d_3/2$ для $\alpha = 4, 6$ и 8° достигает примерно 0,162 мм, что составляет около 80 % от половины натяга

($i/2 = 0,2$ мм). (В то же время при $\alpha = 2^\circ$ данное значение составляет лишь около 74 %, что существенно ниже.) Это свидетельствует о том, что материал деталей перешел в состояние полностью пластического деформирования и в этом случае при $\alpha = 4^\circ$ достигается такой же уровень радиальной деформации, как и при $\alpha = 6$ и 8° .

Общая тенденция заключается в том, что при малом угле α контактное давление распределяется на более протяженном участке, в результате чего увеличивается очаг деформации, но при этом поверхностный слой подвергается более интенсивному упругому восстановлению по сравнению с другими вариантами. В том случае, когда $\alpha = 2^\circ$, сила трения приводит к смятию и наложению поверхностного слоя. В результате этого после выхода дорна из очага деформации происходит интенсивное упругое восстановление поверхности, что вызывает неравномерную деформацию поверхностного слоя и, как следствие, большую волнистость поверхности. При $\alpha = 4^\circ$ качество обработанной поверхности оказывается наилучшим среди рассмотренных случаев, линии профиля поверхности более равномерны и прямолинейны. При дальнейшем увеличении α до 6 и 8° поверхность становится все более неровной. Это позволяет сделать закономерный вывод, что чем короче очаг деформации, тем хуже качество обработанной поверхности.

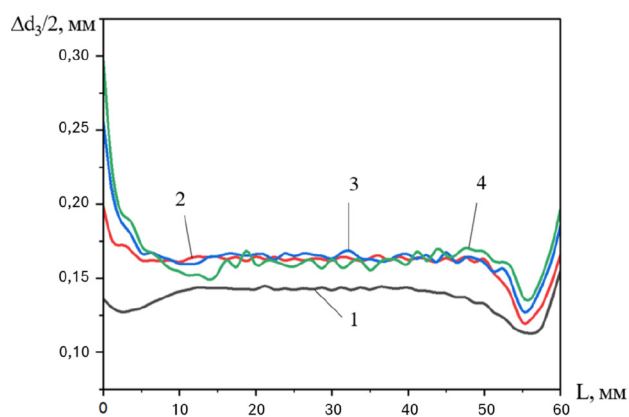


Рис. 5. Графики величины радиальной остаточной деформации на внутренней поверхности деталей по длине L после обработки разными дорнами с натягом $i = 0,4$ мм; 1 – $\alpha = 2^\circ$; 2 – $\alpha = 4^\circ$; 3 – $\alpha = 6^\circ$; 4 – $\alpha = 8^\circ$

Fig. 5. Graph of the nature and magnitude of radial residual deformation on the inner surface of the part along the length L after burnishing with different mandrels with interference fit: $i = 0.4$ mm; 1 – $\alpha = 2^\circ$; 2 – $\alpha = 4^\circ$; 3 – $\alpha = 6^\circ$; 4 – $\alpha = 8^\circ$

На рис. 6 представлены результаты распределения компонентов остаточных напряжений по толщине стенки деталей (в зависимости от радиуса). Как видно из рис. 6, компоненты остаточных напряжений наглядно показывают, что при $\alpha = 2^\circ$ максимальные величины компонентов остаточных напряжений являются наименьшими по сравнению с другими случаями углов заборного конуса α ($\sigma_r^{\text{ост}} = -24$ МПа, $\sigma_\theta^{\text{ост}} = -215$ МПа и $\sigma_z^{\text{ост}} = 345$ МПа), что также согласуется с тем, что при $\alpha = 2^\circ$ пластическое деформирующее воздействие дорна на деталь является самым слабым. Следует отметить, что при $\alpha = 2^\circ$ окружное остаточное напряжение $\sigma_\theta^{\text{ост}}$ непосредственно на внутренней поверхности дости-

гает значения $+30,2$ МПа, это единственный случай, когда величина $\sigma_\theta^{\text{ост}}$ на поверхности имеет положительный знак, что означает, что поверхность подверглась сжатию вместо пластического растяжения. Это напрямую влияет на усталостную прочность поверхностного слоя детали в процессе эксплуатации.

Что касается дорнов с большими значениями α , максимальные величины компонентов остаточных напряжений примерно сопоставимы, при этом максимальное окружное остаточное напряжение ($\sigma_\theta^{\text{ост}} = -215$ МПа) при $\alpha = 6^\circ$ является наибольшим. Следует отметить, что компоненты осевых остаточных напряжений $\sigma_z^{\text{ост}}$ для $\alpha = 6$ и 8° имеют тенденцию, совершенно отличную от

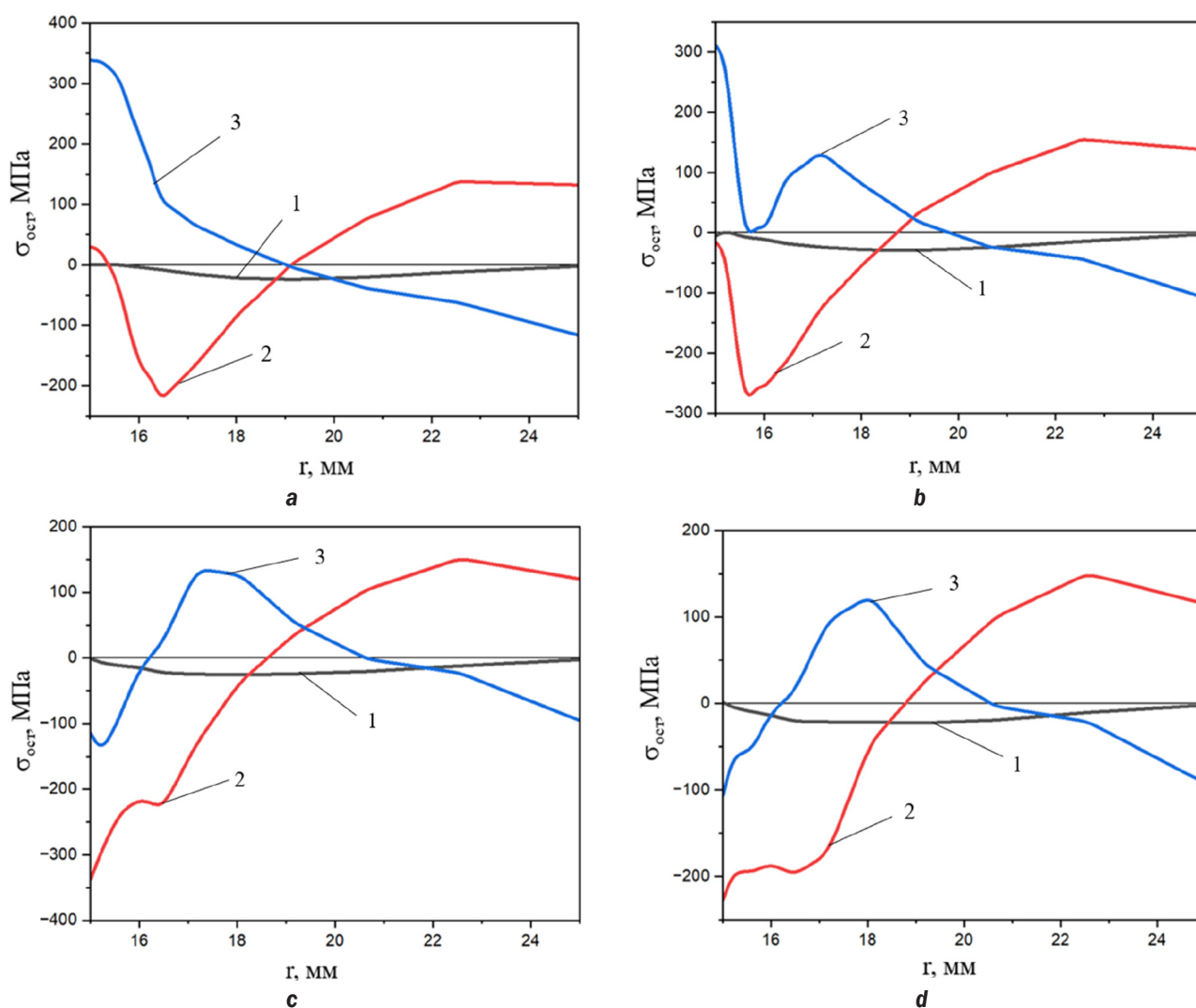


Рис. 6. Графики распределения компонентов остаточных напряжений по толщине стенки трубчатых деталей (в зависимости от радиуса (r) при натяге $i = 0,4$ мм: а - $\alpha = 2^\circ$; б - $\alpha = 4^\circ$; в - $\alpha = 6^\circ$; д - $\alpha = 8^\circ$ (1 - радиальные $\sigma_r^{\text{ост}}$; 2 - окружные $\sigma_\theta^{\text{ост}}$; 3 - осевые $\sigma_z^{\text{ост}}$)

Fig. 6. Graph of the distribution of residual stress components across tubular part wall thickness (as a function of radius (r) at interference fit of $i = 0.4$ mm: а - $\alpha = 2^\circ$; б - $\alpha = 4^\circ$; в - $\alpha = 6^\circ$; д - $\alpha = 8^\circ$ (1 - radial σ_r^{res} ; 2 - circumferential $\sigma_\theta^{\text{res}}$; 3 - axial σ_z^{res})

дорнов с $\alpha = 4^\circ$. Сравнивая распределение осевых остаточных напряжений $\sigma_z^{\text{ост}}$, при $\alpha = 6$ и 8° видно, что обе поверхности сжаты, но это вызывает опасный пик растяжения (+120...+150 МПа) в середине стенки. Что создает некоторый риск зарождения скрытых усталостных трещин внутри детали.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что угол заборного конуса $\alpha = 4^\circ$ является наиболее рациональным среди всех рассмотренных вариантов. В связи с этим для дальнейшей оценки ширины калибрующего пояса и угла обратного конуса α_1 значение угла α принято равным 4° .

Калибрующий пояс. На рис. 7 представлены значения интенсивностей максимальных временных и максимальных остаточных напряжений при дорновании без калибрующего пояса и с калибрующим пояском с разной шириной b (до 4 мм).

Следует отметить, что ширина калибрующего пояса b не оказывает существенного влияния на интенсивность максимальных временных и остаточных напряжений, поскольку разница этих значений между разными случаями, включая вариант без калибрующего пояса $b = 0$ мм, незначительна (максимальное расхождение составляет около 50 МПа). Тем не менее, данный параметр все же заслуживает внимания. Результаты показывают, что интенсивность максимальных временных и остаточных напряжений постепенно возрастает при увеличении b от 0 мм до 2 мм, после чего стабилизируется и плавно снижается в диапазоне от 3 мм до 4 мм. При $b = 2-3$ мм интенсивность остаточных напряжений достигает 360 МПа, что соответствует пределу текучести σ_T для стали 45. При данной величине b интенсивность максимальных остаточных напряжений $\sigma_i^{\text{ост}}$ и пластическое воздействие инструмента на деталь являются максимальными, положительно влияя на эффективное повышение усталостной прочности и износостойкости деталей машин.

На рис. 8 представлена зависимость силы тяги $F_{\text{дор}}$ при дорновании от ширины калибрующего пояса b . Можно отметить, что при отсутствии калибрующего пояса сила тяги при дорновании $F_{\text{дор}}$ является наименьшей, так как с металлом контактирует только заборный конус, а сила трения при этом минимальна, однако величина силы тяги $F_{\text{дор}}$ все же остается довольно большой (49,8 кН),

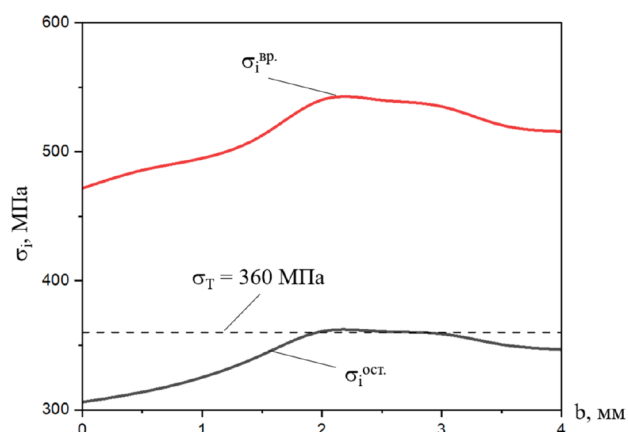


Рис. 7. Графики влияния ширины калибрующего пояса b на интенсивность максимальных временных и остаточных напряжений ($\sigma_T = 360$ МПа)

Fig. 7. Graph of the influence of the drawing cylinder width b on the intensity of maximum temporary and residual stresses ($\sigma_T = 360$ MPa)

поскольку упругая реакция, направленная перпендикулярно направлению движения дорна, создает значительное давление на заднюю кромку инструмента.

В то же время с увеличением ширины калибрующего пояса b силы тяги $F_{\text{дор}}$ заметно возрастают, особенно в диапазоне от $b = 2,5$ мм до $b = 4$ мм, когда $F_{\text{дор}}$ увеличивается с 54,4 до 60,9 кН, тогда как в интервале от $b = 0,5$ мм до $b = 2,5$ мм усилия дорнования не имеют столь значительных отличий.

Главное влияние калибрующего пояса заключается в обеспечении качества обработанной поверхности. На рис. 9 представлены величины средней радиальной остаточной

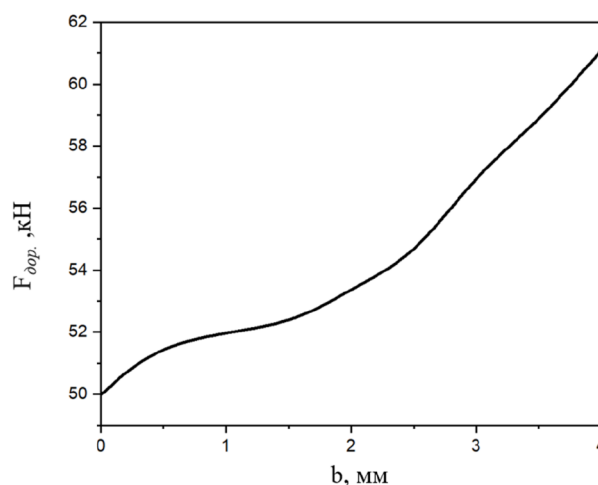


Рис. 8. График зависимости силы тяги $F_{\text{дор}}$ при дорновании от ширины калибрующего пояса b

Fig. 8. Graph of the dependence of the drawing force F_{mand} during mandrel drawing on drawing cylinder width b

деформации $\Delta d_3/2_{\text{сред.}}$ на среднем участке трубчатой детали (см. рис. 9 а), а также средние величины отклонения $\delta_{\text{сред.}}$ поверхности после обработки (см. рис. 9 б). Поскольку на обоих торцах отверстия обычно проявляется действие краевых эффектов, то для оценки цилиндрической поверхности после дорнования выбран участок в интервале L от 10 до 50 мм.

Из рис. 9 а видно, что средняя величина радиальной остаточной деформации $\Delta d_3/2_{\text{сред.}}$ при отсутствии калибрующего пояска является крайне низкой (всего около 0,07 мм), что значительно меньше половины величины натяга ($i/2 = 0,2$ мм). Данное значение постепенно возрастает и при $b = 2-4$ мм достигает порядка 0,162–0,164 мм. Это свидетельствует о том, что при калибрующем пояске $b = 2-4$ мм процесс деформирования можно считать установившимся. При отсутствии пояска или при $b < 2$ мм после дорнования величина упругой зоны оказывается слишком высокой, в результате чего величина радиальной остаточной деформации $\Delta d_3/2_{\text{сред.}}$ остается очень низкой. Только при $b \geq 2$ мм это упругое восстановление эффективно сдерживается и стабилизируется калибрующим пояском, благодаря чему величина радиальной остаточной деформации $\Delta d_3/2_{\text{сред.}}$ достигает существенно больших значений.

В то же время калибрующий поясок способствует повышению точности обработанной поверхности. Из анализа рис. 9 б видно, что при $b = 2,5$ мм достигаются минимальные отклонения поверхности детали после

дорнования (около 3,5 мкм). При дальнейшем увеличении ширины b калибрующего пояска формирующие значительные силы трения, которые могут стать причиной образования задиров, что ведет к росту отклонения цилиндрической поверхности после обработки, в частности при $b = 4$ мм, данная величина достигает порядка 5,9 мкм.

Обратный конус. На рис. 10 представлены величины силы тяги $F_{\text{дор.}}$ при дорновании инструментами с разными углами обратного конуса α_1 (вариант 0 означает дорн без обратного конуса).

При дорновании инструментом без обратного конуса создаются сосредоточенное нормальное давление и большая сила трения на кромке инструмента. По этой причине при отсутствии обратного конуса сила тяги $F_{\text{дор.}}$ достигает максимальной величины (около 59,19 кН). При малых значениях угла α_1 площадь контакта между инструментом и заготовкой увеличивается. Вследствие этого, хотя инструмент и не испытывает давления от упругой деформации на острой кромке, сила трения на поверхности контакта частично возрастает, что приводит к повышенному значению силы тяги $F_{\text{дор.}} \approx 57,87$ кН по сравнению с остальными углами α_1 . Однако при увеличении угла α_1 от 4 до 8° существенной разницы между величинами силы тяги $F_{\text{дор.}}$ не наблюдается, которые колеблются в интервале 54,21–54,40 кН.

На рис. 11 показан характер радиальной деформации $\Delta d_3/2$ на внутренней поверхно-

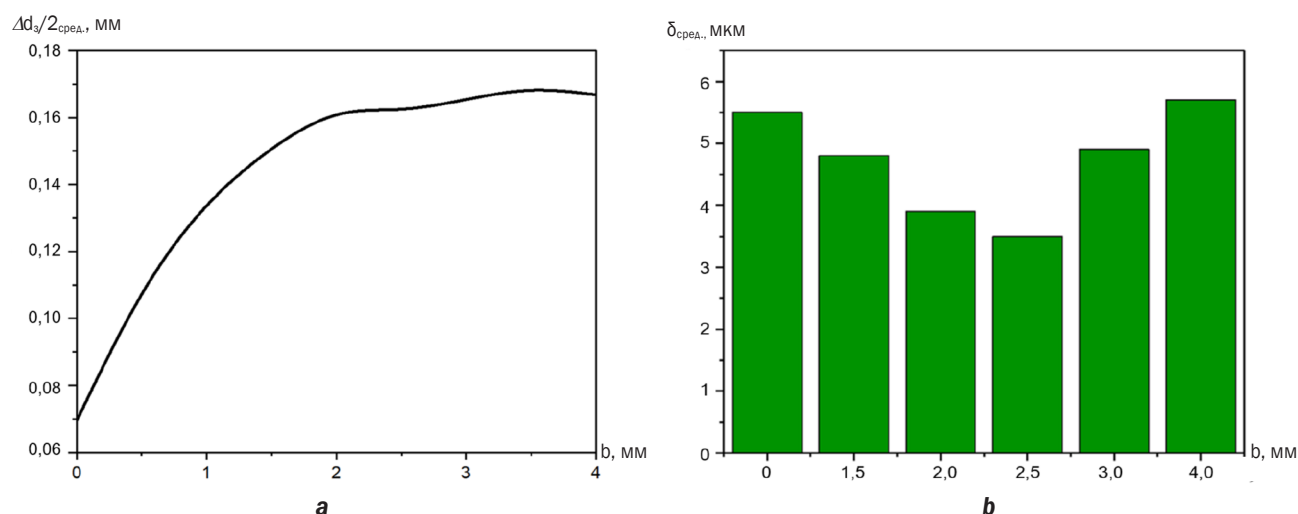


Рис. 9. Графики зависимости средней радиальной остаточной деформации $\Delta d_3/2_{\text{сред.}}$ (а) и средней величины микронеровности $\delta_{\text{сред.}}$ поверхности после обработки (б) от ширины калибрующего пояска b

Fig. 9. Graphs of the dependences of the average radial residual deformation $\Delta d_3/2_{\text{avg.}}$ (а) and the average surface microroughness $\delta_{\text{avg.}}$ of the surface after burnishing (б) on drawing cylinder width b

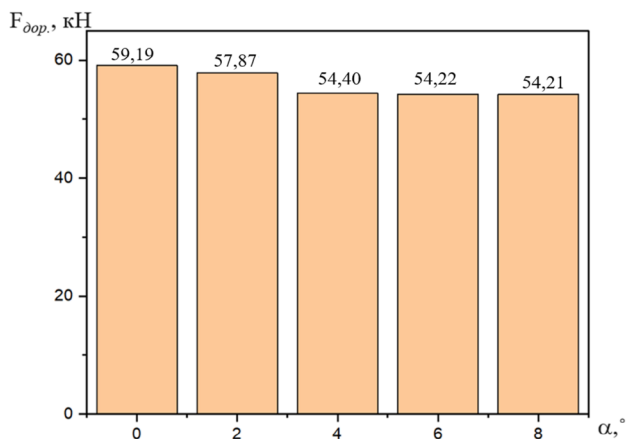


Рис. 10. Гистограммы зависимости силы тяги $F_{дор}$ при дорновании от величины угла обратного конуса дорна α_1

Fig. 10. Histograms of the dependence of the drawing force F_{mand} during mandrel drawing vs back taper angle α_1 of the mandrel

сти трубчатых деталей после полного выхода дорна из зоны контактного взаимодействия при разных углах обратного конуса α_1 .

Анализ рис. 11 показывает, что характер радиальной остаточной деформации для дорнов с разными углами обратного конуса α_1 практически эквивалентный. Это свидетельствует о том, что угол обратного конуса α_1 почти не оказывает влияния на микронеровности поверхности. Однако при угле $\alpha_1 = 8^\circ$ на поверхности начинает появляться микронеровность, которая выше и крупнее, чем в остальных случаях. В долгосрочной перспективе это приведет к тому, что участок металла

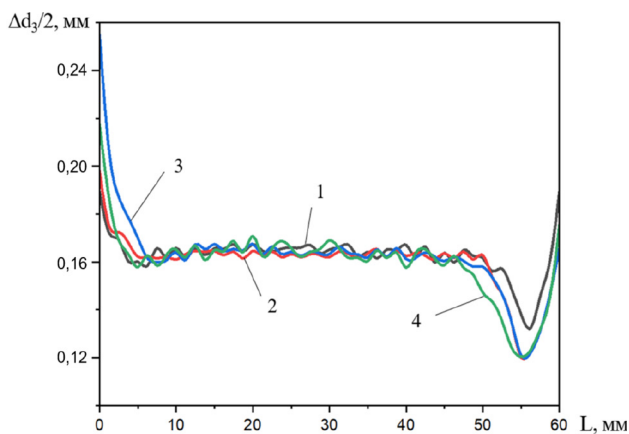


Рис. 11. Графики распределения радиальной остаточной деформации внутренней поверхности детали по длине L после обработки разными дорнами при натяге $i = 0,4 \text{ мм}$: 1 – $\alpha_1 = 2^\circ$; 2 – $\alpha_1 = 4^\circ$; 3 – $\alpha_1 = 6^\circ$; 4 – $\alpha_1 = 8^\circ$

Fig. 11. Graphs of the distribution of residual radial deformation of the inner surface of the part along the length L after burnishing with different mandrels at interference fit of $i = 0.4 \text{ mm}$: 1 – $\alpha_1 = 2^\circ$; 2 – $\alpha_1 = 4^\circ$; 3 – $\alpha_1 = 6^\circ$; 4 – $\alpha_1 = 8^\circ$

инструмента, расположенный на переходной кромке между калибрующим пояском и обратным конусом, будет быстрее изнашиваться, и на этой кромке появятся мельчайшие риски, ухудшающие качество обрабатываемой поверхности. Поэтому использование угла α_1 более 8° является нецелесообразным.

Таким образом, для снижения силы тяги $F_{дор}$ при дорновании и повышения качества обработанной поверхности детали, угол обратного конуса α_1 деформирующего инструмента должен находиться в диапазоне от 4 до 6° .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам численного моделирования МКЭ определено влияние геометрических параметров деформирующего инструмента на качество обработки толстостенных трубчатых деталей из стали 45 и сформулированы следующие основные выводы:

1. Установлено, что угол заборного конуса $\alpha = 4^\circ$ является рациональной величиной, так как обеспечивает минимальную силу тяги $F_{дор}$ (около $54,4 \text{ кН}$). При этом величина радиальной остаточной деформации аналогична показателям для дорнов с более крупными углами α , что обеспечивает качество обработанной поверхности.

2. На основе результатов анализа деформации, остаточных напряжений и качества поверхности рациональной шириной калибрующего пояса дорна является $b = 2,5 \text{ мм}$. Установлено, что при $b < 2 \text{ мм}$ процесс деформирования нестабилен из-за чрезмерного упругого последствия, в то время как ширины калибрующего пояса недостаточно для стабилизации этой деформации. При $b > 3 \text{ мм}$ возрастающие силы трения приводят к риску образования задиров. Диапазон величин $b = 2...3 \text{ мм}$ обеспечивает максимальную интенсивность остаточных напряжений, что гарантирует повышенную усталостную прочность и износостойкость деталей. В то же время при $b = 2,5 \text{ мм}$ достигается наибольшая точность профиля (среднее значение микронеровностей составляет около $3,5 \text{ мкм}$).

3. Для обеспечения минимальной силы тяги $F_{дор}$ и предотвращения дефектов обработанной поверхности рациональный угол обратного конуса дорна должен составлять $\alpha_1 = 4\text{--}6^\circ$. При отсутствии обратного конуса участок материала на острой кромке цилиндра создает концентрацию нормального дав-

ления, что приводит к росту силы тяги при дорновании. При $\alpha_1 = 2^\circ$ сила тяги также остается большой (57,87 кН) из-за увеличения площади контакта. Увеличение угла α_1 более 8° является нецелесообразным, так как это вызывает появление крупных отклонений на

поверхности и приводит к износу переходной кромки инструмента. Диапазон значений $\alpha_1 = 4-6^\circ$ позволяет стабилизировать силу тяги $F_{дор.}$ на минимальном уровне (54,2–54,4 кН) при сохранении хорошего качества микропрофиля поверхности.

Список источников

1. Ke Lu., Li Y., Li Ch., Jiang Xu., Ye Ju., Chen A., et al. Fatigue mechanisms and life prediction of cracked steel elements repaired with cold-expanded crack-stop holes // International Journal of Fatigue. 2026. Vol. 207. P. 109484. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2026.109484>. EDN: RWHJZY.
2. Зайдес С.А., Исаев А.Н. Технологическая механика осесимметричного деформирования: монография. Иркутск: ИрГТУ, 2007. 432 с.
3. Зайдес С.А., Ле Т.Т. Оценка влияния направления упрочненных армированных волокон на деформирующую способность цилиндрических деталей // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2025. № 9. С. 41–52. EDN: OHOISU.
4. Mao J.X., Xian Zh.F., Wang X., Hu D.Y., Pan J.Ch., Wang R.Q., et al. Fatigue life prediction of cold expansion hole using physics-enhanced data-driven method // International Journal of Fatigue. 2025. Vol. 190. P. 108634. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2024.108634>. EDN: KPTDVQ.
5. Zheng Guo, Ye Junjie, Cao Zengqiang. Electromagnetic impact assisted cold expansion method to improve fatigue performance of holed structures: Fatigue failure mechanism and life prediction // Results in Engineering. 2026. Vol. 30. P. 110490. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.110490>.
6. Becerra-Becerra E., Aguilera Ojeda C.O., Saldaña-Robles A., Reveles-Arredondo J.F., Barco-Burgos J., Vidal-Lesso A. A review of numerical simulation of ball burnishing process // Finite Elements in Analysis and Design. 2023. Vol. 218. P. 103926. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2023.103926>. EDN: XNMBTO.
7. Bao Weichao, Huang Lei, Su Ru, Ma Haikun, Li Hua, Dong Hui, et al. Effect of split sleeve cold expansion on microstructure and fatigue performance of heterostructure 7050-T7451 aluminum alloy holes // Engineering Failure Analysis. 2026. Vol. 194. P. 110971. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2026.110971>.
8. Guo Zheng, Junjie Ye, Zengqiang Cao. A double-side symmetric cold expansion method to improve fatigue performance of holed structures: fatigue failure mechanism and life prediction // Results in Engineering. 2026. Vol. 29. P. 109354. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.109354>.
9. Сивцев Н.С., Тарасов В.В. Численное исследование напряженно-деформированного состояния заготовки в контактной задаче поверхностного дорнования отверстий // Наука и техника. 2021. Т. 20. № 3. С. 259–267. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-259-267>. EDN: HTTPAS.
10. Feng Feng, Zhao Zirui, Wang Zibiao, Li Bo, Lin Xiaoxuan, Zhang Jianfu, Feng Pingfa, et al. A calculation method for residual stress of cold expanded hole based on measured springback // Measurement. 2023. Vol. 218. P. 113262. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113262>.
11. Dyl T.C., Kuśmierska-Matyszczyk W. The effect of the burnishing process on the strain rate and state stress in hollow steel tubes // Metals. 2025. Vol. 15. Iss. 7. P. 694. <https://doi.org/10.3390/met15070694>.
12. Рябичева Л.А., Белозир И.И. Моделирование технологических параметров свободного дорнования порошковых пористых заготовок // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2023. № 36. С. 90–94. <https://doi.org/10.26160/2474-5901-2023-36-90-94>. EDN: GQYFRT.
13. Проскуряков Ю.Г. Технология упрочняюще-калибрующей и формообразующей обработки металлов. М.: Машиностроение, 1971. 208 с.
14. Shi Hangjie, Wang Zhiguo, Zuo Yangjie. Gradient cold expansion fatigue behaviors of titanium open hole structures under large expansion size // Engineering Failure Analysis. 2026. Vol. 188. P. 110648. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2026.110648>.
15. Wan Nian, Zhao Biao, Ding Wenfeng, He Qiang. Research status and tendency on cold expansion anti-fatigue manufacturing technology for aircraft structural fastening holes // Journal of Manufacturing Processes. 2025. Vol. 141. P. 319–335. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2025.02.068>.
16. Smith L., Wieland D. Probabilistic analysis of cold expanded holes // Procedia Structural Integrity. 2026. Vol. 79. P. 275–282. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2025.12.334>.
17. Zhang D., Ji Sh., Wang Zh., Yang Ya., Yang H., Li H. Mechanism and control of wall thickness evolution in mandrel-free drawing of capillary tubes // Journal of Manufacturing Processes. 2026. Vol. 160. P. 28–49. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2026.01.014>. EDN: KGVZZQ.
18. Liu J., Lin X., Feng F., Wang Z., Zhao Z., Bai Zh., et al. Study on the surface defect of aluminum alloy hole burnishing // Tribology International. 2023. Vol. 184. P. 108490. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108490>. EDN: KWFTKU.
19. Huang Q., Liu Ju., Yang M. Study on erosion behavior and simulation of 45-steel induced by sand-carrying fluid // Case Studies in Construction Materials. 2025. Vol. 23. P. e05664. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05664>. EDN: NEPEVO.
20. Yang Jinggang. Research on surface alloying and remelting polishing of 45 steel for wear resistance applications in transportation engineering // Materials Letters. 2026. Vol. 420. P. 141082. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2026.141082>.

21. Huang X., Schmidt R., Strodtick S., Walther F., Biermann D., Zabel A. Simulation and modeling of the residual stress state in the sub-surface zone of BTA deep-hole drilled specimens with eigenstrain theory // *Procedia CIRP*. 2021. Vol. 102. P. 150–155. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.09.026>. EDN: LWMUZQ.
22. Зайдес С.А., Хо М.К. Степень упрочнения и глубина наклепа при маятниковом поверхностном пластическом деформировании углеродистой стали // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2023. Т. 66. № 3. С. 272–282. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-3-272-282>. EDN: PSTNGB.
23. Баженов В.Г., Нагорных Е.В. Численный анализ больших упругопластических деформаций тел и сред и идентификация их диаграмм деформирования при различных видах нагружения // *Ученые записки Казанского университета. Серия: Физико-математические науки*. 2022. Т. 164. № 4. С. 316–328. <https://doi.org/10.26907/2541-7746.2022.4.316-328>. EDN: PQJJQB.
24. Wetzel C., Rohl M., Manes T., Kadado A. Plastic deformation of the pediatric forearm: recognition, radiographic measurement, and management // *Journal of the Pediatric Orthopaedic Society of North America*. 2026. Vol. 15. P. 100372. <https://doi.org/10.1016/j.jposna.2026.100372>. EDN: WYCZYL.

References

1. Ke Lu., Li Y., Li Ch., Jiang Xu., Ye Ju., Chen A., et al. Fatigue mechanisms and life prediction of cracked steel elements repaired with cold-expanded crack-stop holes. *International Journal of Fatigue*. 2026;207:109484. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2026.109484>. EDN: RWHJZY.
2. Zaides S.A., Isaev A.N. *Technological mechanics of axisymmetric deformation: monograph*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2007, 432 p. (In Russ.).
3. Zaides S.A., Le T.Ch. Assessment of the reinforced fiber direction influence on deformability of the cylindrical parts. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2025;9:41-52. (In Russ.). EDN: OHISU.
4. Mao J.X., Xian Zh.F., Wang X., Hu D.Y., Pan J.Ch., Wang R.Q., et al. Fatigue life prediction of cold expansion hole using physics-enhanced data-driven method. *International Journal of Fatigue*. 2025;190:108634. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2024.108634>. EDN: KPTDVQ.
5. Zheng Guo, Ye Junjie, Cao Zengqiang. Electromagnetic impact assisted cold expansion method to improve fatigue performance of holed structures: Fatigue failure mechanism and life prediction. *Results in Engineering*. 2026;30:110490. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.110490>.
6. Becerra-Becerra E., Aguilera Ojeda C.O., Saldaña-Robles A., Reveles-Arredondo J.F., Barco-Burgos J., Vidal-Lesso A. A review of numerical simulation of ball burnishing process. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2023;218:103926. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2023.103926>. EDN: XNMBTO.
7. Bao Weichao, Huang Lei, Su Ru, Ma Haikun, Li Hua, Dong Hui, et al. Effect of split sleeve cold expansion on microstructure and fatigue performance of heterostructure 7050-T7451 aluminum alloy holes. *Engineering Failure Analysis*. 2026;194:110971. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2026.110971>.
8. Guo Zheng, Junjie Ye, Zengqiang Cao. A double-side symmetric cold expansion method to improve fatigue performance of holed structures: fatigue failure mechanism and life prediction. *Results in Engineering*. 2026;29:109354. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.109354>.
9. Sivtsev N.S., Tarasov V.V. Numerical study of stress-strain state of workpiece in contact problem of surface mandrel drilling. *Science and Technique*. 2021;20(3):259-267. (In Russ.). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-259-267>. EDN: HTPPAS.
10. Feng Feng, Zhao Zirui, Wang Zibiao, Li Bo, Lin Xiaoxuan, Zhang Jianfu, Feng Pingfa, et al. A calculation method for residual stress of cold expanded hole based on measured springback. *Measurement*. 2023;218:113262. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113262>.
11. Dyl T.C., Kuśmierska-Matyszczyk W. The effect of the burnishing process on the strain rate and state stress in hollow steel tubes. *Metals*. 2025;15(7):694. <https://doi.org/10.3390/met15070694>.
12. Ryabicheva L.A., Belozir I.I. Modeling of technological parameters of free burnishing of powdered porous billet. *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2023;36:90-94. (In Russ.). <https://doi.org/10.26160/2474-5901-2023-36-90-94>. EDN: GQYFRT.
13. Proskuryakov Yu.G. *Technology of hardening, calibrating and shaping of metals*. Moscow: Mashinostroenie; 1971, 208 p. (In Russ.).
14. Shi Hangjie, Wang Zhiguo, Zuo Yangjie. Gradient cold expansion fatigue behaviors of titanium open hole structures under large expansion size. *Engineering Failure Analysis*. 2026;188:110648. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2026.110648>.
15. Wan Nian, Zhao Biao, Ding Wenfeng, He Qiang. Research status and tendency on cold expansion anti-fatigue manufacturing technology for aircraft structural fastening holes. *Journal of Manufacturing Processes*. 2025;141:319-335. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2025.02.068>.
16. Smith L., Wieland D. Probabilistic analysis of cold expanded holes. *Procedia Structural Integrity*. 2026;79:275-282. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2025.12.334>.
17. Zhang D., Ji Sh., Wang Zh., Yang Ya., Yang H., Li H. Mechanism and control of wall thickness evolution in mandrel-free drawing of capillary tubes. *Journal of Manufacturing Processes*. 2026;160:28-49. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2026.01.014>. EDN: KGVZZQ.
18. Liu J., Lin X., Feng F., Wang Z., Zhao Z., Bai Zh., et al. Study on the surface defect of aluminum alloy hole burnishing. *Tribology International*. 2023;184:108490. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108490>. EDN: KWFTKU.

19. Huang Q., Liu Ju., Yang M. Study on erosion behavior and simulation of 45-steel induced by sand-carrying fluid. *Case Studies in Construction Materials*. 2025;23:e05664. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05664>. EDN: NEPEVO.
20. Yang Jinggang. Research on surface alloying and remelting polishing of 45 steel for wear resistance applications in transportation engineering. *Materials Letters*. 2026;420:141082. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2026.141082>.
21. Huang X., Schmidt R., Strodick S., Walther F., Biermann D., Zabel A. Simulation and modeling of the residual stress state in the sub-surface zone of BTA deep-hole drilled specimens with eigenstrain theory. *Procedia CIRP*. 2021;102:150-155. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.09.026>. EDN: LWMUZQ.
22. Zaides S.A., Ho M.Q. Degree and depth of hardening under pendulum surface plastic deformation of carbon steel. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023;66(3):272-282. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-3-272-282>. EDN: PSTNGB.
23. Bazhenov V.G., Nagornyykh E.V. Numerical analysis of large elastoplastic deformations of bodies and continua and identification of their deformation diagrams under different types of loading. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya: Fiziko-Matematicheskie Nauki*. 2022;164(4):316-328. (In Russ.). <https://doi.org/10.26907/2541-7746.2022.4.316-328>. EDN: PQJJQB.
24. Wetzel C., Rohl M., Manes T., Kadado A. Plastic deformation of the pediatric forearm: recognition, radiographic measurement, and management. *Journal of the Pediatric Orthopaedic Society of North America*. 2026;15:100372. <https://doi.org/10.1016/j.jposna.2026.100372>. EDN: WYCZYL.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Зайдес Семен Азикович,

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры материаловедения,
сварочных и аддитивных технологий,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, Российская Федерация,
г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83
✉ zsa@istu.edu
orcid.org/0000-0001-9416-7749

Чан Туан Зунг,

аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, Российская Федерация,
г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83
trantuandung98@gmail.com
orcid.org/0009-0001-5189-2884

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Semen A. Zaides,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Materials Science,
Welding and Additive Technologies,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074,
Russian Federation
✉ zsa@istu.edu
orcid.org/0000-0001-9416-7749

Tuan Dung Tran,

Postgraduate Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074,
Russian Federation
trantuandung98@gmail.com
orcid.org/0009-0001-5189-2884

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Зайдес Семен Азикович с 2000 года является членом редакционной коллегии журнала «iPolytech Journal», но не имеет отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах авторы не заявляли.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

Semen A. Zaides has been a member of the iPolytech Journal Editorial Board since 2000, but he was not involved in making decision about accepting the present article for publication. The article was subjected the Journal's review procedure. The authors do not report any other conflicts of interest

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 02.03.2026 г.; одобрена после рецензирования 24.04.2026 г.; принята к публикации 04.05.2026 г.

Information about the article

The article was submitted 02.03.2026; approved after reviewing 24.04.2026; accepted for publication 04.05.2026.



Экспериментальная оценка феноменологической модели гипервязкоупругости эластичных элементов машин

В.С. Корнеев^{1✉}, С.А. Корнеев²

^{1,2}Омский государственный технический университет, Омск, Российская Федерация

Резюме. Цель – определение по результатам экспериментальных исследований на примере резины И-73-361 материальных параметров феноменологической модели гипервязкоупругости, обеспечивающих повышение точности расчетов высокоэластичных композитных оболочек машин и оборудования в условиях симметричного нагружения. Испытания на одноосное циклическое растяжение с максимальной деформацией 20–25 %, соответствующей удлинению армирующего корда при разрыве, проводились на установке Zwick/Roell/BT-FR010TE-A50. Для описания упругих свойств резины использован потенциал Трелоара, для вязких свойств резины – модель несжимаемой неньютоновской жидкости с коэффициентом вязкости, зависящим от деформации. Обработка экспериментальных данных и идентификация параметров модели выполнены методом наименьших квадратов с минимизацией невязки методом Левенберга–Марквардта в среде Mathcad. Определены материальные параметры феноменологической модели для резины И-73-361: модуль упругости ветви А реологической модели ($\approx 1,061 \times 10^6$ Па), модуль упругости упругого элемента ветви В реологической модели ($\approx 7,610 \times 10^5$ Па), коэффициент вязкости ветви В реологической модели, определяющийся двумя величинами (коэффициент $\approx 1,901 \times 10^6$ Па·с, показатель степени $\approx -0,284$). Также был рассчитан показатель степени, определяющий реологический тип вязких процессов, который составил $\approx 0,828$. Установлено, что погрешность аппроксимации экспериментальных диаграмм деформирования, включая петли гистерезиса, для основных параметров не превышает 5 %. Показано, что в отличие от микромеханической модели Бергстрёма–Бойс предложенная феноменологическая модель не требует введения дополнительного условия однозначности разложения градиента деформации и позволяет описывать как возрастающую, так и убывающую зависимость коэффициента вязкости от деформации. Полученные параметры модели применимы для расчетов вязкоупругих свойств высокоэластичных композитных оболочек при симметричном нагружении. Установлено, что характер изменения коэффициента вязкости с ростом первого инварианта меры Коши–Грина не является универсальным для всех эластомеров: в отличие от модели Бергстрёма–Бойс, предсказывающей его монотонный рост, феноменологическая модель допускает его убывание, что подтверждено экспериментально для исследованного материала.

Ключевые слова: коэффициент вязкости, резина, эластомер, феноменологическая модель, гипервязкоупругость, одноосное циклическое растяжение, гистерезис, модель Бергстрёма–Бойс

Для цитирования: Корнеев В.С., Корнеев С.А. Экспериментальная оценка феноменологической модели гипервязкоупругости эластичных элементов машин // iPolytech Journal. 2026. Т. 30. № 3. С. 413–426 <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2026-3-413-426>. EDN: QONHXK.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Experimental validation of a phenomenological hyperviscoelastic model for elastic machine elements

Vladimir S. Korneyev^{1✉}, Sergey A. Korneyev²

^{1,2}Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

Abstract. The material parameters of a phenomenological hyperviscoelastic model were determined experimentally for I-73-361 rubber to improve the accuracy of calculations for highly elastic composite shells of machines and equipment under symmetric loading. Uniaxial cyclic tensile tests were performed on a Zwick/Roell/BT-FR010TE-A50 testing machine at a maximum strain of 20–25 %, corresponding to the elongation at break of the reinforcing cord. The elastic response of the rubber was described by the Treloar strain-energy potential, while its viscous response was represented by a model of an incompressible non-Newtonian fluid with strain-dependent viscosity. The experimental data were processed and the model parameters identified using the least-squares method, with the residual minimized by

the Levenberg–Marquardt algorithm in Mathcad. The resulting material parameters for I-73-361 rubber were an elastic modulus of approximately 1.061×10^6 Pa for branch A of the rheological model, an elastic modulus of approximately 7.610×10^5 Pa for the elastic element of branch B, and two parameters defining the viscosity coefficient of branch B: a coefficient of approximately 1.901×10^6 Pa·s and an exponent of approximately -0.284 . The exponent characterizing the rheological behavior of the viscous component was approximately 0.828. The approximation error for the experimental stress–strain curves, including the hysteresis loops, did not exceed 5 % for the principal parameters. In contrast to the Bergström–Boyce micromechanical model, the proposed phenomenological model requires no additional uniqueness condition for the decomposition of the deformation gradient and can describe both an increase and a decrease in viscosity with strain. The identified parameters can be used to calculate the viscoelastic properties of highly elastic composite shells under symmetric loading. The dependence of viscosity on the first invariant of the Cauchy–Green strain tensor is not universal across elastomers. Whereas the Bergström–Boyce model predicts a monotonic increase in viscosity, the phenomenological model also permits a decrease, as confirmed experimentally for I-73-361 rubber.

Keywords: viscosity coefficient, rubber, elastomer, phenomenological model, hyperviscoelasticity, uniaxial cyclic stretching, hysteresis, Bergström–Boyce model

For citation: Korneyev V.S., Korneyev S.A. Experimental validation of a phenomenological hyperviscoelastic model for elastic machine elements. *iPolytech Journal*. 2026;30(3):413-426. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2026-3-413-426>. EDN: QOHIXK.

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире все чаще в машинах и оборудовании различных отраслей промышленности применяются композитные материалы, содержащие эластомеры. Для точных расчетов высокоэластичных оболочек привлекается теория вязкоупругости [1–8], включая модель Бергстрёма–Бойс [9–18], отражающую микроструктуру эластомеров. Модель требует выбора условия однозначности для определения упругих и вязких деформаций [14]. При стандартных испытаниях на одноосное растяжение-сжатие выбор условия однозначности не нужен и модель точно описывает экспериментальные данные. Однако требуется исследование для определения параметров при разных скоростях нагружения.

Проблемы выбора условия однозначности отсутствуют при совпадении осей напряжений и деформаций. Ограниченная феноменологическая модель гипервязкоупругости, основанная на модели Кельвина–Пойнтинга, используется для расчета высокоэластичных оболочек при симметричном нагружении [14].

В качестве объекта исследования выбрана резина марки И-73-361, поскольку на предприятиях (например, АО «ФНПЦ «Прогресс», ООО НПП «Сибрезинотехника» и др.) из нее изготавливают разнообразные резинотехнические осесимметричные изделия, включая пневмобаллоны, пневмозаглушки, муфты, пневмозапчасти, патрубки и т.д. При этом предложенный алгоритм применим и для других гиперупругих полимеров.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Феноменологическая модель гипервязкоупругости. Физическое содержание феноменологической модели гипервязкоупругости [14] ясно демонстрирует реологическая модель Кельвина–Пойнтинга, применяемая к одноосному растяжению/сжатию (рис. 1). Данная модель визуализирует свойства материала и выявляет взаимосвязи, лежащие в основе его структуры [4].

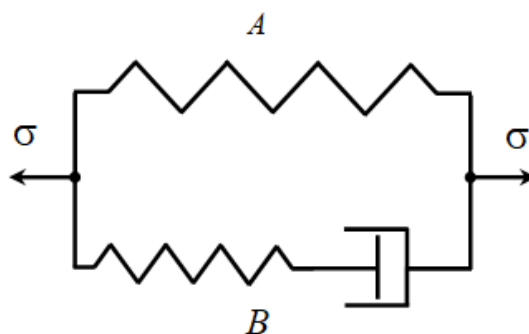


Рис. 1. Модель Кельвина–Пойнтинга

Fig. 1. Kelvin-Poynting model

Элементы A и B , соединенные в параллельном расположении, испытывают одинаковые деформации. При этом тензор общих напряжений складывается из упругих напряжений, составляющих каждого отдельного звена (1), Па:

$$\mathbf{F}_A = \mathbf{F}_B = \mathbf{F}; \quad \mathbf{T} = \mathbf{T}_A^e(\mathbf{F}) + \mathbf{T}_B^e(\mathbf{F}^e), \quad (1)$$

где $\mathbf{F}$ – градиент полной деформации материала (ветвь A); $\mathbf{F}^e$ – градиент упругой деформации материала (упругая составляющая ветви B).

Последовательное соединение вязкого и диссипативного элемента в ветви B позволяет записать выражение (2):

$$\mathbf{T}_B^e(\mathbf{F}^e) = \mathbf{T}_B^v(\mathbf{F}^v, \dot{\mathbf{F}}^v), \quad (2)$$

где $\mathbf{F}^v$ – градиент вязкой деформации и $\dot{\mathbf{F}}^v$ – градиент скорости вязкой деформации, с^{-1} . Взаимосвязь градиентов деформации $\mathbf{F}^e$, $\mathbf{F}^v$, $\mathbf{F}$ описывается через известное в [19, 20] мультипликативное разложение (3):

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}^e \cdot \mathbf{F}^v. \quad (3)$$

Воспользуемся выражением для гиперупругого несжимаемого материала для описания тензоров упругих напряжений элементов A и B (4):

$$\mathbf{T}_A^e = q_A \mathbf{I} + 2\mathbf{F} \cdot \frac{d\Phi_A(\mathbf{C})}{d\mathbf{C}} \cdot \mathbf{F}^T; \quad \mathbf{T}_B^e = q_B^e \mathbf{I} + 2\mathbf{F}^e \cdot \frac{d\Phi_B(\mathbf{C}^e)}{d\mathbf{C}^e} \cdot (\mathbf{F}^e)^T. \quad (4)$$

Вязкий элемент B опишем выражением для несжимаемой неньютоновской жидкости [21–23], где коэффициент вязкости зависит от деформации (5):

$$\mathbf{T}_B^v = q_B^v \mathbf{I} + 2\mu_v(\mathbf{C}^v) \|\mathbf{D}^v\|^\kappa \frac{\mathbf{D}^v}{\|\mathbf{D}^v\|}, \quad (5)$$

где q_A , q_B^e , q_B^v – неопределенные множители Лагранжа, Па [24–26]; Φ_A , Φ_B – упругие потенциалы, Па; κ – показатель степени, он определяет реологический тип вязких процессов ($\kappa = 1$ – ньютоновская жидкость, $\kappa = 0$ – модель сухого трения); $\mathbf{D}^v$ – тензор скоростей вязкой деформации вводится наряду с тензорами скоростей упругой $\mathbf{D}^e$ и полной деформации $\mathbf{D}$ (6), с^{-1} :

$$\mathbf{D}^v = \text{sym}[\dot{\mathbf{F}}^v \cdot (\mathbf{F}^v)^{-1}]; \quad \mathbf{D}^e = \text{sym}[\dot{\mathbf{F}}^e \cdot (\mathbf{F}^e)^{-1}]; \quad \mathbf{D} = \text{sym}(\dot{\mathbf{F}} \cdot \mathbf{F}^{-1}). \quad (6)$$

Правые меры полной, упругой и вязкой деформации Коши–Грина (7):

$$\mathbf{C} = \mathbf{F}^T \cdot \mathbf{F}; \quad \mathbf{C}^e = (\mathbf{F}^e)^T \cdot \mathbf{F}^e; \quad \mathbf{C}^v = (\mathbf{F}^v)^T \cdot \mathbf{F}^v. \quad (7)$$

Коэффициент вязкости $\mu_v(\mathbf{C}^v)$, Па·с, представляет собой изотропную скалярную функцию тензора $\mathbf{C}^v$, которая определяется главными инвариантами $I_{C^v} = \text{tr} \mathbf{C}^v$, $II_{C^v} = (1/2)[(\text{tr} \mathbf{C}^v)^2 - \text{tr}(\mathbf{C}^v)^2] = \text{tr}(\mathbf{C}^v)^{-1}$ (8):

$$\mu_v = \mu_v(I_{C^v}, II_{C^v}). \quad (8)$$

Большой практический интерес [9] представляет зависимость Бергстрёма–Бойс (9), полученная в [12]:

$$\mu_v = \mu_v^0 (\lambda_{chain}^v - 1)^\alpha, \quad (9)$$

где μ_v^0 , Па·с, α – материальные константы.

При этом кратность усредненного удлинения макромолекулярной цепи эластомера (10):

$$\lambda_{chain}^v = \sqrt{I_{C^v}/3}. \quad (10)$$

Поскольку главные оси напряжений остаются неизменными относительно материальных линий (волокон), то выполняются спектральные разложения:

$$\mathbf{T} = \sum_{\alpha=1}^3 \sigma_{\alpha} \mathbf{e}_{\alpha} \mathbf{e}_{\alpha}; \quad \mathbf{F} = \sum_{\alpha=1}^3 \lambda_{\alpha} \mathbf{e}_{\alpha} \mathbf{e}_{\alpha}; \quad \mathbf{F}^e = \sum_{\alpha=1}^3 \lambda_{\alpha}^e \mathbf{e}_{\alpha} \mathbf{e}_{\alpha}; \quad \mathbf{F}^v = \sum_{\alpha=1}^3 \lambda_{\alpha}^v \mathbf{e}_{\alpha} \mathbf{e}_{\alpha}, \quad (11)$$

где σ_{α} – главные напряжения, Па; λ_{α} , λ_{α}^e , λ_{α}^v – кратности полных, упругих и вязких удлинений; $\mathbf{e}_{\alpha}$ – орты главных осей напряжений. Вследствие этого аналогичный вид (12) имеют тензоры скоростей полных, упругих и вязких деформаций (6):

$$\mathbf{D} = \sum_{\alpha=1}^3 \frac{\dot{\lambda}_{\alpha}}{\lambda_{\alpha}} \mathbf{e}_{\alpha} \mathbf{e}_{\alpha}; \quad \mathbf{D}^e = \sum_{\alpha=1}^3 \frac{\dot{\lambda}_{\alpha}^e}{\lambda_{\alpha}^e} \mathbf{e}_{\alpha} \mathbf{e}_{\alpha}; \quad \mathbf{D}^v = \sum_{\alpha=1}^3 \frac{\dot{\lambda}_{\alpha}^v}{\lambda_{\alpha}^v} \mathbf{e}_{\alpha} \mathbf{e}_{\alpha}, \quad (12)$$

которые в рассматриваемом случае удовлетворяют формуле аддитивного разложения (13):

$$\mathbf{D} = \mathbf{D}^e + \mathbf{D}^v. \quad (13)$$

Соответственно, определяющие соотношения (4), (5) выражаются следующим образом [14] (14)–(16):

$$\mathbf{T}_A^e = \sum_{\alpha=1}^3 \sigma_{\alpha}^{Ae} \mathbf{e}_{\alpha} \mathbf{e}_{\alpha}; \quad \sigma_{\alpha}^{Ae} = q_A + \lambda_{\alpha} \frac{\partial \Phi_A}{\partial \lambda_{\alpha}}; \quad (14)$$

$$\mathbf{T}_B^e = \sum_{\alpha=1}^3 \sigma_{\alpha}^{Be} \mathbf{e}_{\alpha} \mathbf{e}_{\alpha}; \quad \sigma_{\alpha}^{Be} = q_B^e + \lambda_{\alpha}^e \frac{\partial \Phi_B}{\partial \lambda_{\alpha}^e}; \quad (15)$$

$$\mathbf{T}_B^v = \sum_{\alpha=1}^3 \sigma_{\alpha}^{Bv} \mathbf{e}_{\alpha} \mathbf{e}_{\alpha}; \quad \sigma_{\alpha}^{Bv} = q_B^v + 2\mu_v \|\mathbf{D}^v\|^{\kappa-1} \frac{\dot{\lambda}_{\alpha}^v}{\lambda_{\alpha}^v}. \quad (16)$$

Выражения (1)–(3), (11)–(16) приводят к системе уравнений [14], которые соответствуют феноменологической модели гипервязкоупругости (17) на основе реологической модели Кельвина–Пойнтинга (см. рис. 1):

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{\alpha} = q + \lambda_{\alpha} \frac{\partial \Phi_A}{\partial \lambda_{\alpha}} + \lambda_{\alpha}^e \frac{\partial \Phi_B}{\partial \lambda_{\alpha}^e}, \\ 2\mu_v \|\mathbf{D}^v\|^{\kappa-1} D_{\alpha}^v = q_B + \lambda_{\alpha}^e \frac{\partial \Phi_B}{\partial \lambda_{\alpha}^e}, \\ \lambda_{\alpha} = \lambda_{\alpha}^e \lambda_{\alpha}^v, \\ D_{\alpha} = D_{\alpha}^e + D_{\alpha}^v, \\ D_{\alpha} = \frac{\dot{\lambda}_{\alpha}}{\lambda_{\alpha}}, D_{\alpha}^e = \frac{\dot{\lambda}_{\alpha}^e}{\lambda_{\alpha}^e}, D_{\alpha}^v = \frac{\dot{\lambda}_{\alpha}^v}{\lambda_{\alpha}^v}, \\ \|\mathbf{D}^v\| = \sqrt{\left(\frac{\dot{\lambda}_1^v}{\lambda_1^v}\right)^2 + \left(\frac{\dot{\lambda}_2^v}{\lambda_2^v}\right)^2 + \left(\frac{\dot{\lambda}_3^v}{\lambda_3^v}\right)^2}. \end{array} \right. \quad (\alpha = 1, 2, 3) \quad (17)$$

Здесь обозначено $q = q_A + q_B^e$; $q_B = q_B^e - q_B^v$, Па.

В систему (17) добавим уравнения несжимаемости (18):

$$\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1; \lambda_1^e \lambda_2^e \lambda_3^e = 1; \lambda_1^v \lambda_2^v \lambda_3^v = 1. \quad (18)$$

И тождественные выражения (19):

$$\text{tr} \mathbf{D} = \sum_{\alpha=1}^3 D_{\alpha} = \sum_{\alpha=1}^3 \frac{\dot{\lambda}_{\alpha}}{\lambda_{\alpha}} = 0; \text{tr} \mathbf{D}^e = \sum_{\alpha=1}^3 D_{\alpha}^e = \sum_{\alpha=1}^3 \frac{\dot{\lambda}_{\alpha}^e}{\lambda_{\alpha}^e} = 0; \text{tr} \mathbf{D}^v = \sum_{\alpha=1}^3 D_{\alpha}^v = \sum_{\alpha=1}^3 \frac{\dot{\lambda}_{\alpha}^v}{\lambda_{\alpha}^v} = 0. \quad (19)$$

В обеих группах уравнений (18) и (19) остаются независимыми только два условия несжимаемости:

1. Одноосное растяжение-сжатие. При проведении одноосных испытаний ГОСТом³ рекомендуется использовать круглые или плоские образцы. В предлагаемых испытаниях имеют место следующие выражения (20)–(23):

$$\sigma_1 = \sigma; \sigma_2 = \sigma_3 = 0. \quad (20)$$

$$\lambda_1 = \lambda > 0; \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda^{-1/2}. \quad (21)$$

$$\lambda_1^e = \lambda^e > 0; \lambda_2^e = \lambda_3^e = (\lambda^e)^{-1/2}. \quad (22)$$

$$\lambda_1^v = \lambda^v > 0; \lambda_2^v = \lambda_3^v = (\lambda^v)^{-1/2}. \quad (23)$$

С учетом этого, по первому соотношению (17) имеем:

$$\begin{cases} \sigma_1 = q + \lambda_1 \frac{\partial \Phi_A}{\partial \lambda_1} + \lambda_1^e \frac{\partial \Phi_B}{\partial \lambda_1^e} = q + \lambda \frac{\partial \Phi_A}{\partial \lambda_1} + \lambda^e \frac{\partial \Phi_B}{\partial \lambda_1^e} = \sigma, \\ \sigma_2 = q + \lambda_2 \frac{\partial \Phi_A}{\partial \lambda_2} + \lambda_2^e \frac{\partial \Phi_B}{\partial \lambda_2^e} = q + \lambda^{-1/2} \frac{\partial \Phi_A}{\partial \lambda_2} + (\lambda^e)^{-1/2} \frac{\partial \Phi_B}{\partial \lambda_2^e} = 0, \\ \sigma_3 = q + \lambda_3 \frac{\partial \Phi_A}{\partial \lambda_3} + \lambda_3^e \frac{\partial \Phi_B}{\partial \lambda_3^e} = q + \lambda^{-1/2} \frac{\partial \Phi_A}{\partial \lambda_3} + (\lambda^e)^{-1/2} \frac{\partial \Phi_B}{\partial \lambda_3^e} = 0. \end{cases}$$

Отсюда следует, что

$$q = -\lambda^{-1/2} \frac{\partial \Phi_A}{\partial \lambda_2} - (\lambda^e)^{-1/2} \frac{\partial \Phi_B}{\partial \lambda_2^e} = -\lambda^{-1/2} \frac{\partial \Phi_A}{\partial \lambda_3} - (\lambda^e)^{-1/2} \frac{\partial \Phi_B}{\partial \lambda_3^e}.$$

Поэтому

$$\sigma = \Psi_A(\lambda) + \Psi_B(\lambda^e), \quad (24)$$

где обозначено:

$$\Psi_A(\lambda) = \lambda \frac{\partial \Phi_A}{\partial \lambda_1} - \lambda^{-1/2} \frac{\partial \Phi_A}{\partial \lambda_3}; \quad \Psi_B(\lambda^e) = \lambda^e \frac{\partial \Phi_B}{\partial \lambda_1^e} - (\lambda^e)^{-1/2} \frac{\partial \Phi_B}{\partial \lambda_3^e}, \text{ Па.} \quad (25)$$

Например, в случае неогоукова потенциала Трелоара [25, 27, 28] (26):

$$\Phi = \frac{\mu_e}{2} (I_c - 3) = \frac{\mu_e}{2} (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3). \quad (26)$$

Для зависимостей вида (25) имеем $\Psi(\lambda) = \mu_e \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda} \right)$, соответственно, для ветви *A* и ветви *B* (см. рис. 1) будут иметь место следующие выражения (27):

³ГОСТ 270-75. Резина. Метод определения упругопрочностных свойств при растяжении. Введ. 01.01.1978. М.: Изд-во стандартов, 1975.

$$\Psi_A(\lambda) = \mu_A \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda} \right), \quad \Psi_B(\lambda) = \mu_B \left((\lambda^e)^2 - \frac{1}{\lambda^e} \right), \quad (27)$$

где μ_A и μ_B – модули упругости упругих элементов ветвей A и $\hat{A}$ реологической модели (см. рис. 1), Па.

Подставляя (23) в последнее уравнение системы (19) с учетом (17), получаем результат (28):

$$D_1^v = \frac{\dot{\lambda}^v}{\lambda^v}, \quad D_2^v = D_3^v = -\frac{1}{2} \frac{\dot{\lambda}^v}{\lambda^v}, \quad \|\mathbf{D}^v\| = \sqrt{\frac{3}{2}} \left| \frac{\dot{\lambda}^v}{\lambda^v} \right|. \quad (28)$$

С учетом (22), (28) второе соотношение (17) приводит к трем уравнениям:

$$\begin{cases} 2\mu_v \|\mathbf{D}^v\|^{\kappa-1} \frac{\dot{\lambda}^v}{\lambda^v} = q_B + \lambda^e \frac{\partial \Phi_B}{\partial \lambda_1^e}, \\ -\mu_v \|\mathbf{D}^v\|^{\kappa-1} \frac{\dot{\lambda}^v}{\lambda^v} = q_B + (\lambda^e)^{-1/2} \frac{\partial \Phi_B}{\partial \lambda_2^e}, \\ -\mu_v \|\mathbf{D}^v\|^{\kappa-1} \frac{\dot{\lambda}^v}{\lambda^v} = q_B + (\lambda^e)^{-1/2} \frac{\partial \Phi_B}{\partial \lambda_3^e}. \end{cases}$$

Следовательно,

$$q_B = -\mu_v \|\mathbf{D}^v\|^{\kappa-1} \frac{\dot{\lambda}^v}{\lambda^v} - (\lambda^e)^{-1/2} \frac{\partial \Phi_B}{\partial \lambda_2^e} = -\mu_v \|\mathbf{D}^v\|^{\kappa-1} \frac{\dot{\lambda}^v}{\lambda^v} - (\lambda^e)^{-1/2} \frac{\partial \Phi_B}{\partial \lambda_3^e},$$

а на основании второй формулы (25) получим (29):

$$3\mu_v \|\mathbf{D}^v\|^{\kappa-1} \frac{\dot{\lambda}^v}{\lambda^v} = \Psi_B(\lambda^e). \quad (29)$$

Согласно третьему соотношению (17) и (21)–(23), можно записать:

$$\lambda = \lambda^e \lambda^v. \quad (30)$$

Окончательно, в соответствии с (7), (11), (23), имеем:

$$\mathbf{C}^v = (\lambda^v)^2 \mathbf{e}_1 \mathbf{e}_1 + \frac{1}{\lambda^v} (\mathbf{e}_2 \mathbf{e}_2 + \mathbf{e}_3 \mathbf{e}_3); \quad I_{C^v} = \text{tr} \mathbf{C}^v = (\lambda^v)^2 + \frac{2}{\lambda^v}; \quad II_{C^v} = \text{tr}(\mathbf{C}^v)^{-1} = (\lambda^v)^{-2} + 2\lambda^v.$$

Благодаря этому зависимость (8) для коэффициента вязкости:

$$\mu_v = \mu_v(\lambda^v). \quad (31)$$

Для примера, для зависимости (9), с учетом (10), определим:

$$\mu_v = \mu_v^0 \left(\sqrt{\frac{(\lambda^v)^2 + 2/\lambda^v}{3}} - 1 \right)^\alpha. \quad (32)$$

Когда $\lambda^v = 1$, то по (10) достигается минимум $\lambda_{chain}^v = 1$. Тогда если $\alpha > 0$, то $\mu_v = 0$, а если $\alpha < 0$, то $\mu_v = \infty$. Поэтому в работах [10, 11, 18] зависимость (9) заменяется выражением, что позволяет проводить численные расчеты (33):

$$\mu_v = \mu_v^0 (\lambda_{chain}^v - 1 + \varepsilon_0)^\alpha. \quad (33)$$

В процессе применения выражение (32) преобразуется в (33), получаем формулу (34):

$$\mu_v = \mu_v^0 \left(\sqrt{\frac{(\lambda^v)^2 + 2/\lambda^v}{3}} - 1 + \varepsilon_0 \right)^\alpha. \quad (34)$$

В [10, 11, 18] вводимая величина ε_0 закладывается достаточно малой.

Система уравнений для расчета вязкоупругого материала в одноосном растяжении-сжатии, включающая соотношения (24), (28)–(31), упрощается до двух уравнений (35) и (36):

$$\sigma = \Psi_A(\lambda) + \Psi_B\left(\frac{\lambda}{\lambda^v}\right). \quad (35)$$

$$\left| \frac{\dot{\lambda}^v}{\lambda^v} \right|^{\kappa-1} \frac{\dot{\lambda}^v}{\lambda^v} = \left(\frac{2}{3} \right)^{\frac{\kappa-1}{2}} \frac{\Psi_B\left(\frac{\lambda}{\lambda^v}\right)}{3\mu_v(\lambda^v)}. \quad (36)$$

Взяв модуль от левой и правой частей (36), получим (37):

$$\left| \frac{\dot{\lambda}^v}{\lambda^v} \right|^\kappa = \left(\frac{2}{3} \right)^{\frac{\kappa-1}{2}} \frac{\left| \Psi_B\left(\frac{\lambda}{\lambda^v}\right) \right|}{3\mu_v(\lambda^v)}. \quad (37)$$

Разделив почленно (36) на (37), будем иметь (38):

$$\frac{\dot{\lambda}^v/\lambda^v}{\left| \dot{\lambda}^v/\lambda^v \right|} = \frac{\Psi_B(\lambda/\lambda^v)}{\left| \Psi_B(\lambda/\lambda^v) \right|}. \quad (38)$$

Из (38) на основании (37) вытекает обыкновенное дифференциальное уравнение (39):

$$\dot{\lambda}^v = \left(\frac{2}{3} \right)^{\frac{\kappa-1}{2\kappa}} \lambda^v \left[3\mu_v(\lambda^v) \right]^{-1/\kappa} \left| \Psi_B\left(\frac{\lambda}{\lambda^v}\right) \right|^{\frac{1}{\kappa}-1} \Psi_B\left(\frac{\lambda}{\lambda^v}\right). \quad (39)$$

2. При жестком режиме нагружения образца (с заданным законом деформирования) мы задаем $\lambda(t)$. Закон изменения вязкой деформации $\lambda^v(t)$ найдем при решении уравнение (39) с использованием условия (40) (здесь и далее t – время, с):

$$\lambda^v \Big|_{t=0} = 1. \quad (40)$$

После чего из (35) выводится величина истинных напряжений $\sigma(t)$, Па.

При мягком режиме испытания (с заданным законом нагружения) образца, который представлен в виде изменения условных напряжений $\bar{\sigma}(t)$, Па, имеющий взаимосвязь с истинными напряжениями $\sigma = \lambda \bar{\sigma}$ [28], соотношение (35) преобразуется следующим образом (41):

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\lambda} \left[\Psi_A(\lambda) + \Psi_B\left(\frac{\lambda}{\lambda^v}\right) \right], \text{ Па.} \quad (41)$$

Так как правая часть (41) монотонно возрастает при $\lambda^v = \text{const}$, то существует обратная функция (42):

$$\lambda = f_\lambda(\bar{\sigma}, \lambda^v), \quad (42)$$

которую можно найти численно.

Подставив (42) в (39), получим дифференциальное уравнение (43):

$$\dot{\lambda}^v = F_{\lambda}(\bar{\sigma}, \lambda^v), \text{ с}^{-1}. \quad (43)$$

Чтобы найти закон изменения вязкой деформации $\lambda^v(t)$, решаем уравнение (43) с начальным условием (40). Затем, применяя зависимость (42), определяем закон деформирования образца $\lambda(t)$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эластомеры способны деформироваться более чем на 200 %. Однако поскольку в композитных материалах используются армирующие слои, изучение реологических свойств эластомеров ограничивается деформациями, происходящими при разрыве этих армирующих слоев.

Кордная нить марки 16АТЛДУ удлиняется на 23 % при разрыве. Поэтому для калибровки феноменологической модели вязкоупругости проведены периодические испытания резины марки И-73-361 на растяжение с деформацией 20–25 % на малых скоростях на установке Zwick/Roell/BT-FR010TE-A50 (рис. 2).

Испытания представляли собой циклическое нагружение треугольной формы с нагрузкой на пике – 35 Н и нулевой на минимуме, состоящей из 6 циклов по 100 с без «отдыха». Параметры циклических испытаний приняты на основании наработок, обозначенных в трудах [10, 11]. Графики одноосного растяжения на рис. 2 демонстрируют нестационарное поведение. Различия в диаграммах деформирования образцов обусловлены незначительным разбросом их геометрических размеров (табл. 1). По выражениям $\sigma = \lambda \bar{\sigma}$, $\lambda = 1 + \varepsilon$ и по первичным данным (рис. 3) определяют интерполяцией законы $\sigma(t)$ и $\lambda(t)$. Упругость материала описывается потенциалом Трелоара (26), вязкость – зависимостью (33) при $\varepsilon_0 = 10^{-4}$.

Таблица 1. Геометрические характеристики образцов

Table 1. Geometric characteristics of samples

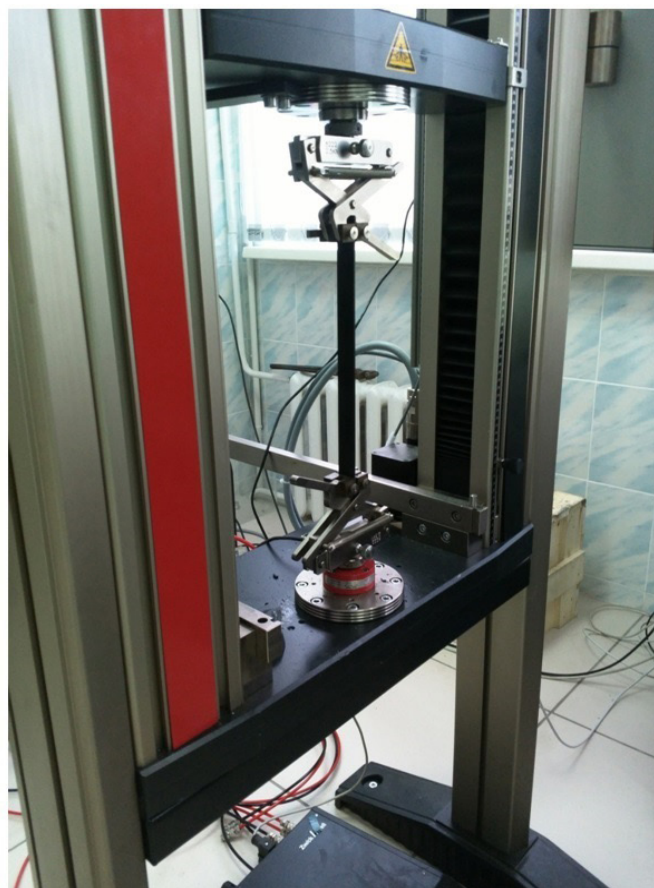
Образец	Рабочая длина l_0 , мм	Толщина a_0 , мм	Ширина b_0 , мм	Площадь поперечного сечения S_0 , мм ²
1	225 ± 1	2,210 ± 0,032	25,293 ± 0,035	55,898 ± 0,891
2		2,103 ± 0,038	25,473 ± 0,191	53,579 ± 1,359
3		2,013 ± 0,041	25,423 ± 0,175	51,186 ± 1,394

Методом наименьших квадратов (отдельно для каждого образца) были определены параметры μ_A , μ_B , μ_v^0 , α , κ (табл. 2). Закон изменения истинных напряжений $\sigma(t)$, заданный в испытании с «жестким» режимом, сравнивался с расчетным по (35) (в совокупности с численным решением выражения (39) при граничных условиях (40) и закона $\lambda(t)$, полученного при эксперименте). Для повышения достоверности применяли альтернативную схему мягкого нагружения, где по заданному закону $\sigma(t)$ и решением соответствующих уравнений определялся закон $\lambda(t)$ и сравнивался с экспериментальным изменением кратности полных удлинений. Тем самым было получено два набора материальных параметров. Из которых выбирался единственный набор, он соответствовал минимуму площадей петель гистерезиса между расчетными и экспериментальными результатами для всех циклов. Результаты для резины марки И-73-361 представлены в табл. 2.

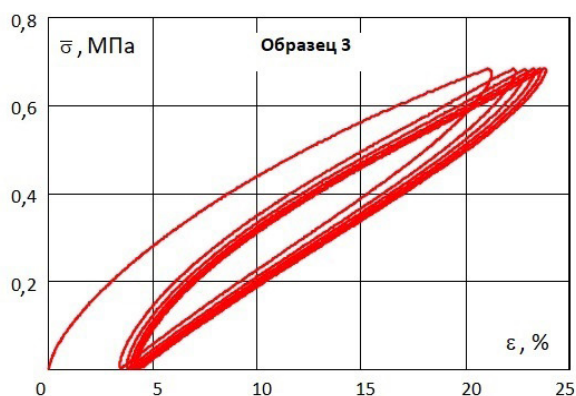
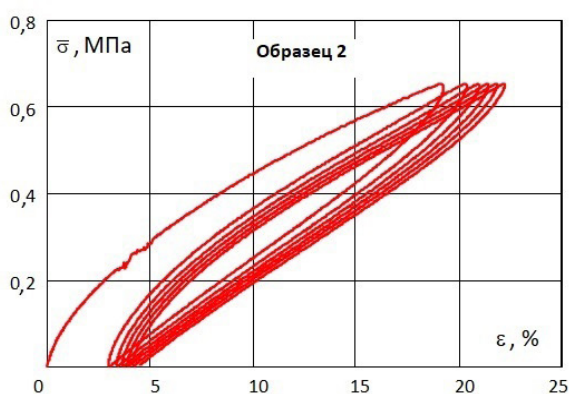
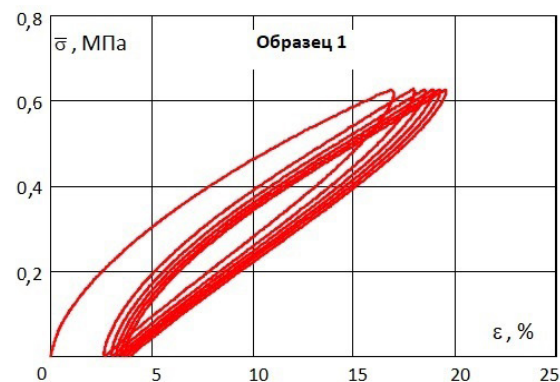
Наибольший разброс наблюдается для коэффициента вязкости μ_v^0 , тогда как для остальных параметров разброс незначителен для инженерной практики.

Примечание: дифференциальные уравнения решались методом Рунге–Кутты с фиксированным шагом. Минимизация невязки велась методом Левенберга–Марквардта. На основе рекомендаций [10–12] назначалось первичное приближение величин определяемых материальных параметров. Расчеты проводились в Mathcad.

На рис. 4, 5 для третьего образца показаны графики расчетных зависимостей: кратность вязких и полных удлинений, истинные напряжения, диаграммы деформирования (гистерезис для каждого цикла). Сопоставление с экспериментальными данными подтверждает высокую точность моделирования (рис. 5 б, с; рис. 4).



a



b

Рис. 2. Испытательный стенд (a) и диаграммы одноосного растяжения образцов резины (b)
Fig. 2. Test stand (a) and uniaxial tensile stress diagrams of rubber samples (b)

Таблица 2. Материальные параметры феноменологической модели гипервязкоупругости
Table 2. Material parameters of the phenomenological model of hyperviscoelasticity

	Материальный параметр (резина И-73-361)				
	$\mu_A, 10^6 \text{ Па}$	$\mu_B, 10^5 \text{ Па}$	$\mu_v^0, 10^6 \text{ Па} \times \text{с}$	α	K
Образец 1	1,118	8,108	1,125	-0,287	0,753
Образец 2	1,046	7,398	1,841	-0,291	0,839
Образец 3	1,020	7,325	2,737	-0,275	0,893
Усредненные значения	$1,061 \pm 0,029$	$7,610 \pm 0,025$	$1,901 \pm 0,47$	$-0,284 \pm 0,005$	$0,828 \pm 0,041$
Погрешность	2,76	3,28	24,53	1,67	4,93

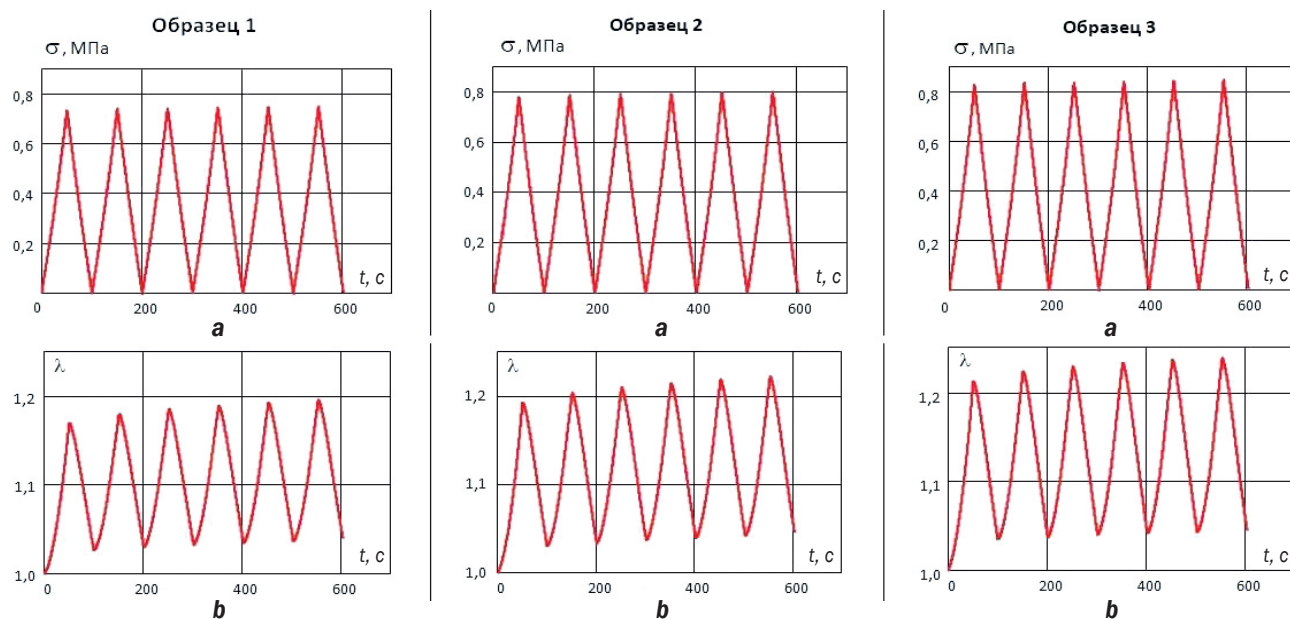


Рис. 3. Законы изменения: а – истинных напряжений; б – кратности полных удлинений

Fig. 3. Laws of variation: а – true stresses; б – total elongation ratio

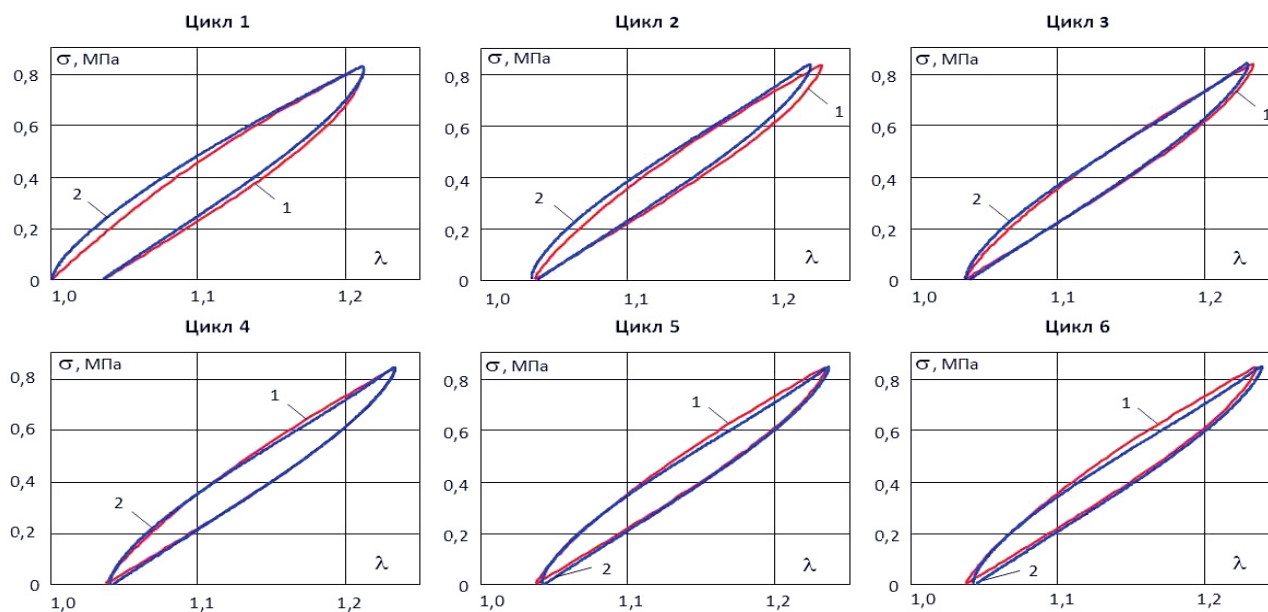


Рис. 4. Диаграммы деформирования третьего образца: 1 – расчетные; 2 – эксперимент

Fig. 4. Deformation diagrams of the third sample: 1 – calculated; 2 – experimental

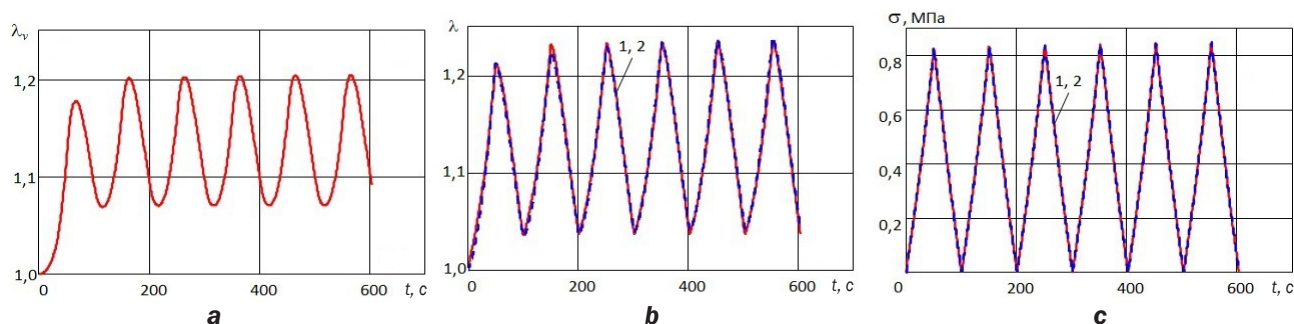


Рис. 5. Графики расчетных и экспериментальных зависимостей (1 – расчет, 2 – эксперимент): а – кратность вязких удлинений; б – кратность полных удлинений; в – истинные напряжения

Fig. 5. Diagrams of calculated and experimental dependencies (1 – calculated, 2 – experimental): а – viscous elongation ratio; б – total elongation ratio; в – true stresses

ОБСУЖДЕНИЕ

Предложенные параметры материала в рамках феноменологической теории гипервязкоупругости целесообразно использовать в практических расчетах для повышения точности моделирования композитных оболочек вращения при симметричном нагружении. Это позволяет учитывать вязкоупругие свойства эластомерных матриц, которые составляет более 80 % от общего объема композита.

Проведенное исследование выявило следующие особенности: μ_v^0 несет довольно высокую погрешность; величина α имеет отрицательные значения. Модель Бергстрёма–Бойс связана с феноменологической моделью в случае одноосного растяжения соотношениями [14] (44):

$$\kappa = 1/m, \quad \alpha = -C_2/m, \quad \mu_v^0 = (\sqrt{2}\hat{C}_1^{1/m})^{-1}. \quad (44)$$

Как указывается в [12], модель Бергстрёма–Бойс демонстрирует чувствительность к значению константы $\hat{C}_1$, что обуславливает закономерность неустойчивости значений материальной константы μ_v^0 . Графики (рис. 6) для коэффициента вязкости $\mu_v(\lambda_{chain}^v)$ на базе параметров (см. табл. 2) показывают, что усредненный график совпадает с графиком образца 2. Разброс значений вязкости предположительно вызван незначительным разбросом геометрических размеров образцов (см. табл. 1) и краевыми эффектами в области зажимов (см. рис. 2).

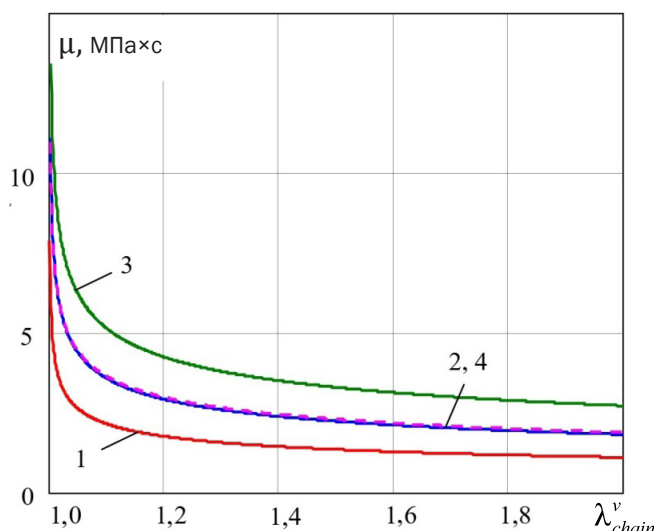


Рис. 6. Зависимость коэффициента μ_v от λ_{chain}^v : 1 – образец 1; 2 – образец 2; 3 – образец 3; 4 – усредненная
Fig. 6. Coefficient μ_v vs λ_{chain}^v : 1 – sample 1; 2 – sample 2; 3 – sample 3; 4 – average

Также ярко выражено отличие в показателе степени α . В работе [12] материальная постоянная $C_2 \in [0, -1]$, а т.к. постоянные $m > 0$, $\hat{C}_1 > 0$, то по (44) α должен быть положительным. Для хлоропренового каучука [12] и полиуретана [11] коэффициент вязкости (33) является возрастающей функцией λ_{chain}^v . Напротив, в настоящей работе α отрицательно. Поскольку для трех видов эластомеров показатели степени α определены экспериментально, то получается, что у одних гиперупругих полимерных материалов коэффициент вязкости возрастает, а у других убывает с ростом вязких деформаций λ_{chain}^v .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные значения материальных параметров феноменологической модели гипервязкоупругости применимы для моделирования релаксации и ползучести, определения вязкоупругих свойств композитных изделий элементов машин.

Вопрос о поведении коэффициента вязкости при увеличении первого инварианта меры Коши–Грина остается открытым:

- 1) в микромеханической модели Бергстрёма–Бойс коэффициент вязкости возрастает;
- 2) в феноменологической модели коэффициент вязкости может как возрастать, так и убывать.

Список источников

1. Ильющин А.А. Труды. Теория термовязкоупругости. М.: Физматлит, 2007. Т. 3. 288 с.
2. Ильющин А.А., Победря Б.Б. Основы математической теории термовязкоупругости. М.: Наука, 1970. 281 с.
3. Кристенсен Р. Введение в теорию вязкоупругости / пер. с англ. М.И. Рейтмана; под ред. Г.С. Шапира. М.: Мир, 1974. 340 с.
4. Пальмов В.А. Колебания упруго-пластических тел. М.: Наука, 1976. 328 с.
5. Эйрих Ф.Р., Рейнер М., Прагер В. и др. Реология: теория и приложения / пер. с англ.; под ред. Ф. Эйриха; под общ. ред. Ю.Н. Работнова, П.А. Ребиндера. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. 824 с.
6. Рейнер М. Реология / пер. с англ. Н.И. Малинина; под ред. Э.И. Григолюка. М.: Наука, 1965. 223 с.
7. Ферри Дж. Вязкоупругие свойства полимеров / пер. с англ. Дж. Ферри; под ред. В.Е. Гуля. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. 535 с.
8. Banks H.T., Hu Shuhua, Kenz Z.R. A brief review of elasticity and viscoelasticity for solids // *Advances in Applied Mathematics and Mechanics*. 2011. Vol. 3. Iss. 1. P. 1–51. <https://doi.org/10.4208/aamm.10-m1030>.
9. Fontanari V., Avalle M., Migliaresi C., Peroni L., Monelli B.D. Dynamic response analysis of thermoplastic polyurethane // *Materials with Complex Behaviour II*. 2012. Vol. 16. P. 337–354. https://doi.org/10.1007/978-3-642-22700-4_20.
10. Белкин А.Е., Даштиев И.З., Лонкин Б.В. Моделирование вязкоупругости полиуретана при умеренно высоких скоростях деформирования // *Математическое моделирование и численные методы*. 2014. № 3. С. 39–54. EDN: TCUUDP.
11. Белкин А.Е., Даштиев И.З., Семенов В.К. Математическая модель вязкоупругого поведения полиуретана при сжатии с умеренно высокими скоростями деформирования // *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение*. 2014. № 6. С. 44–58. EDN: TCSEND.
12. Bergström J.S., Boyce M.C. Constitutive modeling of the large strain time-dependent behavior of elastomers // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1998. Vol. 46. Iss. 5. P. 931–954. EDN: ABALKH.
13. Bergström J.S., Boyce M.C. Large strain time-dependent behaviour of filled elastomers // *Mechanics of Materials*. 2000. Vol. 32. Iss. 11. P. 627–644. [https://doi.org/10.1016/S0167-6636\(00\)00028-4](https://doi.org/10.1016/S0167-6636(00)00028-4).
14. Корнеев В.С., Корнеев С.А. Феноменологическая модель гипervязкоупругости эластомеров при неизменной ориентации главных осей напряжений в сопутствующей системе отсчёта // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. 2019. № 3. С. 149–165. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2019.3.15>. EDN: XUXXCE.
15. Bergström J.S., Hilbert L.B. A constitutive model for predicting the large deformation thermomechanical behavior of fluoropolymers // *Mechanics of Materials*. 2005. Vol. 37. Iss. 8. P. 899–913. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2004.09.002>.
16. Bergstrom J.S., Bischoff J.E. An advanced thermomechanical constitutive model for UHMWPE // *The International Journal of Structural Changes in Solids*. 2010. Vol. 2. Iss. 1. P. 31–39.
17. Qi H.J., Boyce M.C. Stress-strain behavior of thermoplastic polyurethanes // *Mechanics of Materials*. 2005. Vol. 37. Iss. 8. P. 817–839. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2004.08.001>.
18. Quintavalla S.J., Johnson S.H. Extension of the Bergström-Boyce model to high strain rates // *Rubber Chemistry and Technology*. 2004. Vol. 77. Iss. 5. P. 972–981. <https://doi.org/10.5254/1.3547863>.
19. Lee E.H. Elastic plastic deformation at finite strain // *Journal of Applied Mechanics*. 1969. Vol. 36. P. 1–6.
20. Поздеев А.А., Труссов П.В., Няшин Ю.И. Большие упругопластические деформации: теория, алгоритмы, приложения. М.: Наука, 1986. 232 с.
21. Астарита Дж., Марруччи Дж. Основы гидромеханики неньютоновских жидкостей / пер. с англ. Д.А. Казенина; под ред. Ю.А. Бувевича. М.: Мир, 1978. 309 с.
22. Литвинов В.Г. Движение нелинейно-вязкой жидкости. М.: Наука, 1982. 376 с.
23. Серрин Дж. Математические основы классической механики жидкости / пер. с англ. А.Б. Шабата; под ред. Л.В. Овсянникова. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. 256 с.
24. Трусделл К. Первоначальный курс рациональной механики сплошных сред / пер. с англ. Р.В. Гольдштейна, В.М. Ентова; под ред. П.А. Жилина, А.И. Лурье. М.: Мир, 1975. 592 с.
25. Лурье А.И. Нелинейная теория упругости. М.: Наука, 1980. 512 с.
26. Truesdell C., Noll W. The non-linear field theories of mechanics / eds. S.S. Antman. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2004. 602 p.
27. Трелоар Л. Физика упругости каучука / пер. с англ.; под ред. Е.В. Кувшинского. М.: Изд-во иностранной лит., 1953. 240 с.
28. Черных К.Ф. Нелинейная теория упругости в машиностроительных расчётах. Л.: Машиностроение, 1986. 336 с.

References

1. Ilyushin A.A. *Proceedings. Theory of Thermoviscoelasticity*. Moscow: Fizmatlit; 2007, vol. 3, 288 p. (In Russ.).
2. Ilyushin A.A., Pobedrya B.B. *Fundamentals of the mathematical theory of thermoviscoelasticity*. Moscow: Nauka; 1970, 281 p. (In Russ.).

3. Christensen R.M. Theory of Viscoelasticity: An Introduction. New York; London: Academic Press; 1971. (Russ. ed.: *Vvedenie v teoriyu vyazkouprugosti*. Moscow: Mir; 1970, 340 p.)
4. Palmov V.A. *Oscillations of elasto-plastic bodies*. Moscow: Nauka; 1976, 328 p. (In Russ.).
5. Eirich F.R., Reiner M., Prager V., et al. *Rheology. Theory and applications*. New York: Academic Press; 1956. (Russ. ed.: *Reologiya: teoriya i prilozheniya*. Moscow: Izdatel'stvo inostrannoj literatury; 1962, 824 p.)
6. Reiner M. *Rheology*. Berlin; Güttinger; Heidelberg: Springer-Verlag; 1958. (Russ. ed.: *Reologiya*. Moscow: Nauka; 1965, 223 p.)
7. Ferry J. Viscoelastic properties of polymers. (Russ. ed.: *Vyazkouprugie svoystva polimerov*. Moscow: Izdatel'stvo inostrannoj literatury; 1963, 536 p.)
8. Banks H.T., Hu Shuhua, Kenz Z.R. A brief review of elasticity and viscoelasticity for solids. *Advances in Applied Mathematics and Mechanics*. 2011;3(1):1-51. <https://doi.org/10.4208/aamm.10-m1030>.
9. Fontanari V., Avallè M., Migliaresi C., Peroni L., Monelli B.D. Dynamic response analysis of thermoplastic polyurethane. In: *Materials with Complex Behaviour II*. 2012;16:337-354. https://doi.org/10.1007/978-3-642-22700-4_20.
10. Belkin A.E., Dashtiev I.Z., Lonkin B.V. Modeling of polyurethane viscoelasticity at moderately high strain rates. *Mathematical Modeling and Computational Methods*. 2014;3:39-54. (In Russ.). EDN: TCUUDP.
11. Belkin A.E., Dashtiev I.Z., Semenov V.K. Mathematical model of viscoelastic behavior of polyurethane under compression with moderately high strain rates. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*. 2014;6:44-58. (In Russ.). EDN: TCSEND.
12. Bergström J.S., Boyce M.C. Constitutive modeling of the large strain time-dependent behavior of elastomers. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1998;46(5):931-954. EDN: ABALKH.
13. Bergström J.S., Boyce M.C. Large strain time-dependent behaviour of filled elastomers. *Mechanics of Materials*. 2000;32(11):627-644. [https://doi.org/10.1016/S0167-6636\(00\)00028-4](https://doi.org/10.1016/S0167-6636(00)00028-4).
14. Korneyev V.S., Korneyev S.A. The phenomenological model of hyper viscoelasticity of elastomers with a constant orientation of the main stress axes in the accompanying frame of reference. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Series: Mechanics*. 2019;3:149-165. (In Russ.). <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2019.3.15>. EDN: XUXXCE.
15. Bergström J.S., Hilbert L.B. A constitutive model for predicting the large deformation thermomechanical behavior of fluoropolymers. *Mechanics of Materials*. 2005;37(8):899-913. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2004.09.002>.
16. Bergstrom J.S., Bischoff J.E. An advanced thermomechanical constitutive model for UHMWPE. *The International Journal of Structural Changes in Solids*. 2010;2(1):31-39.
17. Qi H.J., Boyce M.C. Stress-strain behavior of thermoplastic polyurethanes. *Mechanics of Materials*. 2005;37(8):817-839. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2004.08.001>.
18. Quintavalla S.J., Johnson S.H. Extension of the Bergström-Boyce model to high strain rates. *Rubber Chemistry and Technology*. 2004;77(5):972-981. <https://doi.org/10.5254/1.3547863>.
19. Lee E.H. Elastic plastic deformation at finite strain. *Journal of Applied Mechanics*. 1969;36:1-6.
20. Pozdeev A.A., Trusov P.V., Nyashin Yu.I. *Finite elastoplastic strains: theory, algorithms, applications*. Moscow: Nauka; 1986, 232 p. (In Russ.).
21. Astarita J., Marucci J. Principles of non-Newtonian fluids mechanics. London: McGRAW; 1974. (Russ. ed.: *Osnovy gidromekhaniki nen'yutonovskih zhidkostej*. Moscow: Mir; 1978, 309 p.)
22. Litvinov V.G. *Motion of a nonlinear viscous fluid*. Moscow: Nauka; 1982, 376 p. (In Russ.).
23. Serrin J. Mathematical principles of classical fluid mechanics. Berlin; 1959. (Russ. ed.: *Matematicheskie osnovy klassicheskoy mekhaniki zhidkosti*. Moscow: Izdatel'stvo inostrannoj literatury; 1963, 256 p.)
24. Truesdell C. A first course in rational continuum mechanics. Baltimore, Maryland: The Johns Hopkins University; 1972. (Russ. ed.: *Pervonachal'nyj kurs racional'noj mekhaniki sploshnyh sred*. Moscow: Mir; 1975, 592 p.)
25. Lurie A.I. *Nonlinear theory of elasticity*. Moscow: Nauka; 1980, 512 p. (In Russ.).
26. Truesdell C., Noll W. The non-linear field theories of mechanics. In: Antman S.S. (eds.). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag; 2004, 602 p.
27. Treloar L. The physics of rubber elasticity. Oxford; 1949. (Russ. ed.: *Fizika uprugosti kauchuka*. Moscow: Izdatel'stvo inostrannoj literatury; 1953, 240 p.)
28. Chernykh K.F. *Nonlinear theory of elasticity in mechanical engineering calculations*. Leningrad: Mashinostroenie; 1986, 336 p.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Корнеев Владимир Сергеевич,
доктор технических наук,
профессор кафедры «Нефтегазовое дело,
стандартизация и метрология»,
Омский государственный технический университет,
644050, Российская Федерация,
г. Омск, пр. Мира, 11
✉ vskorneev@omgtu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1694-1190>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir S. Korneyev,
Dr. Sci. (Eng.),
Professor of the Department of Oil and Gas
Engineering,
Standardization and Metrology,
Omsk State Technical University,
11 Mira pr., Omsk 644050, Russian Federation
✉ vskorneev@omgtu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1694-1190>

Корнеев Сергей Александрович,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Основы механики
и автоматического управления»,
Омский государственный технический университет,
644050, Российская Федерация,
г. Омск, пр. Мира, 11
korsa_home@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0554-5451>

Sergey A. Korneyev,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Fundamentals of
Mechanics
and Automatic Control,
Omsk State Technical University,
11 Mira pr., Omsk 644050, Russian Federation
korsa_home@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0554-5451>

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Authors' contribution

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 24.02.2026 г.; одобрена после рецензирования 15.04.2026 г.; принята к публикации 20.04.2026 г.

Information about the article

The article was submitted 24.02.2026; approved after reviewing 15.04.2026; accepted for publication 20.04.2026.



Повышение эффективности работы мультимодальной системы управления главным гидрораспределителем штамповочного прессы в тяжёлых условиях эксплуатации

К.В. Лицин^{1✉}, С.Н. Басков², Д.А. Морковник³

¹⁻³Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Российская Федерация

Резюме. Цель – повышение стабильности и качества управления подвижной траверсы главного гидрораспределителя штамповочного прессы «Уральский завод тяжёлого машиностроения». Объектом исследований явился штамповочный пресс, который предназначен для выпуска колец различных профилей и материалов усилием 10000 тс, участвующий в технологическом цикле кольцевого проката. Для моделирования типовых процессов основных элементов системы использована среда разработки TiaPortal. Реализовано повышение стабильности и качества управления подвижной траверсой главного гидрораспределителя штамповочного прессы УЗТМ 10000 тс за счет разработки и внедрения специализированных алгоритмов обработки сигналов ручного джойстика. Разработанные алгоритмы прошли апробацию на реальном оборудовании. Предложен и реализован алгоритм формирования управляющего сигнала, который ограничивает скорость его изменения до уровня, исключающего гидравлические удары, и обеспечивает S-образную форму расходной характеристики сервоклапана за счет каскадного включения аperiodических звеньев первого порядка, что минимизирует переходные процессы. Проведенные испытания подтвердили, что блок обработки джойстика полностью исключает влияние зоны нелинейности, обеспечивая стабильное нулевое задание в исходном положении; блок формирования задания гарантирует плавное, безгидроударное изменение формы расходной характеристики сервоклапана по S-образной траектории. В результате модернизации удалось сократить простой оборудования на ремонт на 7 %, что подтверждает практическую эффективность и экономическую целесообразность предложенных решений. Разработанные алгоритмы и технические решения были апробированы на реальном оборудовании предприятия Челябинской области. Внедрение разработанной системы управления позволило повысить надежность работы гидрораспределителя на 5–7 %, исключить гидравлические удары и обеспечить точное позиционирование при времени открытия и закрытия до 1,5 с. Предложенное решение может быть успешно адаптировано для модернизации систем управления аналогичных гидравлических прессов и другого кузнечно-штамповочного оборудования с ручным управлением, продлевая их жизненный цикл.

Ключевые слова: штамповочный пресс, автоматизация, джойстик, нелинейность, сервоклапан, компенсация, траектория

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №25-79-10376.

Для цитирования: Лицин К.В., Басков С.Н., Морковник Д.А. Повышение эффективности работы мультимодальной системы управления главным гидрораспределителем штамповочного прессы в тяжёлых условиях эксплуатации // iPolytech Journal. 2026. Т. 30. № 3. С. 427–441. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2026-3-427-441>. EDN: PVMGIC.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Multimodal control of the main hydraulic directional control valve of a forging press under severe operating conditions

Konstantin V. Litsin^{1✉}, Sergey N. Baskov², Denis A. Morkovnik³

¹⁻³South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

Abstract. This study aims to improve the stability and performance of control of the moving crosshead in the main hydraulic directional control valve of a 10,000-tf forging press manufactured by Ural Heavy Machinery Plant (UZTM, Russia). The press is used to produce rings of various profiles and materials as part of the ring-rolling process. Typical processes in the main system components were modeled using the TIA Portal software platform.

Improved stability and control performance were achieved by developing and implementing specialized algorithms for processing signals from the manual joystick. The algorithms were tested on the actual equipment. A control signal generation algorithm was developed and implemented to limit the rate of signal change to a level sufficient to prevent hydraulic shock and to provide an S-shaped servo-valve flow characteristic through cascaded first-order lag elements, thereby minimizing transients. Testing confirmed that the processing block for joystick input completely eliminates the effect of the nonlinear region while maintaining a stable zero setpoint in the neutral position. The setpoint generation block ensures a smooth change in the servo-valve flow characteristic along an S-shaped trajectory without hydraulic shock. The modernization reduced equipment downtime for repairs by 7 %, confirming the practical effectiveness and economic feasibility of the proposed solutions. The developed algorithms and technical solutions were validated on actual equipment at an industrial facility in the Chelyabinsk Region. Implementation of the control system increased the operational reliability of the hydraulic directional control valve by 5–7 %, eliminated hydraulic shock, and provided accurate positioning with opening and closing times of up to 1.5 s. The proposed solution can be adapted to upgrade the control systems of similar hydraulic presses and other manually operated forging and stamping equipment, thereby extending their service life.

Keywords: die-stamping machine, automation, joystick, nonlinearity, servovalve, compensation, trajectory

Funding. The research was funded by the Russian Science Foundation (grant No. 25-79-10376).

For citation: Litsin K.V., Baskov S.N., Morkovnik D.A. Multimodal control of the main hydraulic directional control valve of a forging press under severe operating conditions. *iPolytech Journal*. 2026;30(3):427-441. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2026-3-427-441>. EDN: PVMGIC.

ВВЕДЕНИЕ

Современное кузнечно-штамповочное производство, в частности, кольцепрокатные комплексы, предъявляет высокие требования к точности, надежности и производительности оборудования [1–9]. Ключевым звеном в технологической цепи изготовления бесшовных колец крупного диаметра является штамповочный пресс, который осуществляет предварительную формовку заготовок [10–17].

В работе рассматривается штамповочный пресс, который предназначен для выпуска колец различных профилей и материалов, которые необходимы для производства таких деталей, как коронные шестерни, планетарные передачи, фланцы и т.д. Для того чтобы получить кольца необходимого профиля, заготовки определенной формы (в виде тора) помещают в кольцепрокатный стан, где согласно определенным законам деформации заготовки получают кольца требуемого профиля [18–24]. В данной работе рассмотрен штамповочный пресс усилием 10000 тс, участвующий в технологическом цикле кольцепрокатного производства. Данный пресс предназначен для формовки цилиндрических заготовок разных габаритов в заготовки с формой, требуемой для кольцераскатного стана.

Рассматриваемый штамповочный пресс УЗТМ 10000 тс (Уральский завод тяжелого машиностроения) был произведен в 1983 г. За годы эксплуатации гидрораспределительная аппаратура, установленная для управления данным прессом, была изношена. Это стало причиной возникновения простоев, связанных с необходимостью проведения ремонтных работ, а также сказалось на качестве выпускаемых колец. В связи с этим появилась необходимость в проведении модернизации главного гидрораспределителя пресса. При проведении модернизации была заменена гидросистема пресса и сервоклапаны гидрораспределителя. Для их управления авторами статьи была разработана новая система управления [25]. Сложность разработанной системы продиктована необходимостью выступить в роли интеллектуального буфера между «капризной» старой механикой (потенциометр джойстика) и высокоточной новой гидравликой. Раньше машиностроение обходилось без таких систем потому, что либо само оборудование было проще и допускало больше погрешностей, либо эти функции выполнялись чисто гидравлическими и механическими средствами – например, специальными золотниковыми устройствами, дозирующими цилиндрами и механизмами обратной связи, которые обеспечивали следящее действие без электроники. Однако по мере роста требований к точности, производительности и надежности, а также по мере старения парка оборудования электронные системы управления становятся не роскошью, а необходимостью для поддержания эффективности производства.

В первоначальной конфигурации связь между оператором и гидрораспределителем обеспечивалась напрямую, без промежуточной цифровой обработки сигнала. Это означало, что

оператор, воздействуя на рычаги или задающие устройства, непосредственно влиял на пилотные гидравлические каскады, которые, в свою очередь, управляли главным золотником.

Проблема исходной системы, таким образом, заключалась не в отсутствии управления как такового, а в его нелинейности, нестабильности и зависимости от множества факторов, в том числе от опыта оператора. Именно за счет мастерства работника добивались ручной компенсации несовершенства машинного оборудования.

В настоящее время при модернизации подобных систем уделяется большое внимание проблемам гистерезиса и дрейфа нуля гидрораспределителей; неравномерности давления и синхронизации движения исполнительных органов; гидравлическим ударам и неконтролируемым переходным процессам. Пути решения этих проблем в современной практике автоматизации идут по нескольким направлениям. Первое направление – компенсация статических нелинейностей [6, 14, 26]. Второе – применение адаптивных алгоритмов управления, в том числе с использованием искусственного интеллекта (ИИ) [27, 28]. ИИ мог бы анализировать огромный массив данных, недоступный для классических регуляторов. Например, нейросетевая модель могла бы обучаться на множестве циклов штамповки, выявляя корреляции между вибрациями, давлением, температурой масла и скоростью перемещения траверсы. На основе этих данных ИИ мог бы в реальном времени адаптировать параметры регуляторов, подстраивая их под текущий износ оборудования или изменение свойств рабочей жидкости. Теоретические работы обосновывают возможность использования законов адаптивного управления для гидропрессового оборудования. Третье направление – совершенствование конструкции самих гидравлических компонентов [29, 30].

Целью работы является повышение стабильности и качества управления подвижной траверсы главного гидрораспределителя пресса с использованием джойстика.

Для того чтобы исключить проблему с зоной нелинейности в исходном положении ручки джойстика, необходимо разработать блок обработки, который будет учитывать эту нелинейность и исключать подачу сигнала задания на контуры регулирования положением запорных элементов сервоклапанов в исходном положении ручки.

Чтобы избежать быстрых открытий и закрытий сервоклапанов, необходимо разработать блок, который будет ограничивать максимальную скорость изменения управляющего сигнала задания на контуры регулирования. Также для плавности работы данный блок должен обеспечивать изменение расходной характеристики по «S-образной» траектории, что положительно скажется на сроке работы гидроаппаратуры.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Рассматриваемый гидрораспределитель имеет в своем составе множество сервоклапанов, управление которыми осуществляется оператором при помощи джойстика, работающего по принципу потенциометра. Отклонение ручки джойстика, как в прямом, так и в обратном направлении вызывает открытие и закрытие сервоклапанов, что вызывает перемещение траверсы пресса.

Джойстик и значение сопротивления его потенциометра имеют зону нечувствительности в исходном положении его ручки. При проведении процедуры определения рабочего диапазона джойстика определяются сопротивления, соответствующие исходной позиции ручки джойстика. После отклонения и возврата ручки в исходное положение, значение сопротивления на потенциометре будет иметь значение, отличающееся от ранее установленной величины сопротивления исходного положения. В зависимости от того, в какое направление была отклонена ручка, значение сопротивления может быть либо больше, либо меньше эталонного значения сопротивления исходного положения. Это расхождение будет подаваться на блок формирования задания, и в результате может привести к нестабильности работы пресса в режиме удержания траверсы в фиксированном положении.

На рис. 2 приведен график зависимости выходного значения сигнала блока обработки джойстика от фактического отклонения ручки джойстика.

На приведенном рис. 2 по горизонтальной оси показано выходное значение сигнала блока обработки джойстика («Deviation»), а по вертикальной оси – сигнал с аналого-цифрового преоб-

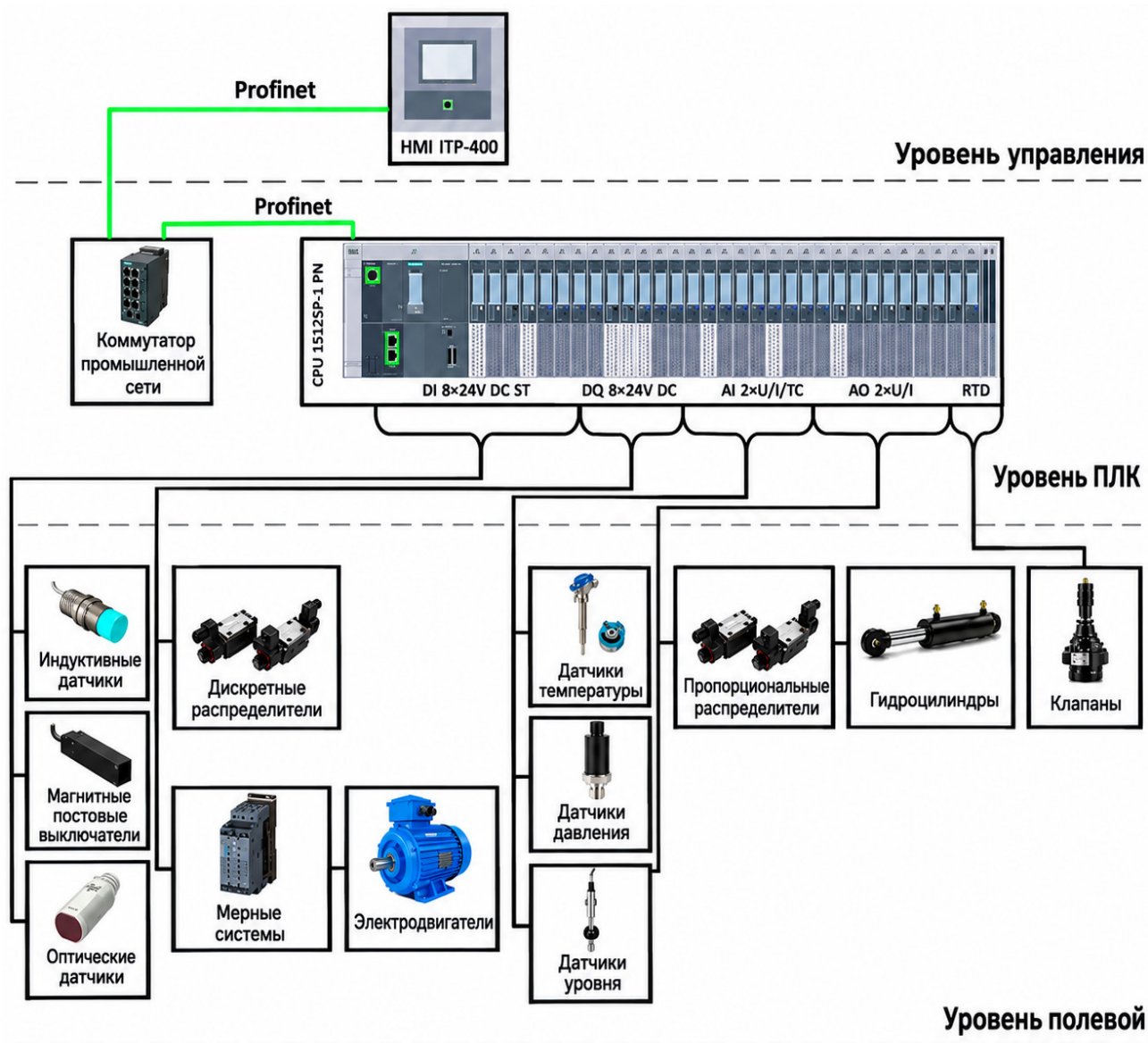


Рис. 1. Архитектура системы управления главным гидрораспределителем

Fig. 1. Architecture of the main hydraulic valve control system

разователя (АЦП) модуля («Module code»), на который подключен потенциометр джойстика. Красным цветом показана зона нечувствительности. Это область, в которой может оказаться сопротивление потенциометра джойстика при возврате ручки джойстика в исходное положение.

Во время работы оператор может резко отклонять ручку джойстика, в этом случае скорость изменения сигнала на потенциометре окажется очень высокой. Это может привести к гидравлическим ударам и, как следствие, к механическим неисправностям.

Для того чтобы исключить зону нечувствительности, которая описана выше (см. рис. 2), была построена требуемая зависимость с мертвой зоной, вид которой приведен на рис. 3.

На приведенном рис. 3 видно, что в указанном диапазоне зоны нелинейности блок обработки игнорирует сигнал изменения сопротивления в зоне нечувствительности. Ширину мертвой зоны определяет параметр «DeadZone» отдельно для положительного и для отрицательного направления перемещения ручки джойстика.

Параметр «Bias» определяет диапазон изменения процента отклонения ручки джойстика, за который блок обработки выравнивает свой выходной сигнал до значений, соответствующих сигналу с АЦП модуля, к которому подключен джойстик.

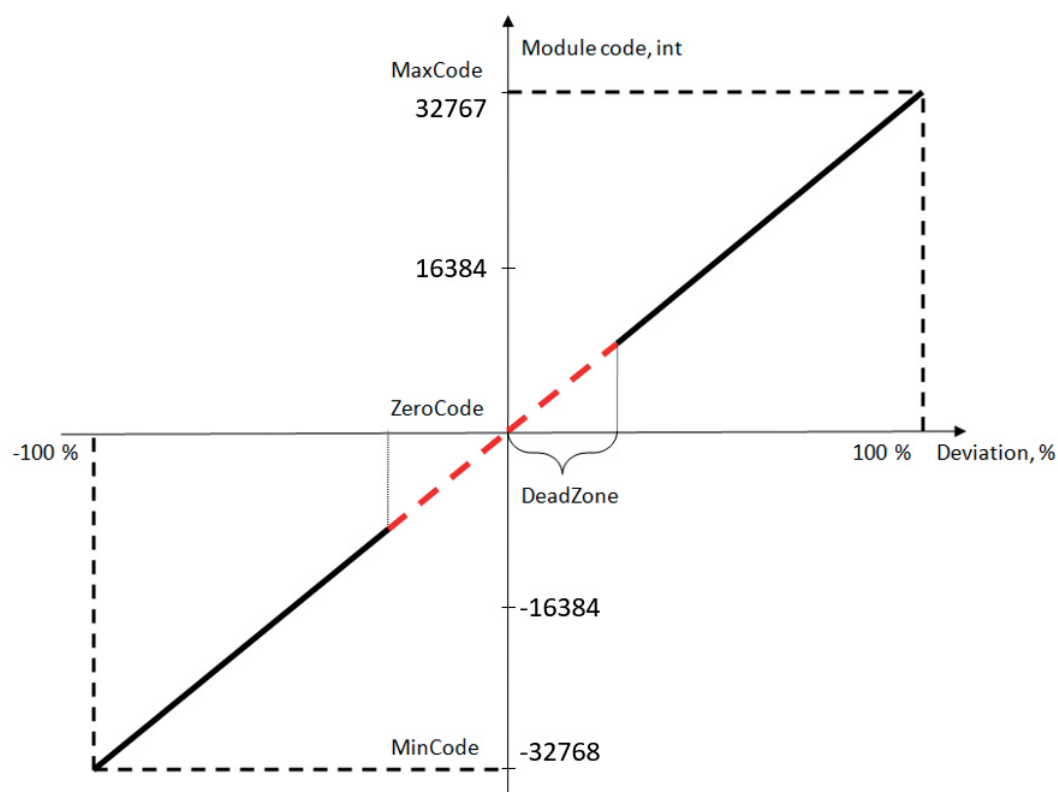


Рис. 2. График зависимости выходного сигнала блока обработки джойстика от фактического отклонения ручки джойстика
Fig. 2. Graph of the output signal of the joystick processing unit vs the actual deflection of the joystick handle

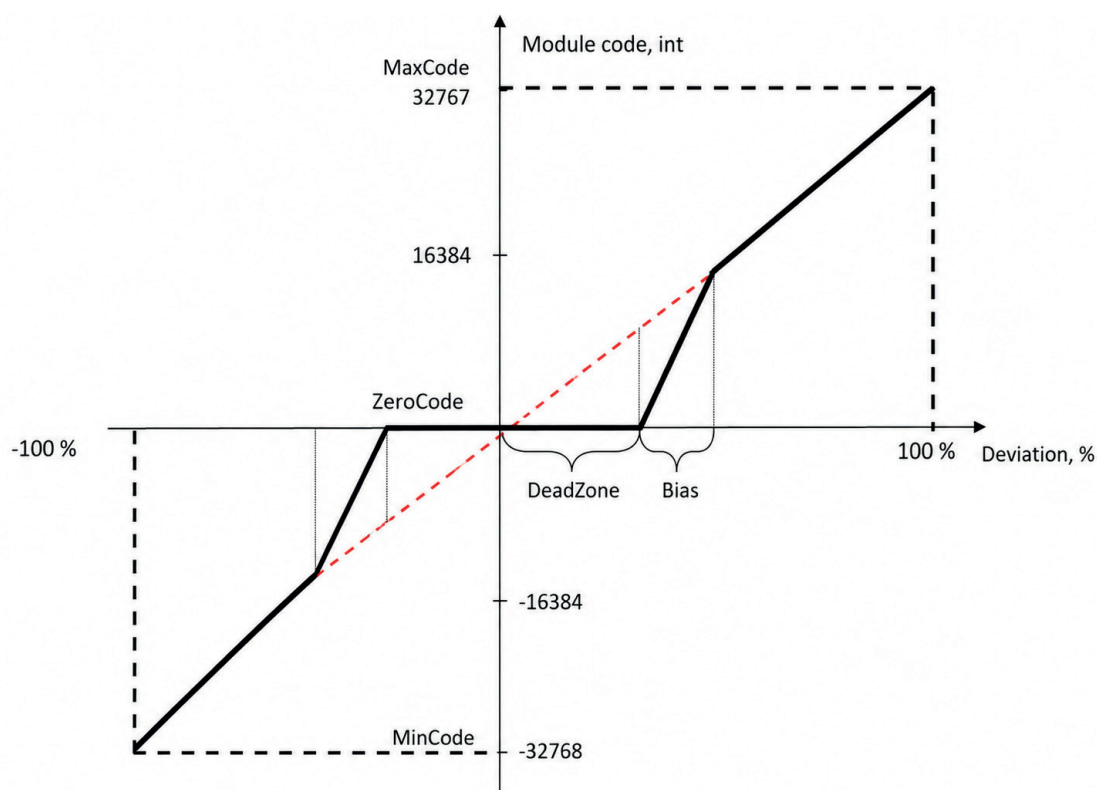


Рис. 3. Требуемый вид зависимости выходного сигнала блока обработки джойстика от фактического отклонения ручки джойстика
Fig. 3. The required type of dependence of the output signal of the joystick processing unit on the actual deflection of the joystick handle

Для выравнивания будем использовать линейную зависимость. Если процент отклонения ручки джойстика больше указанного в параметре «DeadZone» процента и меньше суммы значений параметров «DeadZone» и «Bias», то блок обработки джойстика изменяет свое значение в соответствии прямой, коэффициенты которой необходимо определить.

Для того чтобы определить коэффициенты, необходимо записать общий вид для линейной зависимости. Ниже приведена зависимость для положительного диапазона отклонения ручки джойстика (1):

$$\frac{x - \text{DeadZone}}{\text{Bias}} = \frac{y - \text{ZeroCode}}{(\text{DeadZone} + \text{Bias}) \cdot \frac{\text{MaxCode} - \text{ZeroCode}}{100}}. \quad (1)$$

Представленная зависимость учитывает значения зоны нечувствительности «DeadZone» и ширину зоны компенсации «Bias», а также параметров, полученных в результате определения рабочего диапазона сопротивления потенциометра джойстика: эталонное значение кода сопротивления в исходном положении ручки «ZeroCode», максимальный код с АЦП модуля «MaxCode» и минимальный код с АЦП модуля «MinCode». Преобразовав данное выражение, получим следующие коэффициенты (2), (3):

$$k_{\text{up}} = \frac{1}{\text{Bias}} \cdot (\text{ZeroCode} + (\text{DeadZone} + \text{Bias}) \cdot \frac{\text{MaxCode} - \text{ZeroCode}}{100}); \quad (2)$$

$$b_{\text{up}} = \frac{\text{DeadZone}}{\text{Bias}} \cdot (\text{ZeroCode} + (\text{DeadZone} + \text{Bias}) \cdot \frac{\text{MaxCode} - \text{ZeroCode}}{100}). \quad (3)$$

Аналогичным образом получим формулы для расчетов коэффициентов для построения сопрягающей кривой при отклонении ручки в отрицательном направлении. Записав и преобразовав выражение, получим следующие формулы для определения соответствующих коэффициентов (4), (5):

$$k_{\text{down}} = \frac{1}{\text{Bias}} \cdot (\text{ZeroCode} + (\text{DeadZone} + \text{Bias}) \cdot \frac{\text{MinCode} - \text{ZeroCode}}{100}); \quad (4)$$

$$b_{\text{down}} = \frac{\text{DeadZone}}{\text{Bias}} \cdot (\text{ZeroCode} + (\text{DeadZone} + \text{Bias}) \cdot \frac{\text{MinCode} - \text{ZeroCode}}{100}). \quad (5)$$

Таким образом, выходное значение блока обработки джойстика изменяется согласно следующей системе (6), где приведен пример при отклонении ручки джойстика в положительном направлении:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Out} = 0, \text{ при } P_{\text{н}} < \text{DeadZone} \\ \text{Out} = k_{\text{up}} \cdot P + b_{\text{up}}, \text{ при } \text{DeadZone} < P_{\text{н}} < \text{DeadZone} + \text{Bias}, \\ \text{Out} = \frac{P - \text{ZeroCode}}{\text{MaxCode} - \text{ZeroCode}} \cdot 100 \end{array} \right. \quad (6)$$

где $P_{\text{н}}$ – масштабированное значение отклонения выхода АЦП, %; P – значение выхода АЦП; Out – выход блока обработки; ZeroCode – код АЦП, соответствующий сопротивлению исходного положения джойстика; MaxCode – максимальное значение кода АЦП.

Во время работы задание на процент открытия изменяется пропорционально отклонению ручки джойстика. При этом сигнал задания на открытие клапанов может изменяться от

0 до 100 % в пределах малых отклонений ручки джойстика (в зависимости от циклограммы), например, один из клапанов может полностью открыться или закрыться в промежутке от 20 до 50 % поворота ручки. При такой работе (резком отклонении ручки джойстика) скорость изменения сигнала может быть очень высокой, что может привести к быстрым открытиям сервоклапанов. Эти открытия могут привести к гидравлическим ударам и, как в следствие, к механическим неисправностям.

Для того чтобы избежать резких открытий сервоклапанов, необходимо ограничивать скорость изменения сигналов задания, которые системой подаются на контуры регулирования положением запорно-регулирующих элементов сервоклапанов. Для этого необходимо разработать блок формирования сигнала задания, который помимо ограничения скорости изменения сигнала позволит динамически изменять скорость открытия клапанов в процессе работы системы с целью гибкой настройки. Также для плавности работы блок должен обеспечивать открытие соответствующих клапанов по «S-образной» траектории. Для решения этой задачи разработаем блок, который будет определять параметр, ограничивающий максимальное приращение к выходному сигналу за один цикл контроллера. На рис. 4 представлена зависимость задания на процент открытия клапана SP (Set Point – уставка) от времени t.

На оси времени t показан промежуток времени Δ , этот промежуток равен времени одного цикла контроллера. На оси задания процента открытия показано приращение к выходному сигналу блока за соответствующее время цикла контроллера.

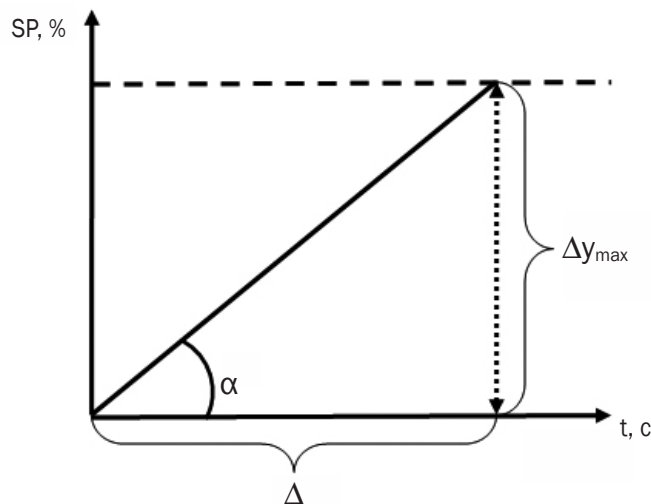


Рис. 4. Зависимость задания на процент открытия клапана SP от времени t
Fig. 4. Valve opening percentage setpoint (SP) vs time t

Если построить треугольник, катетами которого являются время такта контроллера Δ и приращение к выходному сигналу, то указанное приращение зависит от угла α . Таким образом, максимальное приращение за один такт контроллер $\Delta y_{\max}$ составит (7):

$$\Delta y_{\max} = \tan\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right) \cdot \Delta, \quad (7)$$

где $\Delta y_{\max}$ – максимальное приращение к выходному сигналу, %; Δ – время такта контроллера, с.

Таким образом, максимальное приращение к выходному сигналу за такт контроллера ограничено расчетным параметром $\Delta y_{\max}$.

Для того чтобы можно было настраивать максимальное время открытия и закрытия клапана отдельно, рассчитаем значения максимального приращения для возрастающей характеристики и убывающей. В процессе работы приращение каждого такта будет суммироваться в специальном аккумуляторе, значение которого будет подаваться на выход блока. Как указывалось выше, для плавности работы данный блок должен обеспечивать изменение сигнала по «S-образной» траектории. Для этого значения аккумулятора будем подавать на апе-

риодическое звено второго порядка. Запишем данное звено в виде двух последовательно подключенных апериодических звеньев первого порядка (8):

$$W(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1} \cdot \frac{k_2}{T_2 p + 1}, \quad (8)$$

где T_1 и T_2 – постоянные времени апериодического звена первого порядка, с; k_1 и k_2 – коэффициенты усиления апериодического звена первого порядка.

В данном случае передаточные звенья представлены в непрерывном виде. Для реализации их в контроллере необходимо передаточные функции представить в виде решетчатых функций.

Для удобства вычислений представим апериодическое звено первого порядка в дифференциальной форме (9):

$$T \frac{dy}{dt} + y = k \cdot SP. \quad (9)$$

Представим дифференциал в разностной форме (10):

$$T \frac{y_i - y_{i-1}}{\Delta} + y_i = k \cdot SP. \quad (10)$$

Выразив из этого выражения y_i , получим (11):

$$y_i = \frac{\Delta \cdot k \cdot SP + T \cdot y_{i-1}}{T + \Delta}, \quad (11)$$

где Δ – время такта контроллера, с; T – постоянная времени апериодического звена первого порядка, с.

Для реализации апериодического звена второго порядка нужно последовательно записать второе апериодическое звено первого порядка, на вход которого будет подаваться сигнал с выхода первого апериодического звена первого порядка. Вид его решетчатой функции аналогичен первому звену.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С целью исследования разработанных блоков было проведено моделирование типовых процессов основных элементов системы. Для моделирования процессов использована среда разработки TiaPortal, в которой применялись специальные функциональные блоки для моделирования процессов.

Проверено функционирование блока обработки потенциометра джойстика. Зависимость его выходного сигнала должна иметь вид, указанный на рис. 3. В качестве примера были выставлены параметры «DeadZone» и «Bias», равные 5 %. В результате проверки был получен график зависимости выходного сигнала блока обработки джойстика от степени поворота ручки джойстика (рис. 5).

Из графика видно, что ширина зоны нечувствительности соответствует выставленной настройке 5 %. Убедившись, что блок обработки джойстика работает правильно, проверим работу сервоклапана в режиме поддержания положения. Проверка была реализована на реальном оборудовании, включающем в себя рассматриваемый джойстик, установленный на пульте управления прессом (рис. 6).

Для проверки воспользуемся имеющимся функциональным блоком управления сервоклапаном, в состав которого входят пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор и разработанный блок формирования сигналов задания. Построим замкнутый контур

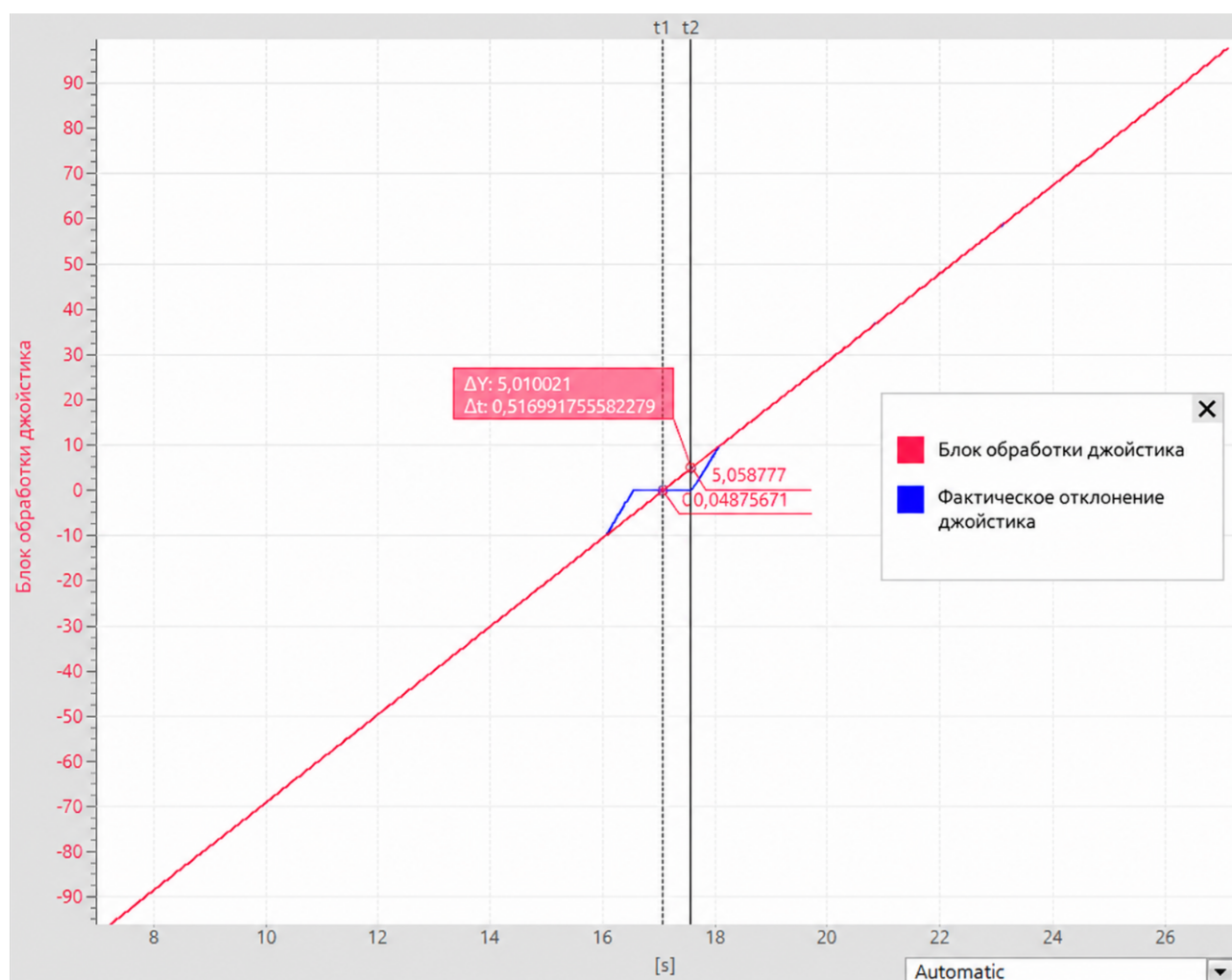


Рис. 5. График зависимости выхода блока обработки джойстика от входного сигнала с аналого-цифрового преобразователя модуля

Fig. 5. Graph of the joystick processing unit output vs input signal from the module's analog-to-digital converter



Рис. 6. Пульт управления прессом

Fig. 6. Die-stamping machine control pane

регулирования положения запорно-регулирующего элемента и подадим на него выход с блока формирования сигналов задания. Для примера выставим следующие параметры: минимальное время открытия и закрытия 1,5 с; постоянная времени фильтра $T = 0,2$ с; пропорциональный коэффициент ПИД регулятора $K = 500$; постоянная времени интегрирования ПИД регулятора $T_i = 250$ мс. При изменении положения ручки джойстика был получен график (рис. 7).

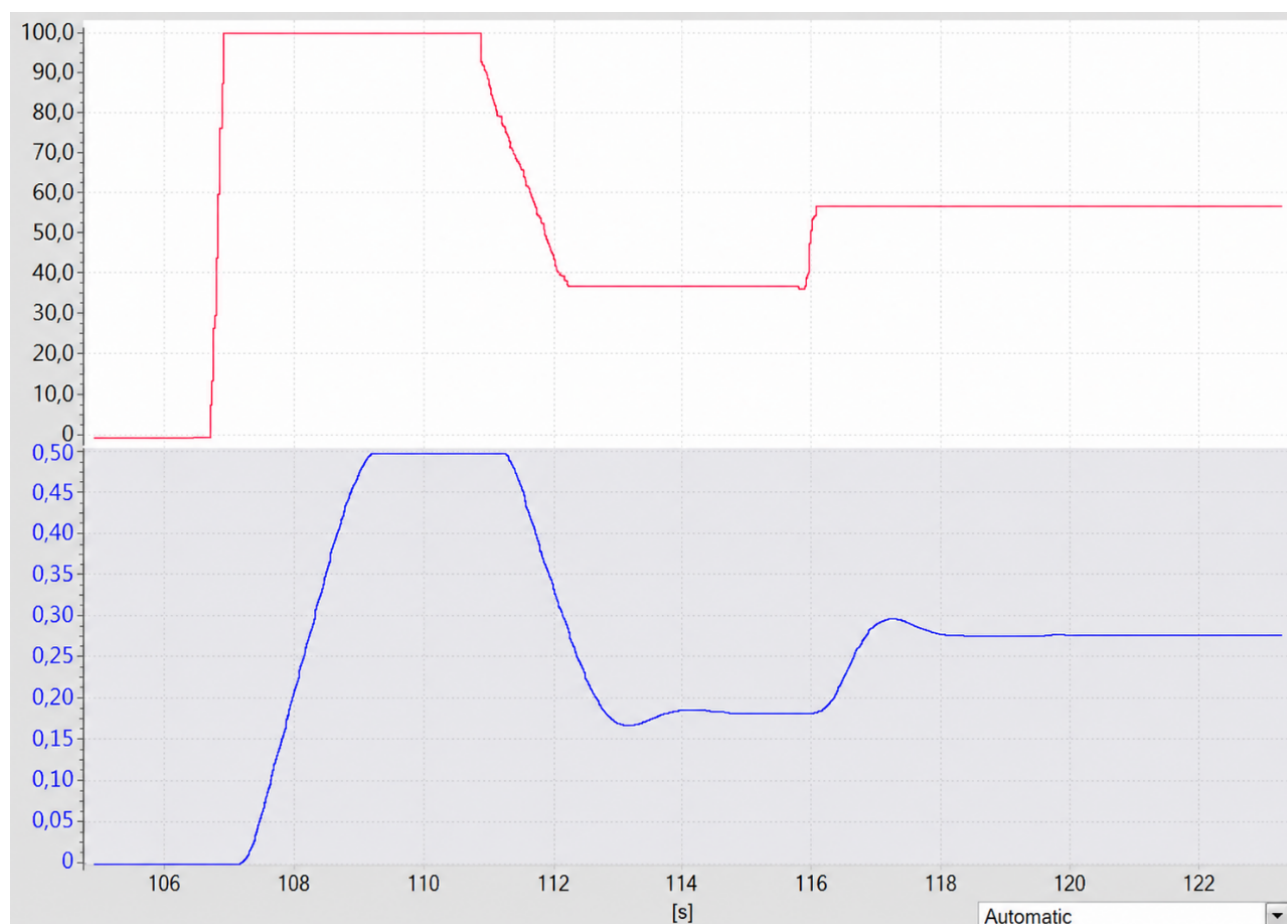


Рис. 7. График зависимости положения запорно-регулирующего элемента клапана от степени отклонения ручки джойстика
Fig. 7. Graph of the valve shut-off/regulating element position vs joystick handle deflection

Из графика видно, что запорно-регулирующий элемент клапана перемещается плавно, резкое отклонение ручки джойстика не вызывают резкой ответной реакции у системы, тем самым исключая гидравлические удары в гидросистеме. Также видно, что блок управления обеспечивает изменение формы расходной характеристики сервоклапана по «S-образной» траектории, что обеспечивает более продолжительную работу клапана. В промежуточных положениях ручки джойстика система поддерживает положение клапана в заданной позиции.

ОБСУЖДЕНИЕ

В представленной работе проведен комплексный анализ проблем управления штамповочным прессом усилием 10 000 тс и предложены решения для повышения стабильности и качества его работы. По результатам испытаний можно сказать, что предложенные решения позволили устранить связанные с потенциометром джойстика нелинейности и проблемы с возможными гидравлическими ударами, которые возникали во время работы пресса при резком отклонении ручки джойстика, что позволило сократить время ремонтных работ на 7 % по отношению к общей продолжительности работы пресса. В связи с этим можно утверждать о применимости разработанных решений на реальном оборудовании, имеющем аналогичный принцип работы.

Однако стоит отметить, что разработанные алгоритмы имеют статическую настройку. Для того чтобы добиться более надежной и отказоустойчивой работы оборудования, возможно внедрение адаптивных алгоритмов для настройки параметров, используемых в разработанных алгоритмах. Такие алгоритмы позволят мгновенно выполнять поправки в работе оборудования при количественном изменении его характеристик, что будет способствовать продлению срока работы гидросистемы, а также прогнозировать возможные неисправности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе была рассмотрена система управления модернизированной гидросистемы главного гидрораспределителя штамповочного пресса, которая предназначена для подачи рабочей жидкости в рабочие полости пресса. Рассмотрена проблема, которая возникала во время модернизации системы управления гидрораспределителем пресса при помощи джойстика. В качестве решения этой проблемы были разработаны блок обработки джойстика и блок формирования сигнала задания. После разработки указанных блоков была проведена апробация разработанных блоков на реальном оборудовании. При скачкообразном изменении положения ручки джойстика график переходного процесса имеет равное 4 % перерегулирование, что соответствует настройке регулятора. Полученная система исключает зону нелинейности в исходном положении ручки джойстика, ограничивает скорость изменения сигналов задания, подаваемые на контуры регулирования положением запорных элементов сервоклапанов, обеспечивая их плавную работу. В результате проведенной модернизации удалось обеспечить непрерывную работу пресса. В результате проведенной работы исключили гидравлические удары в системе, добившись необходимой точности перемещения джойстиком в системе управления, что сократило количество времени ремонтных работ на 7 % от общей продолжительности работы оборудования.

Научная новизна работы заключается в том, что разработаны математическая модель и алгоритм обработки сигнала ручного джойстика, которые позволяют компенсировать зону нелинейности (гистерезиса) потенциометра в его исходном положении. Новизна заключается в комбинированном использовании двух параметрически настраиваемых зон – «DeadZone» (зона нечувствительности) и «Bias» (зона компенсации) с линейной сопрягающей характеристикой, что обеспечивает стабильный нулевой сигнал задания при возврате ручки в исходное положение и плавное, предсказуемое начало управления. Предложен и реализован в дискретной форме алгоритм формирования задания, который не только ограничивает скорость изменения управляющего сигнала, но и обеспечивает его изменение формы расходной характеристики сервоклапана по S-образной траектории за счет каскадного включения двух апериодических звеньев первого порядка. Это позволяет минимизировать переходные процессы в гидросистеме, исключая гидравлические удары и повышая долговечность оборудования.

Практическая значимость работы заключается в том, что система точно реагирует на команды, плавно перемещает траверсу и надежно удерживает ее в заданном положении, что положительно сказывается на качестве формовки заготовок. Кроме того, предложенное решение может быть успешно адаптировано для модернизации систем управления аналогичных гидравлических прессов и другого кузнечно-штамповочного оборудования с ручным управлением, продлевая их жизненный цикл.

Список источников

1. Романова О.А., Сиротин Д.В. Стратегический вектор развития металлургии России в условиях новой реальности // Известия Уральского государственного горного университета. 2022. № 3. С. 133–145. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2022-3-133-145>. EDN: ELXCEC.
2. Тимохин О.А. Непрерывная разливка крупных трубных заготовок // Сталь. 2020. № 4. С. 21–25. EDN: QJXWYX.
3. Сивак Б.А. Направления и перспективы развития взаимодействия металлургической и литейной отраслей промышленности // Литейщик России. 2022. № 6. С. 11–13. EDN: PAEACQ.
4. Воробьев Д.И., Кузин А.О., Ерисов Я.А. Разработка цифрового двойника пресса для кузнечно-штамповочного производства // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 4. С. 365–371. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2023-4-365-372>. EDN: WMKYUP.
5. Семенов А.В., Ниязбекова Ш.У., Варзин В.В., Буркальцева Д.Д., Блажевич О.Г., Польская С.И. [и др.]. Инновационные технологии в кузнечно-штамповочном производстве как фактор развития экономики и обеспечения технологического суверенитета // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2024. № 10. С. 99–109. EDN: VNFMIХ.
6. Новокшенов С.Л., Куц В.В., Смоленцев Е.В. Состояние современного уровня развития технологических процессов и оборудования кузнечно-штамповочного производства // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2025. Т. 21. № 1. С. 134–147. <https://doi.org/10.36622/1729-6501.2025.21.1.020>. EDN: UYNXLH.

7. Ветков О.Г. Аналитическое сравнение процессов при использовании разного технологического оборудования // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 8. С. 101–103. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2023-8-101-102>. EDN: MYPXHV.
8. Jianhua Zheng, Lingfeng Zhang, Zicheng Huang, Kun Wang, Jiahui Zhu, Yang Wang. Research on the application of computer microscopic technology in forging system of metal materials // IEEE International Conference on Sensors, Electronics and Computer Engineering (Jinzhou, 18–20 August 2023). Jinzhou: IEEE, 2023. P. 1049–1053. <https://doi.org/10.1109/ICSECE58870.2023.10263581>.
9. Кравцов Н.С. Влияние износа контактной поверхности подвижной траверсы гидравлического штамповочного прессы на ее сопротивление усталости // Заготовительные производства в машиностроении (кузнечно-прессовое, литейное и другие производства). 2024. Т. 22. № 10. С. 451–457. <https://doi.org/10.36652/1684-1107-2024-22-10-451-457>. EDN: KQLAJR.
10. Debasmith D., Rounak J. Bearing fault predictive maintenance using LSTM // 3rd International Conference on Computing, Analytics and Networks (Rajpura, Punjab, 18–19 November 2022). Rajpura: IEEE, 2022. <https://doi.org/10.1109/ICAN56228.2022.10007139>.
11. Гацунаев К.Н. Социально-экономические факторы развития металлообработки в новое время // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2024. № 8. С. 150–157. EDN: BZHCSK.
12. Meenakshipriya B., Gobinath V.K., Kumar M.D., Manoj V., Dharanish P.K., Dharshini S. Design and implementation of a pneumatic stamping machine for enhanced efficiency in various industrial applications // 15th International Conference on Computing Communication and Networking Technologie (Kamand, 24–28 June 2024). Kamand: IEEE, 2024. <https://doi.org/10.1109/ICCCNT61001.2024.10724368>.
13. Secolo R.H., Ferrer J.A.G., Amici T.T. Simulation of automation being supported by lean manufacturing // 15th IEEE International Conference on Industry Applications (São Bernardo do Campo, 22–24 November 2023). São Bernardo do Campo: IEEE, 2023. P. 1388–1395. <https://doi.org/10.1109/INDUSCON58041.2023.10374868>.
14. Новокшенов С.А., Куц В.В., Юхневич С.С. Анализ влияния параметров технологических процессов на производительность оборудования кузнечно-штамповочного производства // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2025. Т. 21. № 1. С. 161–170. <https://doi.org/10.36622/1729-6501.2025.21.1.023>. EDN: PKFETQ.
15. Гордеев Б.А., Ерофеев В.И., Ермолаев А.И., Охулков С.Н., Плехов А.С. Метод расчета деформаций и напряжений в предохранителе прессы ударного действия // Вестник машиностроения. 2023. Т. 102. № 10. С. 795–802. <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2023-102-10-795-802>. EDN: ZBOAPX.
16. Fung Ts.Na., Ku Ya.H., Chou Yu.W., Yu He.Sh., Lin J.Fa. Safety monitoring system of stamping presses based on YOLOv8n model // IEEE Access. 2025. Vol. 13. P. 53660–53672. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3553845>. EDN: ESIQEW.
17. Zhang Kan, Li Hongyuan. Condition monitoring and fault diagnosis of rough rolling mill split bearing based on stress wave technology // CAA Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (Yibin, 22–24 September 2023). Yibin: IEEE, 2023. <https://doi.org/10.1109/SAFEPROCESS58597.2023.10295908>.
18. Zhang Jinrong, Liang Jingxin, Shang Sitong. Rolling bearing fault image recognition method based on GWO Optimization Darknet 19 // 2nd International Conference on Computer Graphics and Image Processing (Kyoto, 12–14 January 2024). Kyoto: IEEE, 2024. P. 38–42. <https://doi.org/10.1109/CGIP62525.2024.00015>.
19. Снитко С.А., Яковченко А.В., Пилипенко В.В., Ивлева Н.И. Совершенствование метода моделирования процесса прокатки кольцевых заготовок на радиально-осевом кольцепрокатном стане // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 8. С. 665–673. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-8-665-673>. EDN: XKIAR.
20. Wu Jimin, Zhu Guanghong, Pei Lingming. Research on vibrations induced by work roll bearings on temper mill // The 2nd International Symposium on Mechanical Systems and Electronic Engineering (Zhuhai, 25–27 February 2022). Zhuhai: VDE Verlag, 2022.
21. Gartlib E.A., Litsin K.V., Baskov S.N., Belodurin A.D., Kharlashkin K.E. Development of a regulatory method for reducing the impact loads of a rolling mill based on a neural network // Metallurgist. 2024. Vol. 67. Iss. 11–12. P. 1964–1970. <https://doi.org/10.1007/s11015-024-01694-6>. EDN: QHKKVK.
22. Гойдо М.Е., Бодров В.В., Багаудинов Р.М. Упрощенный расчет основных размеров клапанного модуля для гидрораспределителей прессов // Механическое оборудование металлургических заводов. 2023. № 2. С. 24–30. EDN: PIXSKY.
23. Li Changji, Yu Hancheng. Fault diagnosis of multi-station automated stamping production lines based on convolutional neural network // 44th Chinese Control Conference (Chongqing, 28–30 July 2025). Chongqing: IEEE, 2025. P. 7087–7092. <https://doi.org/10.23919/CCC64809.2025.11179683>.
24. Huang J., Li X., Gao L. A novel Ga-Cp method for fixed-type multi-robot collaborative scheduling in flexible job shop // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 2025. Vol. 22. P. 13531–13543. <https://doi.org/10.1109/TASE.2025.3554019>. EDN: KYZXWK.
25. Litsin K.V., Baskov S.N., Morkovnik D.A. A model of automated mold flux feeding into the crystallizer of a continuous casting machine // CIS Iron and Steel Review. 2023. Vol. 26. P. 33–38. <https://doi.org/10.17580/cisr.2023.02.05>. EDN: CWKVOK.

26. Арановский С.В., Лосенков А.А., Васкез К. Система слежения для промышленного гидропривода с компенсатором давления // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 4. С. 615–622. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2015-15-4-615-622>. EDN: TYOAOA.
27. Воробьев Д.И., Кузин А.О., Ерисов Я.А. Разработка цифрового двойника прессы для кузнечно-штамповочного производства // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 4. С. 365–371. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2023-4-365-372>. EDN: WMKYUP.
28. Jin Rui, Huang Haihong, Li Lei, Zuo Hao, Gan Lei, Ge Shuzhi Sam. Artificial intelligence enabled energy-saving drive unit with speed and displacement variable pumps for electro-hydraulic systems // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 2024. Vol. 21. Iss. 3. P. 3193–3204. <https://doi.org/10.1109/TASE.2023.3276766>.
29. Корнилова А.В., Заяр Ч. Устранение причин трещинообразования в ползунах мощного кривошипного штамповочного прессы // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 1. С. 47–56. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-1-47-56>. EDN: AZNISJ.
30. Якубович Е.А. Оптимизация процесса циклического формообразования при штамповке клапанов на горизонтально-штамповочных прессах // Современные материалы, техника и технологии. 2019. № 2. С. 73–79. EDN: UMOPIJ.

References

1. Romanova O.A., Sirotn D.V. Strategic vector for the development of russian metallurgy in the new reality. *NEWS of the Ural State Mining University*. 2022;3:133-145. (In Russ.). <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2022-3-133-145>. EDN: ELXCEC.
2. Timokhin O.A. Continuous casting of big-size pipe shells. *Stal'*. 2020;(4):21-25. (In Russ.). EDN: QJXWYX.
3. Sivak B.A. Directions and prospects for the development of cooperation between the metallurgical and foundry industries. *Liteyshchik Rossii*. 2022;6:11-13. (In Russ.). EDN: PAEACQ.
4. Vorobev D.I., Kuzin A.O., Yerisov Ya.A. Development of a digital double of the press for forging and stamping production. *Proceedings of the Tula State University. Technical Science*. 2023;(4):365-371. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2023-4-365-372>. EDN: WMKYUP.
5. Semenov A.V., Niyazbekova Sh.U., Varzin V.V., Burkaltseva D.D., Blazhevich O.G., Polskaya S.I., et al. Innovative technologies in forging and stamping production as a factor economic development and ensuring technological sovereignty. *Kuznechno-shtampovoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*. 2024;(10):99-109. (In Russ.). EDN: VNFMIK.
6. Novokshchenov S.L., Kutz V.V., Smolentsev E.V. Current state of development of technological processes and equipment for forging and stamping production. *Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2025;21(1):134-147. (In Russ.). <https://doi.org/10.36622/1729-6501.2025.21.1.020>. EDN: UYNXLH.
7. Vetrov O.G. Analytical comparison of processes using different technological equipment. *Proceedings of the Tula State University. Technical Science*. 2023;(8):101-103. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2023-8-101-102>. EDN: MYPXHV.
8. Jianhua Zheng, Lingfeng Zhang, Zicheng Huang, Kun Wang, Jiahui Zhu, Yang Wang. Research on the application of computer microscopic technology in forging system of metal materials. In: *IEEE International Conference on Sensors, Electronics and Computer Engineering*. 18-20 August 2023, Jinzhou. Jinzhou: IEEE; 2023, p. 1049-1053. <https://doi.org/10.1109/ICSECE58870.2023.10263581>.
9. Kravtsov N.S. Effect of wear of movable cross-beam contact surface of hydraulic stamping press on its fatigue strength. *Blanking Productions in Mechanical Engineering*. 2024;22(10):451-457. (In Russ.). <https://doi.org/10.36652/1684-1107-2024-22-10-451-457>. EDN: KQLAJR.
10. Debasmit D., Rounak J. Bearing fault predictive maintenance using LSTM. In: *3rd International Conference on Computing, Analytics and Networks*. 18-19 November 2022, Rajpura, Punjab. Rajpura, Punjab: IEEE; 2022. <https://doi.org/10.1109/ICAN56228.2022.100079>.
11. Gatsunaev K.N. Socio-economic factors of metalworking development in the modern era. *Forging and stamping production. Material working by pressure*. 2024;8:150-157. (In Russ.). EDN: BZHCSK.
12. Meenakshipriya B., Gobinath V.K., Kumar M.D., Manoj V., Dharanish P.K., Dharshini S. Design and implementation of a pneumatic stamping machine for enhanced efficiency in various industrial applications. In: *15th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies*. 24-28 June 2024, Kamand. Kamand: IEEE; 2024. <https://doi.org/10.1109/ICCCNT61001.2024.10724368>.
13. Secolo R.H., Ferrer J.A.G., Amici T.T. Simulation of automation being supported by lean manufacturing. In: *15th IEEE International Conference on Industry Applications*. 22-24 November 2023, São Bernardo do Campo. São Bernardo do Campo: IEEE; 2023, p. 1388-1395. <https://doi.org/10.1109/INDUSCON58041.2023.10374868>.
14. Novokshchenov S.L., Kutz V.V., Yukhnevich S.S. Analysis of the influence parameters of volumetric stamping technological processes on the productivity of forging and stamping production equipment. *Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2025;21(1):161-170. (In Russ.). <https://doi.org/10.36622/1729-6501.2025.21.1.023>. EDN: PKFETQ.
15. Gordeev B.A., Erofeev V.I., Ermolaev A.I., Okhulkov S.N., Plekhov A.S. Method for calculating deformations and stresses in the impact press fuse. *Russian Engineering Research*. 2023;102(10):795-802. (In Russ.). <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2023-102-10-795-802>. EDN: ZBOAPX.
16. Fung Ts.Na., Ku Ya.H., Chou Yu.W., Yu He.Sh., Lin J.Fa. Safety monitoring system of stamping presses based on YOLOv8n model. *IEEE Access*. 2025;13:53660-53672. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3553845>. EDN: ESIQEW.

17. Zhang Kan, Li Hongyuan. Condition monitoring and fault diagnosis of rough rolling mill split bearing based on stress wave technology. In: *CAA Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes*. 22–24 September 2023, Yibin. Yibin: IEEE; 2023. <https://doi.org/10.1109/SAFEPROCESS58597.2023.10295908>.
18. Zhang Jinrong, Liang Jingxin, Shang Sitong. Rolling bearing fault image recognition method based on GWO Optimization Darknet 19. In: *2nd International Conference on Computer Graphics and Image Processing*. 12-14 January 2024, Kyoto. Kyoto: IEEE; 2024, p. 38-42. <https://doi.org/10.1109/CGIP62525.2024.00015>.
19. Snitko S.A., Yakovchenko A.V., Pilipenko V.V., Ivleva N.I. Modeling of ring billets rolling on radial-axial ring-rolling mill. *Izvestiya. Ferrovol Metallurgy*. 2020;63(8):665-673. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-8-665-673>. EDN: XKIAR.
20. Wu Jimin, Zhu Guanghong, Pei Lingming. Research on vibrations induced by work roll bearings on temper mill. In: *The 2nd International Symposium on Mechanical Systems and Electronic Engineering*. 25-27 February 2022, Zhuhai. Zhuhai: VDE Verlag; 2022.
21. Gartlib E.A., Litsin K.V., Baskov S.N., Belodurin A.D., Kharlashkin K.E. Development of a regulatory method for reducing the impact loads of a rolling mill based on a neural network. *Metallurgist*. 2024;67(11-12):1964-1970. <https://doi.org/10.1007/s11015-024-01694-6>. EDN: QHKKVK.
22. Goydo M.E., Bodrov V.V., Bagautdinov R.M. Simplified calculation of the basic dimensions of the valve module for hydraulic distributors of presses. *Mekhanicheskoe oborudovanie metallurgicheskikh zavodov*. 2023;2:24-30. (In Russ.). EDN: PIXSKY.
23. Li Changji, Yu Hancheng. Fault diagnosis of multi-station automated stamping production lines based on convolutional neural network. In: *44th Chinese Control Conference*. 28-30 July 2025, Chongqing. Chongqing: IEEE; 2025, p. 7087-7092. <https://doi.org/10.23919/CCC64809.2025.11179683>.
24. Huang J., Li X., Gao L. A novel Ga-Cp method for fixed-type multi-robot collaborative scheduling in flexible job shop. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2025;22:13531-13543. <https://doi.org/10.1109/TASE.2025.3554019>. EDN: KYZXWK.
25. Litsin K.V., Baskov S.N., Morkovnik D.A. A model of automated mold flux feeding into the crystallizer of a continuous casting machine. *CIS Iron and Steel Review*. 2023;26:33-38. <https://doi.org/10.17580/cisir.2023.02.05>. EDN: CWKVK.
26. Aranovskiy S.V., Losenkov A.A., Vazquez C. Tracking control for a hydraulic drive with a pressure compensator. *Scientific and Technical Bulletin of information Technologies, Mechanics and optics*. 2015;15(4):615-622. (In Russ.). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2015-15-4-615-622>. EDN: TYOAN.
27. Vorobev D.I., Kuzin A.O., Yerisov Ya.A. Development of a digital double of the press for forging and stamping production. *Proceedings of the Tula State University. Technical Science*. 2023;4:365-371. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2023-4-365-372>. EDN: WMKYUP.
28. Jin Rui, Huang Haihong, Li Lei, Zuo Hao, Gan Lei, Ge Shuzhi Sam. Artificial intelligence enabled energy-saving drive unit with speed and displacement variable pumps for electro-hydraulic systems. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2024;21(3):3193-3204. <https://doi.org/10.1109/TASE.2023.3276766>.
29. Kornilova A.V., Zaya K. Elimination of causes of crack formation in the slider of a powerful crank forming press. *RUDN Journal of Engineering Research. Seriya: Inzhenernye issledovaniya*. 2022;23(1):47-56. (In Russ.). <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-1-47-56>. EDN: AZNISJ.
30. Yakubovich E.A. Optimization of the cyclic forming process during stamping valves at horizontal-stamping presses. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii*. 2019;2:73-79. (In Russ.). EDN: UMOPJM.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лицин Константин Владимирович,

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры электропривода,
мехатроники и электромеханики,
Южно-Уральский государственный университет,
454080, Российская Федерация,
г. Челябинск, пр. Ленина, 76

✉ k.litsin@rambler.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4970-0740>

Басков Сергей Николаевич,

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры электропривода,
мехатроники и электромеханики,
Южно-Уральский государственный университет,
454080, Российская Федерация,
г. Челябинск, пр. Ленина, 76

baskovsn@susu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2511-9601>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Konstantin V. Litsin,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of
Electric Drives, Mechatronics, and Electromechanics,
South Ural State University,
76, Lenin pr., Chelyabinsk 454080,
Russian Federation

✉ k.litsin@rambler.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4970-0740>

Sergey N. Baskov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of
Electric Drives, Mechatronics, and Electromechanics,
South Ural State University,
76, Lenin pr., Chelyabinsk 454080,
Russian Federation

baskovsn@susu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2511-9601>

Морковник Денис Александрович,
аспирант,
Южно-Уральский государственный университет,
454080, Российская Федерация,
г. Челябинск, пр. Ленина, 76
d.morkovnik@mail.ru

Denis A. Morkovnik,
Postgraduate Student,
South Ural State University,
76, Lenin pr., Chelyabinsk 454080,
Russian Federation
d.morkovnik@mail.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Authors' contribution

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 14.01.2026 г.; одобрена после рецензирования 06.04.2026 г.; принята к публикации 20.04.2026 г.

Information about the article

The article was submitted 14.01.2026; approved after reviewing 06.04.2026; accepted for publication 20.04.2026.



Использование сигналов виброакустики для оптимизации режимов точения на станках с числовым программным управлением

В.Е. Овсянников¹, У.С. Путилова², Б.А. Лопатин³,
Е.М. Кузнецова⁴✉, Д.А. Маслов⁵

^{1,2}Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация

³Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Российская Федерация

^{4,5}Курганский государственный университет, Курган, Российская Федерация

Резюме. Цель – обоснование возможности использования сигнала акустики для решения задачи коррекции режимов резания при токарной обработке. Объектом исследования является технологическое обеспечение шероховатости поверхности при обработке деталей типа тела вращения. В работе использовались планирование и организация эксперимента, спектральный и корреляционный анализы, методы оптимизации. Эксперименты проводились на токарном станке с числовым программным управлением. В качестве обрабатываемого материала использовались конструкционные стали марок Ст3 и сталь 45. Оценка состояния режущей пластины производилась с помощью электронного устройства измерения режущих инструментов. Запись вибраций производилась с помощью датчика акселерометра, обработка сигналов выполнялась с использованием разработанного авторами программного обеспечения. При проведении спектрального анализа выявлен частотный диапазон сигнала, который имеет наибольшую корреляционную связь с качеством поверхности (6 ... 12 кГц). Проведенные исследования позволили получить зависимости для оценки шероховатости поверхности, которая формируется при чистовой обработке деталей типа вал из Ст3 и сталь 45. Установлено, что использование сигналов виброакустики позволяет производить коррекцию режимов резания на основе мониторинга износа режущей пластины. Так, величина мощности вибросигнала в диапазоне от 0,001 до 0,015 Дб соответствует зоне нормального изнашивания инструмента, в которой рекомендуется работать. Показано, что при превышении мощности значений 0,015 Дб наблюдается переход в зону катастрофического износа, что требует прекращения обработки режущим инструментом ввиду высокой вероятности получения брака. Предварительное тестирование на обработке партии деталей показало возможность повышения производительности на 15–20 % при отсутствии несоответствий по критерию шероховатости обработанной поверхности. Таким образом, использование сигналов виброакустики, записываемых в ходе обработки датчиком акселерометром, позволяет повысить эффективность изготовления деталей типа тел вращений на станках с числовым программным управлением и снизить внезапные отказы режущих пластин.

Ключевые слова: точение, качество поверхности, шероховатость, вибрации, управление

Для цитирования: Овсянников В.Е., Путилова У.С., Лопатин Б.А., Кузнецова Е.М., Маслов Д.А. Использование сигналов виброакустики для оптимизации режимов точения на станках с числовым программным управлением // iPolytech Journal. 2026. Т. 30. № 3. С. 442–450. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2026-3-442-450>. EDN: UMCZMV.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Vibroacoustic signals for optimizing turning modes of CNC machines

Viktor E. Ovsyannikov¹, Uliana S. Putilova²,
Boris A. Lopatin³, Elena M. Kuznetsova⁴✉ Denis A. Maslov⁵

^{1,2}Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation

³South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

^{4,5}Kurgan State University, Kurgan, Russian Federation

Abstract. The present study aims to justify the possibility of using acoustic signals for correcting turning modes of computer numerical control (CNC) machines. The object of the study is the technological assurance of the re-

quired surface roughness during the machining of turned parts. Experimental planning and organization, spectral and correlation analysis, as well as optimization methods were used. Experiments were carried out using a CNC turning machine. St3 and steel 45 grades of structural steel were used for machining. The condition of the cutting insert was assessed using an electronic cutting tool measuring device. Vibrations were recorded using an accelerometer; the obtained vibroacoustic signals were processed using software developed by the authors. Spectral analysis was used to identify the frequency range of the signal that showed the strongest correlation with surface quality (6–12 kHz). The conducted studies resulted in relationships for assessing the surface roughness formed during the finishing of shaft-type parts made of St3 and steel 45 steel grades. Vibroacoustic signals were demonstrated to be appropriate for the correction of turning modes based on cutting insert wear monitoring. Thus, the power of vibration signals in the range from 0.001 to 0.015 dB corresponds to the normal cutting-insert wear zone recommended for operation. If the power exceeds 0.015 dB, a transition to a zone of severe wear is observed, which requires stopping machining due to the high probability of defects. Preliminary testing on a batch of parts showed the possibility of increasing efficiency by 15–20 % without adversely affecting the surface roughness of the machined parts. Thus, vibroacoustic signals recorded by an accelerometer during machining can be used to increase the efficiency of manufacturing turned parts on CNC machines and reduce unexpected cutting-insert failures.

Keywords: turning, surface quality, roughness, vibration, control

For citation: Ovsyannikov V.E., Putilova U.S., Lopatin B.A., Kuznetsova E.M., Maslov D.A. Vibroacoustic signals for optimizing turning modes of CNC machines. *iPolytech Journal*. 2026;30(3):442-450. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2026-3-442-450>. EDN: UMCZMV.

ВВЕДЕНИЕ

При изготовлении деталей типа тела вращения на токарных станках с числовым программным управлением (ЧПУ) возникает проблема, связанная с выбором режимов резания. Применительно к чистовой или финишной обработке главным критерием корректности назначения режимов резания является обеспечение требований чертежа, прежде всего шероховатости обработанной поверхности [1, 2]. В рамках современных представлений о процессе формирования шероховатости поверхности можно выделить две составляющие текстуры профиля [3–9]:

- систематическую составляющую, которая зависит от геометрии режущей части инструмента, кинематики процесса обработки и частично от состояния режущего лезвия (т.к. имеет место копирование неровностей с режущей кромки пластины на обработанную поверхность);

- случайную составляющую, которая порождается деформационными процессами, возникающими от действия сил резания, а также вибрациями элементов технологической обрабатывающей системы.

Следовательно, зная особенности строения профиля шероховатости, можно выработать эффективную стратегию по дальнейшему ее технологическому обеспечению. На рис. 1 приведен пример зависимости уровня случайной составляющей для различных значений среднего арифметического отклонения профиля (в случае обработки конструкционных сталей) [10, 11].

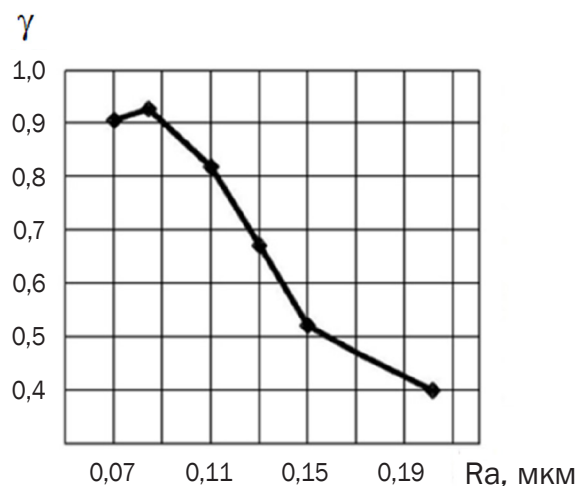


Рис. 1. Зависимость уровня случайной составляющей для конструкционных сталей [10, 11]

Fig. 1. Random component level dependence for structural steels [10, 11]

Из рис. 1 видно, что при росте требований к качеству обработанной поверхности доля случайной составляющей в профиле увеличивается (до 95 %). Таким образом, при чистовой обработке влияние случайных факторов является доминирующим. Для надежного обеспечения требуемого качества поверхности назначают заниженные режимы резания, что приводит к уменьшению производительности. Однако и это не гарантирует результат ввиду того, что по мере изнашивания режущей кромки необходима коррекция режимов. Эффективным решением в данном случае является использование адаптивного управления [12–15]. В качестве диагностического признака целесообразно использовать сиг-

нал виброакустики [16–18]. Причем сигнал должен быть подвергнут предварительной фильтрации с целью выявления оптимального диапазона частот, обладающего наибольшей информационной способностью (наиболее тесной корреляционной связью с оцениваемыми параметрами). На рис. 2 приведена схема технологического обеспечения шероховатости на основе мониторинга по вибросигналу.

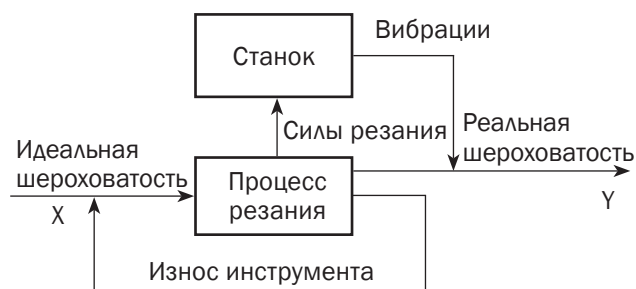


Рис. 2. Схема технологического обеспечения шероховатости на основе мониторинга по вибросигналу

Fig. 2. Process roughness scheme based on vibration signal monitoring

Цель данной работы – обоснование возможности использования сигнала акустики при решении задачи коррекции режимов резания для токарной обработки деталей типа вал из конструкционных сталей на станках с ЧПУ с учетом влияния износа режущего инструмента.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве образцов для исследования рассматривались детали цилиндрической формы с длиной 200 мм и диаметром 50 мм. Материал деталей – конструкционные стали следующих марок: Ст3 и сталь 45. Обработка производилась на токарном станке с числовым программным управлением, с применением резцов с пластинами для контурного точения – пластина CMNN (ISO 1832⁶), марка твердого сплава T15K6. Изготовитель ООО «Кировградский завод твердых сплавов». Маркировка по ГОСТ 19059-80⁷. Главный угол в плане 93°, радиус при вершине инструмента 1 мм. Модель станка 16K20Ф3. Сечение державки 25×25 мм. Закрепление консолей-

ное (вылет 1,5 величины высоты державки резца).

Регистрация сигнала акустики производилась с использованием датчика-акселерометра. Марка датчика AP1019(AP19). Измерительная чувствительность – 0,25 нКл/г (здесь g – ускорение свободного падения, 9,8 м/с²) при частотном диапазоне 0,5...30 кГц. Марка аналого-цифрового преобразователя ZETLAB АЦП ZET 230 с частотой пропускания до 100 кГц. Деталь базировалась в центрах.

Спектральный анализ записанного сигнала выполнялся с использованием программного обеспечения, разработанного авторами исследования.

Записанный сигнал подвергался фильтрации в частотном диапазоне от 6 до 12 кГц. Выявление диапазона сигнала осуществлялось на основе предварительных исследований [19, 20]. Также в ходе исследований были установлены частоты для шпинделя станка (3...5 кГц), державки инструмента (9,3...10, кГц) и режущей пластины (13...15,5 кГц) [19, 20]. Для выявления частотного диапазона сигнала, который в дальнейшем используется в работе, выполнялась его фильтрация в диапазонах с шагом в 6 кГц (0...6 кГц, 6...12 кГц, 12...18 кГц, 18...24 кГц). Фильтрация осуществлялась с помощью цифровых фильтров ФНЧ (фильтр низких частот) и ФВЧ (фильтр высоких частот), которые оставляют сигнал в требуемом диапазоне. После фильтрации производилась оценка корреляционной связи мощности вибросигнала в заданном диапазоне с выходными параметрами (среднеарифметическим отклонением профиля). Наибольшее значение корреляции было установлено в диапазоне от 6 до 12 кГц.

После фильтрации определялась мощность сигнала как интеграл от энергетического спектра. Эксперимент проводился на основе композиционного плана второго порядка.

Продольная подача (S) изменялась в пределах от 0,1 мм/об до 0,2 мм/об, скорость резания (V) – в пределах 100...280 м/мин. Глубина резания (t) – 0,5 мм. Режимы реза-

⁶ISO 1832. Indexable inserts for cutting tools. Designation. Introduced 01.02.2017. 30 p.

⁷ГОСТ 19059-80. Пластины режущие сменные многогранные твердосплавные ромбической формы с углом 80 % с отверстием и стружколомающими канавками на одной сторон. Конструкция и размеры. М.: Стандартинформ, 2006.

ния назначались в соответствии с рекомендациями производителя⁸. Данная область режимов соответствует зоне динамической устойчивости станка 16K20Ф3.

Уровни варьирования факторов приведены в табл. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Пример спектра сигнала акустики приведен на рис. 3. Записанный сигнал подвер-

гнут фильтрации в диапазоне от 6 до 12 кГц. Небольшие величины мощности, которые выходят за указанный диапазон, объясняются тем, что цифровые фильтры ФНЧ и ФВЧ не позволяют полностью устранить боковые частоты.

В табл. 2 и 3 приведены значения выходных данных эксперимента (мощности вибросигнала (S_w) и среднеарифметического отклонения профиля) для обрабатываемого материала сталь 45.

Таблица 1. Уровни варьирования факторов
Table 1. Factor variation levels

Уровень	Кодированные значения факторов	Натуральные значения факторов	
		V, м/мин	S, мм/об
Нижний	-1	100	0,1
Верхний	+1	280	0,2
Основной	0	190	0,15
Интервал варьирования	1	90	0,05

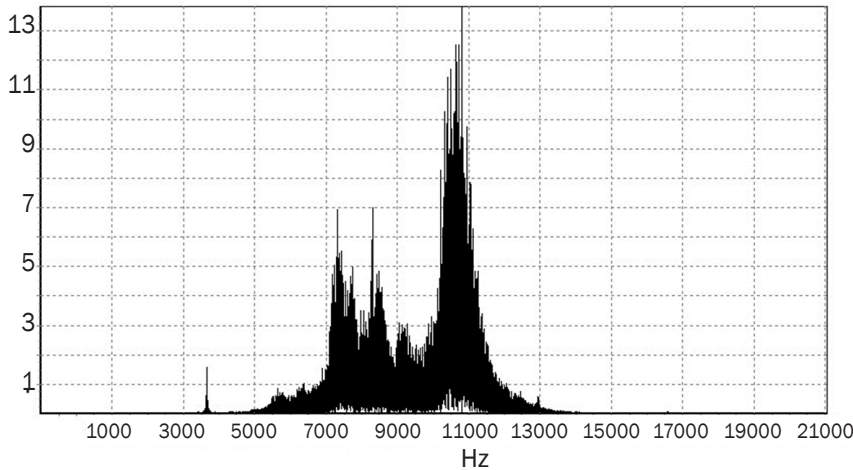


Рис. 3. Пример спектра сигнала акустики
Fig. 3. Example of acoustic signal spectrum

Таблица 2. Значения выходных данных эксперимента
Table 2. Values of experiment output data

Номер экспериментального исследования	Обозначение выходного фактора	S_w , Дб
1	y1	0,014
2	y2	0,019
3	y3	0,0018
4	y4	0,001
5	y5	0,012
6	y6	0,008
7	y7	0,006
8	y8	0,004
9	y9	0,007

⁸Аверченков В.И., Аверченков А.В., Базров Б.М., Варганов М.В., Васильев А.С., Васильев В.Н. [и др.]. Справочник технолога-машиностроителя. Т. 1. М.: Машиностроение, 2023. 1574 с.

Таблица 3. Значения выходных данных эксперимента

Table 3. Values of experiment output data

Номер экспериментального исследования	Обозначение выходного фактора	Ra, мкм
1	y1	1,1
2	y2	1,2
3	y3	0,8
4	y4	0,82
5	y5	1,0
6	y6	0,95
7	y7	0,86
8	y8	0,84
9	y9	0,92

Уравнения регрессии (1) и (2) имеют вид:

$$S_w = 0,03 \cdot S + 1,83 \cdot 10^{-4} \cdot V + 0,121 \cdot S^2 - 1,22 \cdot 10^{-7} \cdot V^2 - 2,48 \cdot 10^{-3} \cdot S \cdot V + 0,0094. \quad (1)$$

$$Ra = -0,154 \cdot S - 7,55 \cdot 10^{-4} \cdot V + 4,97 \cdot S^2 - 5,12 \cdot 10^{-7} \cdot V^2 - 3,45 \cdot 10^{-3} \cdot S \cdot V + 1,1118. \quad (2)$$

Проверка однородности дисперсий проводилась с использованием критерия Кохрена. Было проведено 3 серии параллельных опытов. При принятом уровне значимости 95 % расчетное значение составило 0,388, при критическом значении – 0,4755. Проверка состоятельности уравнений (1) и (2) выполнялась по критерию Фишера (расчетное значение критерия 11,02, табличное значение 19,37 при уровне значимости 0,05).

На рис. 4 приведены поверхности отклика для уравнений (1) и (2).

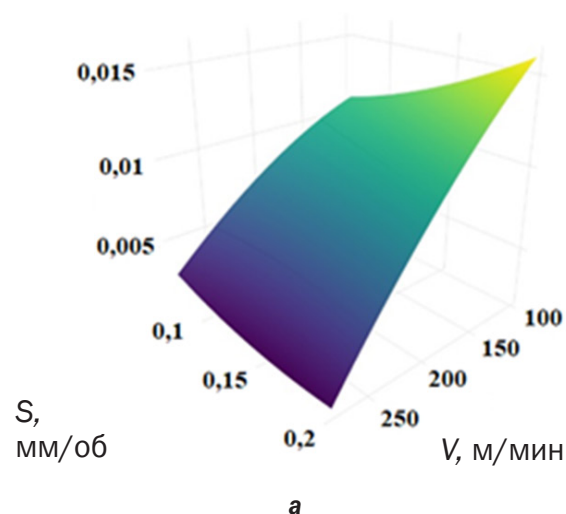
Также было получено уравнение регрессии, характеризующее зависимость между мощностью вибросигнала и износом инструмента (критерий ширина фаски по задней поверхности h_3 , мм) (3):

$$S_w = -0,0010334 \cdot h_3^3 + 0,0063235 \cdot h_3^2 - 0,0083429 \cdot h_3 + 0,0034752. \quad (3)$$

Проверка состоятельности выражения (3) проводилась с использованием коэффициента детерминации R. Его значение составило $R^2 = 0,87$.

Таким образом, выражения (1)–(3) можно использовать для реализации коррекции режимов резания с учетом износа инструмента. Укрупненно можно сформулировать следующую последовательность:

S_w , Дб



Ra , мкм

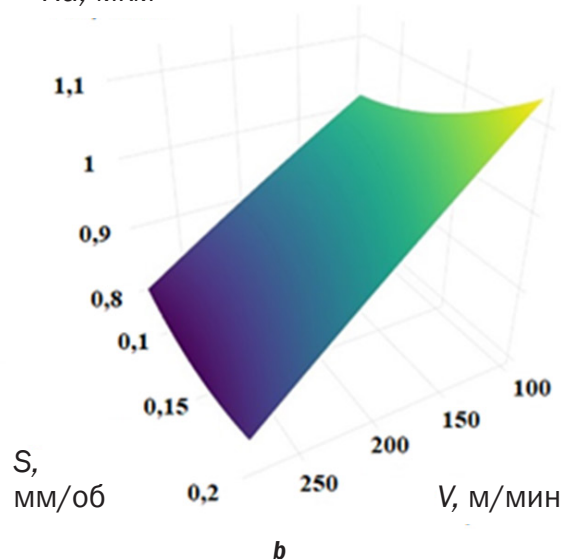


Рис. 4. Поверхности отклика

Fig. 4. Response surfaces

1. Пуск станка и начало записи сигнала.
2. Выбор наибольшей скорости (соответствует верхнему уровню фактора в выражении (2)).
3. Подбор подачи по выражению (2), значение которой обеспечивает требуемую величину шероховатости поверхности ($Ra_{\text{расч}} < Ra_{\text{треб}}$). $Ra_{\text{треб}}$ – требуемая величина шероховатости, задаваемая чертежом. Подбор подачи осуществляется итерационным методом. В правую часть выражения (2) подставляется $Ra_{\text{треб}}$ и значение скорости резания, принятое в пункте 2. Итерационно с шагом в 0,01 мм/об производится подбор подачи.
4. Если подачу подобрать не удалось, то происходит снижение скорости резания. Шаг итерации – 5 м/мин.
5. Повтор пункта 3.
6. Вычисление теоретической мощности вибросигнала по формуле (1).
7. Сравнение с реальной величиной по результатам анализа.
8. Оценка износа по формуле (3).
9. Сравнение износа с предельной величиной.
10. Повтор пунктов 5–9.

Было выполнено экспериментальное тестирование предлагаемого подхода. Обработана партия заготовок в объеме 50 единиц с использованием коррекции режимов. Требуемое значение шероховатости Ra 3,2. Суммарное основное время обработки партии составило 55,4 мин. При этом обработка с рекомендованными режимами⁸ ($V = 160$ м/мин, $t = 0,5$ мм, $S = 0,15$ мм/об) 50 заготовок составила 65,8 мин. Объем партии обусловлен заданным

периодом стойкости пластины в 60 мин. Аналогично была выполнена обработка и для образцов из Ст3. При этом снижение основного времени с коррекцией режимов составило 21 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили получить зависимости для оценки шероховатости поверхности, которая получается при чистовой обработке деталей типа вал из сталей Ст3 и стали 45. Кроме того, показана возможность активного контроля износа режущего инструмента в ходе процесса обработки. Предварительное тестирование на обработке партии деталей показало возможность повышения производительности на 15–20 % при отсутствии несоответствий по критерию шероховатости обработанной поверхности.

В качестве перспективы для дальнейших исследований можно выделить два направления:

- расширение обозначенного подхода на другие обрабатываемые материалы и конструкции деталей (как металлические, так и неметаллические);
- изучение возможности использования искусственного интеллекта для аппроксимации зависимостей, представленных выражениями (1)–(3). Преимуществом использования искусственного интеллекта являются лучшие результаты аппроксимации в условиях неопределенности исходных данных. В частности, данный факт подтвержден при построении моделей для оценки износа режущего инструмента [21].

Список источников

1. Смирнова Е.Н., Крылов Е.Г. Проблема автоматизированного проектирования технологических процессов с учетом технологической наследственности // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2011. № 13. С. 100–102. EDN: ONCNMF.
2. Kotlyarov V.P., Maslakov A.P., Tolstoles A.A. Digital modelling of production engineering for metalworking machine shops // Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS. 2019. Vol. 31. Iss. 3. P. 85–98. [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2019-31\(3\)-8](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2019-31(3)-8). EDN: LSIJGC.
3. Zakovorotnyi V.L., Gvindjiliya V.E. Influence of speeds of forming movements on the properties of geometric topology of the part in longitudinal turning // Journal of Manufacturing Processes. 2024. Vol. 112. P. 202–213. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.01.037>. EDN: LHVZHV.
4. Безъязычный В.Ф., Паламарь И.Н. Современные аспекты автоматизации научных исследований качества поверхности деталей машин с использованием методов машинного обучения // Научные технологии в машиностроении. 2021. № 7. С. 12–19. <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2021-7-12-19>. EDN: VIPEMD.
5. Кабалдин Ю.Г., Иванов С.В., Башков А.А. Управление устойчивостью трибосистемами при внешнем трении и резании на основе алгоритмов нелинейной динамики, теории фракталов и нейросетевого моделирования // Мехатроника, автоматика и робототехника. 2024. № 13. С. 150–156. <https://doi.org/10.26160/2541-8637-2024-13-150-156>. EDN: NXFIAU.

6. Stupnytsky V., Dragašius E., Baskutis S., Xianning Sh. Modeling and simulation of machined surface layer microgeometry parameters // Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science. 2022. Vol. 8. Iss. 1. P. 1–11. <https://doi.org/10.23939/ujmems2022.01.001>. EDN: FGAHMG.
7. Ovsyannikov V., Nekrasov R., Putilova U., Il'yaschenko D., Verkhoturova E. On the issue of automatic form accuracy during processing on CNC machines // Revista Facultad de Ingenieria. 2022. Iss. 103. P. 88–95. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20201111>. EDN: HCVDFL.
8. Некрасов Р.Ю. Повышение эффективности производства рабочих частей цилиндрических втулок буровых насосов // Тракторы и сельхозмашины. 2025. Т. 92. № 6. С. 645–651. <https://doi.org/10.17816/0321-4443-688855>. EDN: VZUSCQ.
9. Черных Л.Г. Расчет систематической составляющей первичного профиля текстуры обработанной поверхности // Металлообработка. 2023. № 2. С. 19–23. <https://doi.org/10.25960/mo.2023.2.19>. EDN: ZHZLRX.
10. Ovsyannikov V., Nekrasov R., Putilova U., Gubenko A. Structural features of the roughness profile of hardened steel parts after finishing turning // EPJ Web of Conferences. 2025. Vol. 318. P. 03011. <https://doi.org/10.1051/epjconf/202531803011>. EDN: FXACLR.
11. Некрасов Р.Ю., Овсянников В.Е., Губенко А.С. Повышение качества втулок цилиндров буровых насосов на основе использования серого чугуна с упрочненным слоем // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. № 2. С. 128–133. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-128-133>. EDN: NWIYML.
12. Кабалдин Ю.Г., Саблин П.А., Щетинин В.С. Управление динамической устойчивостью металлорежущих систем в процессе резания по фрактальности шероховатости обработанной поверхности // Frontier Materials and Technologies. 2023. № 3. С. 43–51. <https://doi.org/10.18323/2782-4039-2023-3-65-4>.
13. Zakovorotny V., Gvindjiliya V. The features of the evolution of the dynamic cutting system due to the regenerative effect // Dynamics of technical systems: AIP Conference Proceedings of the 7 International Scientific-Technical Conference (Rostov-on-Don, 9–11 September 2023). Rostov-on-Don: American Institute of Physics Inc., 2023. Vol. 2507. Iss. 1. P. 030002. <https://doi.org/10.1063/5.0109559>. EDN: FLSYFX.
14. Ovsyannikov V., Nekrasov R., Putilova U., Il'yaschenko D., Verkhoturova E. On the issue of automatic form accuracy during processing on CNC machines // Revista Facultad de Ingenieria. 2022. Iss. 103. P. 88–95. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20201111>. EDN: HCVDFL.
15. Proskuryakov N.A., Nekrasov R.Y., Starikov A.I., Solov'ev I.V., Barbyshev B.V., Tempel' Y.A. Fuzzy controllers in the adaptive control system of a CNC lathe // Russian Engineering Research. 2018. Vol. 38. Iss. 3. P. 220–222. <https://doi.org/10.3103/S1068798X18030188>. EDN: XMQTZ.
16. Tugengol'd A.K., Voloshin R.N., Dimitrov V.P., Borisova L.V., Yusupov A.R. Monitoring the condition of CNC machine tools // Russian Engineering Research. 2020. Vol. 40. Iss. 9. P. 763–767. <https://doi.org/10.3103/S1068798X2009021X>. EDN: UEKPV.
17. Кабалдин Ю.Г., Аносов М.С., Манцеров С.А., Желонкин М.В. Исследование процессов деформирования и разрушения конструкционных сплавов, полученных аддитивной электродуговой наплавкой с акустико-эмиссионным контролем // Вестник машиностроения. 2025. Т. 104. № 1. С. 53–58. <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2025-104-1-53-58>. EDN: VOCTQF.
18. Заковоротный В.А., Гвинджилия В.Е., Кислов К.В. Информационные свойства виброакустической эмиссии в системах диагностики износа режущего инструмента // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2025. Т. 27. № 3. С. 50–70. <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2025-27.3-50-70>. EDN: CIFNCY.
19. Остапчук А.К., Овсянников В.Е. Научные основы обеспечения шероховатости поверхности на базе анализа случайных процессов: монография. Курган: Курганский государственный университет, 2012. 196 с. EDN: YMOJVR.
20. Симонов А.М., Остапчук А.К., Овсянников В.Е. Основы обеспечения качества поверхности деталей машин с использованием динамического мониторинга: монография. Курган: Курганский государственный университет, 2010. 118 с. EDN: QNCVIJ.
21. Рогов Е.Ю., Остапчук А.К., Овсянников В.Е. Автоматическое обеспечение точности формы при обработке на станках с ЧПУ: монография. Курган: Курганский государственный университет, Уральский государственный университет путей сообщения, 2023. 174 с. EDN: PGCNOK.

References

1. Smirnova E.N., Krylov E.G. Problems of technological process computer-aided design based on technological heredity. *Bulletin of the Technological University*. 2011;13:100-102. (In Russ). EDN: ONCNMF.
2. Kotlyarov V.P., Maslakov A.P., Tolstoles A.A. Digital modelling of production engineering for metalworking machine shops. *Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS*. 2019;31(3):85-98. [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2019-31\(3\)-8](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2019-31(3)-8). EDN: LSIJGC.
3. Zakovorotnyi V.L., Gvindjiliya V.E. Influence of speeds of forming movements on the properties of geometric topology of the part in longitudinal turning. *Journal of Manufacturing Processes*. 2024;112:202-213. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.01.037>. EDN: LHVZHV.
4. Bezyazychnyy V.F., Palamar' I.N. Current aspects in automation of scientific researches of machinery surface quality using machine learning methods. *Science intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2021;7:12-19. (In Russ). <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2021-7-12-19>. EDN: VIPEMD.

5. Kabaldin Yu.G., Ivanov S.V., Bashkov A.A. Tribosystem stability control under external friction and cutting based on the algorithms of nonlinear dynamics, fractal theory and neural network modeling. *Mekhatronika, avtomatika i robototekhnika*. 2024;13:150-156. (In Russ). <https://doi.org/10.26160/2541-8637-2024-13-150-156>. EDN: NXFIAU.
6. Stupnytsky V., Dragašius E., Baskutis S., Xianning Sh. Modeling and simulation of machined surface layer microgeometry parameters. *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*. 2022;8(1):1-11. (In Russ). <https://doi.org/10.23939/ujmms2022.01.001>. EDN: FGAHMG.
7. Ovsyannikov V., Nekrasov R., Putilova U., Il'yaschenko D., Verkhoturova E. On the issue of automatic form accuracy during processing on CNC machines. *Revista Facultad de Ingenieria*. 2022;103:88-95. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20201111>. EDN: HCVDFL.
8. Nekrasov R.Yu. Increase production efficiency of working parts of cylinder sleeves of drill pumps. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2025;92(6):645-651. (In Russ). <https://doi.org/10.17816/0321-4443-688855>. EDN: VZUSCQ.
9. Chernykh L.G. Calculation of systematic component of primary profile texture of the machined surface. *Metalloobrabotka*. 2023;2:19-23. (In Russ). <https://doi.org/10.25960/mo.2023.2.19>. EDN: ZHZLRX.
10. Ovsyannikov V., Nekrasov R., Putilova U., Gubenko A. Structural features of the roughness profile of hardened steel parts after finishing turning. In: *EPJ Web of Conferences*. 2025;318:03011. <https://doi.org/10.1051/epjconf/202531803011>. EDN: FXACLR.
11. Nekrasov R.Yu., Ovsyannikov V.E., Gubenko A.S. Improving the quality of drilling pump cylinder liners based on the use of gray iron with a hardened layer. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2025;23(2):128-133. (In Russ). <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-128-133>. EDN: NWIYML.
12. Kabaldin Yu.G., Sablin P.A., Shchetinin V.S. Control of the dynamic stability of metal-cutting systems in the process of cutting based on the fractality of roughness of the machined surface. *Frontier Materials and Technologies*. 2023;3:43-51. (In Russ.). <https://doi.org/10.18323/2782-4039-2023-3-65-4>.
13. Zakovorotny V., Gvindjiliya V. The features of the evolution of the dynamic cutting system due to the regenerative effect. In: *Dynamics of technical systems: AIP Conference Proceedings of the 7 International Scientific-Technical Conference*. 9–11 September 2023, Rostov-on-Don. Rostov-on-Don: American Institute of Physics Inc.; 2023, vol. 2507, Iss. 1, p. 030002. <https://doi.org/10.1063/5.0109559>. EDN: FLSYFX.
14. Ovsyannikov V., Nekrasov R., Putilova U., Il'yaschenko D., Verkhoturova E. On the issue of automatic form accuracy during processing on CNC machines. *Revista Facultad de Ingenieria*. 2022;103:88-95. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20201111>. EDN: HCVDFL.
15. Proskuryakov N.A., Nekrasov R.Y., Starikov A.I., Solov'ev I.V., Barbyshev B.V., Tempel' Y.A. Fuzzy controllers in the adaptive control system of a CNC lathe. *Russian Engineering Research*. 2018;38(3):220-222. <https://doi.org/10.3103/S1068798X18030188>. EDN: XMQTZ.
16. Tugengol'd A.K., Voloshin R.N., Dimitrov V.P., Borisova L.V., Yusupov A.R. Monitoring the condition of CNC machine tools. *Russian Engineering Research*. 2020;40(9):763-767. <https://doi.org/10.3103/S1068798X2009021X>. EDN: UEKPVL.
17. Kabaldin Yu.G., Anosov M.S., Mantserov S.A., Jelonkin M.V. Study of deformation and fracture processes in structural alloys produced by additive electric-arc surfacing with acoustic emission monitoring. *Russian Engineering Research*. 2025;104(1):53-58. (In Russ). <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2025-104-1-53-58>. EDN: VOCTQF.
18. Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E., Kislov K.V. Information properties of vibroacoustic emission in diagnostic systems for cutting tool wear. *Metal Working and Material Science*. 2025;27(3):50-70. (In Russ). <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2025-27.3-50-70>. EDN: CIFNCY.
19. Ostapchuk A.K., Ovsyannikov V.E. *Scientific foundations of ensuring surface roughness based on the random processes analysis: monography*. Kurgan: Kurgan State University; 2012, 196 p. (In Russ). EDN: YMOJVR.
20. Simonov A.M., Ostapchuk A.K., Ovsyannikov V.E. *Fundamentals of ensuring machine part surface quality using dynamic monitoring: monography*. Kurgan: Kurgan State University; 2010, 118 p. (In Russ). EDN: QNCVIJ.
21. Rogov E.Yu., Ostapchuk A.K., Ovsyannikov V.E. *Automatic assurance of shape accuracy in CNC machining: monography*. Kurgan: Kurgan State University, Ural State University of Railways; 2023, 174 p. EDN: PGCNOK.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Овсянников Виктор Евгеньевич,
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры технологии
машиностроения,
Тюменский индустриальный университет,
625000, Российская Федерация,
г. Тюмень, ул. Володарского, 38
vik9800@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Viktor E. Ovsyannikov,
Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Professor of the Department of Mechanical
Engineering Technology,
Industrial University of Tyumen,
38 Volodarsky St., Tyumen 625000,
Russian Federation
vik9800@mail.ru

Путилова Ульяна Сергеевна,

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры технологии
машиностроения,
Тюменский индустриальный университет,
625000, Российская Федерация,
г. Тюмень, ул. Володарского, 38
putilovaus@tyuiu.ru

Лопатин Борис Александрович,

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры технологии
машиностроения,
станков и инструментов,
Южно-Уральский государственный университет,
454080, Российская Федерация,
г. Челябинск, проспект Ленина, 76
lopatinba@susu.ru

Кузнецова Елена Михайловна,

кандидат технических наук,
доцент кафедры автоматизации
производственных процессов,
Курганский государственный университет,
640669, Российская Федерация,
г. Курган, ул. Советская, 63/4
✉ lenkuz@bk.ru

Маслов Денис Александрович,

старший преподаватель кафедры
машиностроения,
Курганский государственный университет,
640669, Российская Федерация,
г. Курган, ул. Советская, 63/4
denis-masloff@yandex.ru

Uliana S. Putilova,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Mechanical Engineering Technology,
Industrial University of Tyumen,
38 Volodarsky St., Tyumen 625000,
Russian Federation
putilovaus@tyuiu.ru

Boris A. Lopatin,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Mechanical
Engineering, Machine Tools, and Instruments
South Ural State University,
76 Lenin pr., Chelyabinsk 454080,
Russian Federation
lopatinba@susu.ru

Elena M. Kuznetsova,

Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department
of Industrial Process Automation,
Kurgan State University,
63/4 Sovetskaya St., Kurgan 640669,
Russian Federation
✉ lenkuz@bk.ru

Denis A. Maslov,

Senior Lecturer of the Department
of Mechanical Engineering,
Kurgan State University,
63/4 Sovetskaya St., Kurgan 640669,
Russian Federation
denis-masloff@yandex.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 30.04.2026 г.; одобрена после рецензирования 09.06.2026 г.; принята к публикации 15.06.2026 г.

Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 30.04.2026; approved after reviewing 09.06.2026; accepted for publication 15.06.2026.



Cooperative behavior strategies of prosumers in an integrated centralized–distributed energy system

Natalia I. Aizenberg^{1✉}, Evgeny A. Barakhtenko², Gleb S. Mayorov³

¹⁻³Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

Abstract. The study aims to develop principles for forming coalitions of prosumers within an integrated energy system for efficient energy supply, substantiate the rules governing their interaction, and create a transparent mechanism for distributing joint gains among coalition participants. To this end, modeling was performed using multi-agent technologies that effectively describe multiple entities with divergent interests. In the present study, these include a centralized energy supply system with large-scale energy sources, individual energy consumers, and prosumers with their own generation sources. Models were constructed based on approaches from the theories of non-cooperative and cooperative games, which determine the actions of participants at different hierarchical levels of interaction within an integrated energy system. Particular attention is paid to the principles of forming prosumer coalitions and approaches to distributing joint gains. For this, solution concepts from cooperative game theory, such as the prenucleolus, modiclus, Shapley value, and tau-value, are used. The problem of interactions among consumers within a coalition was mathematically formulated to implement the cooperative strategies of participants. The developed multi-agent model was used to conduct experiments on the interaction of prosumers in coalitions with various compositions. Cooperative game solutions for distributing joint gains were implemented; the “best” solutions were identified according to a set of criteria reflecting the contribution and interests of each participant. The “best” solutions were demonstrated to vary depending on the coalition configuration. Thus, distribution according to the modiclus is the “best” for a coalition consisting of prosumers that differ significantly in their levels of consumption and own generation. In the case of approximately homogeneous prosumers, the prenucleolus or tau-value is optimal. Thus, the proposed criterion for determining the “best” distribution was used to select the most effective organization of interactions among prosumers within coalitions in the energy system.

Keywords: cooperative game theory, multi-agent approach, agent-based modeling, prosumers, integrated energy system

Funding. The research was carried out under State Assignment Projects (No. FWEU-2026-0012 and No. FWEU-2026-0013) of the Fundamental Research Program of the Russian Federation 2021-2030.

For citation: Aizenberg N.I., Barakhtenko E.A., Mayorov G.S. Cooperative behavior strategies of prosumers in an integrated centralized–distributed energy system // *iPolytech Journal*. 2026;30(3):451-465. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2026-3-451-465>. EDN: UTGMFM.

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 621.311

Кооперативные стратегии поведения активных потребителей в интегрированной централизованно-распределённой энергетической системе

Н.И. Айзенберг^{1✉}, Е.А. Барахтенко², Г.С. Майоров³

¹⁻³Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск, Российская Федерация

Резюме. Цель работы – разработка принципов объединения активных потребителей в коалиции в рамках интегрированной энергетической системы для обеспечения эффективного энергоснабжения; обоснование правил взаимодействия и создание прозрачного механизма дележа совместного выигрыша участников коалиции. Моделирование осуществлялось с использованием мультиагентных технологий, позволяющих эффективно описывать множество субъектов с разнонаправленными интересами. В наших исследованиях это централизованная система энергоснабжения, владеющая крупными источниками энергии, отдельные потребители энергии и активные потребители, имеющие собственные источники генерации. Модели реализованы на основе

подходов теории некооперативных и кооперативных игр, определяющих действия участников на разных иерархических уровнях взаимодействия интегрированной энергетической системы. Особое внимание уделено принципам объединения активных потребителей в коалиции, а также подходам к распределению совместного выигрыша: использованы известные из теории кооперативных игр решения, такие как Пренуклеолус, Модиклус, вектор Шепли, Тау-вектор. Выполнена математическая постановка задачи взаимодействия внутри коалиции потребителей, реализующая принципы кооперативных стратегий участников. С использованием разработанной мультиагентной модели осуществлены эксперименты по взаимодействию активных потребителей в различных по составу коалициях. Для них реализованы решения кооперативной игры по распределению совместного выигрыша, найдены «наилучшие» с точки зрения системы критериев, определенных вкладом и заинтересованностью каждого участника. Показано, что в зависимости от конфигурации коалиции «наилучшие» решения могут быть различны. Так, если коалиция состоит из активных потребителей, существенно различающихся по объемам потребления и собственной генерации, то «наилучшим» решением будет дележ по принципу вектора Модиклус. Если все приблизительно равны, то лучше пользоваться Пренуклеолусом или Тау-вектором. Таким образом, на основании полученных результатов с помощью предложенного критерия определения «наилучшего» дележа выбрана наиболее эффективная организация взаимодействия активных потребителей в коалициях в рамках энергосистемы.

Ключевые слова: теория кооперативных игр, мультиагентный подход, агентное моделирование, активные потребители, интегрированная энергетическая система

Финансирование. Работа выполнена в рамках проектов государственного задания (№ FWEU-2026-0012 и № FWEU-2026-0013) программы фундаментальных исследований РФ на 2021–2030 гг.

Для цитирования: Айзенберг Н.И., Барахтенко Е.А., Майоров Г.С. Кооперативные стратегии поведения активных потребителей в интегрированной централизованно-распределённой энергетической системе // iPolytech Journal. 2026. Т. 30. № 3. С. 451–465. (In Eng.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2026-3-451-465>. EDN: UTGMFM.

INTRODUCTION

Modern energy systems are undergoing changes driven by the energy transition based on the principles of decarbonization, decentralization, and digitalization [1, 2]. The carbon-free policy adopted in most developed economies is shifting from traditional fossil fuels to nuclear energy and renewable (solar, wind, hydroelectric, and geothermal) energy sources (RES) [3, 4]. As a result, the principles of constructing energy systems and the mechanisms of interaction among energy entities are changing, and the influence of the growing number of entities with their behavior patterns, such as prosumers with their energy sources, is increasing. This factor strengthens integration among systems, creating new opportunities for the interaction among energy facilities and the conversion of one type of energy into another [5]. Thus, the establishment of integrated centralized-distributed energy systems is a promising step for the development of currently operating energy systems [6]. At the same time combining power, heating, cooling, and gas systems into a single integrated energy system (IES) makes it challenging to organize interaction among these systems and find optimal energy supply solutions.

Prosumers, combining the roles of both energy producers and consumers, are key components of energy systems contributing to their transformation and the transition to sustainable energy systems. Prosumers are defined as the energy system entities capable of managing their energy supply by monitoring and controlling their self-generation based on their needs, which enables them to supply surplus power to the system when required. Generating energy at the point of use, these actors facilitate the transition from centralized energy generation to distributed sources [7, 8]. Furthermore, coalitions formed by prosumers enable the efficient use of distributed generation.

The organization of energy supply is traditionally viewed as an integrated system. Linear and convex programming optimization models are used to model and determine the optimal system operation. The problem is typically formulated as that of maximizing the joint payoff of all participants, subject to constraints that include balance constraints for each system node, generation constraints for energy sources, and transfer capability constraints for network sections. A significant complication of the problem is the presence of competing interests and incomplete information about the state of the entire energy system for all energy supply participants, which necessitates changes in modeling methods. Modern approaches are based on game theory [9], bilevel programming [10], agent-based modeling [11, 12] methods, and others. The present study is grounded in multi-agent and game-theoretic models.

This paper examines the organization of interactions among participants in the energy supply process within an IES. A multi-agent approach is used to factor in the complex behavior of the IES entities, their divergent interests, and the multi-level structure of the IES. This approach enables the description of individual behavior of each IES entity and considers their interests when searching for a solution to manage the energy supply process [10, 13]. A distributed approach applied to solve the problem involves dividing the overall problem into several smaller-scale problems [11, 14].

Articles [13, 15, 16] present a developed mathematical model describing the interaction of prosumers within coalitions and ensuring a fair distribution of the payoff from this interaction depending on their contribution to the energy supply process. A multi-agent system structure and a composition of agents are proposed to organize interactions among IES entities, considering their operational characteristics. Each level of the IES solves its problem. Thus, the centralized system seeks to maximize social welfare, acting as a social planner, while prosumers tend to protect their interests, striving to obtain the greatest payoff for themselves. In this formulation, the equilibrium should correspond to the Nash equilibrium in the Stackelberg game [13]. The present study uses the developed multi-agent model to perform a set of calculations for various options of prosumer coalitions with four and five prosumers in the IES. A fair distribution of the payoff among prosumers is achieved using the allocation rules such as the prenucleolus, modiclus, Shapley value, and tau-value. These distribution mechanisms were analyzed based on the model proposed for choosing an efficient allocation of joint payoffs, which factors in contributions to the coalition and incentives for leaving it.

MATHEMATICAL FORMULATION OF CONSUMER COALITION INTERACTIONS

The objective is to ensure that each participant $tr \in \{cr, pr\}$, where cr is a set of traditional consumers without self-generation and pr represents a set of prosumers, receives a higher payoff by joining coalition S_k than by acting independently. Consumer payoff $v_{tr}(Q_{tr})$ is determined as a difference between the value of utility derived from the received energy and the total cost incurred to purchase or generate it. The payoff can also be considered as the savings relative to the maximum possible payment for energy. (T, S, η) is a coalition game in a characteristic form [17, 18] with coalitions S_k , which represent partitions of the grand coalition T and have payoff characteristic function η , based on absolute values of consumer payoffs $v_{tr}(Q_{tr})$. We will define participants as $i \in S_k, k = \overline{1, K}$, where K is the number of coalitions, then the payoff characteristic function for game (T, S, η) is as follows (1):

$$\eta(S_k) = \frac{v_{S_k} - \sum_{i \in S_k} v_{tr,i}}{v_T - \sum_{i \in T} v_{tr,i}}, \quad tr \in (cr, pr), k = \overline{1, K}. \quad (1)$$

The numerator in equation (1) contains payoff v_{S_k} of coalition S_k less the sum of payoffs of the participants $\sum_{i \in S_k} v_{tr,i}$, if they do not join this coalition. The denominator contains the payoff of the grand coalition v_T less the payoff of each participant acting independently $\sum_{i \in T} v_{tr,i}$. Thus, $\eta(S_k) \in [0, 1]$. Further, the model employs the payoff $\eta(S_k)$ of coalition $S_k \in T$, which represents a fraction of the maximum total gains achieved through cooperation.

Let us define a set of feasible payoffs in game (T, S, η) as a set $X(T, \eta) = \left\{ \mathbf{x} \in R^T : \sum_{i \in T} x_i \leq \eta(T) \right\}$, where x_i is the fraction of a joint payoff received by coalition participant $i \in S_k$. The set $X^0(T, \eta) = \left\{ \mathbf{x} \in R^T : \sum_{i \in T} x_i = \eta(T) \right\}$ is the set of Pareto-efficient payoffs in game (T, S, η) .

The set of payoffs $E(T, \eta)$ in game (T, S, η) meets the individual rationality condition $E(T, \eta) = \{ \mathbf{x} \in R^T : x_i \geq \eta(\{i\}), i \in S_k, k = \overline{1, K} \}$.

C-core is a solution to game (T, S, η) , at which the condition of individual rationality $\sum_{i \in S_k} x_i \geq \eta(S_k)$ holds for all coalitions $S_k \subseteq T, k = \overline{1, K}$ [18]. The non-emptiness of the core confirms the participants' interest in forming a coalition. At the same time, it is challenging to choose a specific solution belonging to the core, and, to identify a solution from a feasible set, if the core is empty. Cooperative game theory offers several solution concepts [18–21]. Each solution is defined by a unique interpretation of the efficiency, rationality, and fairness in the total payoff distribution.

Cooperative game solution concepts

The solution concepts used in this study include the prenucleolus, modiclus, Shapley value, and tau-value.

The excess of cooperative game (T, S, η) of any coalition $S_k \subseteq T$ for any $\mathbf{x} \in X^0(T, \eta)$ is (2):

$$e(\mathbf{x}, \eta, S_k) = \eta(S_k) - \sum_{i \in S_k} x_i. \quad (2)$$

This is a measure of dissatisfaction of members within coalition S_k with payoff $\eta(S_k)$.

A dual characteristic function for game (T, S, η) is denoted by $\eta^*(\cdot)$, such that $\eta^*(S_k) = \eta(T) - \eta(T \setminus S_k)$ holds.

The excess of the dual game (T, S, η^*) of any coalition $S_k \subseteq T$ is $e(\mathbf{x}, \eta^*, S_k)$. The excess of the dual game characterizes the blocking capability of the coalition.

The excess of the sum for game (T, S, η) and its dual game (T, S, η^*) is represented by $\bar{e}(\mathbf{x}, \eta, S_k) = \frac{1}{2}(e(\mathbf{x}, \eta, S_k) + e(\mathbf{x}, \eta^*, S_k))$.

The vector $\mathbf{M}(T, \eta)$ is the marginal contribution vector, where the i -th component is the marginal contribution of player i to the grand coalition T : $M_i(T, \eta) = \eta(T) - \eta(T \setminus \{i\})$. The minimum contribution vector is $\mathbf{m}(\eta)$, where the i -th component is represented by $m_i(\eta) = \eta(S_k) - \sum_{j \in S_k} M_j(T, \eta)$.

The prenucleolus [22] of game (T, S, η) is a set of payoffs $\mathbf{x} \in I(T, \eta)$ that satisfies (3):

$$\theta(e(\mathbf{y}, \eta, S_k)) \geq_{lex} \theta(e(\mathbf{x}, \eta, S_k)), \forall \mathbf{y} \in I(T, \eta), \quad (3)$$

where $\theta(z) = (\theta^1(z), \dots, \theta^d(z))$ is the vector in R^d , whose components are located in the order such that $\theta(z) = \max_{S_k \subseteq T} \min_{k \in M} (h_k(z))$. Solution is obtained by successively solving optimization problems.

The modiclus (modified nucleolus) [23] of game (T, S, η) is a set of vectors $\mathbf{x} \in X^0(T, \eta)$ such that (4):

$$\theta(\bar{e}(\mathbf{y}, \eta, S_k)) \geq_{lex} \theta(\bar{e}(\mathbf{x}, \eta, S_k)) \quad \forall \mathbf{y} \in X^0(T, \eta). \quad (4)$$

The Shapley value [24] for allocating payoff $\eta(T)$ in game (T, S, η) , for $S_k \subseteq T$ is defined as a vector whose components are as follows (5):

$$\varphi_i = \sum_{S_k \in T} \frac{(k-1)!(t-k)!}{t!} (\eta(S_k) - \eta(S_k \setminus \{i\})), \quad i \in T, k = |S_k|, t = |T|, \quad (5)$$

where $|S_k|$ is the worth of coalition S_k .

The tau-value [25] for allocating payoff $\eta(T)$ of game (T, S, η) is defined by the vector (6):

$$\tau(\eta) = \alpha \cdot \mathbf{m}(\eta) + (1 - \alpha) \cdot \mathbf{M}(T, \eta), \quad (6)$$

where $\alpha \in [0, 1]$ are uniquely defined, and the sum of components of the vector is $\sum_{i \in T} \tau_i(\eta) = \eta(T)$.

Criteria for selecting the best solution to the cooperative game

Selecting a single solution, i.e., allocating a payoff among the players, requires selection criteria. Simultaneously finding a solution that is fair in terms of each player's contribution, stable against incentives for players to leave the coalition, and reflective of their blocking capabilities is infeasible. Several criteria that can be used to determine the "qualitative" characteristics of the resulting solution are discussed in [26]. We have developed the following system of criteria to select a solution from a set:

Satisfaction index serves as the first criterion for "solution quality," which is based on determining the excess (2). Excess shows players the advantages of a coalition relative to independent action, representing the cost savings or gains achieved through cooperation within coalition S_k in accordance with the allocation vector $\mathbf{x}$. The higher the value of $e(\mathbf{x}, \eta, S_k)$, the greater the sum of cost savings for the players in coalition S . Furthermore, the higher the payoff allocated to each player, the higher their satisfaction under allocation $\mathbf{x}$ (7):

$$w_1 = 1 - \min_{S_k} e(\mathbf{x}, \eta, S_k) \rightarrow \min. \quad (7)$$

As seen, according to this criterion, the prenucleolus solution outperforms the other concepts under criterion w_1 , achieving the minimum value.

Fairness index is the criterion that shows the deviation of allocation $\mathbf{x}$ achieved from the payoff distribution by equal fractions. The optimal allocation under criterion w_2 achieves the minimum value for this metric (8):

$$w_2 = \max_{i \in T} x_i - \min_{i \in T} x_i \rightarrow \min. \quad (8)$$

Attractiveness index is the criterion showing a relationship between the sum of losses for the player that has left the coalition and the losses of the coalition itself. The greater the loss of the player, the more attractive it is for them to join/not to leave the coalition. This index is denoted by w_3 . The lower the value of w_3 , the greater the incentive to join the coalition for player i (9):

$$w_3 = \max_{i \in T} \left\{ 1 + \frac{1 - \eta_{T \setminus \{i\}}}{x_i} \right\} \rightarrow \min. \quad (9)$$

Aggregated criterion for solution selection. The above-defined indices w are used to calculate an aggregated quality index for the obtained solution (10):

$$\omega = w_1 \cdot w_2 \cdot w_3. \quad (10)$$

Within cooperative game theory, a smaller value of ω is generally recognized as indicator of the superior allocation of the coalition's payoff.

The allocation rules under study (the prenucleolus, modiclus, Shapley value, and tau-value) yield rational solutions only for the class of convex games. However, technical limitations of energy systems can lead to non-convex cooperative games. In such cases, the contribution of individual players to sub-coalitions may be greater than to the grand coalition. Therefore, developing algorithms that prevent the emergence of non-convex cooperative games is highly relevant, par-

ticularly by identifying cooperative instabilities and implementing mechanisms to eliminate them.

MULTI-AGENT SYSTEM STRUCTURE

A multi-agent system (MAS) structure was developed to organize interactions among IES entities. It comprises three levels, each represented by its set of agents (Fig. 1). The first level is represented by centralized system entities, including large energy sources, backbone network sections, and large-scale traditional consumers. The second level is represented by aggregator agents that coordinate and control distributed systems. The third level is represented by prosumers and small-scale traditional consumers.

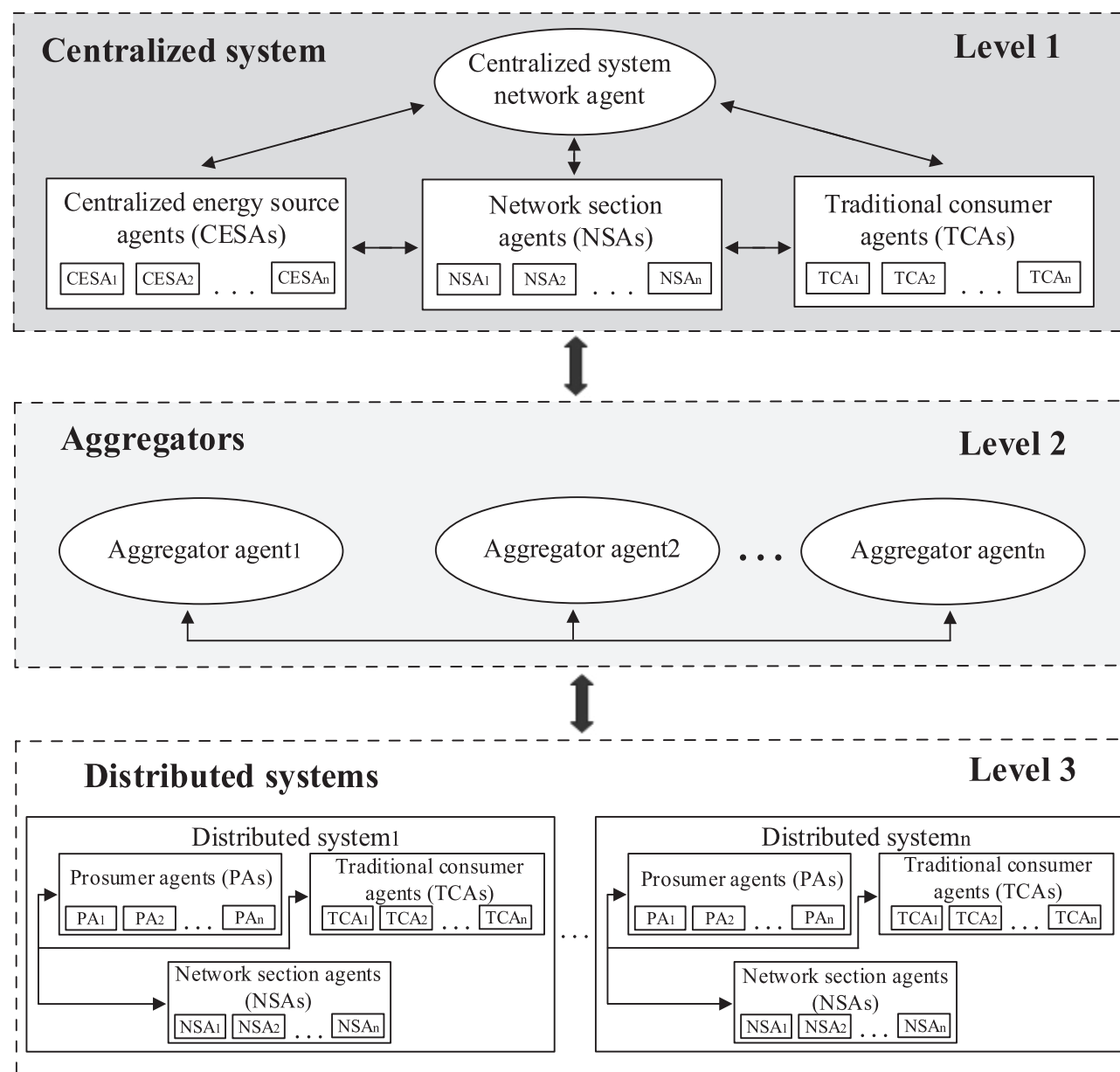


Fig. 1. Multi-agent system structure

Рис. 1. Структура мультиагентной системы

The developed MAS is used to find a solution considering the interests of both the centralized system and prosumers when they form coalitions within the IES. Behavior of agents and mechanisms for their interaction are described in [27, 28].

The algorithm for solving the problem formulated in the study includes the following steps:

1. Prepare data. Determine the iteration number $t = t + 1$.
2. (Centralized system network agent): Search for a solution to the social welfare maximization problem based on the demand forecast received from consumers. Determine the planned energy generation volumes $(Q_j^l)^t$, $l \in I$, $j \in GT$, where I is a set of generation sources of various energy types of set GT ; $(Q_{tr,j}^n)^t$ are volumes of energy consumption; $tr \in [cr, pr]$ are volumes of energy transmission throughout the transportation system $(q_j^{ln})^t$; $(p_j^l)^t$ and $(p_j^n)^t$ are nodal generation and consumption prices, where $n \in [1, N]$ are energy system nodes.
3. Compare the calculated prices $(p_j^n)^t$ and $(p_j^n)^{t+1}$.
 - If the prices are equal, go to step 7.
 - If the prices are not equal, the centralized system network agent transfers the nodal price information to the consumer agents.
1. (Prosumer agents): Optimize demand for two scenarios:
 - 4.1. The prosumer acts individually and does not form coalitions, interacting only with the centralized system.
 - 4.2. The prosumer interacts with both the centralized system and other prosumers, forming coalitions.
 - a. Form a list of potential coalitions, given technical constraints, and identify the most efficient one from this list, with the highest payoff.
 - b. Calculate potential payoff allocation among prosumers in coalitions:
 - i. Reduce the game to the form of (1).
 - ii. Determine the properties of the game: convex or non-convex.
 - iii. Calculate the allocations using the prenucleolus, modiclus, Shapley value, and tau-value.
 - iv. Identify the best allocation using the solution "quality" vector, as per (7)–(9), and calculate the aggregated vector (10) to characterize the properties of the game solution.
 - c. Determine, based on the results obtained, the most profitable energy supply option for prosumer agents themselves, either individual (step 4.1) or within a coalition (step 4.2).
5. (Prosumer agents): Transfer the calculation results to the level of aggregator agents that search for a solution for prosumers connected by network sections, given the transfer capability constraints.
6. (Aggregator agents): Transfer the obtained solution data to the centralized system network agent.
7. Check if all the coalitions from the list are analyzed.
 - If any coalitions of prosumers remain unanalyzed, return to step 1.
 - If all coalitions of prosumers are analyzed, terminate the calculation.

RESULTS AND DISCUSSION

A test IES diagram (Fig. 2) was developed to explore the interaction of prosumers within a coalition. It comprises electricity, heating, gas, and cooling systems. The study focuses on five prosumers with their energy sources, including photovoltaic systems, heat pumps, and chillers. The system also includes three traditional consumers. The centralized system is represented by a CPP, a boiler house, a gas distribution station, PTL, and pipelines (heat and gas). The cooling system is represented by chillers at the consumers' sites.

A set of calculations was performed to determine the "best" solution for the coalition game for two prosumer interaction scenarios: a system with four prosumers (prosumer 5 is disconnected, see Fig. 2) and a system with five prosumers. Apart from the number of prosumers, these scenarios differ in the potential for energy production from centralized and distributed energy sources. In the scenario with five prosumers, the capabilities of distributed generation are significant and can cover a substantial portion of load, whereas in the scenario with four prosumers, distributed generation can only cover a small fraction. In the system with five prosumers, 27 coalition options were identified, whereas only 12 coalition

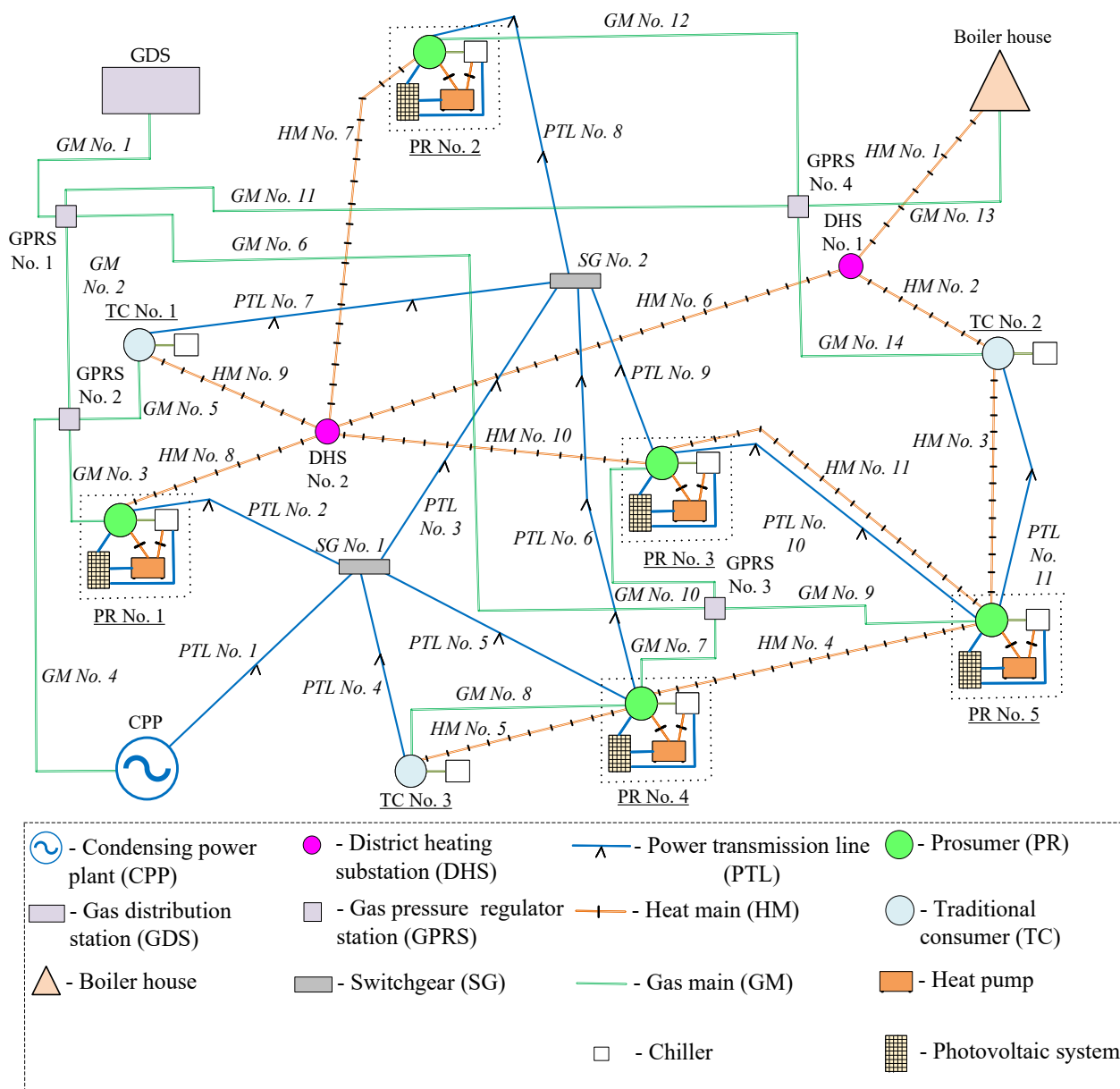


Fig. 2. Test diagram of the integrated energy system

Рис. 2. Тестовая схема интегрированной энергетической системы

options were found for the system with four prosumers. The calculations were performed simultaneously for electricity, heating, cooling, and gas supply, aiming to reduce the total costs for prosumers participating in cooperation within the IES. Figure 3 shows the calculation results for the five-prosumer scenario in the absence of interaction constraints, demonstrating the case of full cooperation. Each entity in the system is represented by a corresponding agent with specified parameters and characteristics. The obtained results are presented next to each entity (see Fig. 3).

The calculations performed yielded data on consumer energy supply, as well as the capacity utilization of both generation equipment and network equipment. Table 1 presents data on energy prices and load distribution between centralized energy sources and prosumer-owned energy sources, comparing the scenario of full cooperation among prosumers $\eta(1,2,3,4,5)$ against the scenario of no interaction $\eta(\{i\}), i \in 1,5$. As seen in the table, centralized energy prices vary for different consumer coalitions. The difference in electricity

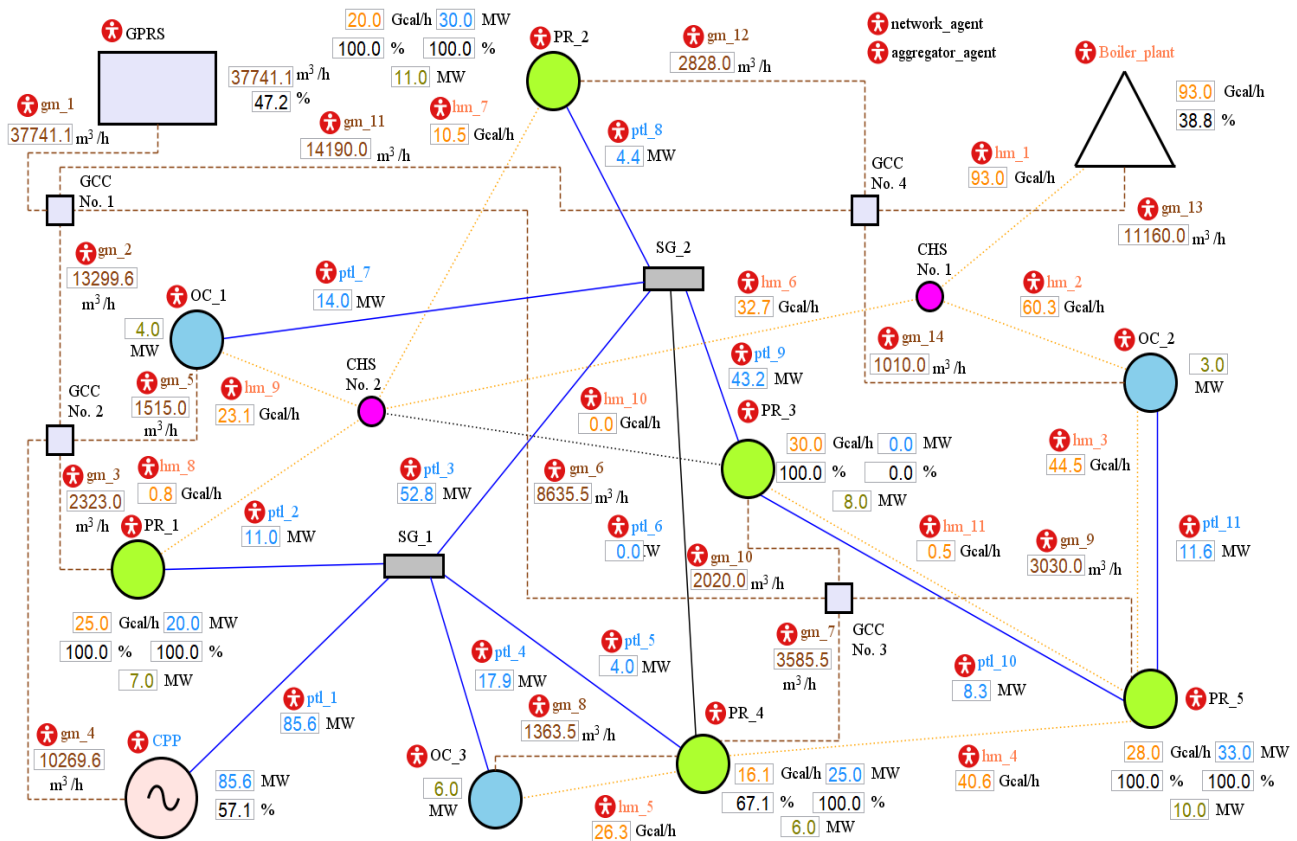


Fig. 3. Full cooperation for five prosumers

Рис. 3. Полная кооперация для пяти активных потребителей

price is primarily driven by fluctuating power output from the condensing power plant. Thus, efficient utilization of prosumer energy sources (in the full cooperation scenario), combined with optimal load distribution between centralized and distributed energy sources, reduces prosumer costs. Negative power values (see Table 1) indicate that prosumers inject surplus power to the system.

Table 2 presents the results for the scenario of full cooperation for five prosumers $\eta(1, 2, 3, 4, 5)$ and the scenario of no interaction $\eta(\{i\})$, $i \in 1, 5$. Based on the data obtained, calculations were performed to fairly distribute the payoff among prosumers using solution concepts such as the prenucleolus, modiclus, Shapley value, and tau-value.

The data presented in Table 2 demonstrate that costs are distributed differently depending on the chosen solution concept, considering the extent to which each prosumer contributes to the energy supply process. To determine the properties of the resulting allocations, a set of criteria was proposed to evaluate their performance. Table 3 presents the criteria ω_1 , ω_2 , ω_3 , and the aggregated index ω , characterizing the solutions obtained for the two scenarios using the solution concepts of the prenucleolus, modiclus, Shapley value, and tau-value. The calculations show that for the five-prosumer scenario, the prenucleolus offers the highest allocation fairness and some degree of stability, whereas the modiclus-based allocation emerges as the best solution in the four-prosumer scenario. In both cases, the value of the aggregated index ω is the lowest among all considered concepts. Figure 4 graphically illustrates the obtained solution. It can thus be concluded that no universal concept exists for payoff allocation among prosumers. Each case is unique and depends on many parameters that influence the final solution. Therefore, it is essential to individually select a solution concept for each scenario to ensure a fair distribution of costs.

Table 1. Calculation results**Таблица 1.** Результаты расчетов

Coalition options	$\eta(\{i\}), i \in [1,5]$					$\eta(1,2,3,4,5)$				
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
Price for 1 MW of centralized electrical energy, RUR	1 771.37	1 771.37	1 771.37	1 771.37	1 771.37	1 558.00	1 558.00	1 558.00	1 558.00	1 558.00
Price for 1 Gcal/h of centralized thermal energy, RUR	1 860.00	1 860.00	1 860.00	1 860.00	1 860.00	1 840.00	1 840.00	1 840.00	1 840.00	1 840.00
Price for 1 m ³ of centralized gas, RUR	15.46	15.46	15.46	15.46	15.46	14.88	14.88	14.88	14.88	14.88
Price for 1 MW of self-generated electrical energy, RUR	1 500.00	1 400.00	1 650.00	1 550.00	1 480.00	1 500.00	1 400.00	1 650.00	1 550.00	1 480.00
Price for 1 Gcal/h of self-generated thermal energy, RUR	2 000.00	1 800.00	1 700.00	2 100.00	1 950.00	2 000.00	1 800.00	1 700.00	2 100.00	1 950.00
Electrical power from centralized source, MW	10.70	0.00	25.97	3.94	0.00	10.95	-4.40	34.90	3.98	-2.25
Thermal power from centralized source, Gcal/h	0.00	10.45	0.45	14.50	3.50	-0.85	10.45	0.45	14.35	3.50
Gas from centralized source, m ³	2 323.00	2 828.00	2 020.00	2 222.00	3 030.00	2 323.00	2828.00	2 020.00	2 222.00	3 030.00
Self-generated electric power, MW	20.00	25.60	8.93	25.00	29.75	20.00	25.60	0.00	25.00	29.75
Self-generated thermal power, Gcal/h	24.15	20.00	30.00	15.95	28.00	25.00	20.00	30.00	16.10	28.00

Table 2. Total energy supply costs for five prosumers**Таблица 2.** Общие затраты на энергоснабжение для пяти потребителей

Experiment	Prosumer No. 1	Prosumer No. 2	Prosumer No. 3	Prosumer No. 4	Prosumer No. 5	Total costs
$\eta(\{i\}), i \in [1,5]$	84 867	99 008	108 753	115 527	97 395	505 549
$\eta(1,2,3,4,5)$	475 761					475 761
Preruleolus	75 332	96 928	99 047	108 956	95 498	475 761
Modiclus	73 205	95 627	100 338	112 280	94 312	475 761
Shapley value	76 454	95 592	100 655	108 923	94 138	475 761
Tau-value	75 716	97 013	99 099	108 269	95 664	475 761

Table 3. Characteristics for the obtained solutions of the coalition game

Таблица 3. Характеристики для полученных решений коалиционной игры

Characteristics	Prenucleolus	Modiclus	Shapley value	Tau-value
Coalition game for 5 prosumers				
Satisfaction index w_1	0.998	1.038	1.043	1.008
Fairness index w_2	0.54	0.43	0.54	0.58
Attractiveness index w_3	2.69	4.43	2.69	2.53
Aggregated index ω	1.46	1.97	1.50	1.47
Coalition game for 4 prosumers				
w_1	0.98	0.99	0.96	0.98
w_2	0.45	0.06	0.23	0.44
w_3	2.64	3.22	2.56	2.37
ω	1.16	0.19	0.56	1.02

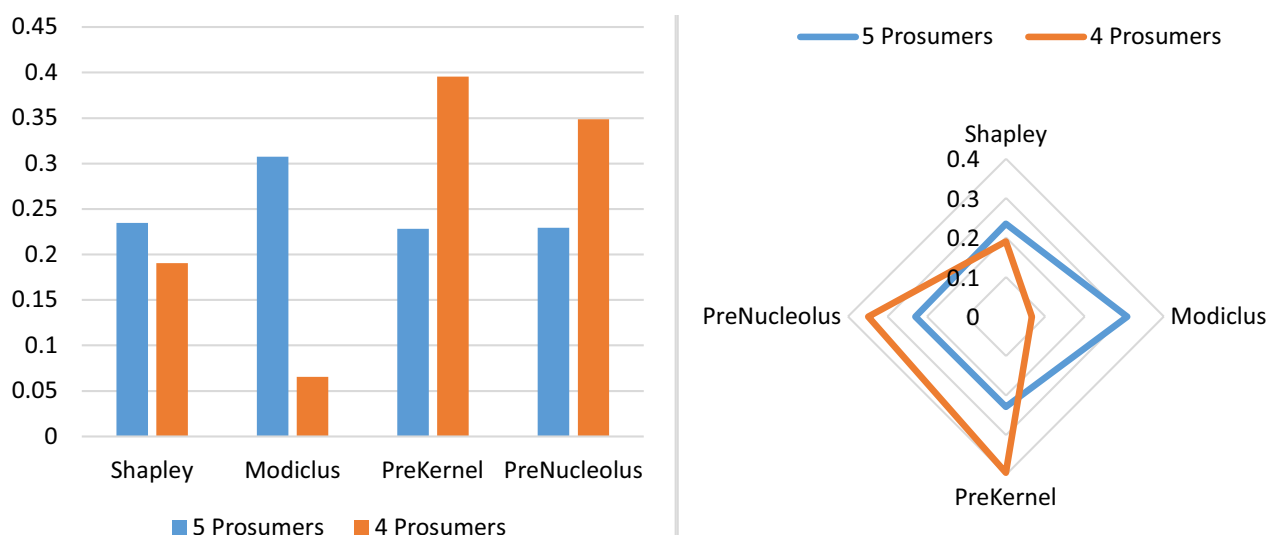

Fig. 4. Determining the best allocation

Рис. 4. Определение наилучшего дележа

The economically justified involvement of prosumers in the energy supply enables efficient load distribution between centralized and distributed energy sources.

CONCLUSION

The rising number of prosumers has a significant effect on energy systems, which must be considered in the operation of IES. The proper integration of prosumers into existing energy systems and the use of distributed energy sources substantially enhance reliability and cost-effectiveness of energy supply. This paper introduces a multi-agent IES model and an algorithm to organize prosumer interactions within coalitions established in the system. A mathematical formulation of the prosumer interactions within a coalition and criteria for selecting the best solution to a cooperative game are proposed. A set of calculations was performed for a system of four and five prosumers with subsequent fair payoff allocation among prosumers based on the solution concepts, including the modiclus, prenucleolus, Shapley value, and tau-value. The calculation results show that the number of prosumers and the proportion of distributed generation in the system affect the performance and applicability of the solution concepts used to identify the best payoff allocation. Thus, maximizing the effectiveness of prosumer involvement in the energy supply process requires a scenario-specific selection of a solution concept to ensure fair cost allocation.

References

1. Markova V.M., Churashev V.N. Energy decentralization: integration and Innovation. *ECO*. 2020;4:8-27. (In Russ.). <https://doi.org/10.30680/EC00131-7652-2020-4-8-27>.
2. Di Silvestre M.L., Favuzza S., Sanseverino E.R., Zizzo G. How decarbonization, digitalization and decentralization are changing key power infrastructures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018;93:483-498. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.068>.
3. Sheraz M., Sinha A., Qin Quande, Mumtaz M.Z. The asymmetric nexus between energy transition and its drivers: new evidence from China. *Energy*. 2024;310:133236. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133236>.
4. Wang Y., He Z., Zou J., Xie H., Bao J. Energy transition for sustainable economy: What is the role of government governance and public concern? *Finance Research Letters*. 2024;69:106087. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2024.106087>. EDN: AMGIDH.
5. Stennikov V., Voropai N., Barakhtenko E., Sokolov D. Digitalization of integrated energy systems. *Energy Safety and Energy Economy*. 2020;4:5-10. (In Russ.). <https://doi.org/10.18635/2071-2219-2020-4-5-10>. EDN: LTFMAZ.
6. Voropai N.I., Stennikov V.A. Integrated smart energy systems. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Energetics*. 2014;1:64-73. (In Russ.). EDN: SBKQDB.
7. Chatterjee S., Mariani M., Wamba S.F. Prosumers' intention to co-create business value and the moderating role of digital media usage. *Journal of Business Research*. 2023;163(1):113920. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2023.113920>.
8. Yang Ch., Liu J., Liao H., Liang G., Zhao Ju. An improved carbon emission flow method for the power grid with prosumers. *Energy Reports*. 2023;9:114-121. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.11.165>. EDN: GRVPVM.
9. Tushar W., Saha T.K., Yuen Chau, Morstyn T., McCulloch M.D., Poor H.V., et al. A motivational game-theoretic approach for peer-to-peer energy trading in the smart grid. *Applied Energy*. 2019;243(10):1-19. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.111>.
10. Ahmadi S.E., Sadeghi D., Marzband M., Abusorrah A., Sedraoui Kh. Decentralized bi-level stochastic optimization approach for multi-agent multi-energy networked micro-grids with multi-energy storage technologies. *Energy*. 2022;245:123223. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123223>. EDN: CIWNUG.
11. Fisher K., Muller J.P., Heimig I., Scheer A.-W. Intelligent agents in virtual enterprises. In: *The Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agent Technology: Proceedings of the First International Conference*. London: UK; 1996, p. 205-224.
12. Yazdani H., Baneshi M., Yaghoubi M. Techno-economic and environmental design of hybrid energy systems using multi-objective optimization and multi-criteria decision making methods. *Energy Conversion and Management*. 2023;282:116873. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116873>. EDN: GFQHVK.
13. Aizenberg N., Barakhtenko E., Mayorov G. Cooperative behavior of prosumers in integrated energy systems. *Mathematics*. 2024;12(24):4005. <https://doi.org/10.3390/math12244005>. EDN: CZQAGJ.
14. Wooldridge M., Jennings N. Intelligent agents: theory and practice. *The Knowledge Engineering Review*. 1995;10(2):115-152.
15. Barakhtenko E.A., Aizenberg N.I., Mayorov G.S. Modeling the behavior of prosumers in cooperation using agent technologies. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Energetics*. 2025;4:28-44. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0002331025040038>. EDN: LHFEJF.
16. Barakhtenko E.A., Aizenberg N.I., Mayorov G.S. Model of interaction of prosumers in an integrated energy system in cooperation. *Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2025;25(4):5-13. (In Russ.). <https://doi.org/10.14529/power250401>. EDN: IFLNZX.
17. Prete C.L., Hobbs B.F. A cooperative game theoretic analysis of incentives for microgrids in regulated electricity markets. *Applied Energy*. 2016;169:524-541. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.099>.
18. Moulin H. *Cooperative microeconomics: a game-theoretical introduction*. London: Princeton University Press; 1995, 254 p.
19. Peleg B., Sudhölter P. *Introduction to the theory of cooperative games*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2007. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-72945-7>.
20. Smirnova N.V., Tarashnina S.I. Properties of solutions of cooperative games with transferable utilities. *Russian Mathematics*. 2016;60(6):63-74. <https://doi.org/10.3103/S1066369X16060086>. EDN: WWIUQB.
21. Pankratova Ya., Tarashnina S. On some excess-based solution concepts of a cooperative game of pursuit. In: *Stability and Control Processes: International Conference in Memory of V.I. Zubov*. 5-9 October 2015, Saint-Petersburg. Saint-Petersburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 2015, p. 252-255. <https://doi.org/10.1109/SCP.2015.7342118>. EDN: UYRATT.
22. Schmeidler D. The nucleolus of a characteristic function game. *SIAM Journal on Applied Mathematics*. 1969;17(6):1163-1170. <https://doi.org/10.1137/0117107>.
23. Sudhölter P. The modified nucleolus: properties and axiomatizations. *International Journal of Game Theory*. 1997;26(2):147-182. <https://doi.org/10.1007/BF01295846>. EDN: CDUGZV.
24. Shapley L.S. A value for n-person games. In: *Contributions to the Theory of Games. Annals of Mathematics*. Santa Monica: RAND Corporation; 1953, chapter 2, iss. 28, p. 307-317.
25. Branzei R., Dimitrov D., Tijs S. *Models in cooperative game theory*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2008, 556 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-77954-4>.

26. Wang Yu., Zhang M., Ao J., Wang Zh., Dong H., Zeng M. Profit allocation strategy of virtual power plant based on multi-objective optimization in electricity market. *Sustainability*. 2022;14(10):6229. <https://doi.org/10.3390/su14106229>. EDN: RWCNMI.
27. Stennikov V., Barakhtenko E., Mayorov G., Sokolov D., Zhou B. Coordinated management of centralized and distributed generation in an integrated energy system using a multi-agent approach. *Applied Energy*. 2022;309:118487. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118487>. EDN: XLPQQM.
28. Stennikov V., Barakhtenko E., Mayorov G. An approach to energy distribution between sources in a hierarchical integrated energy system using multi-agent technologies. *Energy Reports*. 2023;9:856-865. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.11.117>. EDN: UKTMDG.

Список источников

1. Маркова В.М., Чурашев В.Н. Децентрализация энергетики: интеграция и инновации // ЭКО. 2020. № 4. С. 8–27. <https://doi.org/10.30680/ECO0131-7652-2020-4-8-27>.
2. Di Silvestre M.L., Favuzza S., Sanseverino E.R., Zizzo G. How decarbonization, digitalization and decentralization are changing key power infrastructures // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 93. P. 483–498. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.068>.
3. Sheraz M., Sinha A., Qin Quande, Mumtaz M.Z. The asymmetric nexus between energy transition and its drivers: new evidence from China // *Energy*. 2024. Vol. 310. P. 133236. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133236>.
4. Wang Yu., He Z., Zou J., Xie H., Bao Ju. Energy transition for sustainable economy: what is the role of government governance and public concern? // *Finance Research Letters*. 2024. Vol. 69. P. 106087. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2024.106087>. EDN: AMGIDH.
5. Стенников В.А., Воропай Н.И., Барахтенко Е.А., Соколов Д.В. Цифровизация интегрированных энергетических систем // Энергобезопасность и энергосбережение. 2020. № 4. С. 5–10. <https://doi.org/10.18635/2071-2219-2020-4-5-10>. EDN: LTFMAZ.
6. Воропай Н.И., Стенников В.А. Интегрированные интеллектуальные энергетические системы // Известия Российской Академии наук. Энергетика. 2014. № 1. С. 64–73. EDN: SBKDQB.
7. Chatterjee S., Mariani M., Wamba S.F. Prosumers' intention to co-create business value and the moderating role of digital media usage // *Journal of Business Research*. 2023. Vol. 163. Iss. 1. P. 113920. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2023.113920>.
8. Yang Ch., Liu J., Liao H., Liang G., Zhao Ju. An improved carbon emission flow method for the power grid with prosumers. *Energy Reports*. 2023. Vol. 9. P. 114–121. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.11.165>. EDN: GRVPVM.
9. Tushar W., Saha T.K., Yuen Chau, Morstyn T., McCulloch M.D., Poor H.V., et al. A motivational game-theoretic approach for peer-to-peer energy trading in the smart grid // *Applied energy*. 2019. Vol. 243. Iss. 10. P. 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.111>.
10. Ahmadi S.E., Sadeghi D., Marzband M., Abusorrah A., Sedraoui Kh. Decentralized bi-level stochastic optimization approach for multi-agent multi-energy networked micro-grids with multi-energy storage technologies // *Energy*. 2022. Vol. 245. P. 123223. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123223>. EDN: CIWNUG.
11. Fisher K., Muller J.P., Heimig I., Scheer A.-W. Intelligent agents in virtual enterprises // *The Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agent Technology: Proceedings of the First International Conference*. London: UK, 1996. P. 205–224.
12. Yazdani H., Baneshi M., Yaghoubi M. Techno-economic and environmental design of hybrid energy systems using multi-objective optimization and multi-criteria decision making methods // *Energy Conversion and Management*. 2023. Vol. 282. P. 116873. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116873>. EDN: GFQHVK.
13. Aizenberg N., Barakhtenko E., Mayorov G. Cooperative behavior of prosumers in integrated energy systems // *Mathematics*. 2024. Vol. 12. Iss. 24. P. 4005. <https://doi.org/10.3390/math12244005>. EDN: CZQAGJ.
14. Wooldridge M., Jennings N. Intelligent agents: theory and practice // *The Knowledge Engineering Review*. 1995. Vol. 10. Iss. 2. P. 115–152.
15. Барахтенко Е.А., Айзенберг Н.И., Майоров Г.С. Моделирование поведения активных потребителей при кооперации с использованием мультиагентного подхода // Известия Российской Академии наук. Энергетика. 2025. № 4. С. 28–44. <https://doi.org/10.31857/S0002331025040038>. EDN: LHFEJF.
16. Барахтенко Е.А., Айзенберг Н.И., Майоров Г.С. Модель взаимодействия активных потребителей в интегрированной энергетической системе при кооперации // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2025. Т. 25. № 4. С. 5–13. <https://doi.org/10.14529/power250401>. EDN: IFLNZX.
17. Prete C.L., Hobbs B.F. A cooperative game theoretic analysis of incentives for microgrids in regulated electricity markets // *Applied Energy*. 2016. Vol. 169. P. 524–541. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.099>.
18. Moulin H. Cooperative microeconomics: a game-theoretical introduction. London: Princeton University Press, 1995. 254 p.
19. Peleg B., Sudhölter P. Introduction to the theory of cooperative games. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-72945-7>.

20. Smirnova N.V., Tarashnina S.I. Properties of solutions of cooperative games with transferable utilities // Russian Mathematics. 2016. Vol. 60. Iss. 6. P. 63–74. <https://doi.org/10.3103/S1066369X16060086>. EDN: WWIUQB.
21. Pankratova Ya., Tarashnina S. On some excess-based solution concepts of a cooperative game of pursuit // Stability and Control Processes: International Conference in Memory of V.I. Zubov. 5-9 October 2015, Saint-Petersburg. Saint-Petersburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 2015, p. 252–255. <https://doi.org/10.1109/SCP.2015.7342118>. EDN: UYRATT.
22. Schmeidler D. The nucleolus of a characteristic function game // SIAM Journal on Applied Mathematics. 1969. Vol. 17. Iss. 6. P. 1163–1170. <https://doi.org/10.1137/01171107>.
23. Sudhölter P. The modified nucleolus: properties and axiomatizations // International Journal of Game Theory. 1997. Vol. 26. Iss. 2. P. 147–182. <https://doi.org/10.1007/BF01295846>. EDN: CDUGZV.
24. Shapley L.S. A value for n-person games // Contributions to the Theory of Games. Annals of Mathematics. Santa Monica: RAND Corporation, 1953. Chapter 2. Iss. 28. P. 307–317.
25. Branzei R., Dimitrov D., Tijs S. Models in cooperative game theory. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008. 556 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-77954-4>.
26. Wang Yu., Zhang M., Ao J., Wang Zh., Dong H., Zeng M. Profit allocation strategy of virtual power plant based on multi-objective optimization in electricity market // Sustainability. 2022. Vol. 14. Iss. 10. P. 6229. <https://doi.org/10.3390/su14106229>. EDN: RWCNMI.
27. Stennikov V., Barakhtenko E., Mayorov G., Sokolov D., Zhou B. Coordinated management of centralized and distributed generation in an integrated energy system using a multi-agent approach // Applied Energy. 2022. Vol. 309. P. 118487. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118487>. EDN: XLPQQM.
28. Stennikov V., Barakhtenko E., Mayorov G. An approach to energy distribution between sources in a hierarchical integrated energy system using multi-agent technologies // Energy Reports. 2023. Vol. 9. P. 856–865. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.11.117>. EDN: UKTMDG.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Natalia I. Aizenberg,

Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor,
Head of the Laboratory of Electric Power
Market Problems,
Melentiev Energy Systems Institute, Siberian
Branch of the Russian Academy of Sciences,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033,
Russian Federation
✉ zen@isem.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1095-0803>

Evgeny A. Barakhtenko,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Scientific Secretary,
Melentiev Energy Systems Institute, Siberian
Branch of the Russian Academy of Sciences,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033,
Russian Federation
barakhtenko@isem.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6934-0025>

Gleb S. Mayorov,

Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher,
Laboratory of Heat Supply Systems,
Melentiev Energy Systems Institute, Siberian
Branch of the Russian Academy of Sciences,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033,
Russian Federation
mayorovgs@isem.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7405-1965>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Айзенберг Наталья Ильинична,

кандидат экономических наук, доцент,
заведующий лабораторией проблем
электроэнергетических рынков,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, Российская Федерация, г. Иркутск,
ул. Лермонтова, 130
✉ zen@isem.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1095-0803>

Баракhtenko Евгений Алексеевич,

кандидат технических наук, доцент,
ученый секретарь,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, Российская Федерация, г. Иркутск,
ул. Лермонтова, 130
barakhtenko@isem.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6934-0025>

Майоров Глеб Сергеевич,

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
лаборатория систем теплоснабжения,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, Российская Федерация, г. Иркутск,
ул. Лермонтова, 130
mayorovgs@isem.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7405-1965>

Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи..

Information about the article

The article was submitted 23.02.2026; approved after reviewing 13.04.2026; accepted for publication 20.04.2026.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 23.02.2026 г.; одобрена после рецензирования 13.04.2026 г.; принята к публикации 20.04.2026 г.

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 621.316:621.311.1

EDN: OCWIOD

DOI: 10.21285/1814-3520-2026-3-466-480



Управление электропотреблением зарядных станций электромобилей как альтернатива реконструкции распределительных сетей

В.А. Воронин^{1✉}, Д.О. Замарин²¹Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, Кузбасс, Российская Федерация²Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Российская Федерация²ПАО «Россети Урал», Екатеринбург, Российская Федерация

Резюме. Целью настоящей работы является исследование эффективности различных методов управления электропотреблением домашних зарядных станций электромобилей для снижения максимумов мощности и сокращения объемов реконструкции распределительной сети при технологическом присоединении электрозарядной инфраструктуры. Исследование выполнено на примере распределительной сети 10 кВ, питающей более шести тыс. абонентов. Максимальные электрические нагрузки определены с помощью имитационного моделирования с учетом особенностей зарядного поведения владельцев электротранспорта, параметров зарядных станций и суточного профиля изменения нагрузки в распределительной сети. Для ограничения потребляемой мощности зарядных станций использованы метод отложенного заряда, а также одно- и двухуровневая система прямого управления электропотреблением. Для каждого метода управления электропотреблением выполнено моделирование профилей нагрузки зарядных станций электромобилей и распределительной сети. Показано, что широкое распространение электромобилей приводит к заметному росту (на 44 %) пиковой нагрузки в распределительной сети низкого и среднего напряжения, что создает риск перегрузки электросетевого оборудования и требует существенных инвестиций в реконструкцию и усиления электрической сети (порядка 70 млн руб.). Рассмотренные методы управления электропотреблением позволили снизить максимум мощности в распределительной сети на 13 % и обеспечить экономический эффект за счет снижения затрат на реконструкцию на сумму до 66,94 млн руб. Показано, что средний недозаряд электромобилей при использовании одно- и двухуровневой системы прямого управления электропотреблением составил всего 0,93–1,55 %. Таким образом, управление электропотреблением зарядных станций электромобилей позволяет значительно сократить затраты на усиление распределительной сети при незначительном влиянии на качество заряда электромобилей.

Ключевые слова: электромобили, электрозарядные станции, управление электропотреблением, электрический режим, имитационное моделирование

Для цитирования: Воронин В.А., Замарин Д.О. Управление электропотреблением зарядных станций электромобилей как альтернатива реконструкции распределительных сетей // iPolytech Journal. 2026. Т. 30. № 3. С. 466–480. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2026-3-466-480>. EDN: OCWIOD.

POWER ENGINEERING

Original article

Electric demand management for electric vehicle charging stations as an alternative to distribution network reinforcement

Vyacheslav A. Voronin^{1✉}, Dmitry O. Zamarin²¹T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kuzbass, Russian Federation²Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russian Federation²PJSC "Rosseti Ural", Yekaterinburg, Russian Federation

Abstract. This study aims to evaluate the effectiveness of various demand management methods for residential charging stations in reducing peak demand and the extent of distribution network reinforcement needed to accommodate electric vehicle charging infrastructure. The analysis is performed for a 10-kV distribution network supplying more than 6,000 customers. Maximum electrical loads were determined using simulations that account for the

charging behavior of electric vehicle owners, charging station parameters, and the daily load profile of the distribution network. To limit the power drawn by charging stations, a delayed charging strategy was applied, as well as single-level and two-level direct demand control schemes. For each demand management method, the resulting load profiles of both electric vehicle charging stations and the distribution network were modeled. The results show that widespread electric vehicle adoption leads to a substantial increase (44 %) in peak load in low- and medium-voltage distribution networks, posing a risk of equipment overload and necessitating significant investment in distribution network reinforcement (approximately 70 million RUB). The examined demand management methods reduced the network peak demand by 13 %, offering an economic benefit by lowering reinforcement costs by up to 66.94 million RUB. The average incomplete charging associated with the single- and two-level control schemes was only 0.93-1.55 %. Overall, demand management for electric vehicle charging stations can significantly reduce the cost of distribution network reinforcement while having only a minor impact on the charging quality of electric vehicles.

Keywords: electric vehicles, electric vehicle charging stations, power consumption management, electric mode, simulation modeling

For citation: Voronin V.A., Zamarin D.O. Electric demand management for electric vehicle charging stations as an alternative to distribution network reinforcement. *iPolytech Journal*. 2026;30(3):466-480. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2026-3-466-480>. EDN: OCWIOD.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно прогнозу информационно-аналитического агентства «Автостат» предполагалось, что к началу 2026 г. парк электромобилей и подключаемых гибридов России достигнет 175 тыс. штук³.

Порядка 59–64,3 % владельцев электромобилей имеют доступ к домашней электрозарядной станции (ЭЗС), а доля домашних зарядных сессий составляет 72 %⁴, что создает заметную дополнительную нагрузку на распределительные сети коммунально-бытовых потребителей.

Например, в работе [1] показано, что при увеличении количества потребителей с ЭЗС на 1 % максимум нагрузки силового трансформатора трансформаторной подстанции повышается в среднем на 0,33 %, а головного участка воздушной линии – на 0,83 %. В [2] на основании моделирования режимов работы распределительных сетей 0,4–10 кВ бытовых потребителей в Швеции установлено, что уже при доле абонентов с электромобилем в 25 % могут наблюдаться перегрузки и недопустимое снижение качества электроэнергии.

Усиление электросетевого комплекса для заряда растущего парка электротранспорта (ЭТ) может потребовать существенных ин-

вестиций. Например, по оценке, представленной в работе [3], к 2045 г. в Калифорнии необходима реконструкция 67 % фидеров, что потребует инвестиций в объеме от 6 до 20 млрд долл. (примерно 10–40 % от текущей стоимости существующей распределительной сети). В отчете ESIG⁵ необходимый объем инвестиций в усиление электросетевого комплекса США для присоединения электрозарядной инфраструктуры оценивается в 16–50 млрд долл. В работе [4] на примере Найроби показано, что в зависимости от уровня электрификации транспорта в течение пяти лет может потребоваться от 300 тыс. до 1,5 млн долл. на реконструкцию распределительных сетей. Таким образом, исключение перегрузки распределительных сетей при широком внедрении ЭТ только за счет реконструкции и нового сетевого строительства является весьма дорогостоящим решением.

В Германии с 1 января 2024 г. территориальной сетевой компании разрешено ограничивать электропотребление управляемой нагрузки (электроприемники мощностью более 4,2 кВт: домашние зарядные станции, тепловые насосы, кондиционеры, системы накопления электроэнергии) до 4,2 кВт для предотвращения перегрузок⁶. Данные меры

³Пост популярности гибридных автомобилей в России к 2025 году. Режим доступа: <https://avtozen.ru/rost-populyarnosti-gibridnyh-avtomobilej-v-rossii-k-2025-godu/> (дата обращения: 02.02.2026).

⁴Стало известно, где владельцы электромобилей их заряжают. Режим доступа: <https://www.autostat.ru/infographics/56483/> (дата обращения: 02.02.2026).

⁵ESIG's report. Charging Ahead. Grid planning for vehicle electrification. A Report of the Energy Systems Integration Group's Grid Planning for Vehicle Electrification Task Force. Режим доступа: <https://www.esig.energy/grid-planning-for-vehicle-electrification/> (дата обращения: 02.02.2026).

⁶Festlegungsverfahren zur Integration von steuerbaren Verbrauchseinrichtungen und steuerbaren Netzanschlüssen nach § 14 a Energiewirtschaftsgesetz. Режим доступа: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Beschlusskammern/BK06/BK6_83_Zug_Mess/841_SteuVE/BK6_SteuVE_node.html (дата обращения: 15.12.2025).

направлены на ускорение процесса технологического присоединения к электрической сети новых потребителей за счет отсрочки и сокращения объемов реконструкции и нового сетевого строительства благодаря предотвращению перегрузки электросетевого оборудования.

Во множестве работ [5–8] показано, что управление электропотреблением домашних ЭЗС может являться эффективным решением для ограничения максимумов нагрузки в распределительной сети. Однако в существующих работах не уделяется достаточного внимания сравнению предложенных мероприятий с традиционным решением – реконструкцией распределительной сети, что затрудняет анализ потенциала управления электропотреблением ЭЗС. В связи с этим целью настоящей работы является определение потенциального экономического эффекта от управления электропотреблением домашних ЭЗС на основе технико-экономического анализа развития распределительной сети пригорода г. Екатеринбург в условиях широкого распространения ЭТ.

Таким образом, более детальных исследований требуют следующие технико-экономические вопросы, рассмотренные в настоящей статье и составляющие ее научную новизну, а также практическую значимость:

1) анализ влияния мероприятий по управлению электропотреблением ЭЗС на

максимумы мощности распределительной сети и качество заряда электромобилей;

2) количественная оценка необходимых мероприятий по реконструкции распределительной сети для технологического присоединения электрозарядной инфраструктуры.

МЕТОДОЛОГИЯ

В настоящем исследовании расчеты выполняются для распределительной сети 10 кВ пригорода г. Екатеринбург (энергорайон) с горизонтом планирования перспективного развития сети до 2050 г. Исследуемый энергорайон включает в себя распределительные сети центров питания 110 кВ (ЦП): 11 отходящих присоединений 10 кВ; 534 трансформаторные подстанции 10/0,4 кВ (ТП); 6344 бытовых абонента. Основными потребителями рассматриваемого энергорайона являются коттеджные поселки.

Моделирование парка электротранспорта и электрозарядной инфраструктуры. Размер парка электромобилей и ЭЗС на территории исследуемого энергорайона определен на основании прогноза развития рынка электротранспорта в Свердловской области [9]. График изменения количества электромобилей и подключаемых гибридов (в абсолютных единицах и относительно количества домохозяйств региона) представлен на рис. 1. Общее количество домохозяйств принято по данным «Свердловскстат»⁷.

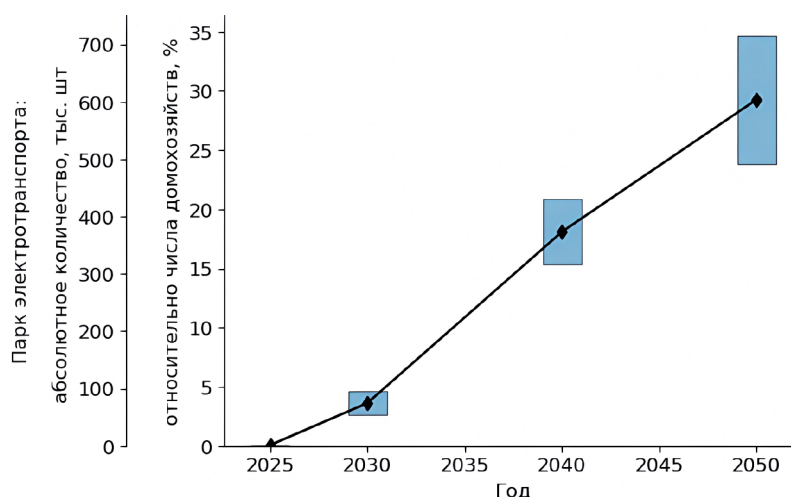


Рис. 1. Прогноз изменения количества электромобилей и подключаемых гибридов в Свердловской области до 2050 г.

Fig. 1. Forecast of the change in the number of electric vehicles and plug-in hybrids in the Sverdlovsk region until 2050

⁷Управление Федеральной службы государственной статистики по Свердловской области и Курганской области. Основные показатели социально-экономического положения муниципальных образований. Режим доступа: https://66.rosstat.gov.ru/main_indicators (дата обращения: 10.11.2025).

Согласно представленным данным (см. рис. 1), в 2030 г. 2,6–4,6 % домохозяйств будут иметь личный электромобиль, а к 2050 г. эта доля может вырасти до 23,8–34,7 %.

Распределение домашних ЭЗС по номинальной мощности принято на основании обзора литературы. Согласно отчету CEER⁸, большинство домашних ЭЗС во Франции имеет номинальную мощность менее 7,4 кВт. В работе [10] для моделирования влияния домашнего заряда электромобилей на электрические сети Нью-Йорка принято следующее распределение мощностей домашних ЭЗС: уровень 1 (3,7 кВт) – 20 %; уровень 2 (7,4 кВт) – 80 %. В аналогичной работе по анализу распределительных сетей западного Кентукки [11] было принято соотношение между домашними ЭЗС уровня 1 и 2 – 50/50. По результатам анализа зарядного поведения 7979 владельцев электромобилей в Калифорнии [12] установлено, что порядка 77 % домашних зарядных сессий выполняются на ЭЗС уровня 2. В [13] принято следующее процентное распределение пользователей домашних ЭЗС Норвегии по мощности: 46 % – менее 4 кВт; 38 % – от 4 до 8 кВт; 16 % – 8–11,5 кВт (однако следует отметить очень высокую долю изменчивости данного распределения по отдельным регионам Норвегии).

Для Российской Федерации подобные исследования не проводились. В связи с этим, на основании обобщения представленных данных, в настоящей работе принято следующее распределение номинальных мощностей домашних ЭЗС: 3,7 кВт – 30 %; 7,4 кВт – 70 %. Следует отметить, что номинальная мощность домашних ЭЗС в отдельных случаях может достигать 11 и 22 кВт, однако установка данного оборудования в частный дом в большинстве случаев потребует обращения в территориальную сетевую компанию для увеличения максимальной мощности ранее присоединенных энергопринимающих устройств, что может существенно увеличить расходы на приобретение и установку данных ЭЗС. В связи с

этим сделано допущение о незначительном количестве частных домов с мощностью домашней ЭЗС более 7,4 кВт.

Характер поведения владельцев ЭТ принят на основании анализа литературы. Так, в работе [14] выполнен статистический анализ 265 тыс. зарядных сессий 576 домовладений с зарядными станциями в США с 2019 по 2022 г. В результате анализа установлено, что частота постановки ЭТ на заряд растет, начиная с 6-7 ч утра, и достигает максимума в 17 ч. Средняя продолжительность заряда составляет порядка 8,8 ч, однако, гистограмма частот продолжительности заряда имеет сложный характер с двумя максимумами: в районе 1-2 ч и 11–15 ч. Домашний заряд характеризуется большой длительностью холостого простоя ЭТ: в среднем порядка 8,7 ч.

В [13] выполнено аналогичное исследование на примере 35 тыс. зарядных сессий 267 домовладений в Норвегии с 2018 по 2020 г. По результатам статистического анализа установлено, что чаще всего заряд ЭТ начинается вечером в 16-17 ч, а завершается утром – в 7-8 ч. Продолжительность заряда в среднем составляет 12,7 ч.

Работа [15] также посвящена анализу использования домашних ЭЗС в Норвегии на примере 179 тыс. зарядных сессий. Авторы получили аналогичные выводы: наиболее частое время постановки ЭТ на заряд – 17:06, а снятие ЭТ с заряда – 8:54. Средняя продолжительность заряда составляет 16,7 ч.

На основании анализа и обобщения открытых данных об использовании ЭЗС в жилых районах, представленных в работах [13–16], приняты следующие распределения вероятностей постановки ЭТ на заряд в течение суток, длительности заряда и начального уровня заряда батарей ЭТ, приведенные на рис. 2. Для определения количества зарядных сессий в сутки использовано распределение Пуассона со средним значением 0,614 о.е. (относительных единиц) по данным информационно-аналитического агентства «Автостат»⁹.

Моделирование суточных профилей электропотребления ЭЗС выполнено с помощью

⁸CEER Report on Electric Vehicles: Network Management and Consumer Protection. Ref. C23-DS-CRM-161-03. CEER, 2023. Режим доступа: <https://www.ceer.eu/wp-content/uploads/2023/08/EV-Report.pdf> (дата обращения: 10.11.2025).

⁹Как часто владельцы электромобилей заряжают их дома? Режим доступа: <https://www.autostat.ru/infographics/59635/> (дата обращения: 02.02.2026).

имитационной модели, подробное описание которой представлено в работе [17], с использованием распределений вероятности, приведенных на рис. 2.

Управление электропотреблением зарядных станций. Расчетная электрическая нагрузка на шинах ТП определяется по выражению (1):

$$P_p = K_{\text{совм}} (P_{\text{max,быт}} + \sum_{i=1}^N K_{c,i} n_i P_{\text{ЭЭС},i}), \quad (1)$$

где $K_{\text{совм}}$ – коэффициент совмещенного максимума нагрузки; $P_{\text{max,быт}}$ – максимальное потребление мощности коммунально-бытовой нагрузкой (фактическая нагрузка ТП без учета ЭЭС), кВт; $K_{c,i}$ – коэффициент спроса ЭЭС i -й группы; N – количество групп ЭЭС; n_i – количество ЭЭС в i -й

группе, шт.; $P_{\text{ЭЭС},i}$ – номинальная мощность ЭЭС в i -й группе, кВт.

Значения коэффициентов спроса K_c для определения расчетной мощности ЭЭС по выражению (1) приняты на основании подхода, описанного в работе [17]. Коэффициент совмещенного максимума нагрузки электротранспорта и коммунально-бытовой нагрузки потребителей $K_{\text{совм}}$ близок к единице, что соответствует практически полному совпадению максимумов коммунально-бытовой нагрузки и ЭЭС (в случае неуправляемого заряда электромобилей).

При моделировании электрических нагрузок рассматриваемого энергорайона для каждой ТП принят усредненный суточный профиль электропотребления, представленный на рис. 3.

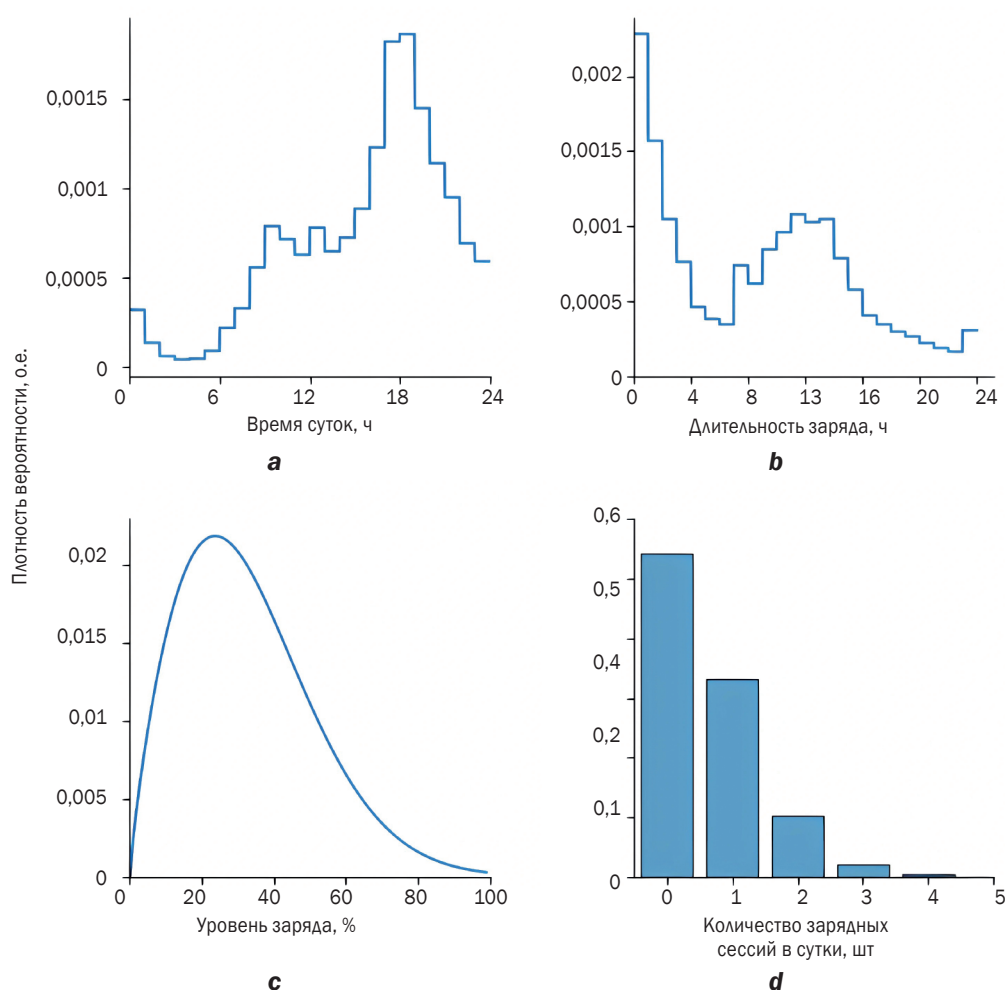


Рис. 2. Параметры поведения владельцев электротранспорта. Распределения вероятностей: а – постановки электротранспорта на заряд в течение суток; б – продолжительности заряда; с – начального уровня заряда батареи; d – количества зарядных сессий в сутки

Fig. 2. Behavior parameters of electric vehicle owners. Probability distributions: а – electric vehicle plug-ins for charging per day; б – charging duration; с – initial battery charge level; d – number of charging sessions per day

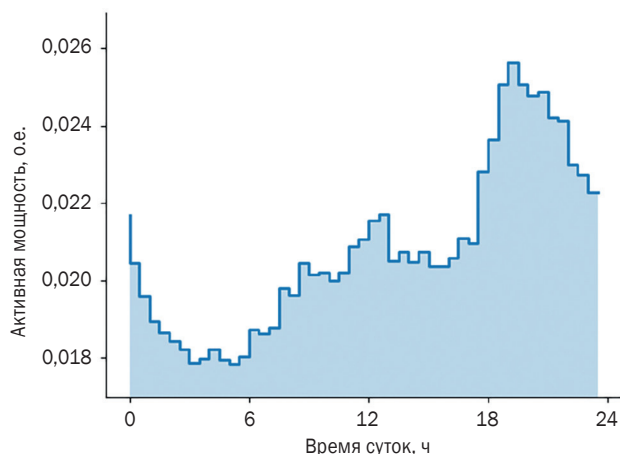


Рис. 3. Усредненный суточный профиль электропотребления коммунально-бытовой нагрузки

Fig. 3. Average daily load profile for residential consumers

В работе рассмотрены следующие методы управления электропотреблением ЭЗС:

1. Отложенный заряд – предусматривает введение случайной выдержки времени начала заряда после присоединения ЭТ к ЭЗС. Случайное смещение времени начала заряда позволяет сдвинуть максимум нагрузки ЭЗС во времени (снижение коэффициента совмещенного максимума нагрузки $K_{совм}$) и выровнять график нагрузки ЭЗС (снижение коэффициента спроса K_c).

При моделировании суточных профилей электропотребления ЭЗС величина выдержки времени для каждой зарядной сессии определялась случайным образом с использованием равномерного распределения с границами от 0 до T_{max} .

2. Прямое управление электропотреблением ЭЗС предусматривает ограничение потребляемой мощности группы ЭЗС при риске возникновения перегрузки трансформаторной подстанции. Объем ограничений потребляемой мощности группы ЭЗС в каждый момент времени определяется по выражению (2):

$$P_{орп,t} = P_t - P_{доп}, \quad (2)$$

где $P_{доп}$ – длительная допустимая нагрузка силового трансформатора ТП, кВт; P_t – суммарное электропотребление ТП в момент времени t , кВт. Если $P_{орп,t} > 0$, то вводятся ограничения на потребление мощности ЭЗС в объеме $P_{орп,t}$. Если $P_{орп,t} \leq 0$, то ЭЗС работают без ограничений. Топология распределительной сети 0,4 кВ не учитывается, а расчетный объем

ограничений распределяется между всеми ЭЗС, присоединенными к перегруженной ТП, равномерно. Таким образом, данная система управления предназначена для исключения перегрузок силовых трансформаторов ТП.

Архитектура рассматриваемой системы управления электропотреблением (СУЭ) приведена на рис. 4 а.

3. Двухуровневая система прямого управления электропотреблением ЭЗС предусматривает ввод ограничений зарядной мощности ЭЗС как при риске возникновения перегрузки силового трансформатора ТП, так и вышестоящей распределительной сети 10 кВ.

Первый уровень данной системы управления электропотреблением работает в соответствии с алгоритмом, описанным выше. Второй уровень системы контролирует загрузку линий электропередачи вышестоящей распределительной сети 10 кВ на основании измерений и/или цифровой модели распределительной сети. При риске перегрузки линий электропередачи 10 кВ контроллер второго уровня формирует дополнительный объем ограничений мощности ЭЗС и распределяет его между контроллерами первого уровня (рис. 4 б). Таким образом, контроллер второго уровня учитывает топологию распределительной сети 10 кВ и формирует дополнительные ограничения мощности только для части ТП, разгрузка которых позволит исключить перегрузку участков сети 10 кВ.

В качестве критериев эффективности рассмотренных методов управления электропотреблением ЭЗС приняты снижения максимума мощности исследуемой распределительной сети, объемов реконструкции и средний недозаряд ЭТ. Под недозарядом ЭТ понимается средняя разность уровня заряда батарей ЭТ на момент снятия ЭТ с заряда в условиях отсутствия и наличия управляющих воздействий со стороны систем управления электропотреблением.

Порядок выполнения технико-экономического анализа. При проведении расчетов оценки влияния электрозарядной инфраструктуры на перспективную загрузку центров питания 35–110 кВ, питающих рассматриваемый энергорайон, и трансформаторных подстанций 10 кВ и на линии электропередачи 10 кВ (ЛЭП) приняты следующие допущения:

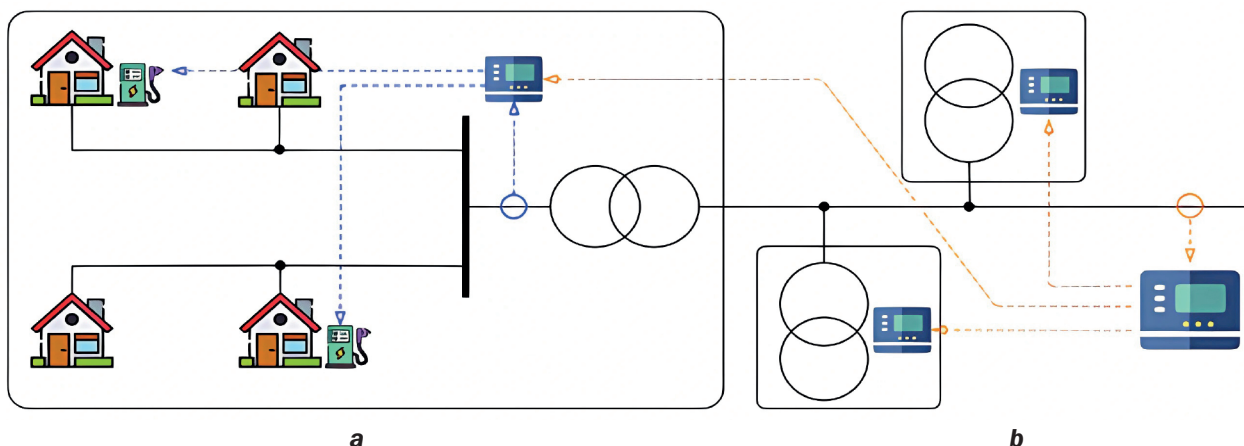


Рис. 4. Архитектура двухуровневой системы управления электропотреблением: а – управление электропотреблением в пределах трансформаторной подстанции; б – управление электропотреблением в пределах фидера

Fig. 4. Architecture of a two-level power consumption management system: a – power consumption management within a transformer substation; b – power consumption management within a feeder

1) величина текущей загрузки и резерв мощности для технологического присоединения новых электропотребителей для ЦП принята в соответствии с ежеквартальной отчетностью ПАО «Россети Урал»¹⁰;

2) величина текущей загрузки и резерв мощности для технологического присоединения новых электропотребителей для ТП принята в соответствии с ежеквартальной отчетностью ПАО «Россети Урал»;

3) фоновый рост нагрузки на 2025–2050 гг. учитывался в соответствии со схемой и программой развития электроэнергетических систем России¹¹;

4) текущая и перспективная нагрузка для ЦП, ТП и ЛЭП рассчитывалась для режима N-1 отключением ЛЭП 10 кВ;

5) необходимость реконструкции ТП определялась по критерию превышения 105 % номинальной мощности трансформатора;

6) ЛЭП 10 кВ определялась по критерию превышения длительно допустимого тока на-

грузки при температуре наружного воздуха -8°C ;

7) ЛЭП 0,4 кВ определялась на основании показателей перегрузки ТП 10 кВ (согласно п. 5). В связи с отсутствием сведений о топологии распределительных сетей 0,4 кВ принято допущение, что сеть 0,4 кВ заменялась целиком в соответствии с номинальным током реконструируемого силового трансформатора 10/0,4 кВ.

Расчет объема необходимых капитальных вложений для реализации рассматриваемых сценариев развития распределительной сети определялся на основании действующей нормативно-технической документации, используемой для задач перспективного развития сети¹². Для определения величины капитальных затрат в ценах 4 квартала 2025 г. применены индекс-дефляторы инвестиций в основной капитал, указанные в базовом варианте прогноза социально-экономического развития Российской Федерации¹³.

¹⁰Сведения о пропускной способности сети ПАО «Россети Урал». Режим доступа: <https://rosseti-ural.ru/disclosure/monopoly/characteristic/bandwidth/> (дата обращения: 06.01.2026).

¹¹Схемы и программы развития электроэнергетических систем России // АО «Системный оператор Единой энергетической системы». Режим доступа: <https://www.so-ops.ru/future-planning/sipr-ees/> (дата обращения: 06.01.2026).

¹² Об утверждении укрупненных нормативов цены типовых технологических решений капитального строительства объектов электроэнергетики в части объектов электросетевого хозяйства: Приказ Министерства энергетики Российской Федерации № 131 от 26 февраля 2024.

¹³Об утверждении форм раскрытия сетевой организацией информации об инвестиционной программе (о проекте инвестиционной программы и (или) проекте изменений, вносимых в инвестиционную программу) и обосновывающих ее материалах, указанной в абзацах втором - четвертом, шестом, восьмом и десятом подпункта «ж» пункта 11 стандартов раскрытия информации субъектами оптового и розничных рынков электрической энергии, утвержденных постановлением правительства Российской Федерации от 21 января 2004 г. № 24, правил заполнения указанных форм и требований к форматам раскрытия сетевой организацией электронных документов, содержащих информацию об инвестиционной программе (о проекте инвестиционной программы и (или) проекте изменений, вносимых в инвестиционную программу) и обосновывающих ее материалах: Приказ Минэнерго РФ № 380 от 5 мая 2016 (зарегистрирован в Минюсте РФ № 42482 от 09.06.2016).

Расчет и анализ установившихся режимов исследуемого энергорайона выполнен в программно-вычислительном комплексе RastrWin для условий зимнего максимума нагрузки.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 5 представлена диаграмма затрат на усиление распределительной сети исследуемого энергорайона при доле домохозяйств с электромобилем в 30 %, что соответствует прогнозируемому уровню развития рынка электротранспорта Российской Федерации на 2050 г. (см. рис. 1).

При доле домохозяйств с электромобилем в 30 % максимум нагрузки распределительной сети увеличивается на 44 %, что

требует порядка 70,17 млн руб. для усиления распределительной сети. Большая часть затрат приходится на реконструкцию низковольтных сетей 0,4 кВ – 61 %, затраты на увеличение мощности ТП 10/0,4 кВ составляют 29 %, а замена линий электропередачи 10 кВ – 10 %.

Результаты моделирования электрических режимов исследуемого энергорайона при управлении электропотреблением ЭЗС представлены в таблице и на рис. 6. Отложенный заряд рассмотрен в трех вариантах с разной максимальной выдержкой времени начала заряда: 30, 235 и 410 мин.

Важно отметить, что указанные объемы ограничений электропотребления и недозаряда ЭЗС относятся к наиболее неблагоприятным

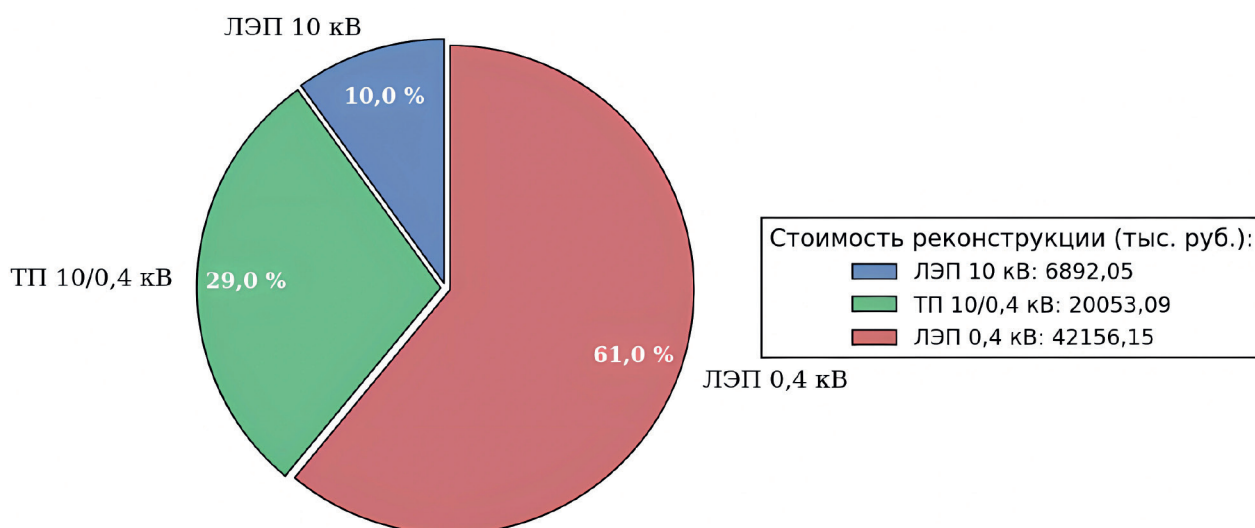


Рис. 5. Диаграмма затрат на усиление распределительной сети
Fig. 5. Cost diagram for distribution network reinforcement

Результаты технико-экономического анализа
 Results of the technical and economic analysis

Параметр	Неуправляемый заряд	Отложенный заряд			Одноуровневая СУЭ	Двухуровневая СУЭ
		30	235	410		
Максимум нагрузки, МВт	20,28	19,99	18,80	17,63	19,61	18,98
Среднее ограничение мощности на одну ЭЗС, кВт	0	0	0	0	1,18	2,77
Средний недозаряд ЭТ, %	0	0,49	5,00	10,00	0,93 (0,16)*	4,56 (1,55)*
Затраты на усиление сети, млн руб.	70,17	51,58	31,91	22,30	6,69	3,23
Экономический эффект, млн руб.	–	18,59	38,26	47,86	63,48	66,94

Примечание: * указаны средний недозаряд подгруппы ЭТ, участвующих в управлении электропотреблением, и для всего парка ЭТ (в скобках).

ятному режиму работы распределительной сети: зимний максимум нагрузки и послеаварийная схема. С учетом сезонной изменчивости электропотребления, а также при нормальной схеме распределительной сети необходимость ввода ограничений электропотребления будет отсутствовать большую часть времени.

Отложенный заряд позволяет добиться существенного снижения максимума потребляемой мощности до 13 % (рис. 6 а), однако оказывает значительное влияние на качество заряда ЭТ, приводя к среднему уровню недозаряда до 10 % (рис. 6 б). Экспериментальным путем было установлено,

что значениям среднего недозаряда ЭТ в 5 и 10 % соответствуют максимальные выдержки времени начала заряда 235 и 410 мин соответственно.

Системы прямого управления электропотреблением ЭЗС имеют важное преимущество в избирательности действия: ограничения вводятся только при риске возникновения перегрузки электросетевого оборудования и только для тех ЭЗС, работа которых влияет на перегруженные участки сети, что позволяет минимизировать средний уровень недозаряда электромобилей до 1,55 % в целом по всем абонентам и до 4,56 % только для ЭЗС, участвующих в

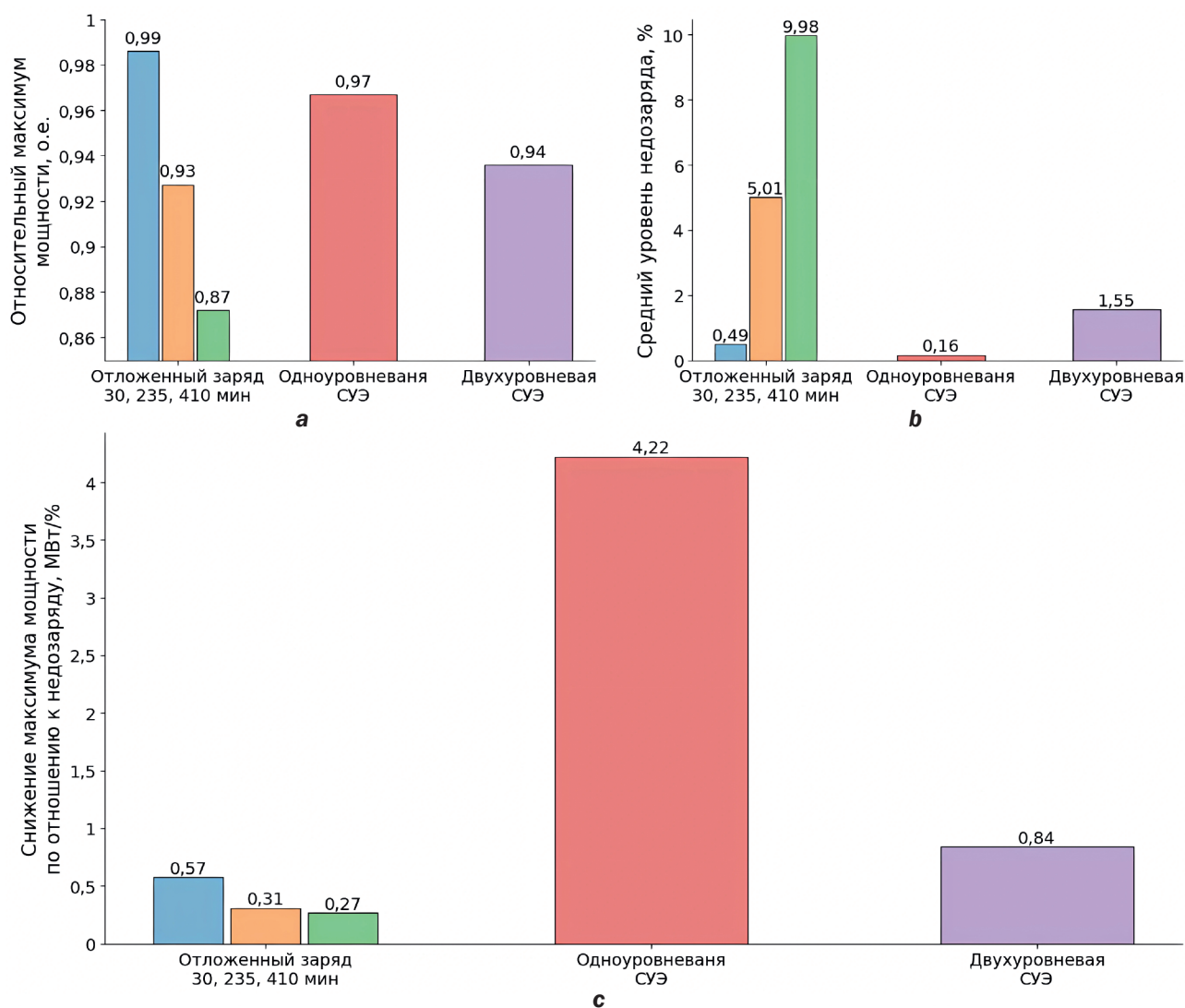


Рис. 6. Основные показатели рассматриваемых систем управления электропотреблением электростанции: а – относительный максимум нагрузки распределительной сети; б – средний недозаряд электромобилей; в – снижение максимума мощности по отношению к среднему недозаряду

Fig. 6. Key performance indicators of the considered management systems of electric charging station power consumption: а – relative peak load of the distribution network; б – average undercharging of electric vehicles; в – peak power reduction relative to the average undercharging

управлении электропотреблением (см. таблицу).

Следует отметить, что по отдельным ЭЗС наблюдается вариация значений недозаряда электромобилей относительно указанных средних значений. Максимальное значение недозаряда для отдельных ЭЗС может достигать 3,85 и 21,75 % для одноуровневой и двухуровневой СУЭ соответственно. Однако существенно меньшие усредненные значения свидетельствуют о редкости возникновения столь продолжительных ограничений. Снижение максимального уровня недозаряда может быть достигнуто за счет использования алгоритмов распределения ограничений потребления мощности между ЭЗС, учитывающих начальный уровень заряда батарей электромобилей, а также дополнительные параметры (например, планируемое время окончания заряда). Разработка подобных алгоритмов является предметом отдельного исследования и не рассмотрена в настоящей работе.

Наиболее эффективным мероприятием по соотношению снижения максимума мощности распределительной сети к среднему уровню недозаряда ЭТ является одноуровневая СУЭ, обеспечивающая среднюю разгрузку в 4,22 МВт на 1 % недозаряда ЭТ. Двухуровневая СУЭ и отложенный заряд показали значительно меньшую эффективность (рис. 6 с).

Наибольший экономический эффект показали СУЭ: одноуровневая СУЭ полностью исключает затраты на реконструкцию ТП и низковольтных сетей, а двухуровневая СУЭ дополнительно снижает затраты на реконструкцию сети 10 кВ (см. таблицу), что обеспечивает снижение затрат на усиление распределительной сети до 66,94 млн руб.

Следует отметить, что полученные результаты чувствительны к номинальной мощности ЭЗС владельцев электромобилей. Так, вариация максимума нагрузки исследуемой распределительной сети при изменении номинальной мощности ЭЗС от 3,7 до 11 кВт составит порядка 28,76 %. Поэтому для повышения точности моделирования необходимо проведение системных исследований потребительских предпочтений на нацио-

нальном уровне для формирования репрезентативного портрета владельца электромобиля, включая его предпочтения по мощности зарядных станций.

Также стоит отметить, что учет топологии распределительных сетей 0,4 кВ при определении объемов реконструкции может дополнительно повысить точность полученных результатов.

Таким образом, результаты моделирования показали, что управление электропотреблением ЭЗС позволяет практически полностью исключить необходимость в усилении распределительной сети (снижение затрат до 95 %) при незначительном влиянии на качество заряда электромобилей (средний уровень недозаряда менее 5 %).

ОБСУЖДЕНИЕ

Рассматриваемые в настоящей работе системы управления электропотреблением уже находят практическое применение в разных странах мира. Например, в Великобритании, согласно постановлению «The Electric Vehicles (Smart Charge Points) Regulations 2021»¹⁴, ЭЗС должны иметь возможность запуска начала заряда со случайной выдержкой времени до 30 мин с возможностью дистанционного изменения выдержки времени. В Германии, согласно п. 14 а «The Energy Industry Act (EnWG)»¹⁵, территориальной сетевой компании разрешено прямое ограничение электропотребления электроприемников мощностью более 4,2 кВт (в т.ч. домашних ЭЗС) при возникновении перегрузки в распределительной сети.

Система отложенного заряда не требует дополнительных затрат для внедрения, однако при максимальной выдержке времени в 30 мин оказывает малое влияние на максимум мощности распределительной сети: согласно результатам расчета, снижение максимума мощности составило порядка 1,39 % (см. таблицу). Увеличение максимальной выдержки времени снижает максимум мощности в большей степени, однако заметно влияет на качество заряда электромобилей.

¹⁴The Electric Vehicles (Smart Charge Points) Regulations 2021. Режим доступа: <https://www.legislation.gov.uk/ukdsi/2021/9780348228434> (дата обращения: 23.12.2025).

¹⁵Bundesnetzagentur 6 und Beschlusskammer 8 // § 14 a EnWG Steuerbare Verbrauchseinrichtungen. Режим доступа: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Beschlusskammern/BK06/BK6_83_Zug_Mess/841_SteuVE/BK6_SteuVE_node.html (дата обращения: 23.12.2025).

Системы прямого управления электропотреблением требуют дополнительных затрат для внедрения. Согласно [18, 19], необходимо следующее оборудование:

- интеллектуальный прибор учета электроэнергии (Smart Meter Gateway) – для приема команд на ограничение электропотребления;

- блок управления (FNN Control Box) – для реализации ограничения электропотребления управляемой нагрузки.

В Германии потребители, для которых установка интеллектуальных приборов учета электроэнергии является обязательной, несут расходы на установку и обслуживание данного оборудования порядка 40–50 евро в год и дополнительные затраты на оборудование для управления электропотреблением порядка 100–600 евро. В России, согласно федеральному закону № 522-ФЗ¹⁶ от 27.12.2018, с 1 января 2022 г. все новые приборы учета электроэнергии должны быть интеллектуальными, а ответственность и расходы на установку и обслуживание приборов учета ложатся на энергосбытовые и территориальные сетевые организации [20]. Оценка полных затрат на реализацию системы управления электропотреблением ЭЭС во многом определяется возможностями использования существующей интеллектуальной системы учета электроэнергии для формирования, передачи и контроля исполнения команд на ограничение электропотребления ЭЭС.

Согласно полученным результатам, удельный экономический эффект при реализации СУЭ составляет до 102–148 тыс. руб. на одного абонента с ЭЭС, участвующего в управлении электропотреблением, что можно рассматривать как предельную величину удельных затрат на реализацию данного мероприятия, обеспечивающих полную компенсацию затрат на реконструкцию распределительной сети.

Таким образом, сравнение полученных результатов с требуемыми инвестициями позволяет сделать вывод о предварительной экономической целесообразности внедрения СУЭ. Удельный экономический эффект, оцениваемый в диапазоне 102–148 тыс. руб./абонент, превышает потенциальные

дополнительные затраты (порядка 100–600 евро/абонент). Однако следует подчеркнуть, что данный вывод справедлив при выполнении двух ключевых условий. Во-первых, необходима полная пригодность существующей интеллектуальной системы учета электроэнергии для решения задач управления электропотреблением. Во-вторых, затраты на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, а также разработку специализированного программного обеспечения учитываются как условно-постоянные (разовые), распределение которых на большое количество абонентов делает их вклад в удельную стоимость пренебрежимо малым в масштабах массового внедрения.

На основании результатов настоящего исследования можно сформулировать следующие рекомендации по управлению электропотреблением ЭЭС:

- 1) целесообразно использование системы отложенного заряда с максимальной выдержкой времени не более 30 мин для всех ЭЭС с целью умеренного ограничения максимума мощности;

- 2) одноуровневые СУЭ целесообразно использовать для отдельных ТП, перспективная расчетная нагрузка которых превышает длительно допустимую за счет роста потребления мощности со стороны ЭЭС;

- 3) целесообразность использования двухуровневых СУЭ должна определяться режимом работы и ожидаемым объемом реконструкции ЛЭП 10 кВ.

Следует отметить, что результаты данного исследования получены на примере пригородных распределительных сетей г. Екатеринбург. Размер экономического эффекта от управления электропотреблением ЭЭС в значительной степени определяется пропускной способностью и загрузкой рассматриваемой распределительной сети и может отличаться для других энергорайонов. Однако достаточно большой размер исследуемого энергорайона (более 500 ТП) позволяет получить репрезентативные результаты и сделать обоснованные выводы о качественном характере и основных закономерностях влияния управления электропотреблением ЭЭС на параметры распределительной сети.

¹⁶О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в связи с развитием систем учёта электрической энергии (мощности) в Российской Федерации. Федеральный закон № 522-ФЗ от 27 декабря 2018 г.

Таким образом, в настоящей работе показано, что управление электропотреблением ЭЗС может являться эффективным решением для ограничения максимумов мощности распределительной сети и сокращения объемов реконструкции при незначительном влиянии на качество заряда электромобилей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе проведен анализ потенциала управления электропотреблением домашних ЭЗС на примере пригородных распределительных сетей г. Екатеринбург.

На основе проведенных исследований установлено, что при увеличении доли домохозяйств с электромобилем до 30 % максимум нагрузки распределительной сети может возрасти до 44 %, что потребует порядка 70,17 млн руб. для усиления электрической сети.

Система отложенного заряда позволяет снизить максимум мощности на 1,39–13,06 % и обеспечить экономический эффект за счет сокращения объемов реконструкции распределительной сети до 18,59–47,86 млн руб. в зависимости от максимальной выдержки времени начала заряда, тем не менее оказывает значительное влияние на

качество заряда ЭТ, приводя к среднему недозаряду до 0,49–10 %.

Системы прямого управления зарядом позволяют избирательно ограничивать заряд только тех ЭЗС, работа которых оказывает влияние на перегруженные участки распределительной сети. Экономический эффект от применения одноуровневой СУЭ составляет 63,48 млн руб. при среднем недозаряде ЭТ 0,93 %, а двухуровневой СУЭ – 66,94 млн руб. при среднем недозаряде ЭТ в 1,55 %.

Полученные результаты могут быть использованы при планировании развития пригородных распределительных сетей коттеджных поселков в условиях широкого внедрения электромобилей для выбора мероприятий по ограничению максимумов мощности с целью сокращения объемов реконструкции электрической сети.

Направлением дальнейших исследований является выполнение научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы по разработке и внедрению системы управления электропотреблением ЭЗС на пилотной площадке, а также проведение аналогичных исследований для общественной электрозарядной инфраструктуры большей номинальной мощности.

Список источников

1. Воронин В.А., Непша Ф.С. Управление напряжением в низковольтных распределительных сетях в условиях внедрения домашних зарядных станций электромобилей // *iPolytech Journal*. 2024. Т. 28. № 2. С. 261–271. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-261-271>. EDN: ZWSVER.
2. Sandström M., Huang P., Bales Ch., Dotzauer E. Evaluation of hosting capacity of the power grid for electric vehicles – a case study in a Swedish residential area // *Energy*. 2023. Vol. 284. P. 129293. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129293>. EDN: FLQPCT.
3. Li Ya., Jenn A. Impact of electric vehicle charging demand on power distribution grid congestion // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2024. Vol. 121. Iss. 18. P. e2317599121. <https://doi.org/10.1073/pnas.2317599121>. EDN: QKBFSW.
4. Lukuyu Ju., Shirley R., Taneja Ja. Managing grid impacts from increased electric vehicle adoption in African cities // *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Iss. 1. P. 24320. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75039-3>. EDN: HLIIAY.
5. Visakh A., Selvan M.P. Smart charging of electric vehicles to minimize the cost of charging and the rate of transformer aging in a residential distribution network // *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*. 2022. Vol. 30. Iss. 3. P. 927–942. <https://doi.org/10.55730/1300-0632.3819>. EDN: VQELDK.
6. Van Sambeek H.L., Zweistra M., Hoogsteen G., Varenhorst I.A.M., Janssen S. Gridshield-optimizing the use of grid capacity during increased EV adoption // *World Electric Vehicle Journal*. 2023. Vol. 14. Iss. 3. P. 68. <https://doi.org/10.3390/wevj14030068>. EDN: SRPSMS.
7. Dreucci D., Yu Yu., Chandra Mouli G.R., Shekhar A., Bauer P. Centralised distribution grid congestion management through EV charging control considering fairness and priority // *Applied Energy*. 2025. Vol. 384. P. 125417. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125417>.
8. Aoun A., Adda M., Ilinca A., Ghandour M., Ibrahim H. Dynamic charging optimization algorithm for electric vehicles to mitigate grid power peaks // *World Electric Vehicle Journal*. 2024. Vol. 15. Iss. 7. P. 324. <https://doi.org/10.3390/wevj15070324>. EDN: NWECHF.
9. Воронин В.А. Исследование влияния электрозарядной инфраструктуры электротранспорта на электроэнергетическую систему России: анализ значимости факторов // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2026. Т. 28. № 1. С. 70–88. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2026-28-1-70-88>. EDN: YKDHOC.
10. Elsayed M., Zafar K., Esa Yu., Soujad T., Mohamed A. Impact of 100% vehicle electrification on the distri-

bution grid in dense urban regions // *Energy Reports*. 2024. Vol. 11. P. 5315–5322. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.05.030>. EDN: IRVEMB.

11. Roy P., Ilka R., He J., Liao Yu., Cramer A.M., Mccann Ju., et al. Impact of electric vehicle charging on power distribution systems: a case study of the grid in Western Kentucky // *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 49002–49023. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3276928>. EDN: WURZAL.

12. Lee Ja.H., Chakraborty D., Hardman S.J., Tal G. Exploring electric vehicle charging patterns: mixed usage of charging infrastructure // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2020. Vol. 79. P. 102249. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102249>. EDN: HLLYVI.

13. Sørensen Å.L., Sartori I., Lindberg K.B., Andresen I. A method for generating complete EV charging datasets and analysis of residential charging behaviour in a large Norwegian case study // *Sustainable Energy, Grids and Networks*. 2023. Vol. 36. P. 101195. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2023.101195>. EDN: XUFMMB.

14. Almaghrebi A., James K., Al Juheshi F., Alahmad M. Insights into household electric vehicle charging behavior: analysis and predictive modeling // *Energies*. 2024. Vol. 17. Iss. 4. P. 925. <https://doi.org/10.3390/en17040925>. EDN: AMGFBH.

15. Huang P., Ma Zh. Unveiling electric vehicle (EV) charging patterns and their transformative role in electricity balancing and delivery: Insights from real-world data in Sweden // *Renewable Energy*. 2024. Vol. 236. P. 121511. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121511>. EDN: ZMHMEX.

16. Baek K., Lee E., Kim J. A dataset for multi-faceted analysis of electric vehicle charging transactions // *Scientific Data*. 2024. Vol. 11. Iss. 1. P. 262. <https://doi.org/10.1038/s41597-024-02942-9>. EDN: TLFFID.

17. Voronin V., Nepsha F., Ilyushin P. Demand factor analysis for electric vehicle charging infrastructure // *World Electric Vehicle Journal*. 2025. Vol. 16. Iss. 9. P. 537. <https://doi.org/10.3390/wevj16090537>. EDN: YGLYGG.

18. Ganz K., Vollmuth P. The Impact of DSO Grid-Integration Measures on EV Users in Germany // *World Electric Vehicle Journal*. 2025. Vol. 16. Iss. 2. P. 110. <https://doi.org/10.3390/wevj16020110>. EDN: KRJAFI.

19. Kroener N., Förderer K., Lösch M., Schmeck H. State-of-the-art integration of decentralized energy management systems into the German Smart Meter Gateway infrastructure // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10. Iss. 11. P. 3665. <https://doi.org/10.3390/app10113665>. EDN: JAAAKU.

20. Бучнев А.О., Рыбина К.А. Интеллектуальные системы учета электроэнергии как фактор развития «умного города» // *Государственная служба*. 2025. Т. 27. № 4. С. 43–51. EDN: EUPAUУ.

References

1. Voronin V.A., Nepsha F.S. Voltage control in low-voltage distribution networks in the context of introducing home charging stations for electric vehicles. *iPolytech Journal*. 2024;28(2):261-271. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-261-271>. EDN: ZWSVER.

2. Sandström M., Huang P., Bales Ch., Dotzauer E. Evaluation of hosting capacity of the power grid for electric vehicles – a case study in a Swedish residential area. *Energy*. 2023;284:129293. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129293>. EDN: FLQPCT.

3. Li Ya., Jenn A. Impact of electric vehicle charging demand on power distribution grid congestion. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2024;121(18):e2317599121. <https://doi.org/10.1073/pnas.2317599121>. EDN: QKBFSW.

4. Lukuyu Ju., Shirley R., Taneja Ja. Managing grid impacts from increased electric vehicle adoption in African cities. *Scientific Reports*. 2024;14(1):24320. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75039-3>. EDN: HLIIAY.

5. Visakh A., Selvan M.P. Smart charging of electric vehicles to minimize the cost of charging and the rate of transformer aging in a residential distribution network. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*. 2022;30(3):927-942. <https://doi.org/10.55730/1300-0632.3819>. EDN: VQELDK.

6. Van Sambeek H.L., Zweistra M., Hoogsteen G., Varenhorst I.A.M., Janssen S. Gridshield-optimizing the use of grid capacity during increased EV adoption. *World Electric Vehicle Journal*. 2023;14(3):68. <https://doi.org/10.3390/wevj14030068>. EDN: SRPSMS.

7. Dreucci D., Yu Yu., Chandra Mouli G.R., Shekhar A., Bauer P. Centralised distribution grid congestion management through EV charging control considering fairness and priority. *Applied Energy*. 2025;384:125417. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125417>.

8. Aoun A., Adda M., Ilinca A., Ghandour M., Ibrahim H. Dynamic charging optimization algorithm for electric vehicles to mitigate grid power peaks. *World Electric Vehicle Journal*. 2024;15(7):324. <https://doi.org/10.3390/wevj15070324>. EDN: NWECCF.

9. Voronin V.A. Investigation of the impact of electric vehicle charging infrastructure on the Russian power system: feature importance analysis. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2026;28(1):70-88. (In Russ.). <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2026-28-1-70-88>. EDN: YKDHOC.

10. Elsayed M., Zafar K., Esa Yu., Soujad T., Mohamed A. Impact of 100% vehicle electrification on the distribution grid in dense urban regions. *Energy Reports*. 2024;11:5315-5322. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.05.030>. EDN: IRVEMB.

11. Roy P., Ilka R., He J., Liao Yu., Cramer A.M., Mccann Ju., et al. Impact of electric vehicle charging on power distribution systems: a case study of the grid in Western Kentucky. *IEEE Access*. 2023;11:49002-49023. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3276928>. EDN: WURZAL.

12. Lee Ja.H., Chakraborty D., Hardman S.J., Tal G. Exploring electric vehicle charging patterns: mixed usage of charging infrastructure. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2020;79:102249. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102249>. EDN: HLLYVI.
13. Sørensen Å.L., Sartori I., Lindberg K.B., Andresen I. A method for generating complete EV charging datasets and analysis of residential charging behaviour in a large Norwegian case study. *Sustainable Energy, Grids and Networks*. 2023;36:101195. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2023.101195>. EDN: XUFMMB.
14. Almaghrebi A., James K., Al Juheshi F., Alahmad M. Insights into household electric vehicle charging behavior: analysis and predictive modeling. *Energies*. 2024;17(4):925. <https://doi.org/10.3390/en17040925>. EDN: AMGFBH.
15. Huang P., Ma Zh. Unveiling electric vehicle (EV) charging patterns and their transformative role in electricity balancing and delivery: Insights from real-world data in Sweden. *Renewable Energy*. 2024;236:121511. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121511>. EDN: ZMHMEX.
16. Baek K., Lee E., Kim J. A dataset for multi-faceted analysis of electric vehicle charging transactions. *Scientific Data*. 2024;11(1):262. <https://doi.org/10.1038/s41597-024-02942-9>. EDN: TLFFID.
17. Voronin V., Nepsha F., Ilyushin P. Demand factor analysis for electric vehicle charging infrastructure. *World Electric Vehicle Journal*. 2025;16(9):537. <https://doi.org/10.3390/wevj16090537>. EDN: YGLYGG.
18. Ganz K., Vollmuth P. The Impact of DSO grid-integration measures on EV users in Germany. *World Electric Vehicle Journal*. 2025;16(2):110. <https://doi.org/10.3390/wevj16020110>. EDN: KRJAFI.
19. Kroener N., Förderer K., Lösch M., Schmeck H. State-of-the-art integration of decentralized energy management systems into the German Smart Meter Gateway infrastructure. *Applied Sciences*. 2020;10(11):3665. <https://doi.org/10.3390/app10113665>. EDN: JAAAKU.
20. Buchnev A.O., Rybina K.A. Intelligent electricity metering systems as a factor in the development of “smart cities”. *Public Administration*. 2025;27(4):43-51. (In Russ.). EDN: EUPAUU.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Воронин Вячеслав Андреевич,

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
научно-исследовательской
лаборатории цифровой трансформации
предприятий минерально-сырьевого комплекса,
доцент кафедры электроснабжения горных
и промышленных предприятий,
Кузбасский государственный технический
университет имени Т.Ф. Горбачева,
650000, Российская Федерация,
г. Кемерово, ул. Весенняя, 28
✉ voroninva@kuzstu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7242-9100>

Vyacheslav A. Voronin,

Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher at the Mining Industry
Digital Transformation Laboratory,
Associate Professor of the Department of Power
Supply of Mining and Industrial Enterprises,
T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,
28 Vesennaya St., Kemerovo 650000, Russian
Federation
✉ voroninva@kuzstu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7242-9100>

Замарин Дмитрий Олегович,

аспирант,
Уральский федеральный университет им.
первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, Российская Федерация,
г. Екатеринбург, ул. Мира, 19;
ведущий специалист департамента технологического
развития и инноваций ПАО «Россети Урал»,
620026, Российская Федерация,
г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 140
zamarin-do@rosseti-ural.ru
<https://orcid.org/0009-0003-0681-3774>

Dmitry O. Zamarin,

Postgraduate Student,
Ural Federal University
named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
19, Mira St., Yekaterinburg 620002, Russian
Federation;
Leading Specialist at the Department of Technological
Development and Innovation, PJSC «Rosseti Ural»,
140, Mamin-Sibiryak St., Yekaterinburg 620026,
Russian Federation
zamarin-do@rosseti-ural.ru
<https://orcid.org/0009-0003-0681-3774>

Заявленный вклад авторов

Authors' contribution

Воронин В.А. – моделирование работы электрозарядных станций электромобилей, обзор литературы, написание текста, редактирование.
Замарин Д.О. – расчет и анализ установившихся электрических режимов, обработка данных, редактирование.

Vyacheslav A. Voronin – modeling operation of electric vehicle charging stations, literature review, text writing, editing.

Dmitry O. Zamarin – calculation and analysis of steady-state electrical modes, data processing, editing.

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 27.01.2026 г.; одобрена после рецензирования 10.03.2026 г.; принята к публикации 16.03.2026 г.

Information about the article

The article was submitted 27.01.2026; approved after reviewing 10.03.2026; accepted for publication 16.03.2026.

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 662.8

EDN: VXLHIU

DOI: 10.21285/1814-3520-2026-3-481-490



Численное исследование влияния условий термоподготовки черемховского угля на свойства топливных брикетов

В.Г. Галеев¹, И.Г. Донской^{2✉}, А.Н. Козлов³, М.В. Пензик⁴, Ю.М. Иса⁵

¹⁻⁴Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск, Российская Федерация

⁵Университет Витватерсранда, Йоханнесбург, Южно-Африканская Республика

Резюме. Цель – исследовать стадию пиролиза (полукоксования) угольной засыпки для получения брикетов, которые далее могут использоваться в виде твердого топлива или в качестве сырья для производства углеродистых материалов. Объектом исследований явился черемховский уголь (влажность – 10 %, выход летучих – 38,7 %, зольность – 30,2 %). Процесс пиролиза засыпок слабоспекающегося угля проводили в лабораторной муфельной печи при нагреве до температуры 300–400 °С, после чего производилось прессование под давлением ≈ 20 МПа. В работе использовалось численное моделирование кинетики термического разложения и теплопереноса. Показано, что полученные при 300–350 °С брикеты имеют прочность ≈ 95 %, в то время как при температурах выше 350 °С брикеты рассыпаются на стадии прессования. Установлено, что прочность угольных брикетов в основном определяется тепловым состоянием засыпки, а именно: однородностью ее прогрева и степенью термического разложения по высоте слоя частиц. Для оценки однородности прогрева и разложения предложена упрощенная математическая модель, описывающая распространение теплоты и протекание двухстадийной эндотермической брутто-реакции (размягчение угля и превращение его в полукок) в одномерном приближении. Сформулирован числовой критерий (коэффициент осцилляции), учитывающий неоднородность профиля конверсии по слою: при больших его значениях ожидаемая прочность брикета будет низкой. Проведенное качественное сравнение экспериментальных данных с оценками по разным критериям (однородность состояния массы засыпки, энергетические затраты) показало, что математическая модель достаточно хорошо описывает процесс термоподготовки угля. Таким образом, проведенные расчеты показывают, что значения температур, соответствующих наилучшей прочности брикетов на основе черемховского угля, ограничиваются областью температур в диапазоне 300–320 °С при времени нагрева ≈ 1 ч. Тепловые затраты на производство брикетов при этом составляют 2–3 МДж/кг угля.

Ключевые слова: угольные брикеты, полукоксование, пиролиз, механическая прочность, математическое моделирование

Финансирование. Работа выполнена в рамках проекта Минобрнауки РФ № 13.2251.21.0254 (эл. бюджет № 075-15-2024-651).

Для цитирования: Галеев В.Г., Донской И.Г., Козлов А.Г., Пензик М.В., Иса Ю.М. Численное исследование влияния условий термоподготовки черемховского угля на свойства топливных брикетов // iPolytech Journal. 2026. Т. 30. № 3. С. 481–490 <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2026-3-481-490>. EDN: VXLHIU.

POWER ENGINEERING

Original article

Numerical analysis of the effects of Cheremkhovo coal thermal pretreatment on fuel briquette properties

Vladislav G. Galeev¹, Igor G. Donskoy^{2✉}, Aleksandr N. Kozlov³,
Maksim V. Penzik⁴, Yusuf M. Isa⁵

¹⁻⁴Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

⁵University of the Witwatersrand, Johannesburg, South Africa

Abstract. The pyrolysis (low-temperature carbonization) of a coal bed was investigated to determine conditions for producing briquettes suitable for use as solid fuel or as feedstock for carbon materials. The study used Cheremkhovo coal (Irkutsk coal basin, Russia) with a moisture content of 10 %, volatile matter yield of 38.7 %, and ash content of 30.2 %. Beds of weakly caking coal were pyrolyzed in a laboratory muffle furnace

at 300–400 °C and subsequently pressed at approximately 20 MPa. Numerical modeling was used to describe the kinetics of thermal decomposition and heat transfer. Briquettes produced at 300–350 °C had a strength of approximately 95%, whereas those produced above 350 °C disintegrated during pressing. Briquette strength was found to depend primarily on the thermal state of the coal bed, specifically on the uniformity of heating and the degree of thermal decomposition throughout the bed height. A simplified mathematical model was developed to evaluate the uniformity of heating and decomposition. In a one-dimensional approximation, the model describes heat transfer and a two-stage endothermic overall reaction comprising coal softening followed by conversion to semicoke. An oscillation index was introduced as a numerical criterion that accounts for nonuniformity in the conversion profile throughout the bed height; high index values indicate low expected briquette strength. Qualitative comparison of the experimental data with estimates based on different criteria, including the uniformity of the coal-bed state and energy consumption, showed that the mathematical model adequately describes the thermal pretreatment of coal. The calculations indicate that the highest strength of Cheremkhovo coal briquettes is achieved at temperatures of 300–320 °C with a heating time of approximately 1 h. The corresponding energy consumption for briquette production is 2–3 MJ/kg of coal.

Keywords: coal briquettes, semi-coking, pyrolysis, mechanical strength, mathematical modeling

Funding. The work was supported by the Russian Ministry of Education and Science project No. 13.2251.21.0254 (electronic budget No. 075-15-2024-651).

For citation: Galeev V.G., Donskoy I.G., Kozlov A.N., Penzik M.V., Isa Yu.M. Numerical analysis of the effects of Cheremkhovo coal thermal pretreatment on fuel briquette properties. *iPolytech Journal*. 2026;30(3):481-490. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2026-3-481-490>. EDN: VXLHIU.

ВВЕДЕНИЕ

Угольные брикеты широко используются в энергетике и других отраслях промышленности как бездымное топливо и как сырье для получения высокоуглеродистых материалов. В связи с вариабельностью свойств углей (даже в пределах одного месторождения) выбор оптимальных условий для брикетирования представляет собой в большинстве случаев задачу эмпирического подбора. Ухудшение качества ископаемых топлив ведет к необходимости вовлекать сырье, которое обычно не используется для брикетирования. Например, разрабатываются методы получения углеродистых материалов из растительного сырья [1], неспекающихся и бурых углей [2].

Благодаря термической обработке, угольные брикеты имеют лучшие экологические характеристики и большую теплоту сгорания, чем рядовой уголь. В работе [3] показано, что при пиролизе углей удается снизить содержание соединений серы. Эти свойства позволяют использовать брикеты, например, для сжигания в автоматических малых котельных, что позволяет существенно снизить удельный расход топлива и вредные выбросы.

Основным инструментом управления процессом пиролиза является температурный режим [4]. Даже для углей, слабоспекающихся при низких скоростях нагрева, можно подобрать условия (тепловой удар, давление, размеры частиц), при которых удастся получить достаточно качественный

полукокс [5]. Как отмечалось выше, такой подбор проводится, как правило, эмпирически [6]. Температура достижения пластического состояния для углей чаще всего находится в диапазоне 350–550 °C [7], но при медленном нагреве вторичные реакции (сшивание ароматических структур [8], взаимодействие с летучими компонентами [9], образование новых фаз [10]) приводят к ухудшению качества углеродного материала. Управляемый нагрев позволяет разделить временные масштабы тепловых процессов и химических превращений для управления процессом полукоксования. Для этого могут быть использованы как транспортные реакторы для дисперсных потоков, так и другие способы управления тепловыми процессами (к примеру, высокочастотный нагрев [11]).

Определение оптимальных условий брикетирования требует разработки количественного критерия, отвечающего нужному качеству брикета. Можно сформулировать ряд требований к этому критерию, например, прямая его зависимость от свойств заправки и возможность управления им с помощью внешних параметров.

Для получения полной информации о протекающих при полукоксовании процессах необходимо вести всесторонние измерения температур и концентраций по всему объему образца. Это не всегда возможно, в том числе из-за его неоднородности, как на масштабах слоя, так и для отдельных частиц. Естественные вариации состава и пористо-

сти угля приводят к необходимости использования методов усреднения как при анализе экспериментальных данных, так и при разработке физико-математических моделей. В связи с этим необходимо оценивать состояние засыпки таким образом, чтобы было возможным установление однозначной связи между этим состоянием и выбранным критерием. Одним из вариантов может быть построение математической модели засыпки, которая позволяет получить информацию о физико-химическом состоянии угольных частиц в ходе нагрева, чтобы, в свою очередь, связать эту информацию с критерием эффективности процесса термоподготовки и с управляющими параметрами. Гипотеза работы состоит в том, что качество брикета зависит от степени однородности термического превращения угля по толщине засыпки. Для проверки этой гипотезы строится такая математическая модель и проводится сравнение полученных на ее основе расчетов с экспериментальными данными.

В статье рассматривается процесс пиролиза засыпок слабоспекающегося угля в муфельной печи. В зависимости от времени выдержки и максимальной температуры нагрева глубина конверсии в засыпке меняется, что сказывается на механической прочности угольных брикетов. На основе сопоставления результатов экспериментальных исследований и численного моделирования нами предложен критерий неоднородности засыпки, который позволяет оценивать качество заготовки для брикетирования. Помимо этого, рассматривается энергетическая эффективность производства брикетов (по величине удельной теплоты, затрачиваемой на нагрев засыпки). На основе этих данных производится комплексная оценка стадии

термоподготовки на примере черемховского угля.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В качестве топлива для исследования использован черемховский уголь. Влажность угля равна 10 %, выход летучих – 38,7 %, зольность – 30,2 %. Теплота сгорания, определенная в калориметрической бомбе, равна 19,2 МДж/кг. Частицы угля со средним размером 6 мм (насыпная плотность 759 кг/м³) засыпаются в форму для прессования (диаметр 54 мм) и помещаются в муфельную печь, где нагреваются до температуры 300–400 °С (температура стенок 500–600 °С). После выдержки до заданного времени пребывания форма извлекается из муфельной печи и прессуется под давлением 5 т (около 20 МПа). Масса засыпки для всех случаев составляет около 80 г (высота около 5 см), максимальная температура нагрева регулируется автоматом, который подстраивается под значения опущенной в засыпку термпары. В таблице ниже приведены основные характеристики экспериментальных режимов. Полученные брикеты показаны на рис. 1: с ростом температуры нагрева возрастает зернистость поверхности, образцы становятся все менее однородными. Прочность брикетов измерялась путем сбрасывания по методике, описанной в ГОСТ 21289-75⁶. Полученные при 300–350 °С брикеты имеют прочность около 95 %, в то время как при температурах выше 350 °С брикеты рассыпаются на стадии прессования. Для экспериментов использовалось оборудование Центра коллективного пользования «Высокотемпературный контур».

Для численных расчетов используется одномерная модель теплопереноса в виде (1):

Условия экспериментальных исследований
Conditions of experimental studies

Температура, °С	Время нагрева, мин	Относительная потеря массы, %
300	53	16,1
300	64	14,1
300	70	15,9
320	61	20,1
350	72	25,4
375	51	28,6
400	42	31,3

⁶ГОСТ 21289-75. Брикеты угольные. Методы физических испытания. Введ. 01.07.77. (с изм. в мае 1978 г., в июле 1984 г.). М.: Изд-во стандартов, 1986.

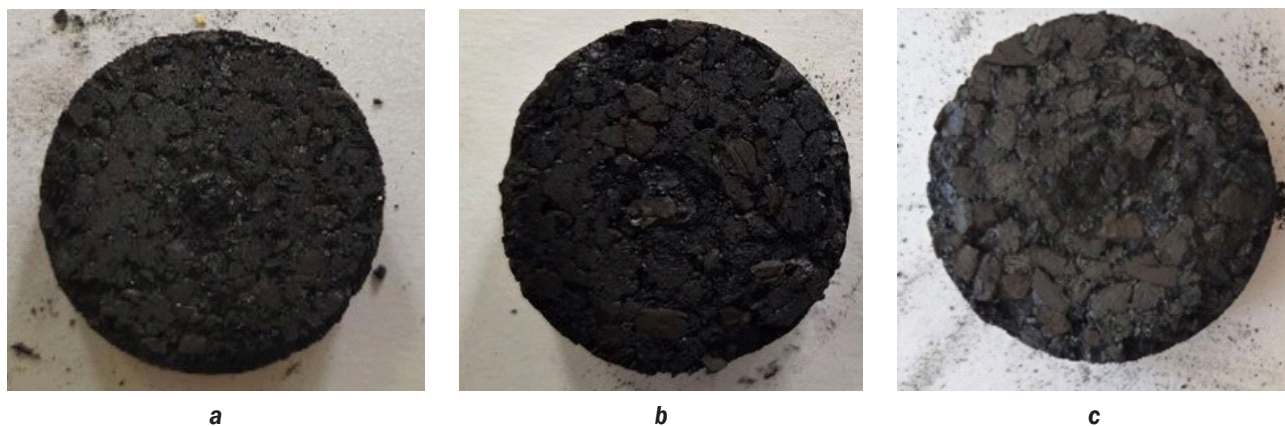


Рис. 1. Внешний вид угольных брикетов, полученных при разных максимальных температурах нагрева: а – 300°C; б – 320°C; в – 350°C

Fig. 1. Appearance of coal briquettes obtained at different maximum heating temperatures: a – 300°C; b – 320°C; c – 350°C

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + q, \quad (1)$$

где T – температура, К; t – время, с; x – координата (высота слоя), м; c – удельная изобарная теплоемкость, Дж/(кг·К); ρ – плотность засыпки, кг/м³; λ – эффективный коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); q – тепловой эффект, который определяется испарением воды и протеканием эндотермической реакции (термического разложения угля), Дж/м³. На внешней границе слоя частиц происходит конвективный и лучистый теплообмен с окружающей средой (заполняющий муфель воздух, стенки печи). Теплофизические свойства угля рассчитывались по рекомендациям работ [12, 13]. Лучистая поправка к коэффициенту теплопроводности вносилась согласно работе [14]. Сушка моделируется ступенчатым фазовым переходом при температуре 100°C. Температурная неоднородность отдельных частиц не учитывается (время тепловой релаксации частицы намного меньше прогрева слоя).

Для описания термического разложения используется двухстадийная схема [15–17]: $C \Rightarrow M (+G) \Rightarrow R (+G)$, где C – исходный уголь; M – промежуточный продукт; уголь в размягченном состоянии (метапласт); G – газообразные продукты разложения; R – твердый остаток (полукокс). Кинетические коэффициенты для обеих брутто-реакций взяты из работы [17]. Высокая массовая доля и равномерное распределение промежуточного продукта перед прессованием делают брикет более механически прочным. Отметим, что одновременное выполнение этих

требований не всегда возможно: для достижения высокой доли промежуточного продукта нужны малые времена пребывания засыпки в печи при высокой температуре; для равномерности распределения размягченной угольной массы – большие времена пребывания при низких температурах.

Совместное решение уравнения теплопроводности с химическими реакциями проводится численно с помощью расщепления по физическим процессам. Для решения уравнений переноса используется метод прогонки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Расчетные распределения температуры и доли угля в пластическом состоянии показаны на рис. 2. С ростом температуры нагрева засыпка прогревается до большей степени разложения, при этом промежуточный продукт распределен менее однородно по высоте засыпки. Естественно, что последующее прессование приводит к образованию менее прочных брикетов. С другой стороны, низкотемпературный пиролиз требует большего времени, при этом отношение скоростей рассматриваемых последовательных реакций изменяется таким образом, что вторая стадия становится преобладающей. В связи с этим появляется вопрос о выборе оптимальной программы для термоподготовки угольной засыпки перед прессованием.

С помощью модели были проведены расчеты процесса пиролиза угольной засыпки (массой 80 г, с теми же геометрическими размерами) при разных максимальных температурах и при разной продолжительности

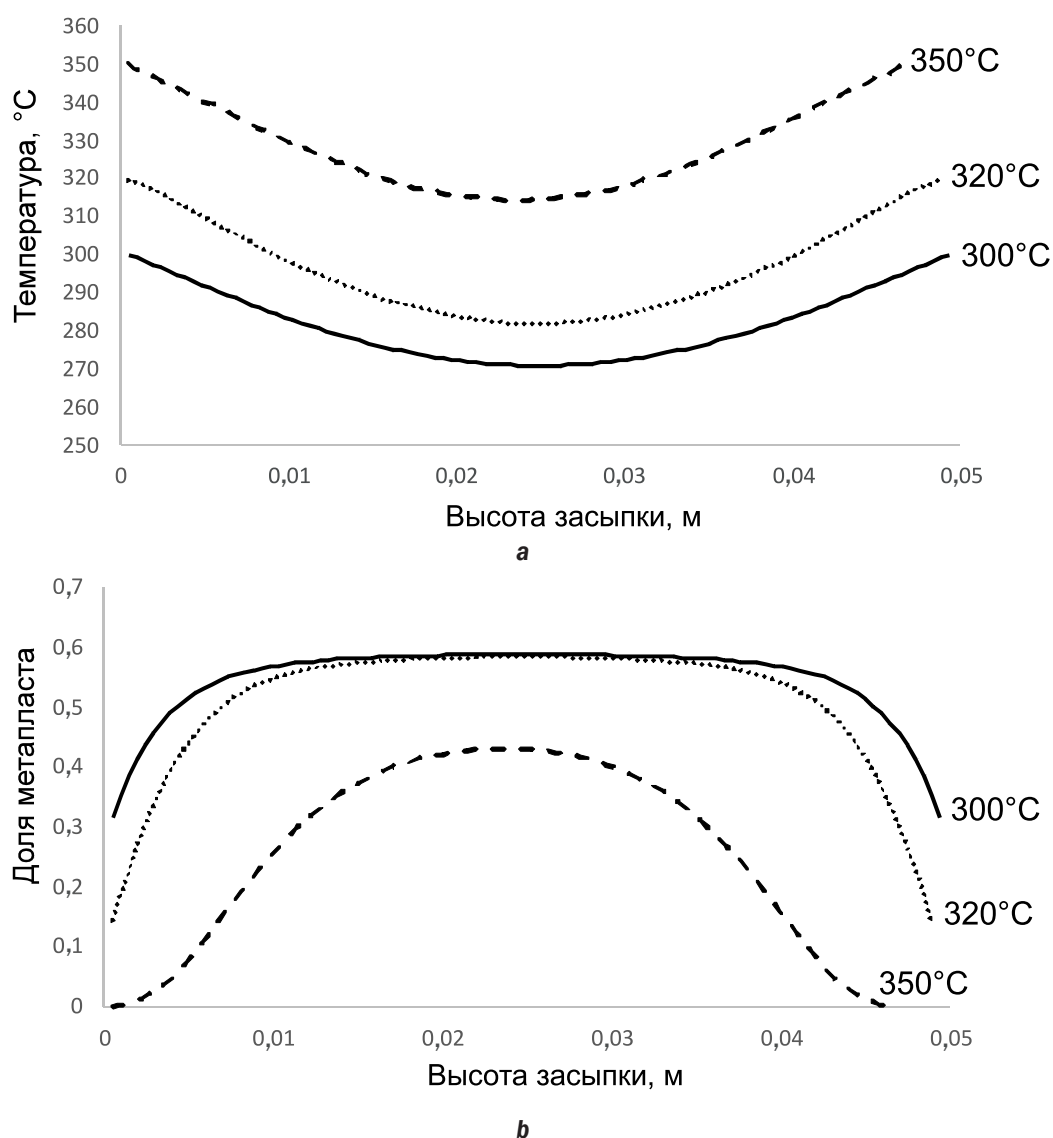


Рис. 2. Расчетные профили температуры (а) и массовой доли промежуточного продукта (b) на момент окончания нагрева при разных максимальных температурах

Fig. 2. Calculated profiles of temperature (a) and mass fraction (b) of the intermediate product at the end of heating at different maximum temperatures

нагрева. Для упрощения предполагаем, что температура газа в муфельной печи линейно растет со временем (10 К/мин) до максимальной температуры, после чего остается постоянной. С ростом максимальной температуры глубина протекания реакций разложения органической массы ожидаемо возрастает. Расчеты показывают, что при длительности нагрева до 2000 с доля промежуточного продукта растет, затем начинается ее резкое снижение, особенно при высоких температурах. Перепад температур по слою не является существенным критерием однородности конверсии угля, более того, существуют временные интервалы с малоизменяющимся высоким градиентом темпера-

туры, они соответствуют стадии сушки [18]. Стадия сушки существенно перекрывается с разложением органической массы угля. В настоящей модели не учитываются возможные перекрестные эффекты (например, влияние водяного пара на динамику выделения и состав продуктов), поэтому влияние сушки сводится к тепловому взаимодействию фазового перехода с процессами теплопереноса.

Для оценки неоднородности распределения размягченной угольной массы по высоте засыпки можно предложить критерий – разность между максимальной и минимальной долей промежуточного продукта, отнесенная к среднему значению (коэффициент осцилляции $F(t)$) (2):

$$F(t) = \frac{\max_x M(t, x) - \min_x M(t, x)}{\langle M(t, x) \rangle} \quad (2)$$

Другими показателями могут выступать средняя массовая доля промежуточного компонента, а также ее произведение с критерием $F(t)$. На рис. 3 показаны результаты расчетов с отмеченными на них маркерами экспериментальными режимами. Круглые маркеры показывают условия, при которых получены прочные брикеты, треугольные – условия для хрупких брикетов. Можно видеть, что диапазоны условий различаются в первую очередь по температуре. Подходящие условия для брикетирования лежат в области низких температур нагрева и времени нагрева 3000–4000 с. В этой области критерий $F(t)$ достигает минимальных значений (0,5–1), а доля промежуточного продукта максимальна (около 0,7). Увеличение температуры термообработки ведет к росту неоднородности и, как следствие, к худшим свойствам брикетов.

Произведение критерия $F(t)$ и среднего содержания компонента M – это комбинированный критерий, который показывает одновременно вклад однородности и насыщенности угольной массы размягченным промежуточным продуктом пиролиза. Однако, как показывает рис. 3, этот критерий не дает четких различий между режимами термopодготовки.

Диапазон экспериментальных температур оказывается довольно узким, в то время как расчеты показывают, что высокая

однородность достигается при невысоких температурах нагрева (для заданного размера заготовки). При этом, однако, пиролиз замедляется. Интенсификация процесса возможна, например, за счет уменьшения порций угля, подвергаемых нагреву. Таким образом, предложенная численная модель позволяет качественно оценивать влияние условий термopодготовки на качество угольных брикетов.

Кроме состояния угля можно также оценивать тепловые затраты на термopодготовку: их снижение поможет улучшить технико-экономические и экологические показатели установок для получения термобрикетов, поскольку нагрев требует дополнительного расхода топлива. На рис. 4 показано изменение энергетических затрат (МДж/кг сырого угля), рассчитанных как интеграл от теплового потока на границе между угольной засыпкой и греющей средой: интенсификация теплообмена позволяет уменьшить удельные затраты теплоты, поэтому снижение температуры и увеличение времени пребывания засыпки в печи приводят к затратам в 2–3 МДж/кг при производстве прочных брикетов (режимы с низкой прочностью брикетов требуют 1–2,5 МДж/кг).

Высокая скорость нагрева влечет за собой малые времена нагрева (и, соответственно, меньше затраты теплоты), однако при этом возрастает неоднородность конверсии угля. При малых скоростях нагрева брикет более однороден, но требует больших времен обработки (и больших затрат теплоты).

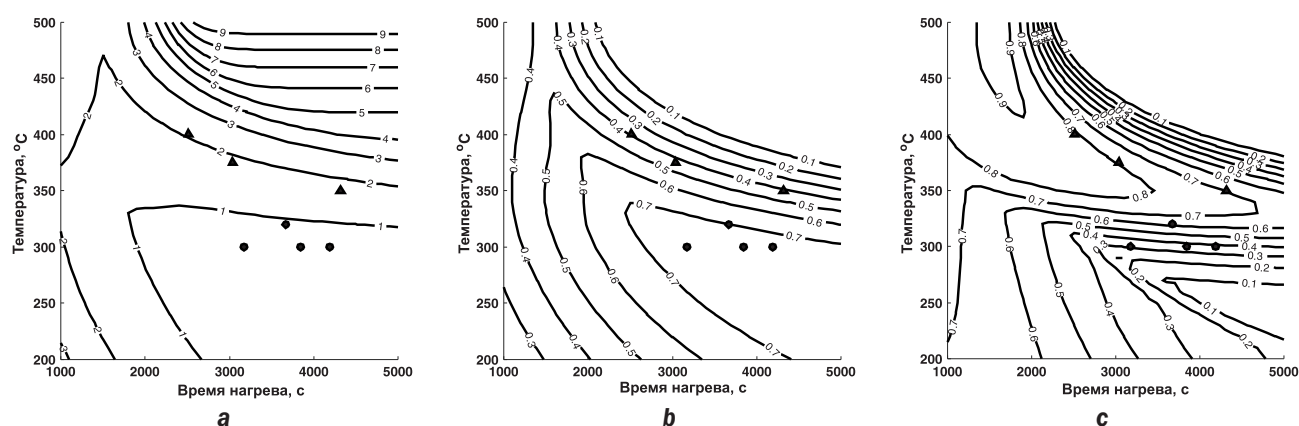


Рис. 3. Сравнение критериев для оценки прочности брикетов: а – критерий неоднородности; б – доля угля в размягченном состоянии; в – произведение двух первых критериев

Fig. 3. Comparison of criteria for assessing briquette strength: а – heterogeneity criterion; б – proportion of coal in a softened state; в – product of the first two criteria

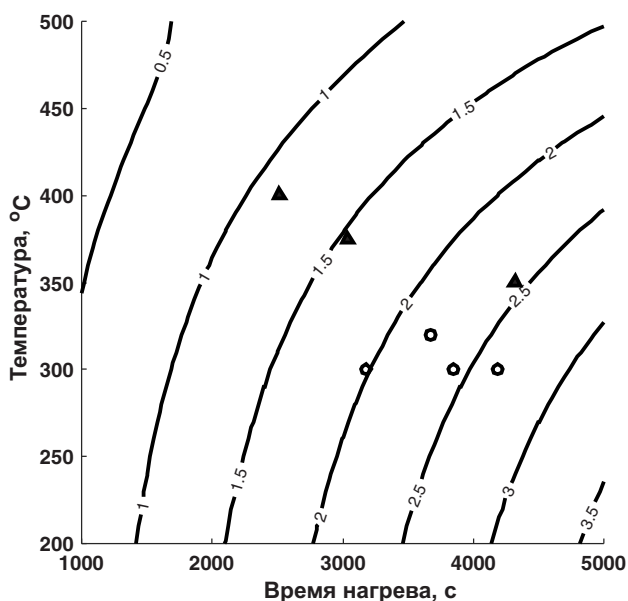


Рис. 4. Удельные затраты теплоты на полукоксование угля, МДж/кг (числа на линиях)

Fig. 4. Specific heat consumption for coal semi-coking, MJ/kg (numbers on lines)

Проведенные расчеты показывают, что тепловые затраты в рассмотренном диапазоне условий меняются в несколько раз, поэтому имеется существенный потенциал для их снижения.

Расчетные тепловые затраты при брикетировании составляют 10–15 % от теплотворной способности топлива. Часть этих затрат можно возместить за счет сжигания пиролизного газа, однако нестабильность

его состава и загрязненность смолой способны приводить к необходимости сжигания сырого угля или полученных брикетов. При этом, однако, появляется возможность регенерации теплоты (например, в процессе сушки). Выбор дополнительного топлива должен производиться с учетом более детального моделирования установки для брикетирования, которое может стать дальнейшим развитием настоящего исследования. Другие возможные способы термоподготовки могут включать обработку реагентами (например, диоксидом углерода [19]), микроволновой нагрев [20] и т.д.): для таких процессов предложенные оценки непригодны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведены экспериментальные исследования процесса термоподготовки угольных засыпок перед брикетированием, получены механически прочные брикеты из слабоспекающегося черемховского угля. На основе численной модели предложен способ оценки качества брикетов по максимальной температуре и продолжительности нагрева засыпки. Расчеты показывают, что значения температур, соответствующих наилучшей прочности брикетов, ограничиваются областью 300–320 °C при времени нагрева около 1 ч. Тепловые затраты на производство брикетов составляют 2–3 МДж/кг угля.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Florentino-Madiedo L., Díaz-Faes E., Barriocanal C. Reactivity of biomass containing briquettes for metallurgical coke production // *Fuel Processing Technology*. 2019. Vol. 193. P. 212–220. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.05.017>. EDN: SOGQLT.
2. Katalambula H., Gupta R. Low-grade coals: a review of some prospective upgrading technologies // *Energy Fuels*. 2009. Vol. 23. Iss. 7. P. 3392–3405. <https://doi.org/10.1021/ef801140t>.
3. Maysyuk E.P., Kozlov A.N. Technology of thermal preparation of coal for ecologically pure combustion of fuel in small boilers // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1565. P. 012059. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1565/1/012059>. EDN: UKOJZD.
4. Vega M.F., Díaz-Faes E., Barriocanal C. Influence of the heating rate on the quality of metallurgical coke // *ACS Omega*. 2021. Vol. 6. Iss. 50. P. 34615–34623. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c05007>. EDN: IQJJSX.
5. Перепелица А.Л. Пирогенетическое окускование углей Иркутского бассейна. М.: Академия наук СССР, 1963. 220 с.
6. Nyathi M.S., Kruse R., Mastalerz M., Bish D.L. Nature and origin of coke quality variation in heat-recovery coke making technology // *Fuel*. 2016. Vol. 176. P. 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.02.050>.
7. Chen Y., Lee S., Tahmasebi A., Mahoney M., Yu J., Bai J. A review of the state-of-the-art research on carbon structure evolution during the coking process: from plastic layer chemistry to 3D carbon structure establishment // *Fuel*. 2020. Vol. 271. P. 117657. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117657>. EDN: AJHWGY.
8. Xu Liang, Liu Haiyu, Jin Yan, Fan Baoguo, Qiao Xiaolei, Jing Bo. Structural order and dielectric properties of coal chars // *Fuel*. 2014. Vol. 137. P. 164–171. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.08.002>.
9. Liu Zhenyu, Guo Xiaojin, Shi Lei, He Wenjing, Wu Junfei, Liu Qingya, et al. Reaction of volatiles - a crucial step in pyrolysis of coals // *Fuel*. 2015. Vol. 154. P. 361–369. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.04.006>.

10. Yu Jianglong, Lucas J.A., Wall T.F. Formation of the structure of chars during devolatilization of pulverized coal and its thermoproperties: a review // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2007. Vol. 33. P. 135–170. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2006.07.003>.
11. Lin Baiquan, Li He, Chen Zhongwei, Zheng Chunshan, Hong Yidu, Wang Zheng. Sensitivity analysis on the microwave heating of coal: a coupled electromagnetic and heat transfer model // *Applied Thermal Engineering*. 2017. Vol. 126. P. 949–962. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.08.012>.
12. Агроскин А.А. Тепловые и электрические свойства углей. М.: Metallurgizdat, 1959. 268 с.
13. Shi Q., Qin Y., Chen Y. Relationship between thermal conductivity and chemical structures of Chinese coals // *ACS Omega*. 2020. Vol. 5. Iss. 29. P. 18424–18431. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c02281>. EDN: UORRXP.
14. Ковенский В.И., Теплицкий Ю.С. О теплопроводности зернистого слоя // *Инженерно-физический журнал*. 2008. Т. 81. № 5. С. 956–962. EDN: NDLODZ.
15. Oh M.S., Peters W.A., Howard J.B. An experimental and modeling study of softening coal pyrolysis // *AIChE Journal*. 1989. Vol. 35. Iss. 5. P. 775–792. <https://doi.org/10.1002/aic.690350509>.
16. Matsuoka K., Hayashi J., Chiba T. A Model for softening and resolidification of coals heated at different rates // *ISIJ International*. 1997. Vol. 37. Iss. 6. P. 566–572. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.37.566>.
17. Sciazko M., Mertas B., Stepień L. Kinetic modelling of coking coal fluidity development // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020. Vol. 142. Iss. 2. P. 977–990. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09487-0>. EDN: NWZGNF.
18. Atkinson B., Merrick D. Mathematical models of the thermal decomposition of coal. 4. Heat transfer and temperature profiles in coke-oven charge // *Fuel*. 1983. Vol. 62. P. 553–561. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(83\)90225-9](https://doi.org/10.1016/0016-2361(83)90225-9).
19. Apicella B., Russo C., Cerciello F., Stanzione F., Ciajolo A., Scherer V., et al. Insights on the role of primary and secondary tar reactions in soot inception during fast pyrolysis of coal // *Fuel*. 2020. Vol. 275. P. 117957. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117957>.
20. Ellison C., Abdelsayed V., Smith M., Shekhawat D. Comparative evaluation of microwave and conventional gasification of different coal types: experimental reaction studies // *Fuel*. 2022. Vol. 321. P. 124055. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124055>.

References

1. Florentino-Madiedo L., Díaz-Faes E., Barriocanal C. Reactivity of biomass containing briquettes for metallurgical coke production. *Fuel Processing Technology*. 2019;193:212-220. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.05.017>. EDN: SOGQLT.
2. Katalambula H., Gupta R. Low-grade coals: a review of some prospective upgrading technologies. *Energy Fuels*. 2009;23(7):3392-3405. <https://doi.org/10.1021/ef801140t>.
3. Maysyuk E.P., Kozlov A.N. Technology of thermal preparation of coal for ecologically pure combustion of fuel in small boilers. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1565:012059. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1565/1/012059>. EDN: UKOJZD.
4. Vega M.F., Díaz-Faes E., Barriocanal C. Influence of the heating rate on the quality of metallurgical coke. *ACS Omega*. 2021;6(50):34615-34623. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c05007>. EDN: IQJJSX.
5. Perepelitsa A.L. *Pyrogenetic agglomeration of coals of the Irkutsk basin*. Moscow: USSR Academy of Sciences; 1963, 220 p. (In Russ.).
6. Nyathi M.S., Kruse R., Mastalerz M., Bish D.L. Nature and origin of coke quality variation in heat-recovery coke making technology. *Fuel*. 2016;176:11-19. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.02.050>.
7. Chen Y., Lee S., Tahmasebi A., Mahoney M., Yu J., Bai J. A review of the state-of-the-art research on carbon structure evolution during the coking process: from plastic layer chemistry to 3D carbon structure establishment. *Fuel*. 2020;271:117657. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117657>. EDN: AJHWGY.
8. Xu Liang, Liu Haiyu, Jin Yan, Fan Baoguo, Qiao Xiaolei, Jing Bo. Structural order and dielectric properties of coal chars. *Fuel*. 2014;137:164-171. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.08.002>.
9. Liu Zhenyu, Guo Xiaojin, Shi Lei, He Wenjing, Wu Junfei, Liu Qingya, et al. Reaction of volatiles - a crucial step in pyrolysis of coals. *Fuel*. 2015;154:361-369. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.04.006>.
10. Yu Jianglong, Lucas J.A., Wall T.F. Formation of the structure of chars during devolatilization of pulverized coal and its thermoproperties: a review. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2007;33:135-170. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2006.07.003>.
11. Lin Baiquan, Li He, Chen Zhongwei, Zheng Chunshan, Hong Yidu, Wang Zheng. Sensitivity analysis on the microwave heating of coal: a coupled electromagnetic and heat transfer model. *Applied Thermal Engineering*. 2017;126:949-962. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.08.012>.
12. Агроскин А.А. *Thermal and electrical properties of coals*. Moscow: Metallurgizdat; 1959, 268 p. (In Russ.).
13. Shi Q., Qin Y., Chen Y. Relationship between thermal conductivity and chemical structures of Chinese coals. *ACS Omega*. 2020;5(29):18424-18431. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c02281>. EDN: UORRXP.
14. Ковенский В.И., Теплицкий Ю.С. On the thermal conductivity of a blown granular bed. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2008;81(5):956-962. (In Russ.). EDN: NDLODZ.

15. Oh M.S., Peters W.A., Howard J.B. An experimental and modeling study of softening coal pyrolysis. *AIChE Journal*. 1989;35(5):775-792. <https://doi.org/10.1002/aic.690350509>.
16. Matsuoka K., Hayashi J., Chiba T. A Model for softening and resolidification of coals heated at different rates. *ISIJ International*. 1997;37(6):566-572. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.37.566>.
17. Sciazko M., Mertas B., Stepień L. Kinetic modelling of coking coal fluidity development. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020;142(2):977-990. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09487-0>. EDN: NWZGNF.
18. Atkinson B., Merrick D. Mathematical models of the thermal decomposition of coal. 4. Heat transfer and temperature profiles in coke-oven charge. *Fuel*. 1983;62:553-561. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(83\)90225-9](https://doi.org/10.1016/0016-2361(83)90225-9).
19. Apicella B., Russo C., Cerciello F., Stanzione F., Ciajolo A., Scherer V., et al. Insights on the role of primary and secondary tar reactions in soot inception during fast pyrolysis of coal. *Fuel*. 2020;275:117957. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117957>.
20. Ellison C., Abdelsayed V., Smith M., Shekhawat D. Comparative evaluation of microwave and conventional gasification of different coal types: experimental reaction studies. *Fuel*. 2022;321:124055. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124055>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Галеев Владислав Гаярович,
аспирант,
инженер лаборатории термодинамики,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, Российская Федерация,
г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130
vlad-galeev-2002@mail.ru

Донской Игорь Геннадьевич,
доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
заведующий отделом теплосиловых систем,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, Российская Федерация,
г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130
donskoy.chem@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2309-8461>

Козлов Александр Николаевич,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
заведующий лабораторией термодинамики,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, Российская Федерация,
г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130
kozlov@isem.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5983-5884>

Пензик Максим Владиславович,
кандидат химических наук,
старший научный сотрудник
лаборатории термодинамики,
Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, Российская Федерация,
г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130
maxim.penzik@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3544-9866>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladislav G. Galeev,
Postgraduate Student,
Thermodynamics Laboratory Engineer,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033,
Russian Federation
vlad-galeev-2002@mail.ru

Igor G. Donskoy,
Dr. Sci. (Eng.),
Chief Researcher, Head of the Thermal
Power Systems Department,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033,
Russian Federation
donskoy.chem@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2309-8461>

Aleksandr N. Kozlov,
Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher,
Head of the Thermodynamics Laboratory,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033,
Russian Federation
kozlov@isem.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5983-5884>

Maksim V. Penzik,
Cand. Sci. (Chem.),
Senior Researcher of the Thermodynamics Laboratory,
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033,
Russian Federation
maxim.penzik@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3544-9866>

Иса Юсуф Макарфи,
PhD,
профессор факультета химической
технологии и металлургии,
Университет Витватерсранда,
2000, Южная Африка, г. Йоханнесбург,
Авеню Яна Смэтса, 1, Браамфонтейн
yusuf.isa@wits.ac.za
<https://orcid.org/0000-0001-8272-3402>

Yusuf M. Isa,
PhD,
Professor of the School of Chemical
and Metallurgical Engineering,
University of the Witwatersrand,
Johannesburg, South Africa
1 Jan Smuts Avenue, Braamfontein 2000
yusuf.isa@wits.ac.za
<https://orcid.org/0000-0001-8272-3402>

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Донской Игорь Геннадьевич с 2026 года является членом редакционной коллегии журнала «iPolytech Journal», но не имеет отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах авторы не заявляли.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 18.12.2025 г.; одобрена после рецензирования 10.02.2026 г.; принята к публикации 16.02.2026 г.

Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

Igor G. Donskoy has been a member of the iPolytech Journal Editorial Board since 2026, but he was not involved in making decision about accepting the present article for publication. The article was subjected the Journal's review procedure. The authors do not report any other conflicts of interest

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

Information about the article

The article was submitted 18.12.2025; approved after reviewing 10.02.2026; accepted for publication 16.02.2026.

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 662.62:662.75:662.94.069

EDN: VQYMJG

DOI: 10.21285/1814-3520-2026-3-491-503



Диспергирование водоугольных суспензий путём распыления пневматической форсункой с винтовой закруткой распыляющего газового агента

Д.В. Гвоздяков^{1✉}, А.В. Зенков², Л.И. Мальцев³^{1,2}Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Российская Федерация³Институт теплофизики имени С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Российская Федерация

Резюме. Цель – разработка способа управления формой газокapelьного факела при распылении водоугольных суспензий путем создания винтовой закрутки распыляющего агента в пневматической форсунке с внешним смешением. Объектом исследования являлись водоугольные суспензии, приготовленные из отходов обогащения каменного угля по двум технологиям: с кавитационной обработкой в роторном гидродинамическом генераторе и без нее. Эксперименты по распылению проведены на специализированном стенде с использованием пневматической форсунки, модернизированной за счет тангенциальной подачи воздуха в кольцевой канал для создания закрученного потока. Измерение размеров капелъ выполнялось методом интерферометрической визуализации частиц, регистрация скоростей – методом трассерной визуализации. Исследования проведены при расходах суспензии 100 и 200 г/с и избыточном давлении распыляющего агента 0,6 и 0,9 МПа. Установлено, что кавитационная обработка суспензии снижает динамическую вязкость при сдвиговых напряжениях более 50 с⁻¹ и увеличивает содержание частиц размером до 100 мкм на 10 %. При распылении обработанной суспензии средний размер капелъ составляет от 87,8 до 112,3 мкм, что на 29–42 % меньше по сравнению с необработанной. Показано, что при увеличении расхода суспензии со 100 до 200 г/с количество мелких капелъ снижается на 5–18 % в зависимости от давления, при этом возрастает доля крупных фракций. Скорость капелъ обработанной суспензии на 10–15 % выше, чем необработанной. Закрутка распыляющего агента увеличивает угол раскрытия факела с 21,1 до 25,8° при незначительном (на 18 %) увеличении среднего размера капелъ по сравнению с прямой подачей. Предложенная модификация форсунки позволяет управлять геометрией факела при сохранении приемлемого уровня дисперсности, а применение кавитационной обработки значительно улучшает реологические свойства суспензий и характеристики распыления, что важно для эффективного сжигания водоугольных топлив в энергетических установках.

Ключевые слова: диспергирование, водоугольная суспензия, пневматическая форсунка, газокapelьная струя, винтовая закрутка распыляющего агента

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного задания Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН (проект № 126021217042-8).

Для цитирования: Гвоздяков Д.В., Зенков А.В., Мальцев Л.И. Диспергирование водоугольных суспензий путём распыления пневматической форсункой с винтовой закруткой распыляющего газового агента // iPolytech Journal. 2026. Т. 30. № 3. С. 491–503. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2026-3-491-503>. EDN: VQYMJG.

POWER ENGINEERING

Original article

Atomization of coal-water slurries using a pneumatic atomizer with helical swirl of the atomizing gas

Dmitry V. Gvozdyakov^{1✉}, Andrey V. Zenkov², Leonid I. Maltsev³^{1,2}National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation³Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation

Abstract. This study presents a method for controlling the shape of the spray plume during the atomization of coal-water slurries by introducing helical swirl of the atomizing gas in an external mixing pneumatic atomizer. Coal-water slurries obtained from coal preparation waste were investigated using two processing routes: with and

without treatment in a rotary hydrodynamic cavitation reactor. Atomization experiments were conducted on a dedicated test rig modified to introduce air tangentially into the annular channel, thereby producing a swirling flow. Droplet size was measured using interferometric particle imaging, while droplet velocity was determined by particle tracking velocimetry. The experiments were performed at slurry flow rates of 100 and 200 g/s and atomizing gas pressures of 0.6 and 0.9 MPa (gauge). Cavitation treatment reduced the dynamic viscosity of the slurry at shear rates above 50 s^{-1} and increased the fraction of particles smaller than $100 \text{ }\mu\text{m}$ by 10 %. Atomization of the treated slurry produced average droplet diameters ranging from 87.8 to $112.3 \text{ }\mu\text{m}$, which were 29–42 % smaller than those obtained with the untreated slurry. As the slurry flow rate increased from 100 to 200 g/s, the proportion of fine droplets decreased by 5–18 %, depending on the pressure, whereas the fraction of larger droplets increased. The velocity of droplets obtained from the treated slurry was 10–15 % higher than that of droplets produced from the untreated slurry. The introduced helical swirl of the atomizing gas increased the spray cone angle from 21.1° to 25.8° , while causing only a modest (18 %) increase in average droplet diameter compared with straight gas injection. The proposed atomizer modification provides effective control of spray geometry while maintaining acceptable atomization quality. In addition, cavitation treatment significantly improves the rheological properties of coal-water slurries and their atomization characteristics, which is important for efficient combustion of coal-water fuels in power generation systems.

Keywords: dispersion, coal-water slurry, compressed air atomizer, gas-droplet jet, helical swirl of the atomizing agent

Funding. Thy study was carried out within the framework of a state assignment of the Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (project No. 126021217042-8).

For citation: Gvozdyakov D.V., Zenkov A.V., Maltsev L.I. Atomization of coal-water slurries using a pneumatic atomizer with helical swirl of the atomizing gas. *iPolytech Journal*. 2026;30(3):491-503. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2026-3-491-503>. EDN: VQYMJG.

ВВЕДЕНИЕ

Методы распыления жидкостей высокоскоростными газовыми потоками находят применение в различных областях техники, включая энергетику, где их используют для сжигания многокомпонентных суспензионных топлив в котлах [1–3].

Актуальность применения новых многокомпонентных топлив обусловлена ростом стоимости традиционных энергоресурсов [4], ужесточением экологических требований [5], а также наличием больших объемов отходов обогащения угля и агропромышленного комплекса, загрязняющих окружающую среду. Их утилизация не только решает экологические задачи, но и позволяет использовать местные вторичные ресурсы для улучшения теплофизических свойств низкосортного топлива. К перспективным видам таких топлив относят водоугольные суспензии (ВУС) с добавками, включающими отходы углеобогащения (фильтр-кек) [6], отработанные нефтепродукты (масла, шламы) [7], древесные опилки [8] и продукты пиролиза древесины [9]. Введение этих компонентов в состав водоугольных топлив (ВУТ) способствует улучшению характеристик воспламенения и горения, а также утилизации отходов [10, 11]. Однако использование новых топлив сопряжено с трудностями, такими как изменение реологических свойств суспензий (вязкости,

плотности, поверхностного натяжения), что требует усовершенствования технологий их приготовления, распыления и сжигания. Несмотря на разработку экспериментальных и численных моделей для исследования горения ВУС [12, 13], проблемы, связанные с диспергированием в реальных условиях, остаются не до конца решенными.

Для распыления суспензионных топлив применяются различные пневматические форсунки, конструкции которых делятся на два основных типа: с внутренним [14] и внешним [15, 16] смешением топлива с распыляющим агентом (РА). Ключевые требования к ним – формирование мелкодисперсного факела и стабильная работа.

Отличительной чертой форсунки [15] является использование высокоскоростного РА. Истекая из конического щелевого сопла, РА формирует сходящийся поток (рис. 1), струи которого, сталкиваясь, создают осевое течение и возвратную кумулятивную струю. Подаваемая под давлением ВУС образует осесимметричную струю, которая при встрече с кумулятивной газовой струей внутри диффузора трансформируется в газожидкостный поток, движущийся вдоль его стенок. Последующее взаимодействие этого потока с высокоэнергетическим газом из щелевого канала приводит к их смешению и образованию тороидального вихря. Данные процессы, наряду с высокой скоростью

газа, обеспечивают интенсивное диспергирование топлива. Однако существенным недостатком данной форсунки на некоторых режимах является формирование узкого и чрезмерно протяженного факела, что особенно критично в малоразмерных горелочных устройствах промышленных и маломощных котлов.

Целью настоящей работы является повышение эффективности работы форсунки и разработка способа управления формой газокапельного факела путем винтовой закрутки РА, а также проведение экспериментальных исследований процессов диспергирования водоугольных суспензий и их распыления пневматической форсункой с закруткой РА.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Модифицированная пневматическая форсунка. В пневматической форсунке [15] (рис. 1) газ РА подводится в кольцевой канал через два или более патрубков, установленных вдоль оси канала.

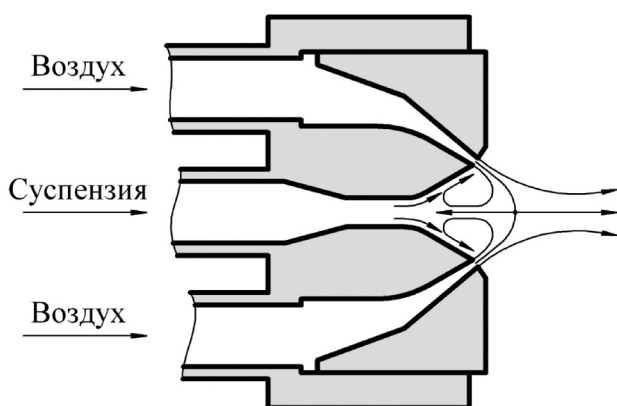


Рис. 1. Схема пневматической форсунки [15]
Fig. 1. Compressed air atomizer diagram [15]

В патенте [15] предлагается в форсунке создать винтовую закрутку потока РА, выходящего из щелевого газового сопла, путем установки винтового завихрителя перед выходом из кольцевого газового канала.

В данной работе использован другой способ закрутки, когда газовый распылительный агент вводится в кольцевой канал перед щелевым соплом по двум (или более) патрубкам с осями, установленными под углом к оси симметрии канала (например, под прямым), тангенциально к его внешней границе [15]. На рис. 2 схематично представлена схема такой реализации закрутки РА в форсунке.

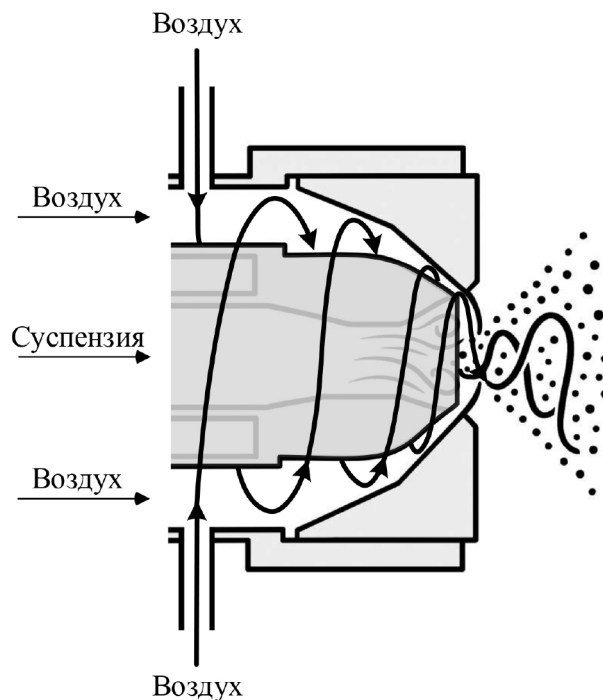


Рис. 2. Схема пневматической форсунки [15] с тангенциальной подачей распыляющего агента
Fig. 2. Diagram of a compressed air atomizer [15] with tangential feed of the atomizing agent

Вышеуказанное решение имеет следующие преимущества перед способом закрутки РА [15]: вблизи сопла, в области высоких температур (более 1000°C) в условиях камер сгорания отсутствуют дополнительные элементы, отвечающие за нормальную безотказную работу форсунки, нет дополнительных гидравлических сопротивлений.

Материалы и технология приготовления образцов. С целью приготовления образцов ВУС для экспериментальных исследований по распылению использовались мелкодисперсные отходы обогащения каменного угля, взятого на ОФ «Северная», г. Березовский Кемеровской обл. Среднее значение зольности трех проб угля составило 5,7 %. Низшая теплота сгорания: пробы угля по бомбе равна 22100 кДж/кг; ВУС 10500 кДж/кг.

Согласно первой технологии, приготовление ВУС включает два основных этапа: дозированное смешивание воды с измельченным углем и последующую кавитационную обработку (КО) полученной смеси на роторном гидродинамическом генераторе кавитаций (РГДГК). В результате процесса в РГДГК [17] достигается доизмельчение угольной массы, гомогенизация состава и химическая активация топлива. Вторая технология приго-

товления ВУС основана на смешивании измельченного угля и воды при помощи миксера (без КО). Таким образом, при проведении исследований использовались два вида ВУС.

Методика определения гранулометрического состава водоугольных суспензий. Содержание массы частиц данного размера в угольной массе суспензии определялось при помощи лазерного дифракционного анализатора SALD-210V. Для определения гранулометрического состава ВУС в данном случае был применен способ, основанный на последовательной промывке образцов суспензий на ситах с убывающими размерами ячеек. В данной работе использовались сита с размерами ячеек: 900, 630, 315, 140, 80, 63, 40, 20 мкм. По результатам измерений построены графики интегрального распределения суммарной массы частиц угля по размерам, и в том числе определяется массовая доля всех частиц размером менее минимального размера ячейки использованного ряда сит.

Методика определения вязкости суспензии. При практическом использовании

ВУС более важной характеристикой суспензии представляется динамическая вязкость, которая определяется напряжением и величиной скорости сдвига и может непосредственно характеризовать поведение ВУС в тех или иных состояниях. В данной работе динамическая вязкость измерялась с помощью вискозиметра «Реотест-2».

Согласно [18], при измерении вязкости с помощью ротационного вискозиметра может возникать погрешность из-за некачественного контроля температуры (около 3–4 %). Данная погрешность была минимизирована путем контроля температуры в помещении и поддержания ее с помощью внешнего обогревателя $25 \pm 0,1^\circ\text{C}$. Погрешность измерений вискозиметра Реотест-2 составляет до 3 %.

Методика измерения размера капель и их скоростей в струе. Экспериментальное определение характеристик газокapельных струй проводилось на специализированном стенде, представленном на рис. 3, где ВУТ распылялось в цилиндрическую камеру диаметром 1,5 м и длиной 6 м. Данная установ-

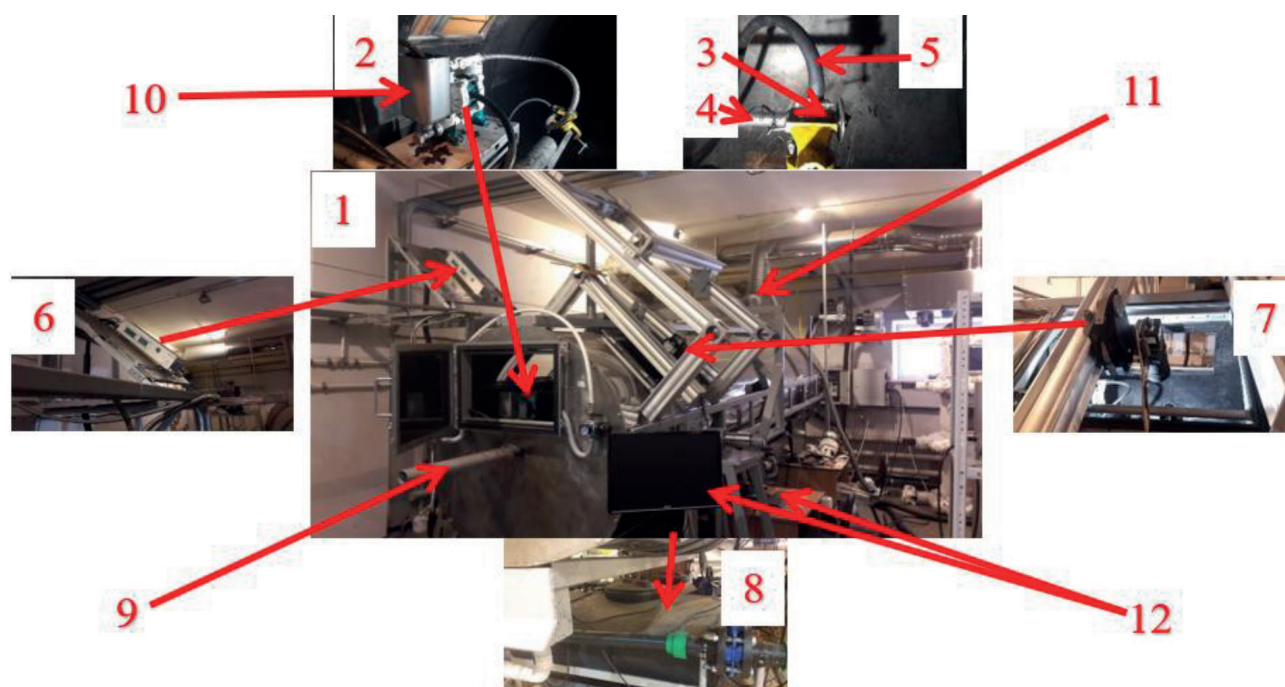


Рис. 3. Исследовательский стенд: 1 – внешний вид; 2 – насос для подачи водоугольных топлив; 3 – форсунка; 4 – линия подачи водоугольных топлив; 5 – линия подачи распыляющего агента; 6 – лазер (Beamtech Vlite-200); 7 – кросскорреляционная камера (ImperX Bobcat B2020); 8 – емкость временного хранения отработанного водоугольного топлива; 9 – направляющая крепления форсунки; 10 – емкость для водоугольных топлив; 11 – вытяжная вентиляция; 12 – компьютер и дублирующий монитор

Fig. 3. Research stand: 1 – external appearance; 2 – coal-water fuel feed pump; 3 – air atomizer; 4 – coal-water fuel feed line; 5 – atomizing agent feed line; 6 – laser (Beamtech Vlite-200); 7 – cross-correlation chamber (ImperX Bobcat B2020); 8 – temporary storage tank for spent coal-water fuel; 9 – air atomizer mounting guide; 10 – coal-water fuel tank; 11 – exhaust ventilation; 12 – computer and backup monitor

ка позволяет исследовать параметры распыления жидких и сухих топлив, а также проводить анализ работы форсунок, используемых в энергетических установках. Исследования осуществлялись на стенде [19]. Пневматическая форсунка размещалась в центре на продольной оси аэродинамического имитатора камеры сгорания котла.

Размер капель ВУС после распыления измеряли методом интерферометрической визуализации частиц IPI (Interferometric Particle Imaging). Этот метод применим для определения мгновенных пространственных распределений размеров капель в диапазоне от 10 до 1000 мкм. Скоростные характеристики капель регистрировались с помощью метода трассерной визуализации PIV (Particle Image Velocimetry) [20]. На рис. 5 схематически показана область струи, в которой осуществлялась регистрация размеров и скоростей капель.

Известно, что источниками погрешности метода PIV могут выступать:

- локальный градиент скорости;
- размер, концентрация и смещение капель;
- оптические эффекты и т.д. [20].

Однако погрешность данной техники измерения профилей скорости не превышает 8 % [21].

По различным оценкам погрешность метода IPI в идеальном случае может составлять 1,5–2 % [22]. Оценка данной погрешности авторами составила 2 %.

Алгоритм расчета случайных погрешностей разработан в соответствии с математическим аппаратом теории ошибок [23, 24].

Метод IPI отличается универсальностью, поскольку применим для анализа как сферических, так и капель произвольной формы. В случае непрозрачных капель, к которым относятся частицы ВУС, фиксируется исключительно свет, отраженный от их поверхности. Следствием этого является концентрация информации о форме капли в рассеянном излучении, которое регистрируется при определенном угле рассеяния. Этот собранный свет несет в себе достаточные данные для определения размера капли, поскольку существует прямая зависимость между частотой интерференционных полос и диаметром капли.

Регистрация капель:

- для определения размеров осуществлялась в области 226–350 мм, расположенной на продольной оси струи на расстоянии 225 мм от сопла форсунки;
- скоростей осуществлялась в области 0–350 мм, расположенной на продольной оси струи.

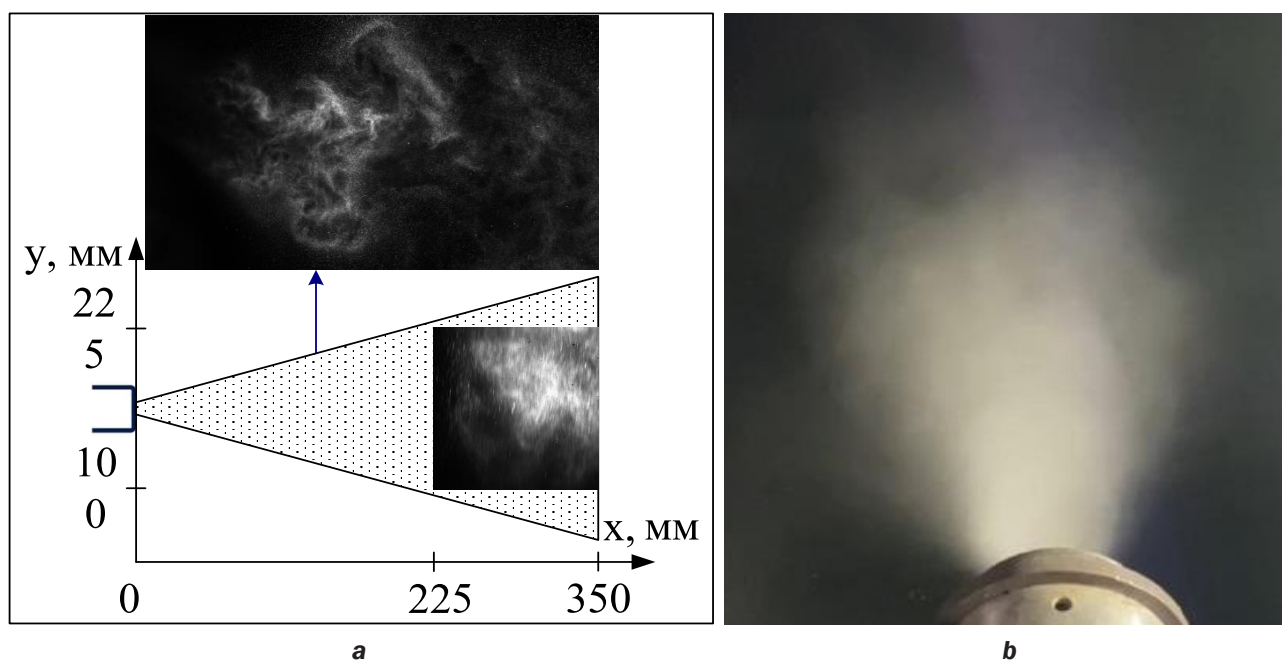


Рис. 4. Область регистрации струи: а – принципиальная схема; б – типичное изображение газокпельной струи водоугольной суспензии

Fig. 4. Jet detection area: a – schematic diagram; b – typical image of a gas-droplet jet of a coal-water slurry

Экспериментальные исследования характеристик газокапельных струй выполнены при следующих параметрах распыления (табл. 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для проведения экспериментов были приготовлены две партии образцов ВУС: а) с кавитационной обработкой и б) без обработки. Отношение жидкое/твёрдое в образцах ВУС составляет 50/50. Подготовка образцов состоялась за 30 дней до испытаний и к моменту начала экспериментов суспензии частично расслоились: образцы партии а) – незначительно и партии б) – существенно. Поэтому перед проведением экспериментов образцы (в течение 2 мин) взбалтывались миксером до визуально и тактильно наблюдаемого однородного состояния.

С целью исключения засорения насоса и форсунки в процессе распыления, а также демонстрации характеристик исходного материала, суспензии пропускались через сито с размером ячейки 1×1 мм. После фильтрации двух равных по массе порций а) и б) на ситах остаются достаточно крупные (более 1 мм) сгустки частиц угля. Ниже на фото (рис. 5)

показаны эти частицы. Как видим, суспензии, прошедшие кавитационную обработку, содержат меньше сгустков угля и меньшее количество сгустков угля, размеры которых заметно меньше.

Гранулометрический состав суспензий.

Гранулометрический состав ВУС, описанных выше, определялся путем рассева образцов суспензий, прошедших обработку на РГДГК при разных значениях времени обработки, включая ноль (то есть, без обработки). На рис. 6 показаны результаты измерений в виде интегральных распределений.

Зависимости (см. рис. 6) иллюстрируют, что содержание суммарной массы частиц размером до 100 мкм после обработки на РГДГК в течение 14 с возрастает примерно на 10 %. Увеличение времени обработки до 40 с и более в диапазоне изменения размеров частиц от 10 мкм до 1 мм мало влияет на перераспределение частиц по размерам.

Вязкость. На рис. 7 показаны зависимости динамической вязкости угольных суспензий от времени обработки ВУС на РГДГК при больших и малых значениях скоростей сдвига. Как видим, при скоростях сдвига больше 20 (1/с) кавитационная обработка ВУС даже при малых временах обработки приводит к

Таблица 1. Экспериментальные исследования характеристик газокапельных струй

Table 1. Experimental studies of gas-droplet jet characteristics

Расход водоугольной суспензии, г/с	Избыточное давление распыляющим агентом, МПа
100	0,6
200	0,6
100	0,9
200	0,9



a



b

Рис. 5. Отфильтрованная масса угольного продукта образца водоугольной суспензии: а – до кавитационной обработки; б – после кавитационной обработки

Fig. 5. Filtered mass of coal product of a coal-water slurry sample: a – before cavitation treatment; b – after cavitation treatment

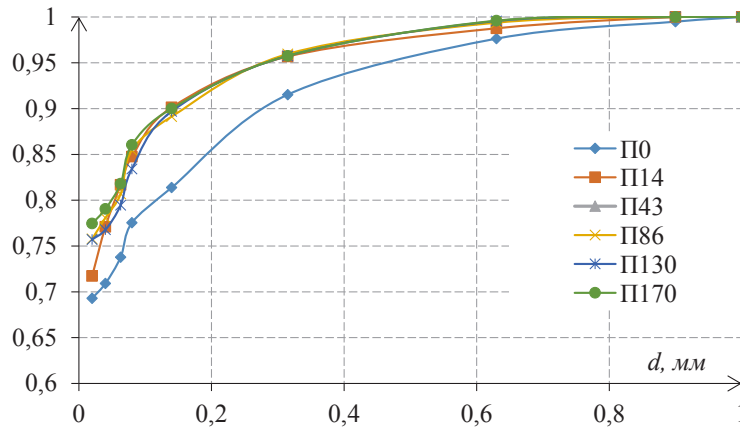


Рис. 6. Гранулометрический состав водоугольной суспензии при различных значениях времени ее обработки на роторном гидродинамическом генераторе кавитации

Fig. 6. Particle size distribution of coal-water slurry at different values of its processing time on a rotary hydrodynamic cavitation generator

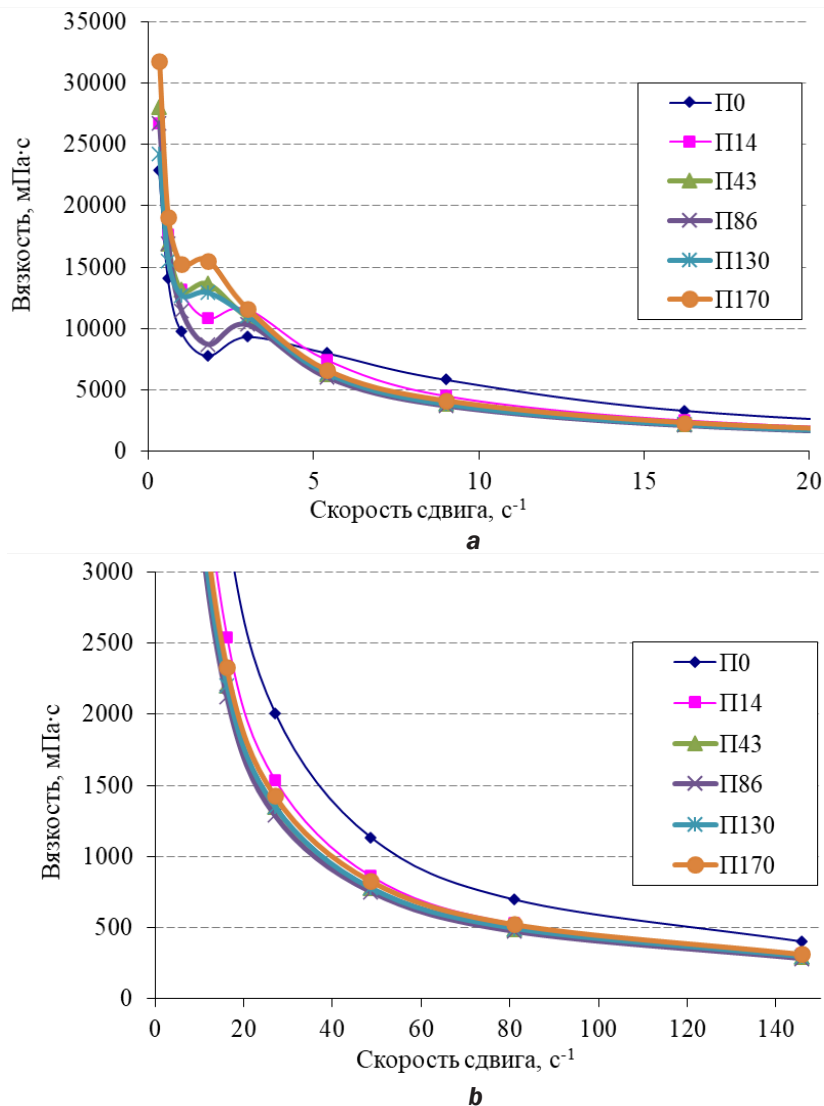


Рис. 7. Динамическая вязкость суспензий в зависимости от скорости сдвига и времени обработки на роторном гидродинамическом генераторе кавитации: а – при малых значениях; б – при больших значениях

Fig. 7. Dynamic viscosity of slurries depending on the shear rate and processing time on a rotary hydrodynamic cavitation generator: a – at low values; b – at high values

существенному снижению динамической вязкости ВУС. Увеличение времени обработки суспензий на РГДГК свыше 15–20 с влияет на вязкость мало.

Необходимо отметить, что при $\tau < 20$ (1/с) динамическая вязкость ВУС резко увеличивается, при этом в случае $\tau < 6$ (1/с) ее обработка на РГДГК приводит к большему увеличению вязкости в сравнении с необработанной суспензией.

Такие изменения динамической вязкости суспензии с постоянным содержанием дисперсной массы объясняются эффектом увеличения удельной свободной поверхности твердой фракции в результате уменьшения размера частиц угля после обработки на РГДГК.

Получить достоверные экспериментальные данные значений динамической вязкости суспензии без КО не удалось. При проведении измерений в аналогичных с ВУС с КО условиях наблюдалось проскальзывание шпинделя вискозиметра. Обусловлено это тем, что суспензия без КО существенно неоднородна.

Измерение размера и скорости капель в струе. Экспериментальные исследования процессов фрагментации струи ВУС в области исследования позволили установить влияние параметров распыления и свойств суспензии на структуру струи и ее гранулометрический состав. На рис. 8 представлен фрагмент результатов регистрации (на ма-

трице кросскорреляционной камеры) газокапельной струи ВУС и в процессе обработки этого снимка при помощи программного обеспечения ActualFlow [13].

В табл. 2 представлены результаты измерения характерных размеров и скоростей капель ВУС после КО, а в табл. 3 – без КО. Ниже в табл. 2, 3 указаны режимы с характерными значениями расходов ВУС G_1 и G_2 , 100 и 200 г/с, давления воздуха в газовой камере форсунки P_1 и P_2 , 0,6 (расход воздуха 0,1 м³/с) и 0,9 (расход воздуха 0,15 м³/с) МПа соответственно. Удельные расходы воздуха на распыление ВУС составили 1,0 и 0,75 м³/кг.

Экспериментально установлено, что после распыления ВУС, подверженной кавитационной обработке, при избыточном давлении РА 0,6 МПа и увеличении расхода суспензии от 100 до 200 г/с, общее количество капель ВУС размером менее 90 мкм снижается на 12 %. Число капель суспензии – размером от 91 до 150 мкм и более 151 мкм – увеличивается на 12 и 33 % соответственно. При росте избыточного давления распыляющего агента в газовой камере форсунки до 0,9 МПа и увеличении расхода суспензии до значения, соответствующего G_2 , количество капель ВУС размером менее 90 мкм снижается на 9 %. Рост числа капель суспензии размером от 91 до 150 мкм, более 151 мкм при таком изменении давления воздуха составляет 7 и 48 %.

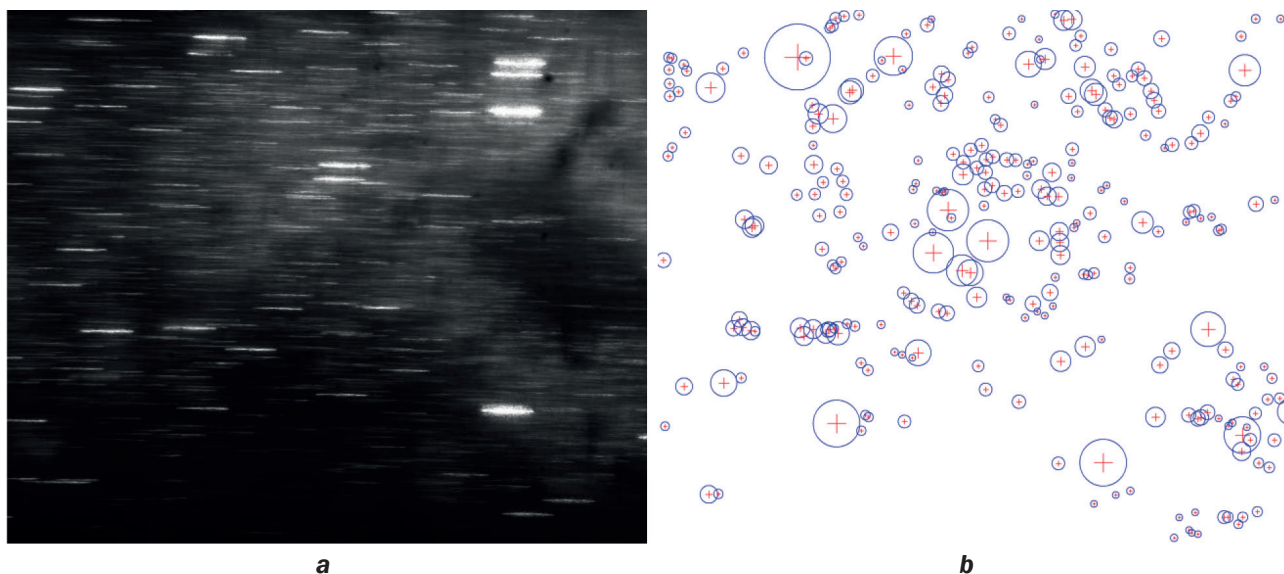


Рис. 8. Образы капель суспензии (пример): а – на матрице кросскорреляционной камеры; б – в процессе обработки
Fig. 8. Images of slurry droplets (example): a – on cross-correlation chamber matrix; b – during processing

Таблица 2. Размер и скорости капель водоугольной суспензии с кавитационной обработкой
Table 2. Size and velocity of coal-water slurry droplets with cavitation treatment

Размер, мкм	ВУС после КО		ВУС после КО	
	Режим: G_1, P_1	Режим: G_2, P_2	Режим: G_1, P_1	Режим: G_2, P_2
<90 мкм, %	61,8	54,2	64,5	58,6
91–150 мкм, %	23,8	26,8	27,4	29,4
>151 мкм, %	14,3	19	8,1	12
Среднее, мкм	96,2	112,3	87,8	95,3
Средняя скорость, м/с	45,9	35,6	46,5	38,4
<40 м/с, %	43,80	54,20	42,20	53,30
41–60 м/с, %	26,90	24,50	28,00	22,70
61–80 м/с, %	22,40	17,20	22,60	20,80
>80 м/с, %	6,90	4,10	7,20	3,20

Анализ результатов показал, что после распыления ВУС (после КО) при давлении РА 0,6 МПа средняя скорость капель суспензии в струе при ее расходе G_1 и G_2 составляет 46 и 36 м/с, соответственно. После распыления ВУС (после КО) и давлении РА 0,9 МПа средняя скорость капель суспензии в струе при ее расходе G_1 и G_2 составляет 46 и 38 м/с.

Результаты исследований изменения дисперсного состава газодожельной струи ВУС без КО иллюстрируют аналогичную (табл. 2) зависимость. При избыточном давлении РА 0,6 МПа и увеличении расхода суспензии от 100 г/с до 200 г/с количество капель ВУС размером менее 90 мкм снижается на 18 %. Количество капель суспензии размером от 91 до 150 мкм и более 151 мкм увеличивается на 8 и 15 % соответственно. При росте избыточного давления распыляющего агента в газовой камере форсунки до 0,9 МПа и увеличении расхода суспензии до значения,

соответствующего G_2 , количество капель ВУС размером менее 90 мкм снижается на 5 %. Рост числа капель суспензии размером от 91 до 150 мкм и более 151 мкм составляет 2 и 22 % соответственно.

После распыления ВУС (без КО) и давлении РА 0,6 МПа средняя скорость капель суспензии в струе при ее расходе G_1 и G_2 составляет 41 и 36 м/с. После распыления ВУС (без КО) и давлении РА 0,9 МПа средняя скорость капель суспензии в струе при ее расходе G_1 и G_2 составляет 42 и 36 м/с соответственно.

Дополнительно была также исследована прямая подача распыляющего агента (без закрутки воздуха в газовой камере форсунки) на форсунку при давлении воздуха 0,6 МПа и расходе кавитационно-обработанной ВУС 200 г/с (G_2). Полученные результаты дали возможность провести сравнительный анализ двух режимов диспергирования

Таблица 3. Размер и скорость капель водоугольной суспензии без кавитационной обработки
Table 3. Size and velocity of coal-water slurry droplets without cavitation treatment

Размер, мкм	Водоугольная суспензия без кавитационной обработки			
	Режим			
	G_1, P_1	G_2, P_2	G_1, P_1	G_2, P_2
<90 мкм, %	34,5	28,4	30,1	28,6
91–150 мкм, %	51,3	55,3	57,2	55,9
>151 мкм, %	14,2	16,3	12,7	15,5
Среднее, мкм	154,4	164,3	138,2	157,6
Средняя скорость, м/с	41,2	36,2	42,3	35,7
<40 м/с, %	41,30	50,80	43,50	51,40
41–60 м/с, %	28,70	25,60	24,60	20,80
61–80 м/с, %	20,80	19,40	20,50	18,30
>80 м/с, %	9,20	4,20	11,40	9,50

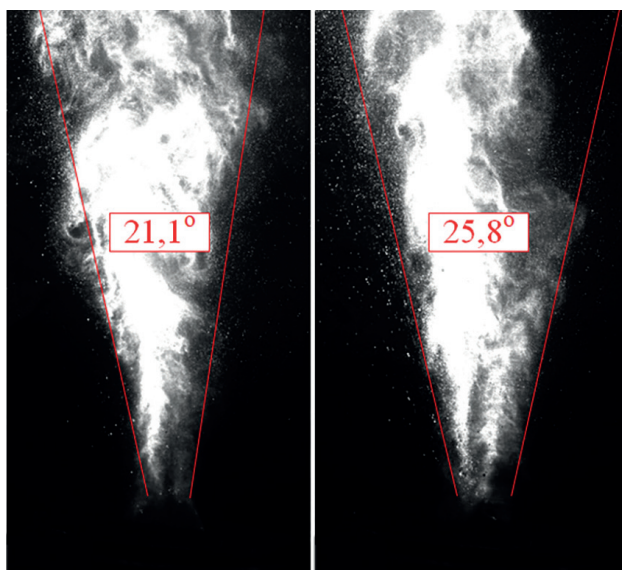
**a****b**

Рис. 9. Угол раскрытия струи: а – при прямой подаче воздуха; б – подача воздуха с завихрением

Fig. 9. Jet expansion angle: a – direct air supply; b – air supply with swirl

сuspензии: с прямой подачей РА и с его закруткой в газовой камере форсунки. Так, средний размер капель ВУС при прямой подаче распыляющего агента составил 103,6 мкм, что на 8 % меньше, чем при тангенциальной подаче воздуха. Такое отличие объясняется тем, что при прямой подаче воздуха большая часть его энергии тратится на дробление капель ВУС. В случае с закруткой РА часть его энергии расходуется на закрутку потока и торможение за счет окружающего воздуха. Поэтому средний размер капель незначительно отличается. При этом, при прямой подаче РА, его удельный расход существенно выше (в среднем на 30 %) в сравнении с тангенциальной подачей РА на форсунку и составляет 2 м³/кг и 1,5 м³/кг при давлении воздуха в газовой камере форсунки Р₁ и Р₂, 0,6 (расход воздуха 0,1 м³/с) и 0,9 (расход воздуха 0,15 м³/с) МПа, соответственно. Таким образом, при использовании форсунки с закруткой РА расходуется меньше воздуха

при незначительном отличии среднего размера капель в струе.

Анализ изменения угла раскрытия струи в зависимости от способа подачи РА показал незначительные отличия. В целом значение угла раскрытия струи в случае с завихрением РА составило 25,8°. С прямой подачей РА угол раскрытия струи составил 21,1°.

На рис. 9 показаны кадры процессов распыления, иллюстрирующие угол раскрытия струи.

На практике увеличение угла раскрытия струи приведет к образованию большего объема топливовоздушной смеси, что может позволить повысить эффективность сжигания сuspензии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований изменения дисперсного состава показали, что количество капель топлива размером менее 90 мкм при тангенциальной подаче воздуха снижается на 18 %, в сравнении с прямой подачей распыляющего агента. При росте избыточного давления распыляющего агента до 0,9 МПа количество капель сuspензии размером <90 мкм снижается незначительно, а количество капель сuspензии размером >151 мкм составляет 22 %, в сравнении с прямой подачей распыляющего агента. При прямой подаче распыляющего агента его удельный расход существенно выше (в среднем на 30 %) в сравнении с тангенциальной подачей распыляющего агента. Установлено, что угол раскрытия факела отличается незначительно (не более 4°). Таким образом, проведенные исследования подтверждают гипотезу о возможности изменения формы факела форсунки с внешним смешением с помощью тангенциального подвода к ней воздуха, что позволит повысить ее эффективность, особенно в малоразмерных горелочных устройствах промышленных и маломощных котлов.

Список источников

1. Мурко В.И., Карпенко В.И., Баранова М.П., Бухмиров В.В., Темлянцева Е.Н. Особенности сжигания композиционных водоугольных топлив // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2024. № 3. С. 5–12. <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2024.3.005-012>. EDN: QBISII.
2. Jiang B., Li J., Chen D., Wang Li., Yang W. Synthesis and performance of sulfonated poly(styrene-alt-maleic anhydride) for coal-water slurry: the effect of structure on slurryability and stability // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2024. Vol. 685. P. 133154. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.133154>. EDN: EBYZGA.
3. Zaostrovsky A.N., Murko V.I. Production and use of highly reactive water-coal fuel // Coke and Chemistry. 2023. Vol. 66. Iss. 9. P. 458–464. <https://doi.org/10.3103/s1068364x23701120>. EDN: QFLISJ.

4. Hille E. Europe's energy crisis: are geopolitical risks in source countries of fossil fuels accelerating the transition to renewable energy? // *Energy Economics*. 2023. Vol. 127. P. 107061. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.107061>. EDN: DGQMPM.
5. Cherwoo L., Gupta I., Flora G., Verma R., Kapil M., Arya Sh.K., et al. Biofuels an alternative to traditional fossil fuels: a comprehensive review // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2023. Vol. 60. P. 103503. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103503>. EDN: XYHBUB.
6. Zhang K., Zhang Y., Zhou L., Li H., Shi W., Cheng X., et al. Experimental and theoretical insight into the effect of a novel composite dispersant on the properties of coal pitch water slurry // *Fuel*. 2024. Vol. 365. P. 131281. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131281>. EDN: KAIKH.
7. Antonov D.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Fragmentation of heated droplets of coal-water slurries containing petrochemicals // *Applied Thermal Engineering*. 2021. Vol. 195. P. 117190. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117190>. EDN: IUZHW.
8. Dorokhov V.V., Nyashina G.S., Strizhak P.A. Anthropogenic emissions from coal-water slurry combustion: Influence of component composition and registration methods // *Environmental Research*. 2023. Vol. 223. P. 115444. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115444>. EDN: PBVXL.
9. Gvozdyakov D.V., Zenkov A.V., Kaltaev A.Zh. Characteristics of spraying and ignition of coal-water fuels based on lignite and liquid pyrolysis products of wood waste // *Energy*. 2022. Vol. 257. P. 124813. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124813>. EDN: LDMDWE.
10. Wang J., Wang Sh., Liu J., Chen C., Chen Y., Zheng X. Eco-friendly utilization of waste oil for preparing coal water slurry: additive suitability and dispersion mechanism // *Fuel*. 2023. Vol. 333. P. 126314. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126314>. EDN: ZMCEOI.
11. Sharma S.K., Jones A.R. Radiative transfer characteristics of clouds of atomised coal water slurry drops in a furnace // *Fuel*. 2002. Vol. 81. Iss. 1. P. 59–63. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00115-6](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00115-6).
12. Gaber C., Wachter P., Hochenauer C., Demuth M. Experimental investigation and demonstration of pilot-scale combustion of oil-water emulsions and coal-water slurry with pronounced water contents at elevated temperatures with the use of pure oxygen // *Fuel*. 2020. Vol. 282. P. 118692. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118692>. EDN: OQIIZR.
13. Alekseenko S.V., Dekterev A.A., Maltsev L.I., Kuznetsov V.A. Implementation of a three-stage scheme for the co-combustion of pulverized coal and coal-water slurry in an industrial boiler to reduce NOx emissions // *Process Safety and Environmental Protection: Transactions of the Institution of Chemical Engineers*. 2023. Vol. 169. Part B. P. 313–327. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.11.034>. EDN: CSTGUY.
14. Deng Jianxin, Ding Zeliang, Zhou Houming, Tan Yuanqiang. Performance and wear characteristics of ceramic, cemented carbide, and metal nozzles used in coal–water–slurry boilers // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2009. Vol. 27. Iss. 5. P. 919–926. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2009.05.007>.
15. Патент № 2346756, Российская Федерация, С1, В05В 7/08. Пневматическая форсунка / Л.И. Мальцев; заявители и патентообладатели Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук; Общество с ограниченной ответственностью Агентство «Городок». № 2007118139/12. Заявл. 15.05.2007; опубли. 20.02.2009. EDN: NRWQN.
16. Shadrin E.Y., Anufriev I.S., Butakov E.B., Kopyev E.P., Alekseenko S.V., Maltsev L.I., et al. Coal-water slurry atomization in a new pneumatic nozzle and combustion in a low-power industrial burner // *Fuel*. 2021. Vol. 303. P. 121182. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121182>. EDN: CZSNWN.
17. Гвоздяков Д.В., Зенков А.В., Мальцев Л.И., Поджаров Ю.С. Влияние кавитационной обработки на свойства водоугольных суспензий с добавками пирогенетической жидкости // *iPolytech Journal*. 2023. Т. 27. № 2. С. 297–309. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-297-309>. EDN: XKCIZP.
18. Mansour A., Chigier N. Air-blast atomization of non-Newtonian liquids // *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 1995. Vol. 58. Iss. 2-3. P. 161–194. EDN: APMHEB.
19. Gvozdyakov D.V., Zenkov A.V. The effect of coal-water slurries spraying method on the characteristics of gas-droplet jets // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2026. Vol. 172. P. 110546. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2026.110546>. EDN: XQVHGQ.
20. Anufriev I.S., Shadrin E.Y., Kopyev E.P., Alekseenko S.V., Sharypov O.V. Study of liquid hydrocarbons atomization by supersonic air or steam jet // *Applied Thermal Engineering*. 2019. Vol. 163. P. 114400. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114400>. EDN: EEVATZ.
21. Khashehchi M., Harun Z. Accuracy of tomographic particle image velocimetry data on a turbulent round jet // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2019. Vol. 77. P. 61–72. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2019.03.005>.
22. König G., Anders K., Frohn A. A new light-scattering technique to measure the diameter of periodically generated moving droplets // *Journal of Aerosol Science*. 1986. Vol. 17. Iss. 2. P. 157–167.
23. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента / пер. с англ. Е.Г. Коваленко; под ред. Н.П. Бусленко. М.: Мир, 1972. 381 p.
24. Зайдель А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений. Ленинград: Наука, 1968. 96 p.
25. Alekseenko S.V., Kuznetsov V.A., Mal'tsev L.I., Dekterev A.A., Chernetskii M.Y. Analysis of combustion of coal-water fuel in low-power hot-water boiler via numerical modeling and experiments // *Journal of Engineering Thermophysics*. 2019. Vol. 28. Iss. 2. P. 177–189. <https://doi.org/10.1134/S1810232819020024>. EDN: QJHHPT.
26. Shlegel N.E., Tkachenko P.P., Strizhak P.A. Influence of viscosity, surface and interfacial tensions on the liquid droplet collisions // *Chemical Engineering Science*. 2020. Vol. 220. P. 115639. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115639>. EDN: IPYZPJ.

References

1. Murko V.I., Karpenok V.I., Baranova M.P., Bukhmirov V.V., Temlyantseva E.N. Features of combustion of composite coal-water fuel. *Vestnik of the Ivanovo State Power Engineering University*. 2024;3:5-12. (In Russ.). <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2024.3.005-012>. EDN: QBISIL.
2. Jiang B., Li J., Chen D., Wang Li., Yang W. Synthesis and performance of sulfonated poly (styrene-alt-maleic anhydride) for coal-water slurry: the effect of structure on slurriability and stability. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2024;685:133154. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.133154>. EDN: EBYZGA.
3. Zaostrovsky A.N., Murko V.I. Production and use of highly reactive water-coal fuel. *Coke and Chemistry*. 2023;66(9):458-464. <https://doi.org/10.3103/s1068364x23701120>. EDN: QFLISJ.
4. Hille E. Europe's energy crisis: are geopolitical risks in source countries of fossil fuels accelerating the transition to renewable energy? *Energy Economics*. 2023;127:107061. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.107061>. EDN: DGQMPM.
5. Cherwoo L., Gupta I., Flora G., Verma R., Kapil M., Arya Sh.K., et al. Biofuels an alternative to traditional fossil fuels: a comprehensive review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2023;60:103503. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103503>. EDN: XYHBUB.
6. Zhang K., Zhang Y., Zhou L., Li H., Shi W., Cheng X., et al. Experimental and theoretical insight into the effect of a novel composite dispersant on the properties of coal pitch water slurry. *Fuel*. 2024;365:131281. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131281>. EDN: KAIKH.
7. Antonov D.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Fragmentation of heated droplets of coal-water slurries containing petrochemicals. *Applied Thermal Engineering*. 2021;195:117190. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117190>. EDN: IUZVHW.
8. Dorokhov V.V., Nyashina G.S., Strizhak P.A. Anthropogenic emissions from coal-water slurry combustion: Influence of component composition and registration methods. *Environmental Research*. 2023;223:115444. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115444>. EDN: PBVXL.
9. Gvozdyakov D.V., Zenkov A.V., Kaltaev A.Zh. Characteristics of spraying and ignition of coal-water fuels based on lignite and liquid pyrolysis products of wood waste. *Energy*. 2022;257:124813. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124813>. EDN: LDMDWE.
10. Wang J., Wang Sh., Liu J., Chen C., Chen Y., Zheng X. Eco-friendly utilization of waste oil for preparing coal water slurry: additive suitability and dispersion mechanism. *Fuel*. 2023;333:126314. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126314>. EDN: ZMCEOI.
11. Sharma S.K., Jones A.R. Radiative transfer characteristics of clouds of atomised coal water slurry drops in a furnace. *Fuel*. 2002;81(1):59-63. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00115-6](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00115-6).
12. Gaber C., Wachter P., Hochenauer C., Demuth M. Experimental investigation and demonstration of pilot-scale combustion of oil-water emulsions and coal-water slurry with pronounced water contents at elevated temperatures with the use of pure oxygen. *Fuel*. 2020;282:118692. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118692>. EDN: OQIIZR.
13. Alekseenko S.V., Dekterev A.A., Maltsev L.I., Kuznetsov V.A. Implementation of a three-stage scheme for the co-combustion of pulverized coal and coal-water slurry in an industrial boiler to reduce NOx emissions. *Process Safety and Environmental Protection: Transactions of the Institution of Chemical Engineers*. 2023;169(B):313-327. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.11.034>. EDN: CSTGUY.
14. Deng Jianxin, Ding Zeliang, Zhou Houming, Tan Yuanqiang. Performance and wear characteristics of ceramic, cemented carbide, and metal nozzles used in coal-water-slurry boilers. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2009;27(5):919-926. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2009.05.007>.
15. Maltsev L.I. *Compressed air atomiser*. Patent RF, no. 2346756; 2009. (In Russ.). EDN: NRWQNP.
16. Shadrin E.Y., Anufriev I.S., Butakov E.B., Kopyev E.P., Alekseenko S.V., Maltsev L.I., et al. Coal-water slurry atomization in a new pneumatic nozzle and combustion in a low-power industrial burner. *Fuel*. 2021;303:121182. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121182>. EDN: CZSNWN.
17. Gvozdyakov D.V., Zenkov A.V., Maltsev L.I., Podzharov Yu.S. Influence of cavitation treatment on the properties of coal-water slurries with pyrogenetic liquid and characteristics of their atomization by a pneumatic nozzle. *iPolytech Journal*. 2023;27(2):297-309. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-297-309>. EDN: XKCIZP.
18. Mansour A., Chigier N. Air-blast atomization of non-Newtonian liquids. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 1995;58(2-3):161-194. EDN: APMHEB.
19. Gvozdyakov D.V., Zenkov A.V. The effect of coal-water slurries spraying method on the characteristics of gas-droplet jets. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2026;172:110546. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2026.110546>. EDN: XQVHGQ.
20. Anufriev I.S. Shadrin E.Y., Kopyev E.P., Alekseenko S.V., Sharypov O.V. Study of liquid hydrocarbons atomization by supersonic air or steam jet. *Applied Thermal Engineering*. 2019;163:114400. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114400>. EDN: EEVATZ.
21. Khashehchi M., Harun Z. Accuracy of tomographic particle image velocimetry data on a turbulent round jet. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2019;77:61-72. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2019.03.005>.
22. König G., Anders K., Frohn A. A new light-scattering technique to measure the diameter of periodically generated moving droplets. *Journal of Aerosol Science*. 1986;17(2):157-167.

23. Schenck H. Theories of engineering experimentation. New York; St. Louis; San Francisco; Toronto; London; Sydney. (Russ. ed: *Teoriya inzhenernogo eksperimenta*. Moscow: Mir; 1972, 381 p.)
24. Zaidel A.N. *Elementary estimates of measurement errors*. Leningrad: Nauka; 1968, 96 p. (In Russ.).
25. Alekseenko S.V., Kuznetsov V.A., Mal'tsev L.I., Dekterev A.A., Chernetskii M.Y. Analysis of combustion of coal-water fuel in low-power hot-water boiler via numerical modeling and experiments. *Journal of Engineering Thermophysics*. 2019;28(2):177-189. <https://doi.org/10.1134/S1810232819020024>. EDN: QJHHPT.
26. Shlegel N.E., Tkachenko P.P., Strizhak P.A. Influence of viscosity, surface and interfacial tensions on the liquid droplet collisions. *Chemical Engineering Science*. 2020;220:115639. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115639>. EDN: IPYZPJ.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гвоздяков Дмитрий Васильевич,
кандидат технических наук, доцент,
доцент Научно-образовательного центра
И.Н. Бутакова,
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
634050, Российская Федерация,
г. Томск, просп. Ленина, 30 а
✉ dim2003@tpu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7866-9180>

Зенков Андрей Викторович,
кандидат технических наук,
доцент Научно-образовательного центра
И.Н. Бутакова,
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
634050, Российская Федерация,
г. Томск, просп. Ленина, 30 а
avz41@tpu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7763-3266>

Мальцев Леонид Иванович,
доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
Институт теплофизики
им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Российская Федерация,
г. Новосибирск, просп. Академика
Лаврентьева, 1
maltzev@itp.nsc.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4699-8289>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitry V. Gvozdyakov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Butakov
Research Center,
National Research Tomsk Polytechnic University,
30a, Lenin pr., Tomsk 634050, Russian Federation
✉ dim2003@tpu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7866-9180>

Andrey V. Zenkov,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Butakov
Research Center,
National Research Tomsk Polytechnic University,
30a, Lenin pr., Tomsk 634050, Russian Federation
avz41@tpu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7763-3266>

Leonid I. Maltsev,
Dr. Sci. (Eng.),
Chief Researcher,
Kutateladze Institute of Thermophysics,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
1, Academician Lavrentiev pr., Novosibirsk 630090,
Russian Federation
maltzev@itp.nsc.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4699-8289>

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 24.11.2025 г.; одобрена после рецензирования 16.02.2026 г.; принята к публикации 09.12.2025 г.

Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 24.11.2025; approved after reviewing 16.02.2026 ; accepted for publication 09.12.2025.

ЭНЕРГЕТИКА

Обзорная статья

УДК 621.311:004.032.26

EDN: XEPLFE

DOI: 10.21285/1814-3520-2026-3-504-523



Генеративно-сопоставительные искусственные нейронные сети для решения задач управления режимами и планирования развития энергосистем

П.Ю. Губин^{1✉}, Р.Т. Валиев², А.М. Верхозин³

¹⁻³Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Российская Федерация

Резюме. Цель – провести обзор применения генеративно-сопоставительных нейронных сетей для решения задач управления и планирования режимов электроэнергетических систем с выявлением перспективных направлений применения и развития данных моделей. Рассмотрено около 50 российских и зарубежных работ, в каждой из которых были проанализированы преимущества и недостатки предложенных решений, перспективные направления их развития. Также в ходе вычислительного эксперимента библиотеки методов машинного обучения PyTorch в работе реализована и протестирована модель генеративно-сопоставительной нейронной сети для получения случайных суточных почасовых графиков выработки мощности солнечными электростанциями. Анализ литературных источников выявил два основных направления применения генеративных искусственных нейронных сетей при управлении режимами энергосистем. Чаще всего с помощью таких моделей предлагается генерировать сценарии выдаваемой мощности возобновляемыми источниками энергии, а также мощности нагрузок в узлах энергосистем для задач планирования развития, прогнозирования, анализа надежности. Также показано, что генеративные сети с входным условием применяются в качестве вероятностных моделей объектов для анализа значимости влияющих факторов. В ходе проведенного вычислительного эксперимента модель генеративной сети позволила получать случайные суточные графики выдаваемой мощности солнечных электростанций, которые по вероятностным метрикам неотличимы от реальных. Показано, что основными сложностями при работе с такими моделями являются нестабильное обучение, а также сложность применения одной модели для одновременной генерации большого количества данных. Таким образом, в проведенном обзоре рассмотрены примеры применения генеративно-сопоставительных нейронных сетей, а также разобраны конкретные алгоритмы обучения и их применения. Решение выявленной проблемы, а также обучение генеративных сетей для решения вспомогательных задач при оптимизации режимов – это наиболее перспективные направления для дальнейших исследований.

Ключевые слова: генеративно-сопоставительные сети, искусственный интеллект, электроэнергетические системы, управление режимами, возобновляемые источники энергии, генерация данных, прогнозирование, оптимизация режимов, балансовая надежность, планирование развития

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 25-29-00620.

Для цитирования: Губин П.Ю., Валиев Р.Т., Верхозин А.М. Генеративно-сопоставительные искусственные нейронные сети для решения задач управления режимами и планирования развития энергосистем // iPolytech Journal. 2026. Т. 30. № 3. С. 504–523. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2026-3-505-523>. EDN: XEPLFE.

POWER ENGINEERING

Review article

Generative adversarial networks for power system operation and expansion planning

Pavel Yu. Gubin^{1✉}, Rustam T. Valiev², Andrey M. Verkhozin³

¹⁻³Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russian Federation

Abstract. The study aims to review the application of generative adversarial networks (GANs) in power system operation and expansion planning, identifying promising areas for their implementation and future

development. The article examines approximately 50 Russian and international publications, analyzing the advantages, limitations, and prospects of the proposed solutions. Additionally, a computational experiment using the PyTorch library was conducted to implement and test a GAN model for generating synthetic hourly solar power profiles. Literature analysis identified two primary applications of generative models in power systems: scenario generation for renewable energy output and nodal loads to support expansion planning, forecasting, and reliability assessment. Conditional generative networks are also shown to be used as probabilistic models for analyzing the significance of influencing factors. In the computational experiment, the generative network model enabled the generation of stochastic daily power output profiles for solar power plants that are indistinguishable from real ones in terms of probabilistic metrics. The study highlights that the primary challenges in using such models are unstable training and the difficulty of applying a single model to simultaneously generate large amounts of data. This review examines various GAN applications and analyzes specific training and application algorithms. Solving the identified issues and training generative networks to address auxiliary tasks in operational optimization represent the most promising areas for further research.

Keywords: generative adversarial networks, artificial intelligence, electric power systems, operation control, renewable energy sources, data generation, forecasting, optimal power flow, generation adequacy, expansion planning

Funding. The work was supported by the Russian Science Foundation (RSF), grant no. 25-29-00620.

For citation: Gubin P.Yu., Valiev R.T., Verkhozin A.M. Generative adversarial networks for power system operation and expansion planning. *iPolytech Journal*. 2026;30(3):504-523. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2026-3-504-523>. EDN: XEPLFE.

ВВЕДЕНИЕ

Методы искусственного интеллекта (ИИ), в частности машинного обучения, быстро развиваются и постепенно внедряются в промышленности. Они позволяют лучше – быстрее и с большей точностью – решить старые задачи и вводить новые с целью повышения экономической эффективности и снижения издержек. Приоритет развития этих технологий закреплен в Указе о развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации⁴.

В электроэнергетике новые подходы помогают лучше решить существующие проблемы управления и эксплуатации энергосистемами (ЭЭС). Хорошо известны решения на основе методов машинного обучения, которые позволяют определить место и классифицировать повреждения на линиях электропередачи [1, 2], ускорить алгоритмы противоаварийной автоматики [3], спрогнозировать потребление и выработку возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [4], найти источники коммерческих потерь [5]. Есть и другие менее распространенные и узкоспециализированные методы ИИ, которые могут найти место в управлении и планировании развития ЭЭС.

Генеративно-сопязательная нейронная сеть GAN (Generative Adversarial Network) –

это специальный вид искусственной нейронной сети (ИНС), предназначенный для генерации новых данных согласно некоторому закону распределения вероятностей, который сеть «запомнила» в ходе обучения [6]. Такие ИНС сегодня часто используют для генерации изображений и видео. Способность воссоздавать данные согласно некоторому многомерному сколь угодно сложному вероятностному распределению, которое невозможно представить функционально, делает этот вид ИНС полезным в некоторых задачах электроэнергетики. С помощью GAN можно генерировать случайные графики нагрузки потребителей или выработки станций и использовать их при оптимизации режимов, расчете надежности и планировании развития ЭЭС. Достоверные случайные профили⁵ мощности можно получить и другими способами, используя теорию случайных процессов или метод копул для учета корреляции случайных величин [7].

Эти методы вычислительно затратны и сложны. Они требуют от инженера высокой квалификации, предварительного анализа данных, разработки сложных моделей случайных процессов. В итоге там, где GAN позволила бы генерировать случайные профили и работать с ними, вводятся допущения, модель расчета упрощается, а достоверность

⁴О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации: Указ Президента Российской Федерации от 10.10.2019 № 490 (ред. от 20.07.2025) // Официальный интернет-портал правовой информации. Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201910100004> (дата обращения: 20.10.2025).

⁵Далее в статье понятия «график мощности» и «профиль мощности» или просто «профиль» эквивалентны.

снижается. Помимо GAN для генерации данных используют также вариационные автокодировщики VAE (Variational AutoEncoder) [8] и состязательные автокодировщики AAE (Adversarial AutoEncoder) [9]. Эти модели могут быть применены для решения тех же задач, но сейчас менее распространены. Далее в статье они не обсуждаются.

В отечественных публикациях и исследованиях, посвященных электроэнергетике, генеративно-состязательные модели сегодня почти не применяются. В ходе сбора материалов для обзора была найдена всего одна статья, в которой GAN использовалась при прогнозировании цен на электроэнергию на рынке на сутки вперед. Вместе с тем эти модели могут быть полезны для решения множества задач помимо генерации данных, а процесс их обучения немногим сложнее, чем для современных моделей глубокого обучения. Данная работа носит обзорно-демонстрационный характер. Ее цель – показать исследователям и инженерам новые пути решения существующих задач управления режимами энергосистем с помощью GAN. В статье рассмотрены основные идеи GAN и ключевые модели этого вида ИНС, представлен обзор применения GAN в электроэнергетике, показан результат работы простой GAN для генерации суточных графиков мощности солнечных электростанций (СЭС).

ПРИНЦИП РАБОТЫ GAN

Принцип работы GAN для наглядности рассматривается на примере задачи генерации суточного графика нагрузки с шагом 1 ч. В основе наиболее простой версии GAN лежат две ИНС: генератор и дискриминатор. «Состязательность» заключается в разных целях обучения этих сетей, хотя проходит оно совместно. Задача генератора – создать такой профиль потребления, чтобы дискриминатор не смог отличить его от настоящего. Задача дискриминатора – это задача классификации, он должен отличить график от поддельного, созданного генератором.

Схема GAN показана на рис. 1. На вход генератора подается случайный нормальный шум – вектор псевдослучайных значений, полученных с помощью стандартного нормального распределения. ИНС генератора на основе шума создает вектор значений требуемой размерности: для суточного графика

нагрузки по часам – это 24 значения. Дискриминатор получает на вход истинные профили из обучающей выборки и поддельные профили от генератора. Его задача правильно разметить эти графики и выделить подделки.

Математически целевая функция обучения для GAN выглядит так (1):

$$\min_{\theta_G} \max_{\theta_D} V(D, G) = \mathbb{E}_{\mathbf{x} \sim p_{\text{истина}}} [\ln D(\mathbf{x}; \theta_D)] + \mathbb{E}_{\mathbf{z} \sim p_{\text{шум}}} [\ln(1 - D(G(\mathbf{z}; \theta_G); \theta_D))], \quad (1)$$

где $\mathbf{x}$ и $\mathbf{z}$ – векторы реальных данных и шума; $p_{\text{истина}}$ и $p_{\text{шум}}$ – распределение реальных данных и распределение нормального шума; $D(\mathbf{x}; \theta_D)$ – выходное значение дискриминатора с весами θ_D , на вход которого подается вектор данных $\mathbf{x}$; $G(\mathbf{z}; \theta_G)$ – вектор данных, созданный генератором с весами θ_G , на вход которого подается вектор шума $\mathbf{z}$.

При правильном обучении максимум целевой функции (1) соответствует случаю, когда дискриминатор правильно определяет все сгенерированные графики нагрузки. Минимум – случаю, когда дискриминатор не может отличить реальные графики от поддельных. Процесс обучения происходит последовательно по так называемым «эпохам». Каждая эпоха делится на два этапа: обучение дискриминатора и обучение генератора. На первом этапе решается задача поиска весов θ_D , обеспечивающих максимум целевой функции (1) при фиксированных весах генератора θ_G . На втором этапе ищут веса генератора θ_G , при которых целевая функция (1) будет минимальна, а веса дискриминатора остаются фиксированы. Обычно для более стабильного обучения нужно, чтобы дискриминатор был «сильнее» генератора и обучался быстрее. По этой причине веса генератора обновляются не каждую эпоху, а с некоторой периодичностью: раз в 3–5 эпох. Процесс обучения и общее описание работы с ИНС подробно описаны в работе [10].

Генератор не обязательно принимает на вход только шум. На вход также могут приходиться дополнительные условия и требования к данным. Например, при генерации графика нагрузки можно помимо шума подать на вход генератора номер дня недели или температуру воздуха и обучать его генерировать графики для этих условий. Такая GAN называется условной – создает наборы

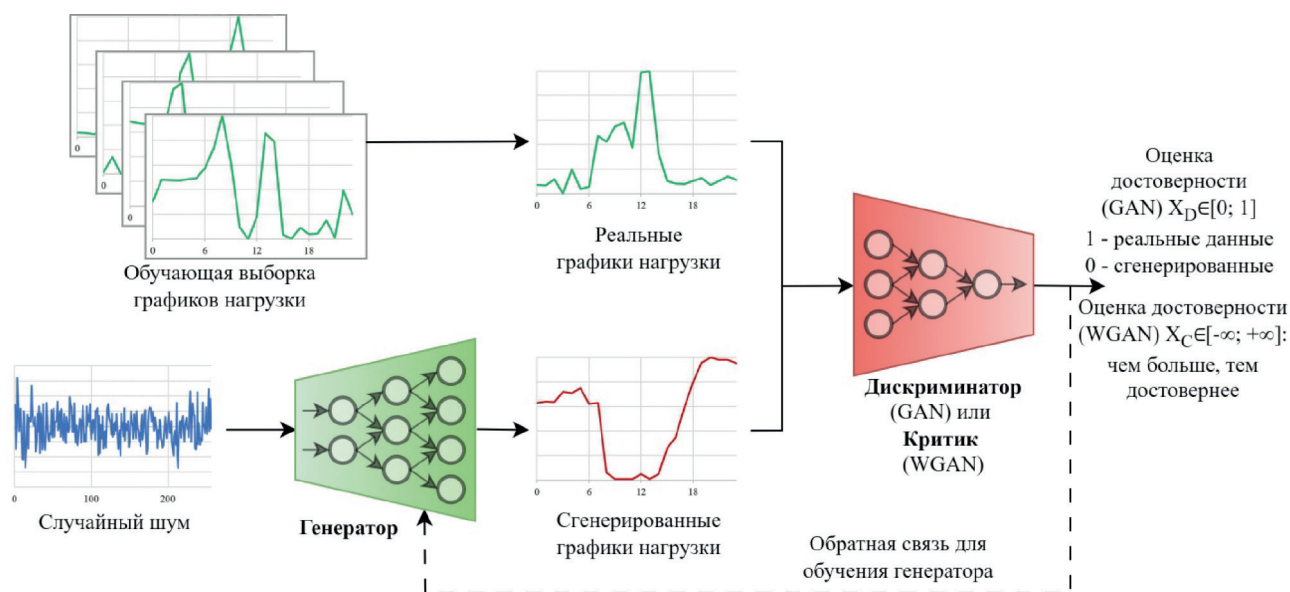


Рис. 1. Схема Дискриминатор/Критик GAN/WGAN (GAN Васерштейна)

Fig. 1. Diagram of the Discriminator/Critic in GAN and WGAN (Wasserstein GAN)

данных, соответствующие входным условиям. Этот вид сети используется не только для того, чтобы генерировать более специфичные данные, но и для оценки влияющих факторов. При наличии обученной условной GAN с входным номером дня недели и температурой воздуха можно, варьируя эти два параметра, получить множество графиков под каждый набор условий. Это позволит, например, проследить, как в один и тот же день температура воздуха влияет на среднее потребление.

Основной проблемой обучения GAN и работы с ними является так называемый «mode collapse» или коллапс моды. Это случай, когда генератор обучается точно воссоздавать однотипные данные, которые дискриминатор не может отличить от реальных. В таком случае генерируемые данные не разнообразны, реальная цель обучения не достигается. Это видно и по целевой функции обучения (1): можно заметить, что она учитывает различия между сгенерированными профилями и реальными. Схожесть профилей на выходе генератора не оценивается. Для случая генерации графиков нагрузки коллапс моды наступил бы, если бы генератор всегда возвращал график потребления близкого к нулю и игнорировал все сложные формы профилей. Такие сценарии возможны, но дискриминатору очень трудно распознать в них подделку. В итоге по функции (1) цель достигнута, но обученный генератор бесполезен.

Развитие моделей GAN преследует две цели: лучше описывать данные и бороться с коллапсом моды. Модификаций базовой версии GAN существует множество. Далее описываются некоторые из них.

Наиболее известное и распространенное решение для улучшения работы GAN – новая целевая функция на основе метрики Васерштейна. Обученная таким образом сеть называется WGAN [11] или для более развитой модели со штрафом на величину градиента при обучении – WGAN-GP [12]. В WGAN вместо понятия «дискриминатор» вводится термин «критик». Критик возвращает не бинарную метрику классификации подделка/не подделка, а оценку достоверности. Чем она больше, тем вероятнее, что данные настоящие, и наоборот. Для WGAN целевая функция обучения (2) оказывается проще, чем (1):

$$\min_{\theta_G} \max_{\theta_C} V(C, G) = \mathbb{E}_{\mathbf{x} \sim p_{\text{истина}}} C(\mathbf{x}; \theta_C) - \mathbb{E}_{\mathbf{z} \sim p_{\text{шум}}} [C(G(\mathbf{z}; \theta_G); \theta_C)], \quad (2)$$

Коллапса моды можно избежать, изменив структуру модели GAN/WGAN.

В работе [13] предложена версия сети с двумя дискриминаторами или критиками, решающими противоположные задачи. Схема такой сети представлена на рис. 2. Задача первого критика – найти графики из обучающей выборки: чем больше похож

график на входе на настоящий, тем больше будет оценка на выходе критика. Второй критик, наоборот, должен искать подделки и ставить высокую оценку теперь им. Оценки обоих критиков включаются в новую целевую функцию с разными знаками (3):

$$\min_{\theta_G} \max_{\theta_{C_1}, \theta_{C_2}} V(G, C_1, C_2) = \mathbb{E}_{\mathbf{x} \sim p_{\text{истина}}} [C_1(\mathbf{x}; \theta_{C_1})] - \mathbb{E}_{\mathbf{z} \sim p_{\text{шум}}} [C_1(G(\mathbf{z}; \theta_G); \theta_{C_1})] - \mathbb{E}_{\mathbf{x} \sim p_{\text{истина}}} [C_2(\mathbf{x}; \theta_{C_2})] + \mathbb{E}_{\mathbf{z} \sim p_{\text{шум}}} [C_2(G(\mathbf{z}; \theta_G); \theta_{C_2})], \quad (3)$$

где C_1 и C_2 – критики с весами ИНС θ_{C_1} и θ_{C_2} соответственно. В такой сети в случае, когда генератор «застрял» в одной области и обманул первого критика, это распознает второй критик. Он начинает ставить высокие оценки сгенерированным данным, четвертое слагаемое целевой функции (3) возрастает. Это вынуждает генератор искать другое решение и защитит от коллапса моды.

В работе [14] предложена модель GAN с несколькими генераторами, дискриминатором и многоклассовым классификатором. Генераторы учатся независимо на одном и том же шуме. Для того чтобы не увеличивать сеть пропорционально числу генераторов, веса их ИНС во всех слоях, кроме первого, являются общими. Классификатор должен определить, каким из генераторов созданы данные на его входе, кросс-энтропийная оценка его работы прибавляется к целевой функции. Если генераторы возвращают мало

отличающиеся графики нагрузки, классификатор начинает часто ошибаться, и целевая функция возрастает. Это заставляет генераторы создавать разные данные, и коллапс моды исключается.

Такое решение не защищает от того, что каждый из генераторов займет свою область пространства состояний и у каждого из них произойдет свой коллапс – часть сценариев окажется проигнорирована всеми генераторами сразу. Модель такого типа оказывается зависима от числа генераторов и его нужно подбирать.

Следует отметить работу [15], в которой предложен алгоритм обучения GAN на основе метаэвристического алгоритма – эволюционный GAN (EGAN, от англ. Evolutionary GAN). Этот алгоритм работает с популяцией весов генераторов и одним дискриминатором. Генераторы обновляются на каждом поколении с помощью различных операторов мутаций. Мутация – это одна эпоха обучения, но по разным целевым функциям: может быть стандартная целевая функция (1), целевая функция по квадратам отклонений и другие. Оценка качества решений выполняется по модифицированной целевой функции, контролирующей точность моделирования и разнообразие новых данных.

Есть и другие типы моделей GAN, предназначенные для решения своих специфических задач. Табличный GAN позволяет генерировать одновременно разнотипные данные,

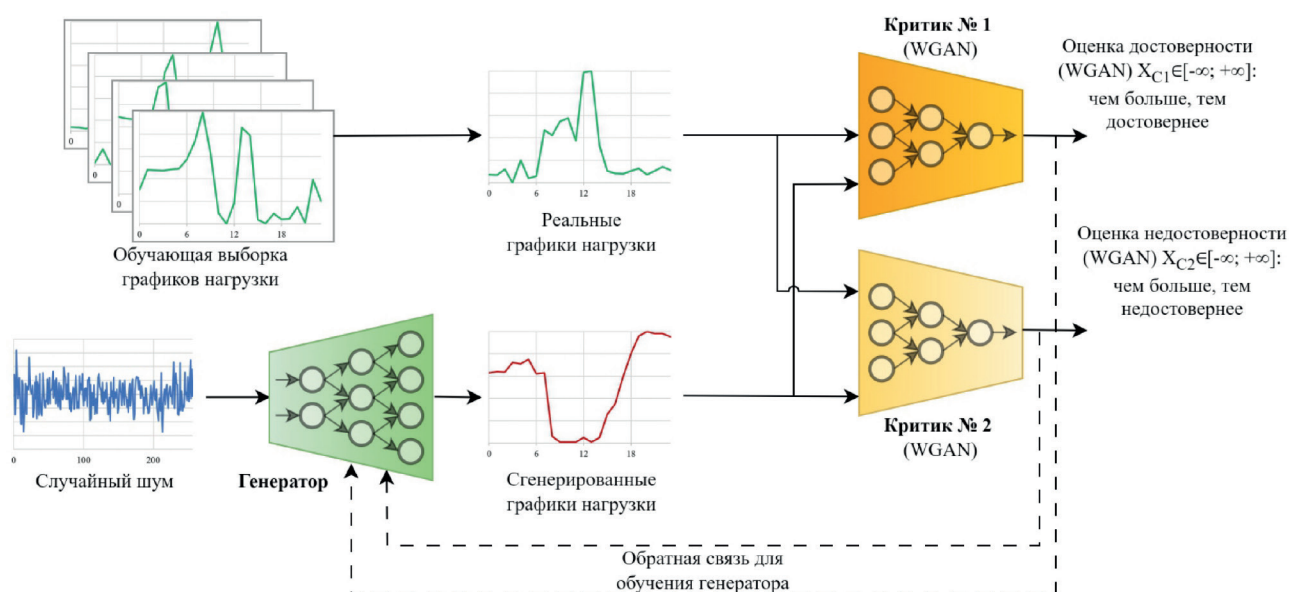


Рис. 2. Схема WGAN с двойным критиком

Fig. 2. Dual-critic WGAN diagram

представленные в табличном виде [16]. Он может воссоздавать не только уровень потребления, но также и координаты, и тип потребителя, дату измерения и другие характеристики, не обязательно численные. Наконец, следует упомянуть TimeGAN – модель генеративной сети, разработанную для генерации временных рядов (от англ. Time) [17]. Эта ИНС построена на рекуррентных сетях и ячейках краткосрочно-долгосрочной памяти.

ОБЗОР ПРИМЕНЕНИЯ GAN ПРИ УПРАВЛЕНИИ РЕЖИМАМИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭНЕРГОСИСТЕМАМИ

Практически во всех статьях, включенных в анализ, GAN используется для генерации данных. Это могут быть данные о потреблении – график нагрузки с некоторым временным шагом, вместе с которым одновременно генерируются характеристики потребителей: ценовая категория, характер нагрузки, число абонентов и т.д. Не реже задача GAN заключается в генерации графиков мощности ВИЭ. Интересно то, как эти данные затем используются. Поэтому далее работы сгруппированы по общим решаемым задачам, которые генеративные сети позволили решить по-новому.

Анализ режимов эксплуатации энергосистемами. В работе [18] GAN используется в качестве вспомогательного инструмента при расчете индексов тяжести режима. Анализ режимов по критерию N-1 для объединенной ЭЭС требует много времени. При оперативном управлении и в алгоритмах автоматизации скорость выполнения этого анализа критична. Для ускорения решения можно использовать ИНС [19, 20]: на вход сети подаются мощности узлов, состояние оборудования, на выходе – индекс тяжести режима. Режим рассчитывается без упрощений только если для него индекс оказался выше порога. Этот подход может давать колоссальное ускорение. В работе [20] анализ режимов сети узлами сети размерностью 1354 узла с помощью сверточной ИНС оказался быстрее традиционного в 129 раз: 0,264 с для ИНС против более чем 34 с для полного расчета. В работе [18] предложен алгоритм, позволяющий выполнить такие расчеты для сети с большой долей ВИЭ. На первом этапе с помощью GAN генерируются почасовые суточные графики мощности ветровых элек-

тростанций (ВЭС) и СЭС. Затем по этим графикам моделируются режимы ЭЭС. Для них с помощью другой предварительно обученной ИНС оценивается индекс тяжести режима.

В работе [21] описывается, как с помощью условной GAN выполнить генерацию утяжеленных сценариев работы системы. Утяжеленные сценарии в статье – это сценарии, в которых выработка ВИЭ велика и главный риск в избытке мощности, которую некому потребить. Тяжесть режима авторы оценивают по суммарной выработке электроэнергии (ЭЭ) ВИЭ в ЭЭС за сутки. Такие экстремальные сценарии маловероятны, поэтому в собранной в ходе эксплуатации обучающей выборке их доля неизбежно будет невелика. Для решения этой проблемы авторы предлагают использовать GAN, обученную особым образом. Авторы обучают GAN на имеющейся небольшой выборке тяжелых сценариев, генерируют с помощью нее новые сценарии, включают их в выборку и продолжают обучение. Таким образом, выборка тяжелых сценариев сама частично сгенерирована слабыми версиями GAN. На вход обученного GAN подается целевой индекс тяжести режима и шум. Тестирование проводилось на суточных профилях СЭС и ВЭС. Авторы оценивали качество сгенерированных данных, сравнивая матрицы коэффициентов корреляции выработки станций по моментам времени и по функции распределения выработки. GAN отработала хорошо в обоих случаях. Полученные по этому методу графики могут быть недостоверны, поскольку часть выборки сгенерирована с помощью необученных GAN.

Анализ балансовой надежности. В работе [22] GAN предлагается использовать для генерации мощностей ВЭС в конкретном режиме при расчете показателей надежности по методу Монте-Карло. Как показано в работах [23–25], скорости ветра на ВЭС в ЭЭС могут коррелировать между собой. Взаимосвязь мощностей станций следует учитывать при анализе режимов и надежности. Авторы предложили использовать для этой цели GAN, которая генерирует на выходе мощности всех ВЭС энергосистемы в конкретный час. Удобство такой модели в том, что GAN оказывается совместима с алгоритмами выборки по значимости [26]. Для выделения множества маловероятных неблагоприятных сце-

нариев, когда выработка ВИЭ в ЭЭС одновременно велика или мала, не нужно работать с распределениями скорости ветра на отдельных станциях и явно учитывать их корреляцию. На вход генератора подается случайный нормальный шум – вектор независимых случайных нормально распределенных значений. Поиск редких событий можно вести в этом латентном пространстве, что гораздо проще. В ходе эксперимента авторами показано, что в связке с выборкой по значимости применение GAN дало прирост в скорости расчета при сохранении точности: время расчета по сравнению с методом копул для учета корреляций оказалось меньше в 4 раза.

Решение задачи выбора состава включенного генерирующего оборудования (ВСВГО). В работе [27] предложен механизм скользящего ВСВГО на основе сценариев, сгенерированных с помощью D2CGAN – условного D2GAN на основе сверточных ИНС. На предварительном этапе с помощью GAN генерируется множество возможных сценариев выработки ВИЭ и потребления в ЭЭС и затем решается задача ВСВГО, например, на сутки вперед. Уже в ходе работы ЭЭС по найденному графику, с учетом текущего режима, выбираются актуальные в данный момент сценарии работы ВИЭ и нагрузки. Затем задача ВСВГО решается повторно в темпе процесса: состояние оборудования и диспетчерский график корректируются под отобранные сценарии. На вход генератора помимо шума подаются прогнозы выработки ВИЭ и потребления.

В работе [28] описана методика ВСВГО для microgrid на сутки вперед. Она включает два этапа. На первом с помощью GAN генерируются графики нагрузки системы и графики выработки ВИЭ. На основе этих графиков строится диспетчерский график для генераторов сети. На втором этапе этот график последовательно корректируется для каждого часа: генерируются новые профили потребления и генерации с учетом фактических режимов, под них корректируется состав на оставшиеся сутки. Графики от GAN учитываются в задаче ВСВГО с помощью вероятностей, которые определяются по результатам кластеризации сгенерированных профилей с помощью метода k-средних. Вероятность каждого сценария потребления равна отно-

шению числа сценариев в том же кластере к общему их числу. Вероятности учитываются с помощью дополнительного слагаемого CVaR (Conditional Value at Risk) в целевой функции [29]. Оно позволяет учесть изменение затрат на выработку ЭЭ в хвосте распределения потребления и выработки ВИЭ.

Генерация графиков нагрузки потребителей и графиков выработки электростанций. В работе [30] предлагается схема генерации годовых почасовых профилей нагрузки с помощью модифицированной версии GAN и вейвлет-преобразования. Для генерации годовых профилей суточных значений потребления ЭЭ применяется модель DoppelGANger. Эта модель использует вспомогательные генераторы и дискриминаторы. В нее входят три генератора: первый генерирует метаданные годового графика, второй – минимальное и максимальное значения потребления, третий, основанный на рекуррентных ИНС, принимает на вход данные от первых двух генераторов нормальный шум. Последний генератор должен сгенерировать сами графики нагрузки с учетом метаданных. Дискриминаторов также три. Первый оценивает достоверность метеоданных и метаданных о потреблении, второй – достоверность годового графика. Третий дискриминатор принимает на вход выходы первых двух и дает итоговую оценку. После того, как обученная GAN сгенерировала годовую профиль по дням на основе годового графика и статистики потребления с помощью вейвлет-преобразования, генерируются суточные графики для каждого суток годового графика нагрузки. Эта работа – одна из немногих, в которых описана методика получения случайных профилей потребления за столь продолжительный период. Как правило, исследователи ограничиваются суточными графиками с разным временным шагом.

В работе [31] описана методика генерации профилей потребления с учетом их взаимной корреляции. В частности, в рамках эксперимента обучена сеть, позволившая сгенерировать 15-минутные профили для 8 домохозяйств. В основе модели лежит GAN, на вход которого подаются одновременно все профили потребителей. Это необходимо для учета взаимной корреляции. GAN основан на многослойной многоканальной сверточной сети. Для того чтобы обойтись без LSTM

(Long Short-Term Memory) и рекуррентных сетей, в работе профили кодируются. Мощность потребителей и температура переводятся в RGB-формат (Red Green Blue) для получения изображения. Это изображение приходит на вход ИНС, разработанной другими исследователями специально для генерации изображений. Для того чтобы сгенерировать много профилей нагрузки, изображение набирается из горизонтальных полос. Каждая полоса – это отдельный потребитель. Пример закодированных профилей потребления представлен на рис. 3.

В работе [32] описана генерация данных для абонентов распределительной сети на основе сверточной GAN. Сгенерированные данные применяются для обучения классификатора потребителей. Классификатор должен по профилям абонентов определить тип потребителя, год постройки дома, возраст владельца, число жильцов, социальный статус, площадь дома и т.д. Авторы обучили GAN на основе сверточных ИНС. Ее генератор воспроизводит профили потребления и метаданные, а дискриминатор определял, насколько достоверны эти показатели и насколько они соответствуют друг другу.

Выходные профили использовались для обучения классификатора, который по сгенерированному профилю должен бы установить характеристики потребителя. Авторы представили достаточно слабую модель GAN:

эта ИНС хорошо воспроизводит суточную форму графика потребления, но корреляция между потреблением в смежные часы слабее, чем в реальности. Анализ работы классификатора показал небольшое снижение точности работы по сравнению с обучением на реальных данных в диапазоне от (–2 до +10 %). В этой работе от классификатора требуются решения слишком большого числа задач и разделения потребителей на слишком большое число категорий. Кроме того, не доказано, что суточное потребление коррелирует с выбранными в статье метаданными.

Оптимизация режимов и развития сетей. Современный тренд в оптимизации прежде всего сетей microgrid – это разработка методик, в которых последовательно применяются различные алгоритмы машинного обучения, кластеризации, обучение с подкреплением и классические методы оптимизации. Это нужно для того, чтобы учесть разные сценарии работы оптимизируемой ЭЭС и учесть их с помощью вероятностей. GAN, как правило, применяются для того, чтобы генерировать различные сценарии на предварительном этапе оптимизации на основе существующей статистики. С помощью GAN генерируются новые сценарии, они формируют новую большую выборку возможных вариантов работы сети. Затем выполняется кластеризация новой выборки. Число сценариев в каждом из кластеров и форма гра-

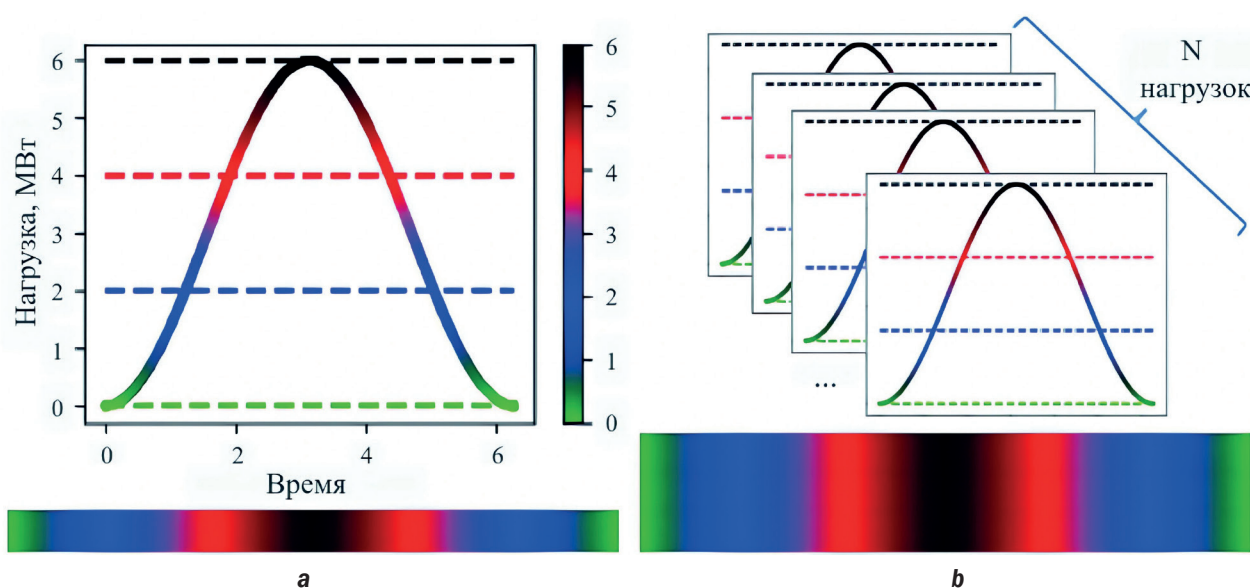


Рис. 3. Профили потребления, закодированные в виде изображения [31]: а – рисунок для графика нагрузки; б – рисунок для N графиков нагрузки

Fig. 3. Image-encoded consumption profiles [31]: а – image for load graph; б – image for N load graphs

фигов в них используются для определения вероятностей отдельных сценариев.

В статье [33] описан алгоритм планирования развития и оптимального управления сетью микрогрид. Оптимизация выполняется методом динамического программирования. В основе лежит агент, обученный методами с подкреплением. Наградой для него служит сумма инвестиций в строительство объектов сети микрогрид и издержек на обслуживание на разных этапах. Сети GAN используются авторами для генерации случайных данных, используемых в задаче оптимизации. С помощью GAN генерируются скорость ветра, плотности потока солнечной энергии, потребление электроэнергии, тепла и энергии на охлаждение, тариф на электроэнергию и газ. На первом этапе с помощью рекуррентной нейронной сети выполняется прогнозирование изменений перечисленных параметров по месяцам. На втором этапе на основе прогноза и ретроспективных данных GAN генерирует почасовые суточные профили потребления и выработки солнечной и ветровой генерации.

В работе используется модель GAN с входным условием – на вход генератора и дискриминатора подаются дополнительные условия моделирования. Затем с помощью самоорганизующейся карты выполняется кластеризация сценариев и выделение наиболее значимых из них для дальнейшего анализа. Сгенерированные сценарии используются на этапе оптимизации вариантов, учитываются в основной оптимизационной постановке с вероятностью, рассчитанной по числу сценариев в кластерах. Также, как и в большинстве последующих работ, неясно: почему нельзя выполнить кластеризацию на имеющейся статистике, в чем необходимость генерировать новые сценарии, если для обучения самой GAN нужна ретроспектива.

Схожий алгоритм описан работе [34]. В ней цель авторов также в том, чтобы минимизировать затраты на строительство и эксплуатацию сети микрогрид, выбрать параметры фотоэлектрических панелей и накопителя электроэнергии. GAN помогла сгенерировать профили выработки ВИЭ и потребления, которые затем были сгруппированы с помощью метода k-медоид. Отобранные сценарии учитывались в целевой функции

стоимости электроэнергии из внешней сети. По всей видимости использовалась достаточно простая модель GAN, поскольку качество сгенерированных графиков оказалось невысоким. Аналогично в работе [35] описано применение MGAN в алгоритме вероятностной оптимизации режима. GAN моделирует нагрузку и выработку ВИЭ в конкретном режиме с учетом их взаимной корреляции. Для полученных данных решается задача оптимизации режима. Затем данные обобщаются и получают вероятностные показатели режима.

В работе [36] GAN используется для генерации профилей выработки ВЭС и СЭС. Для выборки сгенерированных сценариев выполняется кластеризация с помощью метода k-средних. Сгенерированные N профилей выработки формируют множество сценариев: $S_{ВЭС}$ для ВЭС, $S_{СЭС}$ для СЭС. Вероятность, что ВЭС будет вырабатывать электроэнергию по графику $s_i^{ВЭС}$ равна $p(s_i^{ВЭС}) = \frac{N_c}{S_{ВЭС}} \mid s_i^{ВЭС} \in C$,

где $N_{(c,ВЭС)}$ – число профилей ВЭС в кластере c . Тогда по утверждению авторов вероятность k -го сценария, в котором СЭС и ВЭС выдают мощность в сеть одновременно по двум конкретным графикам i и j равна произведению вероятностей $p_k = p(s_i^{ВЭС}) \cdot p(s_j^{СЭС})$. Эти вероятности учитываются в целевой функции при оптимизации, которая равна математическому ожиданию прибыли при продаже ЭЭ с учетом вероятных сценариев. Оптимизация выполняется по схеме игры Штакельберга. На верхнем уровне тариф на электроэнергию определяется с помощью метаэвристики – генетического алгоритма (ГА). При оценке качества выбора цены для отдельных решений в ГА каждый потребитель оптимизирует режимы своих установок.

В работе [37] предлагается использовать GAN при генерации исходных данных для оптимального размещения накопителей с учетом неопределенности потребления и выработки ВИЭ. Обученная авторами сеть GAN позволяет получить 36 типовых суточных графиков по описанной выше схеме: генерация множества графиков и их группировка с помощью метода k-средних. Оптимизация выполняется для этих характерных дней по критерию минимума затрат, в которые входят две составляющие: затраты на строительство, оцениваемые по параме-

трам и числу накопителей ЭЭ, и затраты на эксплуатацию, определяемые режимами работы. Типовые суточные графики используются при оценке второй составляющей затрат. Например, слагаемое стоимости выработки электроэнергии учитывает генерацию во все типовые дни, приведенные в сумме к году. Этот подход аналогичен расчету потерь электроэнергии по типовым дням. В основе постановки задачи лежит потоковая модель [38, 39], которая в зарубежной литературе традиционно применяется для распределительных сетей.

Прогнозирование мощности нагрузки системы и выработки возобновляемых источников энергии. В работе [40] предложен метод вероятностного прогнозирования мощности нагрузки. Цель заключается в обучении GAN, которая будет генерировать вероятные профили нагрузки, принимая на вход в качестве состояния помимо шума прогноз от другой ИНС. Алгоритм обучения сетей следующий. Все имеющиеся данные – время, температура воздуха и мощность нагрузки – делятся на три части. На первом наборе данных обучается ИНС для прогнозирования потребления в следующий момент времени. Для этой цели авторы использовали и сравнивали разные модели – полносвязные ИНС, методы опорных векторов, случайного леса, градиентный бустинг. Обученная сеть применяется ко второму набору данных. Для всех точек строятся прогнозы потребления и оцениваются абсолютные ошибки. Наконец, GAN учится по входному шуму и условиям прогноза (время, температура воздуха и мощность нагрузки) генерировать правдоподобные профили ошибки прогнозирования с прошлого шага. Третий набор данных используется для проверки качества GAN. Для получения вероятностного прогноза используются ИНС и генератор GAN: первая выдает прогноз потребления, а генератор на основе этого прогноза и нормального шума возвращает вероятный профиль ошибок. Их сумма дает уточненный прогноз.

В работе [41] описана модель GAN с входным условием, позволяющая получить распределение прогнозной выработки ВЭС. На вход генератора помимо шума подавали вектор предшествующих значений скорости ветра. Дискриминатор принимает вектор скоростей ветра на ВЭС: либо это истинные

значения скорости, либо часть входного вектора – это прогнозные значения от генератора. Обученный генератор способен по ретроспективным данным генерировать вероятные скорости ветра в последующие часы. В работе [42] выполнялось сравнение различных моделей GAN для прогнозирования потребления. Авторы сравнили GAN, WGAN, WGAN-GP, GAN с целевой функцией на основе среднеквадратичной ошибки, полносвязную ИНС для прогноза и CGAN на основе сверточных сетей. Все модели GAN были с входным условием: на вход, кроме шума, приходили номера недели, года, номер дня и диапазон температур. Сравнение показало, что сверточная модель воспроизводит данные лучше всего, что логично, поскольку оператор свертки явно учитывает корреляцию между входными параметрами.

Прочие задачи. В работе [43] предлагается использовать модифицированную версию GAN на основе сверточных нейронных сетей для восстановления высокодискретных измерений по низкодискретным. Авторы показывают, как из часовых профилей выработки СЭС и профилей потребления получают профили с периодом измерений 5 мин. За основу взята модель SRGAN (Super Resolution GAN), разработанная специально для обработки фотореалистичных изображений и повышения разрешения [44]. Авторы адаптировали ее так, чтобы она принимала на вход соответствующие профили, а генератор возвращал графики большей размерности. Недостатком описанного решения является то, что обученная таким образом GAN работает не с шумом, а с конкретным изображением – для одного и того же изображения на входе результат детерминирован. Очевидно, что потребление за один час можно развернуть в вектор энергии с шагом 5 мин множеством способов и у каждого из этих вариантов будет своя вероятность. При обработке изображений это не требуется, поскольку ожидается конкретный результат. Сложность разработки и обучения такого генератора профилей заключается в подготовке обучающей выборки – каждый имеющийся высокодискретный профиль сворачивается в один низкодискретный и неясно, откуда взять данные для обучения. Схожая проблема решалась авторами статьи [45]. В ней также описана

методика повышения дискретности данных о потреблении. Авторы с помощью GAN разворачивали профили потребления с шагом по времени 15 мин, 30 мин и 60 мин в профили с шагом 5 мин. По сравнению с линейной интерполяцией, данная схема дала прирост в точности отображения нагрузок для разных нагрузок 36–62 %.

В работе [46] описан метод генерации осциллограмм подсинхронного резонанса с помощью WGAN. Вычислительный эксперимент в работе показал, что сгенерированные данные достаточно сильно отличались от исходных и качество генерации было низким. Скорее всего, это связано с простотой модели, вызвавшей коллапс моды, о которой говорилось в предыдущем разделе. Более сложная модель GAN – например, сверточная – с дополнительными модификациями дала бы лучший результат.

В работе [47] представлена модель GAN для генерации возможных профилей цен на электроэнергию в ЭЭС Германии на сутки вперед. Для этого используется GAN на основе глубокой сверточной ИНС, которая используется в сетях генератора и дискриминатора. На выходе этих сетей авторы также добавили блоки ячеек Bi-LSTM – двухсторонней краткосрочно-долгосрочной памяти. В качестве входных сигналов для генератора, помимо шума, использовались цены за предшествующие 24 ч, прогноз выработки ВЭС, СЭС и стоимости ЭЭ на следующие 24 ч. Обученная модель использовалась в работе для исследования влияния входных условий на стоимость электроэнергии: изменялись прогнозные значения потребления, выработки ВЭС, СЭС и т.д. Работа хорошо демонстрирует то, что GAN – это не только генератор новых данных, но и вероятностная модель системы, с помощью которой можно исследовать ее поведение в разных условиях.

В работе [48] предложена модель для построения прогноза цены на электроэнергию на рынке на сутки вперед. В отличие от других работ в данной статье генеративно-состязательный подход используется не для получения новых данных, а для улучшения показателей работы обучаемых моделей. Здесь схема GAN применена для повышения точности прогноза. Исходно авторы предлагают рекуррентную ИНС, которая на основе ретроспективных данных позволяет

прогнозировать цену на электроэнергию. Для того чтобы прогноз был точнее, авторы вводят дискриминатор – классификатор на основе сверточной ИНС, который принимает на вход вектор семь значений стоимости электроэнергии. Последнее значение – это либо реальная цена, либо прогноз от первой рекуррентной ИНС. Задача дискриминатора определить, какие профили цены электроэнергии реальны, а какие из них получены на основе прогноза. На первом этапе обучается основная прогнозирующая ИНС. На втором этапе в схему обучения вводится дискриминатор, а целевая функция для первой ИНС обновляется: в нее вводится результат работы дискриминатора. Задача этой сети теперь не только в том, чтобы выдать точный прогноз на основе обучающей выборки, но и в том, чтобы этот прогноз был достаточно качественным, чтобы обмануть дискриминатор. Сравнение с авторегрессионной моделью, рекуррентной и сверточной ИНС показало превосходство модели на основе GAN. В частности, предложенная модель дала выигрыш в точности по MAE (Mean Absolute Error) в полтора раза: MAE для GAN – 0,0497, MAE для рекуррентной ИНС без дискриминатора – 0,062, MAE для авторегрессионной модели – 0,0724.

В работе [49] также описана методика прогнозирования цен на электроэнергию, но в парадигме обучения без учителя. На вход сверточной нейронной сети подается 3D-тензор со следующими измерениями: число узлов сети – число узлов сети – число часов в рассматриваемом интервале. Он представляет данные для оценки пространственной и временной корреляции цен в узлах. Его составная двумерная матрица описывает, как коррелируют цены узлов, третье измерение показывает временную корреляцию. Задача GAN – научиться на основе такого тензора для момента t генерировать статистически правдоподобный 2D-тензор узловых цен ЭЭ для момента $t+1$. Генератор принимает на вход 3D-тензор и генерирует матрицу цен для следующего момента. Тензоры конкатенируются и передаются на вход дискриминатора. Также на его вход подаются конкатенированные исходный тензор и истинное значение в следующий момент времени. Дискриминатор по ним дает оценку достоверности полученной матрицы.

ГЕНЕРАЦИЯ ГРАФИКОВ ВЫРАБОТКИ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Для демонстрации работы GAN для генерации графиков в управлении ЭЭС была обучена сеть WGAN с двумя критиками, структура которой показана на рис. 2. Параметры сети приведены в таблице. Задача этой сети генерировать суточные графики выработки СЭС с шагом 1 час.

Параметры ИНС генератора и критиков выбирались экспериментально. При этом не утверждается, что архитектура является оптимальной. Модель достаточно хорошо себя показала в вычислительном эксперименте, как показано далее, но при этом в ходе ее подготовки не было цели минимизировать размеры ИНС. Эта модель только демонстрирует возможности генеративно-сопязательного подхода для получения данных. Оптимизация архитектуры – это задача будущих исследований.

Полносвязные ИНС плохо улавливают корреляцию между входами. Это сильно влияет на работу критиков, поскольку без учета взаимосвязи между мощностью СЭС в разные моменты времени распознать синтезированный график сложно. Для того чтобы усилить критиков, помимо суточного профиля на их входы поступают метаданные графика генерации. Набор метаданных определялся также экспериментально. Были выбраны параметры, которые описывают график мощности в целом без привязки ко времени, а также характеристики, которые использовались в аналогичных работах по теме. Перед тем, как подать график выработки СЭС на вход крити-

ка, для него рассчитываются суммарная выработка ЭЭ, средняя мощность, максимальная и минимальная мощности, коэффициент заполнения графика. Также на основе БПФ (быстрого преобразования Фурье) определяются амплитуды первых 12 гармоник суточного профиля генерации. Амплитуды гармоник и параметры графика заменяют для ИНС явный учет корреляции, как это делалось, например, в работе [50]. Эти характеристики графика формируют вектор метаданных, который конкатенируется с графиком мощности СЭС и подается на входы критиков.

Для обучения модели использовались данные по выработке СЭС тестовой модели RTS-GMLC (Reliability Test System Grid Modernization Lab Consortium) (архив авторов тестовой модели RTS-GMLC⁶). В ней представлены данные о выработке СЭС в штате Калифорния в 2020 г. Для обучения использовались почасовые графики суточной выработки электроэнергии. Эти данные предварительно обработаны авторами модели RTS-GMLC: в графиках мощности нет разрывов, присутствует мощность за все часы, нет выбросов. В обучающую выборку попали суточные графики мощности всех СЭС тестовой модели за 2020 г. – около 10000 суточных профилей. С обученной GAN помощью было сгенерировано 10000 синтетических профилей станций. Скорость обучения для критиков задана 0,0001, для генератора – 0,0002. Обучение проводилось в течение 2500 эпох.

На рис. 4–6 представлено, соответственно, сравнение матриц коэффициентов корреляции по часам в реальной выборке и сгенерированным данным, усредненные

Параметры искусственной нейронной сети генератора и критиков GAN
 GAN generator and critics artificial neural network parameters

Элемент GAN	Входные данные	Число нейронов и функции активации по слоям	Число параметров	Выходные данные
Генератор	Нормальный шум (1x256)	256 → Linear (256) + LReLU (0,2) → Linear (512) + LReLU (0,2) → Linear (1024) + LReLU (0,2) → Linear (2024) + LReLU (0,2) → ReLU (24)	2 878 232	Суточный график мощности СЭС (1x24)
Критик-1 и Критик-2	Суточный график мощности СЭС (1x24) + Метаданные графика (1x17)	41 → Linear (1024) + LReLU (0,2) → Linear (512) + LReLU (0,2) → Linear (256) + LReLU (0,2) → Linear (128) + LReLU (0,2) → Linear (1)	734 209	Оценка критика (1x1)

⁶GridMod / RTS-GMLC. Режим доступа: <https://github.com/GridMod/RTS-GMLC> (дата обращения: 20.10.2025).

профили выработки СЭС с диапазоном ± 1 стандартное отклонение (СКО) и функции плотности распределения для реальных и сгенерированных данных по часам. На графиках 4 и 6 данные представлены для отрезка с 6 до 17 ч, поскольку в остальные часы выработка СЭС слишком мала или ее нет.

По матрице корреляции видно, что сильнее всего мощность СЭС коррелирует с мощностями в соседние часы. Взаимосвязь также проявляется в симметричные относительно полудня часы. Анализ матрицы для синтезированных данных показывает, что ИНС смогла воспроизвести зависимость между

выработкой в разные часы. При этом связь всегда слабее, чем в действительности. Чем больше разница по времени между моментами, тем хуже ИНС воспроизводит корреляцию.

Рис. 5 позволяет убедиться в том, что по средней мощности и СКО реальные и синтезированные данные близки. Наибольшая разница наблюдается в 10 ч.

Вывод подтверждается при анализе плотностей распределения на рис. 6. Видно, что распределения для реальных и сгенерированных данных близки по форме и экстремумам к реальным. Основных отли-

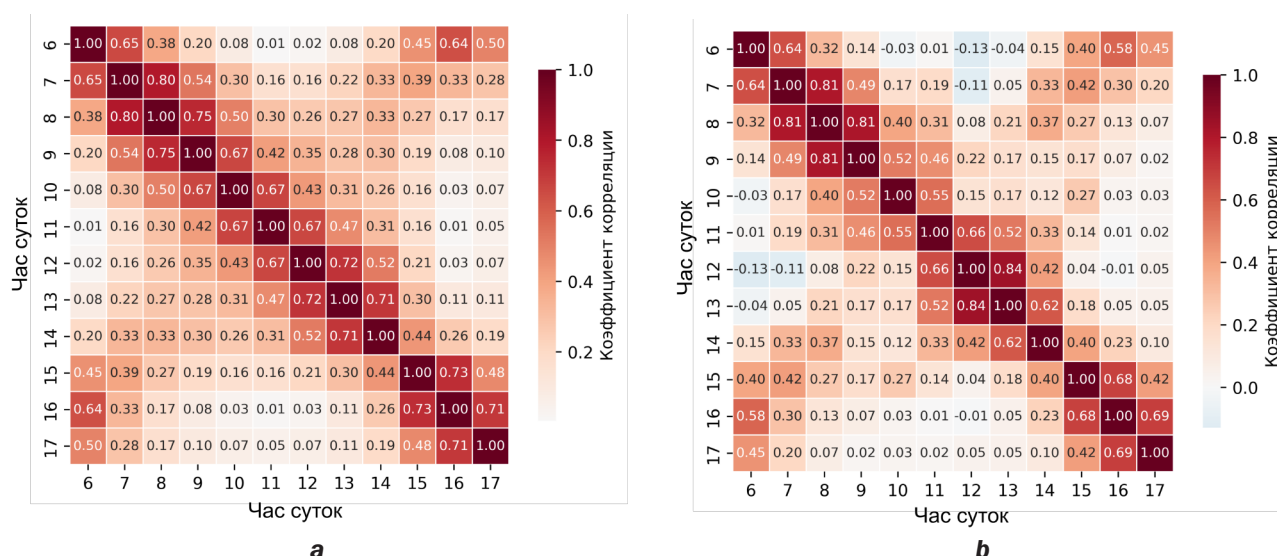


Рис. 4. Матрицы коэффициентов корреляции выработки солнечных электростанций по часам: а – для реальных данных; б – для сгенерированных с помощью GAN

Fig. 4. Correlation coefficient matrices for hourly solar power plants generation: a – real data; b – GAN-generated data

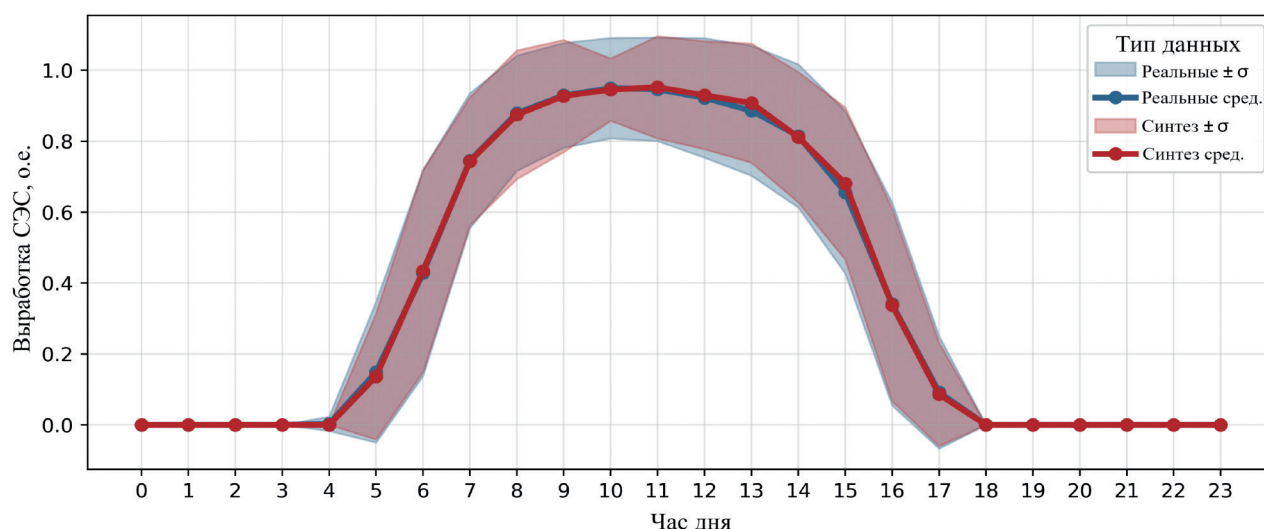


Рис. 5. Усредненные профили выработки солнечных электростанций и степень разброса значений в реальных данных и синтезированной выборке

Fig. 5. Average solar power plants generation profiles and value dispersion in real and synthetic datasets

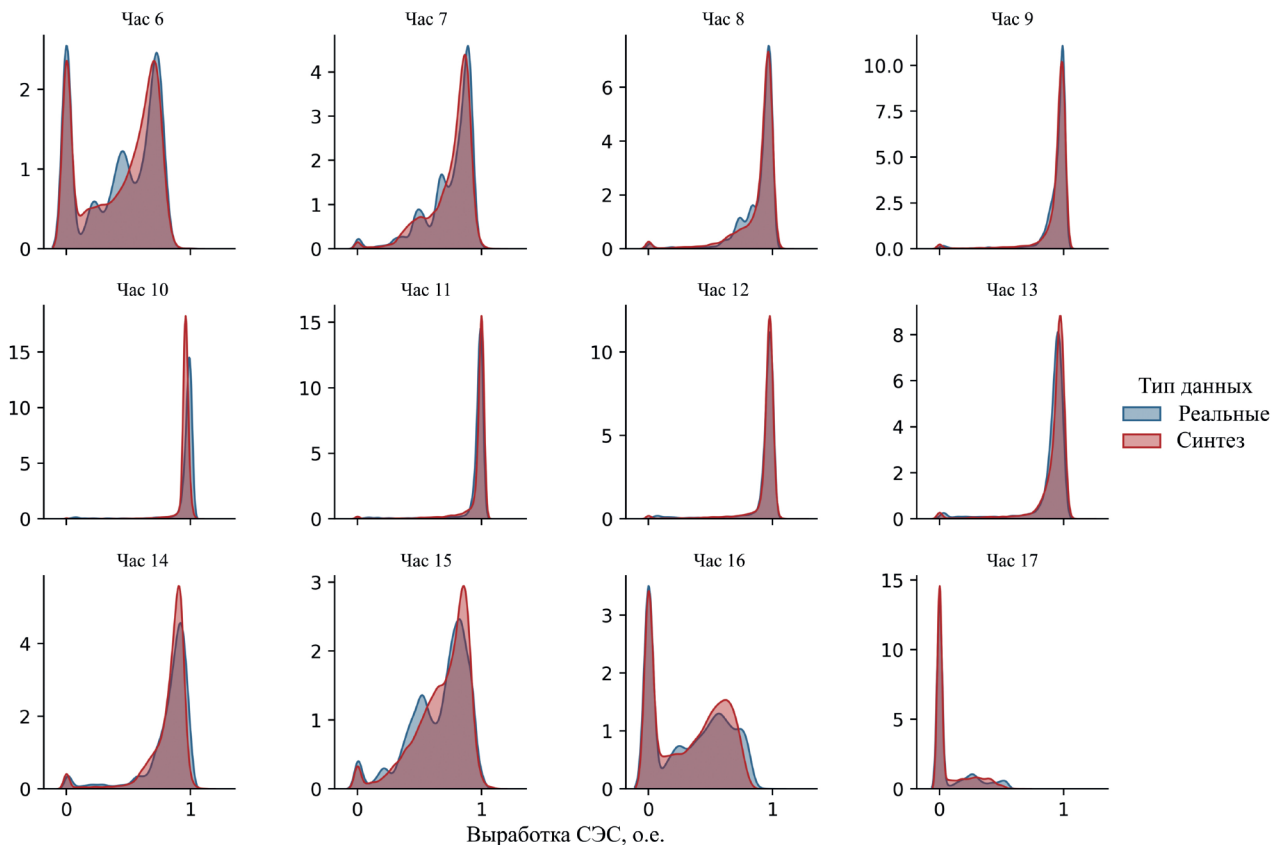


Рис. 6. Плотности распределения выработки солнечных электростанций по часам для реальных данных и сгенерированных с помощью GAN

Fig. 6. Probability density distributions of hourly solar power plants generation for real and GAN-generated data

чий два: для распределений не всегда совпадают их моды, как, например, для 10 ч, и GAN не воспроизводит высокочастотные колебания в функциях распределения. Последнее не обязательно является ошибкой: обучающая выборка не очень велика и точная форма реального распределения неизвестна.

Можно заключить, что GAN хорошо справляется с задачей генерации графиков и моделированием распределений вероятностей мощности СЭС по часам и их корреляций. Главная проблема, которая не видна на графиках, но повлияла на результат, – сложность обучения GAN. Поскольку процесс обучения является ступенчатым – генератор и дискриминатор учатся по очереди – обучение ИНС нестабильно и плохо предсказуемо. Большее число эпох обучения не гарантирует лучший результат, и работа генератора циклически улучшается и затем ухудшается. По этой причине модель сохранялась каждые 10 эпох обучения и затем по синтезированным данным и сравнению с реальными выбиралась лучшая версия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлен обзор применения GAN для решения задач, возникающих при управлении ЭЭС. Основное применение этого типа ИНС – генерация случайных графиков мощности и параметров нагрузки и графиков мощности станций ВИЭ. Полученные профили мощности можно использовать:

1. В задачах оптимизации режимов и планирования развития ЭЭС для формирования множеств возможных сценариев и учета вероятностного характера генерации и потребления.

2. В задаче прогнозирования мощностей нагрузок и выдаваемой мощности ВИЭ для расширения обучающей выборки для других ИНС.

3. В задачах анализа балансовой надежности для учета взаимной корреляции мощностей нагрузок ЭЭС и мощностей ВИЭ во времени и между собой.

Также GAN можно использовать для построения моделей ЭЭС и других объектов для исследования влияния различных факторов на их поведение. Например, построение ве-

роятностной модели цены на электроэнергию, зависящей от входных условий: погоды, дня недели, времени года, доли ВИЭ и т.д. Наконец, состязательный принцип, заложенный в основе GAN, можно использовать для повышения качества обучения других моделей машинного обучения, применяемых, например, для прогнозирования мощности нагрузки.

Анализ литературы, а также проведенные тестовые расчеты позволили также выявить и трудности при использовании моделей GAN. Две основные трудности – это сложность обучения и ограниченная применимость для решения задач большой размерности.

С точки зрения сложности обучения можно говорить о том, что обучение GAN нестабильно и увеличение числа эпох не всегда гарантирует улучшение решения. Нужно сохранять больше решений при обучении, и по его завершении проводить анализ и выбирать лучшее. В ходе тестовых расчетов и обучения GAN для генерации суточных графиков мощности СЭС даже спустя 1000 эпох обучения качество модели в соседние эпохи сильно отличалось. При двухэтапной оптимизации ИНС критика и генератора сложно соблюсти баланс между качеством их работы,

поэтому целевая функция обучения постоянно колеблется.

Анализ литературы выявил всего две статьи, в которых ставилась задача генерации данных на продолжительный период и/или для объединенной ЭЭС. Решение обеих задач требует обучения GAN с выходным слоем большой размерности. Так, во втором случае для учета корреляции между мощностями узлов ЭЭС GAN должна одновременно генерировать все графики мощностей нагрузок и станций в системе. Для случая генерации суточных графиков мощности для сети в 100 узлов GAN должна возвращать 2400 значений. Такую сеть сложно и затратно обучать.

Решение последней задачи является перспективным направлением исследований. Оно позволит применять GAN не только для оптимизации состава оборудования в малых сетях или прогнозирования мощности отдельных узлов, но и для ускорения решения задач оптимизации в ОЭС и связанных с ними – для планирования ремонтов основного оборудования энергосистем. Сейчас GAN применяются только в задачах малой размерности и поэтому не получили широкого распространения в электроэнергетике.

Список источников

1. Галяутдинова А.Р., Ившин И.В., Соловьев С.А. Система оценки и прогнозирования технического состояния силового маслонаполненного трансформаторного оборудования распределительных сетей с применением машинного обучения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2024. Т. 26. № 2. С. 32–45. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2024-26-2-32-45>. EDN: JNMGX.
2. Паздерин А.В., Сенюк М.Д., Классен В.В., Теплухин Д.А., Шендер С.Е. Обзор методов идентификации места возмущения в электрических сетях на основе синхронизированных векторных измерений и алгоритмов машинного обучения // Электричество. 2025. Т. 27. № 2. С. 15–28. <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2025-2-15-28>. EDN: OXJQUI.
3. Senyuk M., Beryozkina S., Zicmane I., Safaraliev M., Klassen V., Kamalov F. Bulk low-inertia power systems adaptive fault type classification method based on machine learning and phasor measurement units data // Mathematics. 2025. Vol. 13. Iss. 2. P. 316. <https://doi.org/10.3390/math13020316>. EDN: VWGIXW.
4. Снегирев Д.А., Паздерин А.В., Самойленко В.О., Крючков П.А. Оптимизация краткосрочного прогнозирования выработки ветроэлектрических станций с помощью машинного обучения // Электрические станции. 2025. № 6. С. 40–49. <https://doi.org/10.71841/EP.elst.2025.1127.6.05>. EDN: ILXYEE.
5. Самойленко В.О., Верховин А.М., Тащилин В.А., Паздерин А.В., Мухлынин Н.Д. Анализ эффективности современных информационных методов выявления нетехнических потерь электроэнергии // Электроэнергия. Проблема и распределение. 2023. № 4. С. 64–74. EDN: DWOUPI.
6. Goodfellow I., Pouget-Abadie J., Mirza M., Xu Bing, Warde-Farley D., Ozair S., et al. Generative adversarial nets // Advances in Neural Information Processing Systems. 2014. Vol. 27. P. 2672–2680. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1406.2661>.
7. Chen Fan, Wei Zhinong, Liu Haitao, Li Jun, Zhang Xiaolian. Reliability modeling of wind farms considering weather conditions // 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (Changsha, 26–29 November 2015). Changsha: IEEE, 2015. P. 380–385. <https://doi.org/10.1109/DRPT.2015.7432236>.
8. Kingma D.P., Welling M. Auto-encoding variational bayes // 2nd International Conference on Learning Representations. 2014. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1312.6114>.
9. Makhzani A., Shlens J., Jaitly N., Goodfellow I., Frey B. Adversarial autoencoders // 4th International Conference on Learning Representations. 2016. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1511.05644>.

10. Николенко С.И., Кадуриh А.А., Архангельская Е.О. Глубокое обучение. СПб.: Питер, 2020. 480 с.
11. Arjovsky M., Chintala S., Bottou L. Wasserstein GAN // Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning. 2017. Vol. 70. P. 214–223. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1701.07875>.
12. Gulrajani I., Ahmed F., Arjovsky M., Dumoulin V., Courville A. Improved training of Wasserstein GANs // Advances in Neural Information Processing Systems. 2017. Vol. 30. P. 5767–5777. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1704.00028>.
13. Nguyen Tu Dinh, Le Trung, Vu Hung, Phung Dinh. Dual discriminator generative adversarial nets // Advances in Neural Information Processing Systems. 2017. Vol. 30. P. 2670–2680. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1709.03831>.
14. Hoang Quan, Nguyen Tu Dinh, Le Trung, Phung Dinh. Multi-generator generative adversarial nets // 6th International Conference on Learning Representations. 2017. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1708.02556>.
15. WangChaoyue, Xu Chang, Yao Xin, Tao Dacheng. Evolutionary generative adversarial networks // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 2019. Vol. 23. Iss. 6. P. 921–934. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1803.00657>.
16. Park N., Mohammadi M., Gorde K., Jajodia S., Park H., Kim Y. Data synthesis based on generative adversarial networks // Proceedings of the VLDB Endowment. 2018. Vol. 11. Iss. 10. P. 1071–1083. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1806.03384>.
17. Yoon Jinsung, Jarrett D., Van der Schaar M. Time-series generative adversarial networks // Advances in Neural Information Processing Systems. 2019. Vol. 32. P. 5508–5518.
18. Qian T., Shi F., Wang Ke., Yang Sh., Geng J., Li Ya., et al. N-1 static security assessment method for power grids with high penetration rate of renewable energy generation // Electric Power Systems Research. 2022. Vol. 211. Iss. 5. P. 108200. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108200>. EDN: LCPJBZ.
19. Sidhu T.S., Cui L. Contingency screening for steady-state security analysis by using FFT and artificial neural networks // IEEE Transactions on Power Systems. 2000. Vol. 15. Iss. 1. P. 421–426. <https://doi.org/10.1109/59.852154>.
20. Du Yan, Li Fangxing, Li Jiang, Zheng Tongxin. Achieving 100x acceleration for N-1 contingency screening with uncertain scenarios using deep convolutional neural network // IEEE Transactions on Power Systems. 2019. Vol. 34. Iss. 4. P. 3303–3305. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2914860>.
21. Peng H., Lou Yu., Sun H., Zuo Zh., Liu Yu., Wang Ch. Extreme scenario generation for renewable energies // IET Smart Grid. 2024. Vol. 7. Iss. 2. P. 130–141. <https://doi.org/10.1049/stg2.12119>. EDN: CPMDCQ.
22. Zhuang Xinran, Ye Chengjin, Ding Yi, Cheng Lin, Song Yonghua, Ye Shuiquan, et al. Data-driven efficient reliability evaluation of power systems with wind penetration: an integrated GANs and CE method // IET Generation, Transmission & Distribution. 2020. Vol. 14. Iss. 2. P. 549–558. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2019.1048>.
23. Buttler A., Dinkel F., Franz S., Hartmut S. Variability of wind and solar power – an assessment of the current situation in the European Union based on the year 2014 // Energy. 2016. Vol. 106. P. 147–161. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.041>.
24. Gao Y., Billinton R. Adequacy assessment of generating systems containing wind power considering wind speed correlation // IET Generation, Transmission & Distribution. 2009. Vol. 3. Iss. 2. P. 217–226. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg:20080036>.
25. Kang Jichuan, Sun Liping, Sun Hai, Chunlin Wu. Risk assessment of floating offshore wind turbine based on correlation-FMEA // Ocean Engineering. 2017. Vol. 129. P. 382–388. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.11.048>.
26. Rubinstein R.Y., Kroese D.P. The cross-entropy method: a unified approach to combinatorial optimization, Monte-Carlo simulation and machine learning. New York: Springer, 2004. P. 287–295. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-4321-0>.
27. Sun Ye., Wang Bo., Yuan R., Watada Ju. Rolling unit commitment based on dual-discriminator conditional generative adversarial networks // Electric Power Systems Research. 2022. Vol. 205. P. 107770. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107770>. EDN: RUUMYA.
28. Xu J., Ji Zh., Liu X., Bao Yu., Zhang Sh., Wang W., et al. Two-stage scheduling of integrated energy systems based on a two-step DCGAN-based scenario prediction approach // Frontiers in Energy Research. 2023. Vol. 10. P. 1012367. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.1012367>. EDN: XXBJRE.
29. Fu Yu, Sun Q., Wennersten R. Effectiveness of the CVaR method in risk management in an integrated energy system // Energy Reports. 2020. Iss. 6. P. 1010–1015. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.11.084>. EDN: BWGIRH.
30. Claeys R., Cleenwerck R., Knockaert J., Desmet J. Capturing multiscale temporal dynamics in synthetic residential load profiles through generative adversarial networks // Applied Energy. 2024. Vol. 360. Iss. 1. P. 122831. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122831>. EDN: PMTORC.
31. Hu Y., Li Y., Song L., Lee H. P., Rehm P. J., Makdad M. MultiLoad-GAN: a GAN-based synthetic load group generation method considering spatial-temporal correlations // IEEE Transactions on Smart Grid. 2024. Vol. 15. Iss. 2. P. 2309–2320. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.01167>.
32. Li J., Chen Zh., Cheng L., Liu X. Energy data generation with Wasserstein deep convolutional generative adversarial networks // Energy. 2022. Vol. 257. Iss. 3. P. 124694. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124694>. EDN: ZEZAJM.
33. Liu J., Meng X., Wu J. Multi-stage cooperative planning among shared energy storage operator and multiple prosumers in regional integrated energy system considering long-term uncertainty // Journal of Energy Storage. 2024. Vol. 103. P. 114244. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.114244>. EDN: WIFLUI.

34. Bagheri F., Dagdougui H., Gendreau M. Stochastic optimization and scenario generation for peak load shaving in Smart District microgrid: sizing and operation // *Energy and Buildings*. 2022. Vol. 275. P. 112426. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112426>. EDN: FGJPIF.
35. Qian T., Yang Sh., Geng J., Wang Sh. Probabilistic optimal power flow calculation method considering sequential features and correlations of multi-uncertain source-load scenarios // *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. 2021. Vol. 13. Iss. 4. P. 045503. <https://doi.org/10.1063/5.0053687>. EDN: VMATQZ.
36. Li Yang, Wang Bin, Yang Zhen, Li Jiazheng, Chen Chen. Hierarchical stochastic scheduling of multi-community integrated energy systems in uncertain environments via Stackelberg game // *Applied Energy*. 2022. Vol. 308. P. 118392. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2112.07103>.
37. Liu H., Tang W. Multi-objective bi-level programs for optimal microgrid planning considering actual BESS lifetime based on WGAN-GP and info-gap decision theory // *Journal of Energy Storage*. 2024. Vol. 89. P. 111510. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111510>. EDN: EDBFUM.
38. Паздерин А.В., Банных П.Ю., Бартоломей П.И., Гаврилова А.Е. Метод поиска предельного режима в заданном контролируемом сечении с применением потоковой модели // *Электричество*. 2024. Т. 26. № 12. С. 49–57. <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2024-12-49-57>. EDN: VXGTRZ.
39. Franco J.F., Ochoa L.F., Romero R. AC OPF for smart distribution networks: an efficient and robust quadratic approach // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2018. Vol. 9. Iss. 5. P. 4613–4623. <https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2665559>.
40. Wang Yi., Hug G., Liu Z., Zhang N. Modeling load forecast uncertainty using generative adversarial networks // *Electric Power Systems Research*. 2020. Vol. 189. P. 106732. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106732>. EDN: SBTXAB.
41. Koochali A., Schichtel P., Dengel A., Ahmed S. Probabilistic forecasting of sensory data with generative adversarial networks – ForGAN // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 63868–63880. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2915544>. EDN: CNOZEX.
42. Bendaoud N.M.M., Farah N., Ben Ahmed S. Comparing generative adversarial networks architectures for electricity demand forecasting // *Energy and Buildings*. 2021. Vol. 247. P. 111152. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111152>. EDN: ZHCOWR.
43. Tang R., Dore J., Ma J., Leong Ph.H.W. Interpolating high granularity solar generation and load consumption data using super resolution generative adversarial network // *Applied Energy*. 2021. Vol. 299. Iss. 3. P. 117297. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117297>. EDN: QUPUYM.
44. Ledig C., Theis L., Huszar F., Caballero J., Cunningham A., Acosta A., et al. Photo-realistic single image super-resolution using a generative adversarial network // *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2017. P. 105–114. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1609.04802>.
45. Song Lidong, Li Yiyang, Lu Ning. ProfileSR-GAN: a GAN based super-resolution method for generating high-resolution load profiles // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2022. Vol. 13. Iss. 4. P. 3278–3289. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.09523>.
46. Zheng Yuhang, Miao Miao, Peng Xiangjia, Lei Jiaying, Feng Shuang, Bai Yufei. A method for generating subsynchronous oscillation data of power system based on Wasserstein generative adversarial network // *IEEE 6th International Electrical and Energy Conference*. 2023. P. 3702–3707. <https://doi.org/10.1109/CIEEC58067.2023.10166608>.
47. Walter V., Wagner A. Probabilistic simulation of electricity price scenarios using conditional generative adversarial networks // *Energy and AI*. 2024. Vol. 18. Iss. 3. P. 100422. <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2024.100422>. EDN: VZEARG.
48. Каукин А.С., Павлов П.Н., Косарев В.С. Краткосрочное прогнозирование цен на электроэнергию с использованием генеративных нейронных сетей // *Бизнес-информатика*. 2023. Т. 17. № 3. С. 7–23. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2023.3.7.23>. EDN: BRCUPM.
49. Zhang Zhongxia, Wu Meng. Real-time locational marginal price forecasting using generative adversarial network // *IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids*. 2020. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2011.04717>.
50. Hu Ch., Cheng F., Zhao Y., Guo Sh., Ma L. State of charge estimation for lithium-ion batteries based on data augmentation with generative adversarial network // *Journal on Energy Storage*. 2024. Vol. 80. P. 110004. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.110004>. EDN: XVXHHJ.

References

1. Galyautdinova A.R., Ivshin I.V., Solovlev S.A. System for assessment and prediction of the technical condition of power oil-filled transformer equipment of distribution networks using machine learning. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2024;26(2):32-45. (In Russ.). <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2024-26-2-32-45>. EDN: JNMAGX.
2. Pazderin A.V., Senyuk M.D., Klassen V.V., Tepluhin D.A., Shender S.E. A review of methods for locating a disturbance in electrical networks based on synchronized phasor measurements and machine learning algorithms. *Elektrichestvo*. 2025;27(2):15-28. (In Russ.). <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2025-2-15-28>. EDN: OXJQUI.

3. Senyuk M., Beryozkina S., Zicmane I., Safaraliev M., Klassen V., Kamalov F. Bulk low-inertia power systems adaptive fault type classification method based on machine learning and phasor measurement units data. *Mathematics*. 2025;13(2):316. <https://doi.org/10.3390/math13020316>. EDN: VWGIXW.
4. Snegirev D.A., Pazderin A.V., Samoylenko V.O., Kriuchkov P.A. Optimization of the short-term wind power forecasting using machine learning. *Power Technology and Engineering*. 2025;6:40-49. (In Russ.). <https://doi.org/10.71841/EP.elst.2025.1127.6.05>. EDN: ILXYEE.
5. Samoylenko V.O., Verkhosin A.M., Tashchilin V.A., Pazderin A.V., Mukhlynin N.D. State-of-the-art efficiency of data-oriented methods for non-technical electricity losses detection. *Electric Power. Transmission and distribution*. 2023;4:64-74. (In Russ.). EDN: DWOUPI.
6. Goodfellow I., Pouget-Abadie J., Mirza M., Xu Bing, Warde-Farley D., Ozair S., et al. Generative adversarial nets. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2014;27:2672-2680. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1406.2661>.
7. Chen Fan, Wei Zhinong, Liu Haitao, Li Jun, Zhang Xiaolian. Reliability modeling of wind farms considering weather conditions. In: *5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*. 26–29 November 2015, Changsha. Changsha: IEEE; 2015, p. 380-385. <https://doi.org/10.1109/DRPT.2015.7432236>.
8. Kingma D.P., Welling M. Auto-encoding variational bayes. In: *2nd International Conference on Learning Representations*. 2022. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1312.6114>.
9. Makhzani A., Shlens J., Jaitly N., Goodfellow I., Frey B. Adversarial autoencoders. In: *4th International Conference on Learning Representations*. 2016. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1511.05644>.
10. Nikolenko S.I., Kadurin A.L., Arkhangelskaya E.O. *Deep learning*. St. Petersburg: Piter; 2020, 480 p. (In Russ.).
11. Arjovsky M., Chintala S., Bottou L. Wasserstein GAN. In: *Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning*. 2017;70:214-223. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1701.07875>.
12. Gulrajani I., Ahmed F., Arjovsky M., Dumoulin V., Courville A. Improved training of Wasserstein GANs. In: *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2017;30:5767-5777. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1704.00028>.
13. Nguyen Tu Dinh, Le Trung, Vu Hung, Phung Dinh. Dual discriminator generative adversarial nets. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2017;30:2670-2680. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1709.03831>.
14. Hoang Quan, Nguyen Tu Dinh, Le Trung, Phung Dinh. Multi-generator generative adversarial nets. In: *6th International Conference on Learning Representations*. 2017. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1708.02556>.
15. Wang Chaoyue, Xu Chang, Yao Xin, Tao Dacheng. Evolutionary generative adversarial networks. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2019;23(6):921-934. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1803.00657>.
16. Park N., Mohammadi M., Gorde K., Jajodia S., Park H., Kim Y. Data synthesis based on generative adversarial networks. *Proceedings of the VLDB Endowment*. 2018;11(10):1071-1083. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1806.03384>.
17. Yoon Jinsung, Jarrett D., Van der Schaar M. Time-series generative adversarial networks. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2019;32:5508-5518.
18. Qian T., Shi F., Wang Ke., Yang Sh., Geng J., Li Ya., et al. N-1 static security assessment method for power grids with high penetration rate of renewable energy generation. *Electric Power Systems Research*. 2022;211(5):108200. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108200>. EDN: LCPJBZ.
19. Sidhu T.S., Cui L. Contingency screening for steady-state security analysis by using FFT and artificial neural networks. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2000;15(1):421-426. <https://doi.org/10.1109/59.852154>.
20. Du Yan, Li Fangxing, Li Jiang, Zheng Tongxin. Achieving 100x acceleration for N-1 contingency screening with uncertain scenarios using deep convolutional neural network. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2019;34(4):3303-3305. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2914860>.
21. Peng H., Lou Yu., Sun H., Zuo Zh., Liu Yu., Wang Ch. Extreme scenario generation for renewable energies. *IET Smart Grid*. 2024;7(2):130-141. <https://doi.org/10.1049/stg2.12119>. EDN: CPMDCQ.
22. Zhuang Xinran, Ye Chengjin, Ding Yi, Cheng Lin, Song Yonghua, Ye Shuiquan, et al. Data-driven efficient reliability evaluation of power systems with wind penetration: an integrated GANs and CE method. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2020;14(2):549-558. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2019.1048>.
23. Buttler A., Dinkel F., Franz S., Hartmut S. Variability of wind and solar power – an assessment of the current situation in the European Union based on the year 2014. *Energy*. 2016;106:147-161. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.041>.
24. Gao Y., Billinton R. Adequacy assessment of generating systems containing wind power considering wind speed correlation. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2009;3(2):217-226. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg:20080036>.
25. Kang Jichuan, Sun Liping, Sun Hai, Chunlin Wu. Risk assessment of floating offshore wind turbine based on correlation-FMEA. *Ocean Engineering*. 2017;129:382-388. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.11.048>.
26. Rubinstein R.Y., Kroese D.P. The cross-entropy method: a unified approach to combinatorial optimization, Monte-Carlo simulation and machine learning. New York: Springer; 2004, p. 287-295. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-4321-0>.
27. Sun Ye., Wang Bo., Yuan R., Watada Ju. Rolling unit commitment based on dual-discriminator conditional generative adversarial networks. *Electric Power Systems Research*. 2022;205:107770. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107770>. EDN: RUUMYA.

28. Xu J., Ji Zh., Liu X., Bao Yu., Zhang Sh., Wang W., et al. Two-stage scheduling of integrated energy systems based on a two-step DCGAN-based scenario prediction approach. *Frontiers in Energy Research*. 2023;10:1012367. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.1012367>. EDN: XXBJRE.
29. Fu Yu, Sun Q., Wennersten R. Effectiveness of the CVaR method in risk management in an integrated energy system. *Energy Reports*. 2020;6:1010-1015. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.11.084>. EDN: BWGIRH.
30. Claeys R., Cleenwerck R., Knockaert J., Desmet J. Capturing multiscale temporal dynamics in synthetic residential load profiles through generative adversarial networks. *Applied Energy*. 2024;360(1):122831. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122831>. EDN: PMTORC.
31. Hu Y., Li Y., Song L., Lee H. P., Rehm P. J., Makdad M. MultiLoad-GAN: a GAN-based synthetic load group generation method considering spatial-temporal correlations. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2024;15(2):2309-2320. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.01167>.
32. Li J., Chen Zh., Cheng L., Liu X. Energy data generation with Wasserstein deep convolutional generative adversarial networks. *Energy*. 2022;257(3):124694. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124694>. EDN: ZEZAJM.
33. Liu J., Meng X., Wu J. Multi-stage cooperative planning among shared energy storage operator and multiple prosumers in regional integrated energy system considering long-term uncertainty. *Journal of Energy Storage*. 2024;103:114244. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.114244>. EDN: WIFLUI.
34. Bagheri F., Dagdougui H., Gendreau M. Stochastic optimization and scenario generation for peak load shaving in Smart District microgrid: sizing and operation. *Energy and Buildings*. 2022;275:112426. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112426>. EDN: FGJPIF.
35. Qian T., Yang Sh., Geng J., Wang Sh. Probabilistic optimal power flow calculation method considering sequential features and correlations of multi-uncertain source-load scenarios. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. 2021;13(4):045503. <https://doi.org/10.1063/5.0053687>. EDN: VMATQZ.
36. Li Yang, Wang Bin, Yang Zhen, Li Jiazheng, Chen Chen. Hierarchical stochastic scheduling of multi-community integrated energy systems in uncertain environments via Stackelberg game. *Applied Energy*. 2022;308:118392. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2112.07103>.
37. Liu H., Tang W. Multi-objective bi-level programs for optimal microgrid planning considering actual BESS lifetime based on WGAN-GP and info-gap decision theory. *Journal of Energy Storage*. 2024;89:111510. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111510>. EDN: EDBFUM.
38. Pazderin A.V., Bannykh P.YU., Bartolomey P.I., Gavrilova A.E. A search for the power system stability limit at a specified controlled cutset by applying a flow model. *Elektrichestvo*. 2024;26(12):49-57. <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2024-12-49-57>. EDN: VXGTRZ.
39. Franco J.F., Ochoa L.F., Romero R. AC OPF for smart distribution networks: an efficient and robust quadratic approach. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2018;9(5):4613-4623. <https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2665559>.
40. Wang Yi., Hug G., Liu Z., Zhang N. Modeling load forecast uncertainty using generative adversarial networks. *Electric Power Systems Research*. 2020;189:106732. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106732>. EDN: SBTXAB.
41. Koochali A., Schichtel P., Dengel A., Ahmed S. Probabilistic forecasting of sensory data with generative adversarial networks – ForGAN. *IEEE Access*. 2019;7:63868-63880. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2915544>. EDN: CNOZEX.
42. Bendaoud N.M.M., Farah N., Ben Ahmed S. Comparing generative adversarial networks architectures for electricity demand forecasting. *Energy and Buildings*. 2021;247:111152. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111152>. EDN: ZHCOWR.
43. Tang R., Dore J., Ma J., Leong Ph.H.W. Interpolating high granularity solar generation and load consumption data using super resolution generative adversarial network. *Applied Energy*. 2021;299(3):117297. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117297>. EDN: QUPUYM.
44. Ledig C., Theis L., Huszar F., Caballero J., Cunningham A., Acosta A., et al. Photo-realistic single image super-resolution using a generative adversarial network. In: *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2017;105-114. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1609.04802>.
45. Song Lidong, Li Yihan, Lu Ning. ProfileSR-GAN: a GAN based super-resolution method for generating high-resolution load profiles. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2022;13(4):3278-3289. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.09523>.
46. Zheng Yuhang, Miao Miao, Peng Xiangjia, Lei Jiaying, Feng Shuang, Bai Yufei. A method for generating subsynchronous oscillation data of power system based on Wasserstein generative adversarial network. In: *IEEE 6th International Electrical and Energy Conference*. 2023;3702-3707. <https://doi.org/10.1109/CIEEC58067.2023.10166608>.
47. Walter V., Wagner A. Probabilistic simulation of electricity price scenarios using conditional generative adversarial networks. *Energy and AI*. 2024;18(3):100422. <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2024.100422>. EDN: VZEARG.
48. Kaukin A.S., Pavlov P.N., Kosarev V.S. Short-term forecasting of electricity prices using generative neural networks. *Business Informatics*. 2023;17(3):7-23. (In Russ.). <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2023.3.7.23>. EDN: BRCUPM.
49. Zhang Zhongxia, Wu Meng. Real-time locational marginal price forecasting using generative adversarial network. In: *IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids*. 2020. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2011.04717>.
50. Hu Ch., Cheng F., Zhao Y., Guo Sh., Ma L. State of charge estimation for lithium-ion batteries based on data augmentation with generative adversarial network. *Journal on Energy Storage*. 2024;80:110004. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.110004>. EDN: XVXHHJ.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Губин Павел Юрьевич,

кандидат технических наук,
доцент кафедры автоматизированных
электрических систем,
Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, Российская Федерация,
г. Екатеринбург, ул. Мира, 19
✉ pavel.gubin@urfu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3736-652X>

Валиев Рустам Талгатович,

кандидат технических наук,
доцент кафедры автоматизированных
электрических систем,
Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, Российская Федерация,
г. Екатеринбург, ул. Мира, 19
r.t.valiev@urfu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8603-3246>

Верховзин Андрей Михайлович,

старший преподаватель кафедры
автоматизированных электрических систем,
Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002, Российская Федерация,
г. Екатеринбург, ул. Мира, 19
a.m.verkhozin@urfu.ru
<https://orcid.org/0009-0003-4246-2182>

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготов-
ку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный ва-
риант рукописи.*

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 23.09.2025 г.; одобре-
на после рецензирования 12.11.2025 г.; принята к
публикации 09.12.2025 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Pavel Yu. Gubin,

Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Automated
Electrical Systems,
Ural Federal University named after the first
President of Russia B.N. Yeltsin,
19, Mira St., Yekaterinburg 620002,
Russian Federation
✉ pavel.gubin@urfu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3736-652X>

Rustam T. Valiev,

Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Automated
Electrical Systems,
Ural Federal University named after the first
President of Russia B.N. Yeltsin,
19, Mira St., Yekaterinburg 620002,
Russian Federation
r.t.valiev@urfu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8603-3246>

Andrey M. Verkhozin,

Senior Lecturer of the Department of Automated
Electrical Systems,
Ural Federal University named after the first
President of Russia B.N. Yeltsin,
19, Mira St., Yekaterinburg 620002,
Russian Federation
a.m.verkhozin@urfu.ru
<https://orcid.org/0009-0003-4246-2182>

Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 23.09.2025; approved
after reviewing 12.11.2025; accepted for publication
09.12.2025.

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 621.311.243

EDN: SJHTHP

DOI: 10.21285/1814-3520-2026-3-524-543



Исследование способа повышения энергоэффективности солнечных электростанций на основе комбинирования отражательных систем и дискретного позиционирования фотоэлектрических модулей

Н.П. Местников^{1✉}, В.З. Манусов²¹Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, Якутск, Российская Федерация¹Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, Якутск, Российская Федерация¹Якутский институт водного транспорта (филиал) Сибирского государственного университета водного транспорта, Якутск, Российская Федерация²Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Российская Федерация

Резюме. Цель – обоснование энергоэффективности комбинированного применения систем ручного дискретного позиционирования фотоэлектрических модулей и плоских отражающих систем для солнечных электростанций микро- и малой мощности, эксплуатируемых на изолированных территориях Севера. Работа базируется на методологии планирования натурального эксперимента и сравнительном анализе выходных характеристик исследуемых фотоэлектрических модулей. Исследования проведены в центральной части Якутии с применением научно-лабораторного стенда, оснащенного плоской отражательной системой, метеостанцией, регистраторами и средствами тепловизионного контроля. Предложен способ повышения выработки электроэнергии, заключающийся в ежечасной ручной коррекции азимутальных (от +90 до –90°) и зенитных (от 15° до 55°) углов жестко связанного блока «фотоэлектрический модуль – отражатель». Установлено, что данный регламент обеспечивает прирост среднесуточной генерации на 41,82 %, а прогнозируемой среднегодовой – на 30,88 % относительно стационарного размещения модулей. Выявлен побочный эффект нагрева поверхности фотоэлементов на 12–13 %, приводящий к росту тепловых потерь на 23,63 %, что обосновывает необходимость интеграции систем охлаждения в регионах с высокой инсоляцией. Доказана оптимальность 60-минутного шага регулирования как рационального компромисса между энергоэффективностью и трудозатратами потребителя. Выявлена широтная дифференциация эффективности метода: от адаптации фотоэлектрических модулей к низким углам Солнца в арктических районах (выше 66° с.ш.) до максимизации пиковой мощности в Южной Якутии. В ходе проведенных исследований подтверждена целесообразность внедрения дискретного позиционирования для повышения коэффициента использования установленной мощности солнечной электростанции в высоких широтах. Предложенный подход, дополненный системами накопления энергии, обеспечивает высокую энергетическую автономность удаленных потребителей без капитальных затрат на сложную автоматику, уязвимую в условиях экстремально низких температур воздуха на территории Севера и Арктики.

Ключевые слова: гелиоэнергетика, солнечная электростанция, повышение энергоэффективности, дискретное позиционирование, плоские отражательные системы, удельная выработка электроэнергии, температурная деградация, фотоэлектрический модуль

Благодарность. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации FSRG-2025-0009 и государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации FWRS-2024-0031 по приоритетному направлению деятельности ПФНИ в Российской Федерации. Федерации на долгосрочный период (2021–2030 гг.) 2.5.1. Энергетический и экологический менеджмент (Тема № 124032600076-7). Работа выполнена с использованием научного оборудования Центрального научного центра (ЦНИИЦ) СО РАН. Выражаем благодарность Центральному исследовательскому центру КНЦ СО РАН за предоставленную возможность проводить исследования на научном оборудовании Центра.

Для цитирования: Местников Н.П., Манусов В.З. Исследование способа повышения энергоэффективности солнечных электростанций на основе комбинирования отражательных систем и дискретного позиционирования фотоэлектрических модулей // iPolytech Journal. 2026. Т. 30. № 3. С. 524–543. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2026-3-524-543>. EDN: SJHTHP.

Energy efficiency of solar power plants combining reflective systems and discrete tracking of photovoltaic modules

Nikolay P. Mestnikov^{1✉}, Vadim Z. Manusov²

¹Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation

¹Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk, Russian Federation

¹Yakut Institute of Water Transport (branch) of the Siberian State University of Water Transport, Yakutsk, Russian Federation

²Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russian Federation

Abstract. This study evaluates the energy efficiency of combining manual discrete tracking of photovoltaic modules with flat reflectors in micro- and small-scale solar power plants operated in remote northern regions. The study was based on full-scale experiments and comparative analysis of the output characteristics of photovoltaic modules. Experiments were conducted in central Yakutia (Russian Federation) using a laboratory test facility equipped with a flat reflector, weather station, data loggers, and thermal imaging equipment. A method is proposed to increase electricity generation through hourly manual adjustment of the azimuth (from $+90^\circ$ to -90°) and zenith (from 15° to 55°) angles of a rigidly coupled photovoltaic module–reflector assembly. This tracking strategy increased average daily electricity generation by 41.82 %, while the projected increase in average annual generation was 30.88 %, relative to fixed modules. A concomitant 12–13 % increase in the surface temperature of the photovoltaic cells resulted in 23.63 % higher thermal losses, indicating the need for integrated cooling systems in regions with high solar irradiance. A 60-min adjustment interval was found to provide an optimal compromise between energy efficiency and user effort. The effectiveness of the method also varied with latitude: in Arctic regions above 66° N, its principal benefit was the ability to adapt the photovoltaic modules to low solar elevation angles, whereas in southern Yakutia, it maximized peak power output. The results confirm the feasibility of discrete tracking as a means of increasing the capacity factor of solar power plants at high latitudes. In combination with energy storage systems, the proposed approach can provide a high degree of energy autonomy for remote consumers without the capital costs associated with sophisticated automation systems and their vulnerability to the extremely low air temperatures of northern and Arctic regions.

Keywords: solar energy, photovoltaic (PV) power station, energy efficiency improvement, discrete positioning, flat reflective systems, specific power generation, temperature degradation, photovoltaic (PV) module

Acknowledgement. This work was supported by the Russian Ministry of Science and Higher Education's State Assignment FSRG-2025-0009 and the Russian Ministry of Science and Higher Education's State Assignment FWRS-2024-0031 for the priority area of the Fundamental Scientific Research Program in the Russian Federation for the Long-Term Period (2021–2030) 2.5.1. Energy and Environmental Management (Topic No. 124032600076-7). The work was performed using the scientific equipment of the Central Research Center of the SB RAS. We would like to express our gratitude to the Central Research Center of the SB RAS for the opportunity to conduct research using the scientific equipment of the Center.

For citation: Mestnikov N.P., Manusov V.Z. Energy efficiency of solar power plants combining reflective systems and discrete tracking of photovoltaic modules. *iPolytech Journal*. 2026;30(3):524-543. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2026-3-524-543>. EDN: SJHTHP.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день применение солнечных электростанций (СЭС) имеет все более массовый характер. Устойчивая эксплуатация СЭС стала одной из ключевых тенденций развития электроэнергетики в последние десятилетия. Фотоэлектрический модуль (ФЭМ), являющийся ключевым генерирующим элементом любой СЭС, преобразовывает энергию солнечного излучения непосредственно в электрическую энергию путем воздействия полупроводникового явления – фотоэффекта [1]. Гелиоэнергетика получила широкое распространение вслед-

ствие развития технологий, снижения издержек на оборудование и усиливающегося влияния мировых экологических проблем (глобальное потепление).

Ключевые преимущества гелиоэнергетики заключаются в ресурсной неисчерпаемости, экологической безопасности, снижении удельной стоимости генерации, возможности создания децентрализованных систем и положительном экономическом эффекте [2–4].

Мировой рынок демонстрирует экспоненциальный рост: суммарная установленная мощность СЭС увеличилась с 230 ГВт

в 2015 г. до 2,2 ТВт к концу 2025 г. [5–7]. При устойчивом среднегодовом приросте около 100 ГВт доля солнечной генерации в глобальном энергобалансе достигла 3–4 %, характеризуюсь при этом значительной региональной дифференциацией.

Безусловным технологическим лидером является Китай, аккумулирующий свыше 1,2–1,3 ТВт мощностей благодаря масштабным государственным инвестициям. Значительный вклад в мировую структуру возобновляемых источников энергии (ВИЭ) вносят США (155–160 ГВт), Индия (136 ГВт), Германия (117 ГВт) и Япония (95–100 ГВт), где развитие отрасли стимулируется стратегиями декарбонизации и задачами укрепления национальной энергетической безопасности.

Развитие гелиоэнергетики в России опирается на фундаментальный задел ведущих отечественных научных школ, чьи исследования определяют технические векторы повышения эффективности СЭС. В частности, специалистами Национального исследовательского университета «Московского энергетического института» детально изучены механизмы влияния температурных режимов на деградацию характеристик ФЭМ, что позволяет научно обосновать выявленные в данной работе эффекты термических потерь. Ресурсная база исследования и оценка потенциала инсоляции в условиях Севера соотносятся с данными ГИС-атласа Научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, предоставляющего интерактивные карты ВИЭ для стратегического планирования размещения энергообъектов. Вопросы эксплуатационной надежности, включая защиту ФЭМ от избыточного перегрева и разработку методов предотвращения загрязнения их поверхностей, активно прорабатываются в Уральском федеральном университете имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ). При этом методология проведения испытаний гелиотехнического оборудования в различных климатических зонах, развиваемая в УрФУ, служит основой для верификации выходных характеристик исследуемых гелиосистем. Учет достижений данных институтов позволяет интегрировать результаты исследований по дискретному

позиционированию в общую структуру отечественных разработок по интенсификации выработки электрической энергии.

В целях устойчивой эксплуатации СЭС необходимы применение различных технологий и реализация следующих технических мероприятий по повышению энергоэффективности:

- автоматические способы очистки модулей;
- трекинг ФЭМ; размещение модулей по концепции BIPV (Building-Integrated Photovoltaics) – это размещение ФЭМ на фасадах и крышах зданий и сооружений;
- размещение ФЭМ на водной поверхности озер, рек и водохранилищ;
- плоские отражательные системы для отражения солнечного излучения на ФЭМ;
- концентраторные устройства в виде систем линз Френеля или зеркал;
- вертикальное или вогнутое размещение модулей и др. [7–11].

Все вышесказанные технологии, устройства и способы активно используются в рамках модернизации и повышения производительности гелиотехнических устройств. Современные решения для эксплуатации СЭС зачастую требуют дорогостоящего сервиса и привлечения высококвалифицированных специалистов. Это приводит к росту эксплуатационных издержек на 15–75 %, при этом прирост выработки электрической энергии обычно составит лишь 10–25 %, что не всегда оправдывает затраты для малых и изолированных объектов. Следовательно, для владельцев микро- (до 10 кВт) и малых (до 100 кВт) СЭС повышение энергоэффективности становится труднодостижимым из-за отсутствия локальных сервисных центров и дефицита средств для получения сервисных услуг [12]. К данной категории потребителей, выделяемой по низкому уровню энергопотребления и автономному режиму деятельности, относятся представители традиционных промыслов Севера и Арктики (оленьеводы, охотники, рыбаки), а также малые фермерские хозяйства и удаленные туристические объекты.

Таким образом, существует потребность в разработке эффективного способа или устройства с низкой себестоимостью для увеличения производительности уже эксплуатируемых СЭС микро- и малой мощности, размещенных на изолированных и отдаленных

территориях. Рассмотрим потенциальные технические мероприятия или устройства для решения представленной проблемы:

1. Сезонное изменение угла наклона ФЭМ относительно горизонта (в месте их стационарной установки). К примеру, для оптимизации генерации в северных широтах рекомендуется устанавливать угол $70-80^\circ$ зимой, $50-60^\circ$ весной и осенью, и $30-40^\circ$ летом [13].

2. Отсутствие затенения местности, где размещены секции ФЭМ со стороны зданий, сооружений и лесных массивов.

3. Регулярная очистка поверхности ФЭМ. Согласно регламентам ПАО «РусГидро»³ (в частности, по опыту эксплуатации объектов АО «Сахазнерго»), для предотвращения деградации мощности рекомендовано производить очистку модулей от снега, льда, пыли и песка не реже двух раз в месяц независимо от сезона.

4. Уменьшение затененности территории, где размещена СЭС. Под данным мероприятием подразумевается очистка близлежащей местности от крупных объектов (в том числе кустарников) или же обрезка ветвей крупных деревьев [14].

5. Профилактическая проверка контактных соединений со стороны секций ФЭМ или же соединительных кабелей в силовой части СЭС для предотвращения риска потери напряжения или перегрева проводки [15].

6. Регулирование дневного электропотребления: минимизация нагрузки в дневной период (отключение освещения, ограничение числа активных потребителей) способствует эффективному аккумулированию солнечной энергии. Сформированный запас мощности позволяет бесперебойно обеспечивать нужды потребителей в ночные часы.

7. Применение плоских отражающих систем, изготовленных из зеркальных поверхностей, отполированных металлов либо светлых полимерных материалов, расположенных к фронтальной части ФЭМ, позволяет повысить выработку электрической энергии посредством концентрирования солнечного облучения на активную область модуля [16–18].

8. Использование естественных теплоизоляционных покрытий (солома, дерн) на

кровлях (rooftop) в зонах, непосредственно прилегающих к месту установки ФЭМ. Данное мероприятие обеспечивает снижение температуры поверхности кровли, предотвращая перегрев ФЭМ снизу, и создает дополнительную теплоизоляцию здания. Это способствует поддержанию коэффициента полезного действия (КПД) ФЭМ в расчетных пределах, так как рост температуры ФЭМ выше 25°C ведет к снижению их эффективности (отрицательный температурный коэффициент).

9. Периодическая ручная поливка водой на поверхность ФЭМ в летний период. Данное мероприятие позволит уменьшить электрические потери из-за избыточного нагрева поверхности модулей, а также поспособствует их очистке от загрязнения [19, 20].

10. Анализ возможности автоматизации процессов управления пространственной ориентацией ФЭМ указывает на перспективность внедрения механических систем с часовым приводом. В отличие от дорогостоящих электромеханических трекеров с сервоприводами, предлагаемая концепция базируется на принципе работы часового механизма, обеспечивающего поворот несущей конструкции с востока на запад в соответствии с суточной траекторией Солнца. Несмотря на необходимость ежемесячной корректировки величины угла поворота, обусловленной сезонным изменением продолжительности светового дня, данное решение позволяет минимизировать эксплуатационные расходы и практически полностью исключить трудозатраты, характерные для классического ручного трекинга.

Вышеуказанные технические мероприятия широко применяются на существующих объектах гелиоэнергетики и прошли масштабную прикладную апробацию в СЭС различных мощностей. Тем не менее для изолированных систем перспективным является внедрение комбинированного метода: совместное использование плоских отражательных систем (ПОС) и ручного трекера (РТ) в виде дискретного позиционирования. Под термином «плоская отражательная система» в данном контексте понимается совокупность плоских поверхностей (зеркальных или

³СТО РусГидро 02.01.62-2021. Электрические станции и сети. Ремонт и техническое обслуживание оборудования, зданий и сооружений. Организация производственных процессов. Нормы и требования. М.: ПАО «РУСГИДРО», 2021.

диффузных), направляющих дополнительный поток излучения на ФЭМ. «Ручной трекер» представляет собой опорную конструкцию, позволяющую вручную изменять угол наклона или азимут ФЭМ для ориентации на Солнце без использования электроприводов и автоматики.

Данное решение нацелено на существенное увеличение среднесуточной выработки электрической энергии в течение всего года. Внедрение ПОС сопряжено с определенными эксплуатационными вызовами. Основная сложность заключается в необходимости регулярного обслуживания отражателей в зимний период: накопление снегового покрова и образование наледи на поверхности систем значительно снижают их коэффициент отражения, что требует дополнительных трудозатрат на очистку в экстремальных климатических условиях.

На основании вышеизложенного представляется необходимым проведение натурных исследований для детального изучения особенностей комбинированного применения плоских отражательных систем и ручного трекинга ФЭМ в составе СЭС микромощности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В центральной части Якутии проведены натурные испытания по оценке эффективности применения ручного трекинга ФЭМ с отражательными системами в составе СЭС. В соответствии с методологией планирования эксперимента необходимая кратность измерений для подтверждения достоверности полученных результатов определена на основании выражения (1):

$$N = P^K = 2^2 = 4, \quad (1)$$

где N – количество опытов, ед.; P – число уровней каждого фактора, ед.; K – число факторов, ед.

Исследование учитывает два ключевых фактора, влияющих на работу ФЭМ и отражательных систем: солнечную инсоляцию и температурный режим модулей. Двухуровневая структура каждого фактора обусловлена связью основного параметра с внешними условиями: интенсивности излучения – с уровнем суммарной радиации, а температуры поверхности ФЭМ – с температурой окружающего воздуха.

Алгоритм оценки эффективности ручного трекинга ФЭМ и отражательных систем базируется на расчете среднесуточного прироста выработки электрической энергии и анализе мгновенного КПД ФЭМ в течение светового дня. При этом в выражении (2) учитываются электрические потери, обусловленные термическим дрейфом характеристик при нагреве поверхности ФЭМ, и фактическая температура фотоэлементов.

$$\Delta_{PT+ПО} = \begin{cases} \mathcal{E}_{mp-ПО}^i = \int_0^{24} P_{mp-ПО}(t, \eta, T) dt \\ \mathcal{E}_{лин}^i = \int_0^{24} P_{лин}(t, \eta, T) dt \\ \Delta_{эф} = \left[\frac{\frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \mathcal{E}_{mp-ПО}^i}{\frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \mathcal{E}_{лин}^i} - 1 \right] \times 100 \% \\ P_{факт}(t) = I_{нов}(t) \times S \times \eta_{ном} \times [1 - \beta (T_{мод}(t) - 25)] \\ \eta_{мгн}(t) = \frac{P_{факт}(t)}{I_{нов}(t) \times S} \\ 0 < \Delta_{эф} < 58 \% \end{cases}, \quad (2)$$

где $\mathcal{E}_{mp-ПО}^i$ – суточная выработка электрической энергии от ФЭМ с ручным трекингом и отражателями в i -м опыте, Вт·ч; $\mathcal{E}_{лин}^i$ – суточная выработка электрической энергии от ФЭМ со стандартной (линейной) стационарной установкой в i -м опыте, Вт·ч; $P_{mp-ПО}(t)$, $P_{лин}(t)$ – мгновенная мощность соответствующих ФЭМ в момент времени t , Вт; $P_{факт}(t)$ – фактическая генерируемая мощность ФЭМ с учетом влияния внешних факторов, Вт; t – время в течение суток, от 0 до 24 ч; $\Delta_{эф}$ – итоговый коэффициент применимости (прирост эффективности) предложенного мероприятия, %; i – порядковый номер повторности эксперимента ($i = 1, 2, 3, 4$), ед.; $I_{нов}(t)$ – интенсивность суммарной солнечной инсоляции, приходящей на приемную поверхность (с учетом вклада отражателей для ручного трекинга), Вт/м²; S – рабочая площадь ФЭМ, м²; $\eta_{ном}$ – номинальный КПД ФЭМ при стандартных условиях измерений STC (Standart Test Conditions), о. е.; $\eta_{мгн}(t)$ – мгновенный фактический КПД ФЭМ, рассчитанный как отношение выходной мощности к энергии падающего излучения, о. е.; β – температурный коэффициент мощности ФЭМ (потери при нагреве), %/°C; $T_{мод}(t)$ – фактическая температура поверхности фотоэлектрического модуля в момент времени

t , °C; 25 – базовая температура модуля при стандартных условиях испытаний, °C.

Для обеспечения оперативной корректировки пространственного положения ФЭМ (4) в системе ручного трекинга реализовано размещение модуля на специализированной подвижной платформе (1). Данное конструктивное решение предусматривает совместную установку ФЭМ и отражательной системы на едином основании, жестко соединенном с несущей конструкцией по периметру с помощью болтов М8. Использование такой платформы упрощает процесс позиционирования установки пользователем без применения сложного инструмента. Схема узла соединения представлена на рис. 1.

Геометрические параметры ПОС выбраны исходя из условия равенства апертур: общая площадь поверхности кашированной алюминиевой фольги строго соответствует площади фронтальной поверхности ФЭМ (67×107 см). Данное конструктивное решение позволяет достичь оптимального баланса между интенсивностью отраженной инсоляции и равномерностью засветки ФЭМ мощностью 125 Вт. Использование идентичных площадей минимизирует краевые эффекты и упрощает механическую юстировку системы при совмещении отражателя с несущей конструкцией ФЭМ, обеспечивая эффективное концентрирование энергии (AI) слоем без избыточного утяжеления установки.

Для достижения точной последовательности проводимых исследований разработана блок-схема, описывающая порядок выполнения работ, рис. 2.

Анализ представленной блок-схемы (рис. 4) подтверждает соответствие разработанно-

го алгоритма фундаментальным принципам теории планирования эксперимента. В основу методики заложено сравнительное сопоставление данных, полученных при мониторинге функционирования двух опытных групп в идентичных условиях. Для обеспечения достоверности результатов необходимо соблюдение четырех ключевых условий:

Условие I: Идентичность технических характеристик. Обязательным требованием является использование ФЭМ одинаковых моделей, что исключает влияние заводских допусков и конструктивных различий на итоговые показатели.

Условие II: Подготовка рабочих поверхностей. Перед началом каждого цикла суточного мониторинга проводится обязательная очистка ФЭМ и поверхностей ПОС от загрязнений (пыли, наслоений и др.), что гарантирует максимальную прозрачность и коэффициент отражения систем.

Условие III: Геометрическая оптимизация ПОС. Размещение отражательных систем относительно фронтальной плоскости ФЭМ осуществляется под строго определенным углом к горизонту. Данный параметр является переменным и рассчитывается исходя из текущей высоты стояния Солнца (зенитного угла) и выбранного угла наклона ФЭМ для максимизации плотности лучистого потока.

Условие IV: Регламент ручного трекинга. Согласно результатам предварительных испытаний [12], корректировку пространственной ориентации ФЭМ целесообразно производить с дискретностью не более одного раза в час. Данная периодичность является оптимальной с точки зрения баланса между трудо-

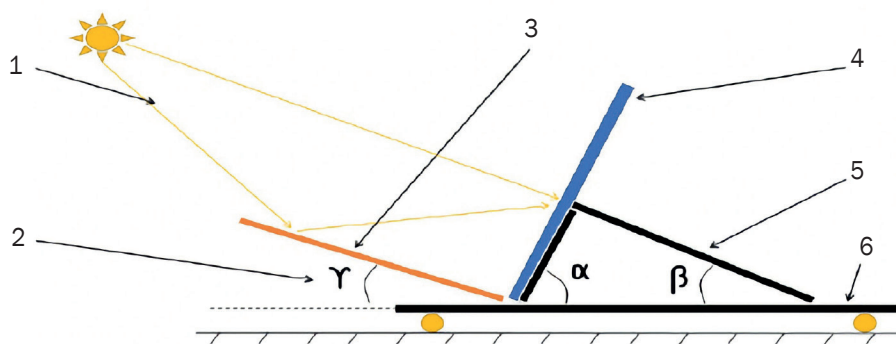


Рис. 1. Схема размещения модуля с отражателем и применением ручного трекинга: 1 – лучи солнца; 2 – угол наклона отражателя; 3 – отражатель; 4 – фотоэлектрический модуль; 5 – несущая конструкция; 6 – подвижная платформа

Fig. 1. Layout of a photovoltaic module with a reflector and manual tracking: 1 – sun rays; 2 – reflector tilt angle; 3 – reflector; 4 – photovoltaic module; 5 – supporting structure; 6 – moving platform

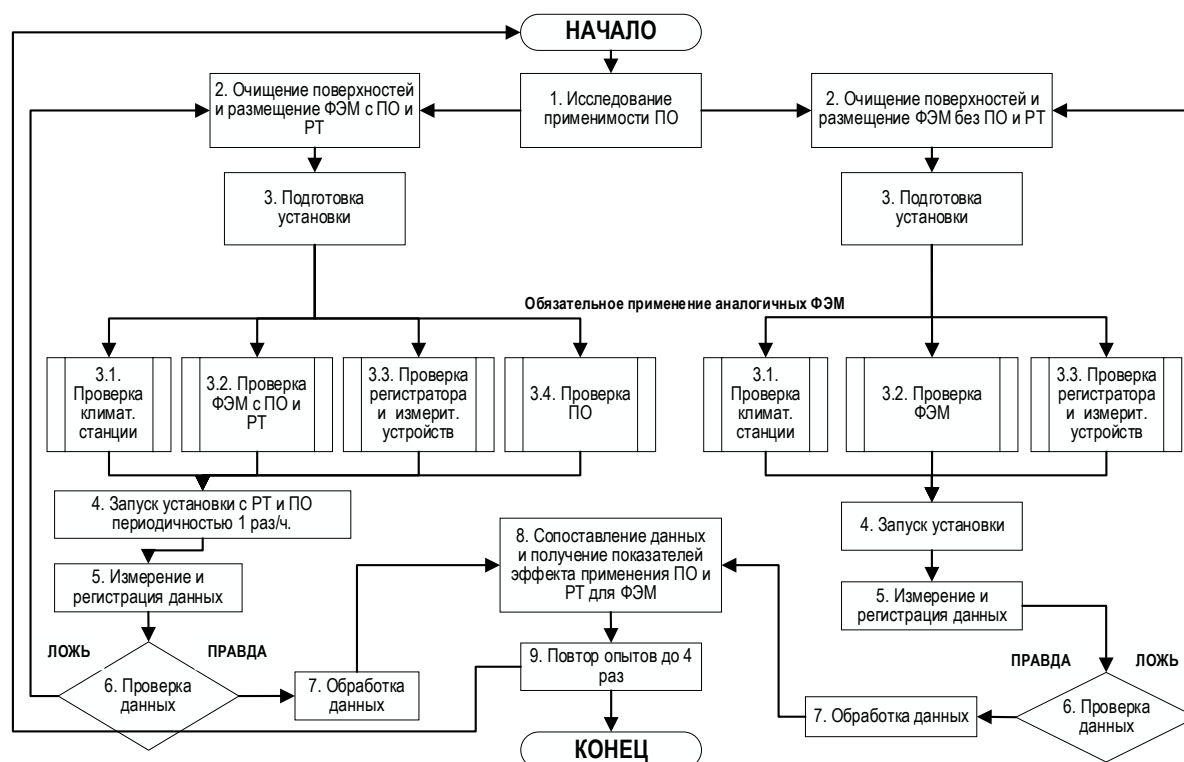


Рис. 2. Блок-схема разработанного алгоритма
Fig. 2. Block-diagram of the developed algorithm

затратами персонала и достигаемым приростом выработки электрической энергии.

Соблюдение вышеуказанных условий продиктовано необходимостью обеспечения высокой достоверности экспериментальных данных. ФЭМ, являясь полупроводниковым устройством, обладает критической чувствительностью к неравномерности освещения: даже локальное затенение незначительной площади поверхности модуля способно привести к существенной деградации выходных характеристик.

В соответствии с разработанным алгоритмом, по результатам измерений будут сформированы графические зависимости (аппроксимирующие кривые) ключевых режимных параметров ФЭМ в условиях базовой эксплуатации и при комплексном применении РТ и ПОС. К основным исследуемым характеристикам относятся зависимости генерируемой мощности, КПД, температура рабочей поверхности и электрических потерь мощности модуля от интенсивности падающей солнечной инсоляции.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 3 представлен внешний вид исследуемой ФЭМ с ПОС и дискретным позиционированием, согласно схеме из рис. 1.

Представленные данные и схемы подтверждают, что исследуемый ФЭМ, оснащенный ПОС, перемещается с целью ориентации на Солнце с установленной периодичностью – один раз в час. Для обеспечения чистоты эксперимента критически важно исключить взаимное затенение ФЭМ, особенно в вечерний период при низком стоянии Солнца. Данное требование соблюдено путем пространственного разнесения установок на расстояние не менее 1,0...1,5 м, что гарантирует отсутствие теней от контрольного образца на поверхности ФЭМ с ПОС.

Благодаря использованию передвижной платформы, ФЭМ с ПОС позиционируется в оптимальное положение относительно солнечного диска без значительных физических усилий. Оптимальный угол ориентации определяется расчетным путем на основе данных об азимуте и угле возвышения (высоте) Солнца для географических координат центральной части Якутии. Согласно общетехническим рекомендациям по эксплуатации мобильных энергоустановок, для обеспечения легкости маневрирования платформы и точности позиционирования целесообразно использовать подготовлен-



Рис. 3. Внешний вид исследуемого модуля на передвижной конструкции и отражателе
Fig. 3. External view of the studied photovoltaic module on a mobile structure and a reflector

ные твердые основания (бетонные площадки или участки с уплотненным грунтом).

На рис. 4 приведены графические зависимости выходных параметров системы от интенсивности солнечной инсоляции. Значения вырабатываемой мощности, КПД и электрических потерь ФЭМ, расчет которых предусмотрен этапом обработки данных (Блок 7), определялись расчетно-аналитическим методом. В качестве базиса использовались прямые измерения выходного тока и напряжения, а также данные температурных датчиков, фиксирующих состояние рабочей поверхности модуля в реальном времени.

Анализ зависимости КПД фотоэлектрического модуля от интенсивности инсоляции в светлое время суток подтверждает значительный рост эффективности системы. В исследуемом диапазоне ($200\text{--}600\text{ Вт/м}^2$) КПД модуля с использованием ПОС и дискретного позиционирования увеличился с базовых $9,4\text{--}9,8\%$ до $13,8\text{--}14,8\%$. Таким образом, относительный прирост КПД составил $46,8\text{--}51,0\%$ ($4,4\text{--}5,0$ п.п. (процентный пункт) в абсолютном выражении). Математическое описание данных процессов выполнено с помощью полиномов 5-й степени, что позволило достичь высоких коэффициентов детерминации: $R^2 = 0,9614$ для системы с ПОС и $R^2 = 0,9197$ для базовой конфигурации. Высокие значения R^2 подтверждают статистическую значимость и достоверность полученных экспериментальных данных.

Увеличение КПД напрямую обеспечило рост удельной генерирующей мощности с $46,65$ до $66,16\text{ Вт/м}^2$, что эквивалентно суммарному приросту выработки электроэнергии на $41,82\%$. Стабильный характер кривых аппроксимации во всем интервале наблюдений доказывает устойчивость положительного эффекта предлагаемого метода независимо от колебаний солнечной активности в течение дня.

Динамика электрических потерь мощности из-за нагрева ФЭМ также подвергнута математическому анализу. Установлено, что при пиковой инсоляции в 600 Вт/м^2 тепловые потери в системе с ПОС достигают $13,2\%$, что на $15,8\%$ (относительно базового уровня) выше показателей стандартного модуля ($11,4\%$). Данные зависимости аппроксимированы полиномами 3-й степени с исключительно высокой степенью достоверности ($R^2 = 0,9627$ и $R^2 = 0,9937$ соответственно). Сравнение моделей показывает, что несмотря на нелинейный рост термических потерь, полезный эффект от концентрации светового потока многократно превосходит негативное влияние перегрева, обеспечивая итоговую высокую энергоэффективность предложенного способа.

Расчетный КПД полупроводниковой структуры с учетом коэффициента концентрации остается стабильным (табл. 1), что свидетельствует о сохранении энергетического баланса системы при интенсификации облученности.

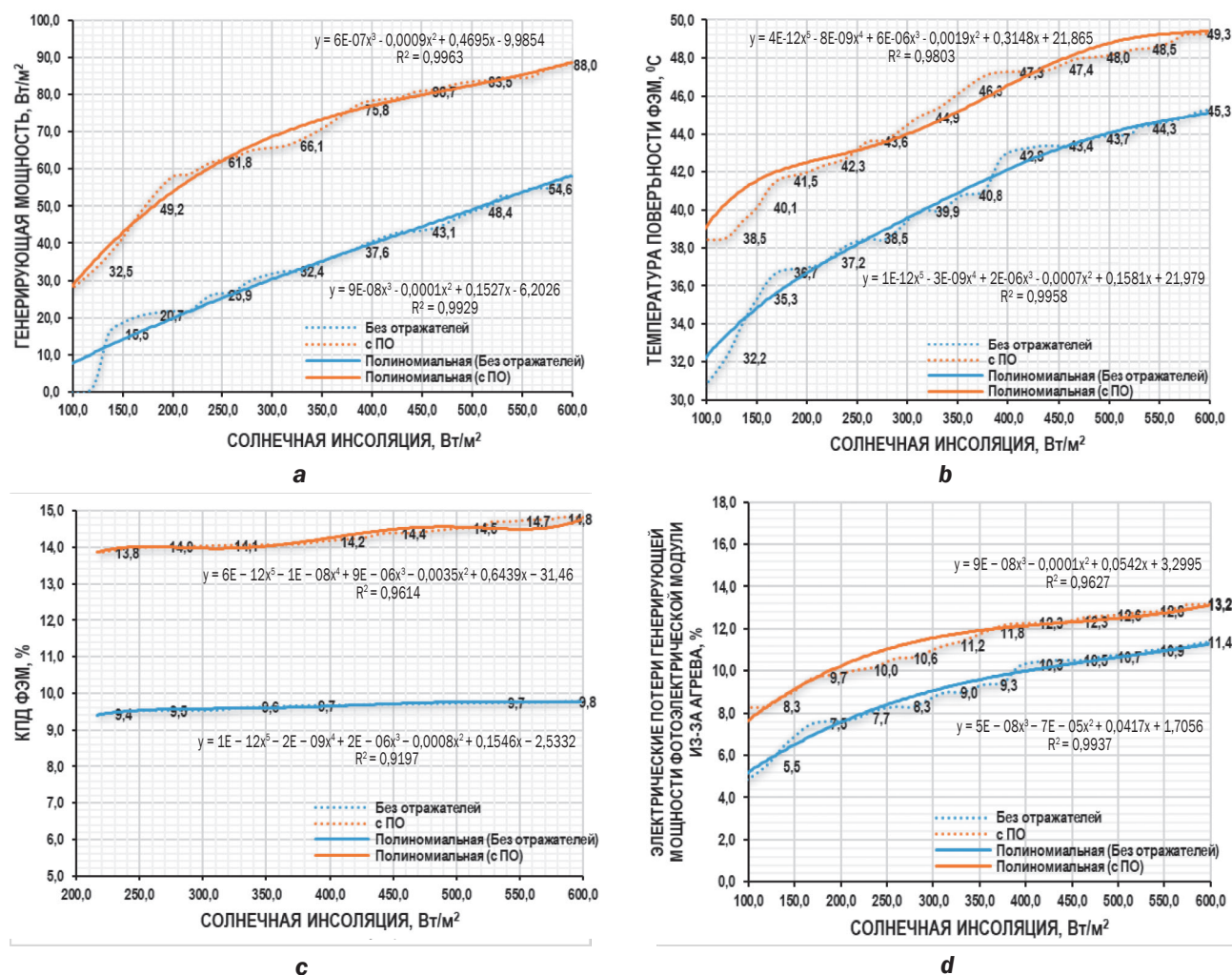


Рис. 4. Графики зависимости параметров функционирования модулей с отражателями и ручным трекингом от солнечной инсоляции: а – генерирующая мощность; б – коэффициент полезного действия модуля; в – поверхностная температура модуля; г – электрические потери модуля из-за нагрева

Fig. 4. Graphs of the performance parameters of modules with reflectors and manual tracking versus solar insolation: а – generating power; б – photovoltaic module efficiency; в – photovoltaic module surface temperature; г – photovoltaic module electrical losses due to heating

Исследование температурного режима ФЭМ показало, что использование ПОС и РТ приводит к существенному разогреву ФЭМ. Среднесуточная температура поверхности

модулей в данной комплектации достигла +44,73 °C, что на 4,79 °C (или 12 %) выше показателей стандартной установки без дополнительных приспособлений (+39,94 °C).

Таблица 1. Показатели концентрирования солнечного излучения

Table 1. Solar radiation concentration indicators

Наименования среднесуточных параметров	Параметры фотоэлектрического модуля		Эффект от плоских отражающих систем и ручного трекинга, %
	с отражающими системами и ручным трекингом	стационарный	
Солнечная инсоляция на поверхности модуля, Вт/м ²	622,32	427,34	+45,62
Коэффициент концентрирования излучения, о. е.	1,4562		
Генерирующая мощность модуля, Вт/м ²	66,16	46,65	+41,82
Суммарная выработка электрической энергии от модуля, Втч/м ²	727,81	513,19	
Суммарные электрические потери, %	+3,80		
КПД фотоэлектрического модуля, %	10,63	10,91	±0,28

Такой избыточный нагрев создает предпосылки для роста электрических потерь мощности.

Оценка зависимости электрических характеристик от инсоляции подтвердила негативное влияние термического фактора. Из-за перегрева поверхности среднесуточные электрические потери модулей с ПОС и РТ составили 11,13 %, в то время как в базовом варианте этот показатель не превышал 8,97 %. Таким образом, внедрение систем отражения и трекинга спровоцировало рост тепловых потерь на 24,08 % (+2,16 о. е.). Детальные показатели проведенных испытаний приведены в табл. 2.

Выполнен сравнительный тепловизионный контроль температуры поверхности ФЭМ в базовой и оптимизированной (ПОС и РТ) конфигурациях при идентичных метеоусловиях. Измерения проводились в характерные временные интервалы (утро, солнечный зенит, вечер). Визуализация тепловых полей представлена на термограммах (рис. 5), а результаты количественной обработки данных систематизированы в табл. 3.

Результаты сравнительного анализа температурных режимов свидетельствуют о закономерном росте термической нагрузки на ФЭМ при интенсификации светового потока. Установлено, что применение ПОС в соче-

Таблица 2. Результаты натурных исследований

Table 2. Field study results

Наименование параметра	Параметры фотоэлектрического модуля		Эффект от плоских отражающих систем и ручного трекинга, %
	с отражающими системами и ручным трекингом	стационарный	
Диапазон солнечной инсоляции, Вт/м ²	100,00...600,00		
Среднесуточная температура поверхности ФЭМ, °С	44,73	39,94	+4,79
Среднесуточная температура среды, °С	27,7		
Среднесуточная скорость ветра, м/с	1,0...2,0		
Среднесуточное повышение температуры поверхности ФЭМ, °С	17,03	12,24	+39,13
Среднесуточная генерирующая мощность ФЭМ, Вт/м ²	66,16	46,65	+41,82
Среднесуточные электрические потери ФЭМ из-за нагрева, %	11,13	8,97	+24,08
Фактическая среднесуточная генерирующая мощность ФЭМ, Вт/м ²	77,29	55,62	+38,96
Среднестатистическая КПД ФЭМ, %	14,35	9,86	+4,49

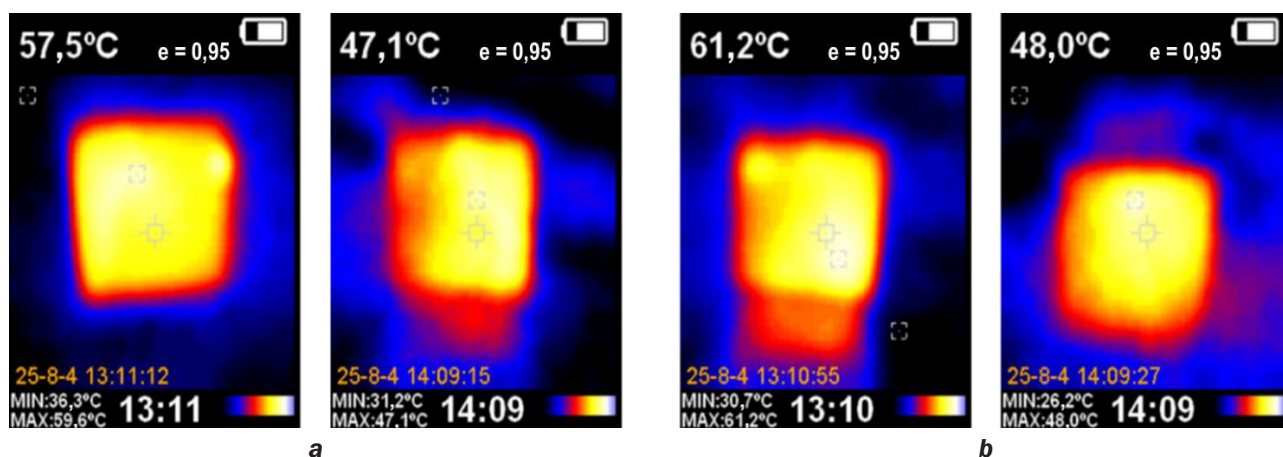


Рис. 5. Термограммы поверхности фотоэлектрического модуля с плоским отражателем и ручным трекингом в зените дня: а – стационарный; б – с отражателем и трекингом

Fig. 5. Thermograms of the surface of a photovoltaic module with a flat reflector and manual tracking at the zenith of the day: a – stationary; b – with a reflector and tracking

Таблица 3. Результаты обработки данных

Table 3. Data processing results

Период контроля	Температура отражающих систем, °С	Температура поверхности модуля, °С	Термические потери мощности, %
		с отражающими системами и ручным трекингом	стационар
Утро	+25,10	+45,35	+33,90
Полдень (зенит)	+27,10	+54,60	+52,30
Вечер	+28,20	+44,25	+41,90
Среднесуточное	+26,80	+48,07	+42,70

тании с дискретным позиционированием (РТ) приводит к увеличению среднесуточной температуры поверхности ФЭМ на 5,37 °С относительно стационарного размещения (с +42,70 до +48,07 °С). Наиболее выраженный температурный градиент наблюдается в утренние часы (разница составляет 11,45 °С), что объясняется эффективным «захватом» солнечной радиации под оптимальным углом в период, когда стационарный ФЭМ работает с минимальной эффективностью.

Визуальный анализ термограмм (см. рис. 5) подтверждает данные натурных измерений и наглядно демонстрирует распределение тепловых полей. На снимках отчетливо фиксируется рост пиковых температур поверхности в зените дня: при использовании системы ПОС и РТ температура достигает +54,60 °С (рис. 5 б), в то время как стационарный ФЭМ прогревается до +52,30 °С (см. рис. 5 а). Интенсивное свечение в центральной части ФЭМ на термограмме

(см. рис. 5 б) коррелирует с зоной максимальной концентрации отраженного светового потока, что подтверждает корректность юстировки отражательной системы.

Увеличение поверхностной температуры неизбежно ведет к росту фактических электрических потерь, обусловленных температурным коэффициентом мощности фотоэлементов. Согласно расчетным данным, среднесуточный показатель потерь в системе с интенсификацией составляет 12,63 %, что превышает базовый уровень стационарного ФЭМ (10,22 %). Относительное увеличение фактических термических потерь достигает 23,63 %. Несмотря на это, полученный ранее прирост суммарной выработки электрической энергии в 41,82 % доказывает, что энергетический выигрыш от применения ПОС и РТ значительно превосходит негативное влияние перегрева, при этом выявленный температурный режим служит обоснованием для внедрения вспомогательных систем охлаждения.

Таблица 4. Почасовая динамика параметров эффективности в Центральной Якутии, начало июля

Table 4. Hourly dynamics of efficiency parameters in central Yakutia, early July

Время суток (с востока на запад)	Угол поворота ФЭМ, град.	Угол наклона отражателя к горизонту, град.	Мощность (ПОС + РТ), Вт/м ²	Мощность (стационар), Вт/м ²	Прирост эффективности, %
06:00	+90	15	24,1	1,8	92,5
07:00	+75	22	42,4	8,2	80,6
08:00	+60	30	55,8	15,8	71,6
09:00	+45	38	69,8	30,0	57,0
10:00	+30	45	86,3	44,0	49,0
11:00	+15	50	94,7	60,2	36,4
12:00	0	53	99,7	70,8	28,9
13:00 (Зенит)	-15	55	107,5	79,1	35,9
14:00	-30	50	95,5	73,4	23,1
15:00	-45	42	90,1	64,7	28,1
16:00	-60	35	74,4	44,7	39,9
17:00	-75	25	53,7	22,4	58,2
18:00	-90	18	34,8	13,4	61,4
В среднем за сутки	-	-	727,81	513,19	41,6-41,8

В табл. 4 представлена почасовая динамика параметров функционирования стационарной и усиленной ФЭМ (ПОС и РТ).

Результаты исследований наглядно демонстрируют закономерности изменения эффективности выработки электрической энергии в условиях суточного движения Солнца с востока на запад. В основу эксперимента положена методика ручного дискретного позиционирования единого блока (ФЭМ+ПОС). Данный подход позволяет синхронизировать ориентацию приемной поверхности с азимутальным и зенитным перемещением солнечного диска, обеспечивая максимальную плотность лучистого потока во временной точке мониторинга.

Анализ геометрических параметров системы показывает, что для условий начала июля в Центральной Якутии оптимальная траектория следования за Солнцем требует изменения азимутального угла блока от $+90^\circ$ в утренние часы до -90° в вечерние. Одновременно с этим жесткая конструктивная связь ФЭМ и ПОС позволяет путем корректировки угла наклона всего блока к горизонту (от 15 до 55°) удерживать нормаль падения прямого излучения и одновременно максимизировать вклад отраженной составляющей. Такая комплексная переориентация нивелирует косинусные потери, характерные для стационарных установок, и создает эффект «оптического усиления» во всем световом диапазоне.

Энергетический отклик системы наиболее выражен в периоды низкого стояния Солнца над горизонтом. В интервале с 06:00 до 09:00, когда стационарные ФЭМ работают с минимальной эффективностью из-за острого угла падения лучей, экспериментальная установка (ФЭМ+ПОС+РТ) демонстрирует кратный рост удельной мощности – от 53,4 до 92,5 %. Аналогичная тенденция прослеживается в вечерний период (16:00–18:00), где прирост составляет от 32,6 до 56,8 %. Данный феномен объясняется тем, что дискретное позиционирование фактически «растягивает» полезный световой день, вовлекая в генерацию низкопотенциальное излучение, которое при стационарном размещении рассеивается или отражается от защитного стекла модуля.

В околополуденные часы (11:00–14:00) зафиксированы пиковые значения удельной

мощности ФЭМ, достигающие максимума в $107,5 \text{ Вт/м}^2$ в точке зенита. Несмотря на закономерное снижение относительного прироста эффективности в этот период (до 20,0–25,4 %), обусловленное ростом термических потерь при нагреве поверхности ФЭМ до $+54,6^\circ\text{C}$, абсолютная выработка электрической энергии остается на предельно высоком уровне. Интегральная оценка данных за цикл наблюдений подтверждает, что суммарная удельная энергия исследуемой системы составила 932,2 против 658,5 Вт/м^2 у стационарного аналога.

Таким образом, применение дискретного позиционирования в сочетании с ПОС обеспечило увеличение среднесуточной выработки электрической энергии на 41,6 %. Полученные данные доказывают, что предложенная техническая реализация – жесткая связка ФЭМ и ПОС с ежечасной ручной корректировкой – является высокоэффективным и надежным решением для северных широт. Она позволяет не только существенно повысить коэффициент использования установленной мощности, но и стабилизировать выходные характеристики СЭС в течение всего светового дня, компенсируя суточную динамику движения Солнца.

Затем на рис. 6 представлены кривые зависимостей прироста эффективности (увеличение выработки электрической энергии), угла наклона ПОС и вырабатываемой мощности ФЭМ в течение суток.

Представленные графики иллюстрируют зависимость энергоэффективности СЭС от параметров дискретного позиционирования блока «ФЭМ – ПОС». Исследования подтверждают, что ежечасная корректировка углов обеспечивает стабильный среднесуточный прирост выработки электрической энергии на уровне 41,6 %.

На графике (см. рис. 6 а) кривые удельной мощности имеют плавный вид, что обусловлено непрерывным изменением солнечной инсоляции в течение дня. Маркеры на линиях соответствуют точкам фиксации данных сразу после каждого акта позиционирования. Использование линий позволяет наглядно сравнить общую динамику выработки электрической энергии от исследуемых ФЭМ и стационарной установки.

На графике (рис. 6 б) параметры ориентации ФЭМ с ПОС (угол наклона) представлены в виде столбчатой диаграммы, что под-

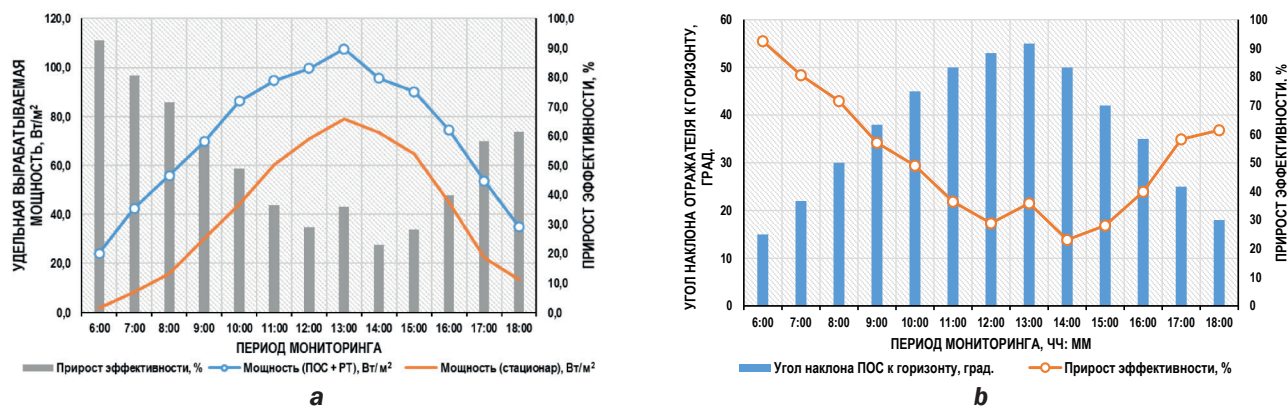


Рис. 6. Результаты натурных испытаний системы с ручным дискретным трекингом: а – зависимость генерируемой мощности; б – зависимость относительного прироста от параметров ориентации модуля

Fig. 6. Results of field tests of the system with manual discrete tracking: а – dependence of the generated power; б – dependence of the relative increase on the photovoltaic module orientation parameters

черкивает дискретный характер управления с шагом в 60 мин. В отличие от непрерывно меняющейся мощности, угловое положение установки фиксировалось вручную один раз в час и оставалось неизменным до следующей корректировки. Подобный комбинированный способ отображения данных (линии для мощности и столбцы для углов) позволяет разделить естественные физические процессы и технические манипуляции оператора. Анализ подтверждает, что даже при упрощенном почасовом трекинге достигается значительный рост эффективности (до 92,5 % в утренние часы), что доказывает целесообразность применения данной методики в условиях северных широт.

На рис. 7 и 8 представлены графики среднесуточной и среднегодовой выработки электрической энергии от ФЭМ в базовом исполнении и при комплексном применении ручного трекинга и отражателей. Поскольку представленные исследования ограничены конкретными временными интервалами, среднегодовые показатели получены расчетно-аналитическим методом. В основу расчетов заложены экспериментально подтвержденные коэффициенты эффективности (КПД и прирост мощности от ПОС и РТ), интегрированные в модель с учетом многолетних статистических данных по солнечной инсоляции в исследуемом регионе. Такой подход позволил экстраполировать результаты натурных

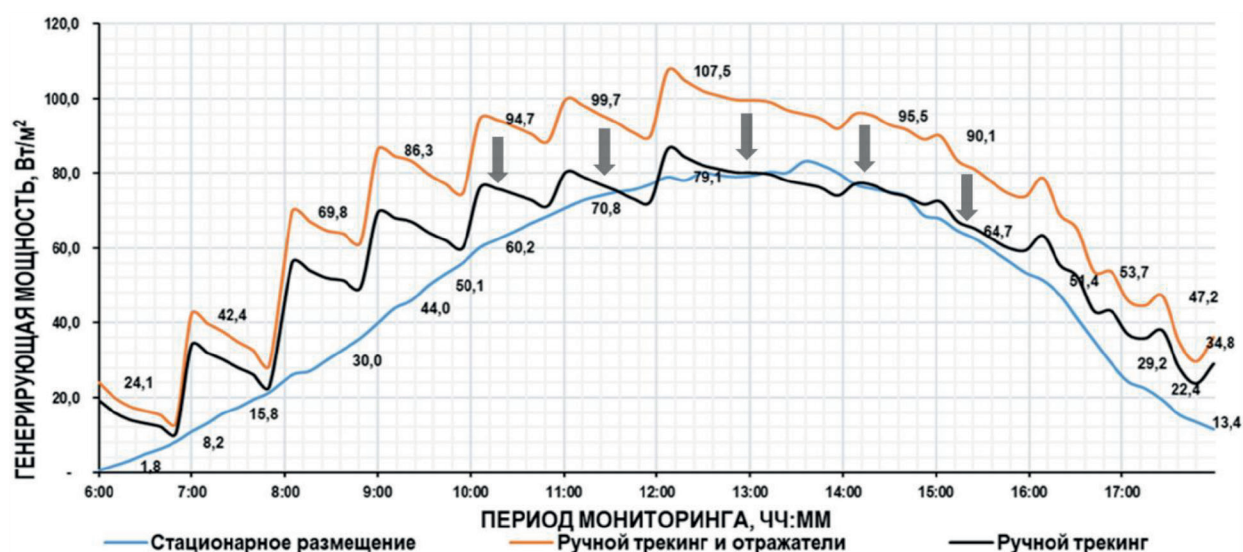


Рис. 7. Суточный график генерируемой мощности солнечной электростанции до и после применения предложенного решения

Fig. 7. Daily graph of photovoltaic power plant generated power before and after the introduction of the proposed solution

измерений на весь календарный год, учитывая сезонные изменения высоты стояния Солнца и продолжительности светового дня.

Представленная графическая зависимость суточной динамики удельной генерирующей мощности ($\text{Вт}/\text{м}^2$) подтверждает высокую энергетическую эффективность комбинированного использования ручного трекинга и ПОС в сравнении со стационарным размещением ФЭМ. График стационарной установки характеризуется классической унимодальной кривой с максимумом в околополуденные часы, тогда как профили с применением ручного трекинга имеют выраженный пилообразный характер, обусловленный дискретной ежечасной корректировкой пространственного положения ФЭМ. Максимальная плотность потока мощности зафиксирована для системы с отражателями из кашированной алюминиевой фольги, достигая пикового значения $107,5 \text{ Вт}/\text{м}^2$, что существенно превышает показатели как изолированного ручного трекинга, так и стационарного размещения ($\sim 79...83 \text{ Вт}/\text{м}^2$). Стабильное превышение амплитуды оранжевой кривой над остальными на всем интервале мониторинга (с 06:00 до 18:00) наглядно иллюстрирует эффект концентрации солнечного излучения, обеспечиваемый равенством площадей ПОС и ФЭМ, что в конечном итоге и приводит к зафиксированному ранее росту среднегодовой выработки на 30,88 %.

Анализ среднесуточного графика выработки показал, что кривая выработки электрической энергии от ФЭМ после применения ПОС и РТ имеет аналогичный характер при сопоставлении с кривой выработки при использовании только РТ [12]. На графике видно, что после применения ПОС выработка электрической энергии от ФЭМ увеличилась в значительной мере – на 41,82 % при сопоставлении со стационарным размещением модулей.

Результаты анализа среднегодового графика подтверждают положительную динамику увеличения среднемесячной выработки электрической энергии СЭС при внедрении ПОС и РТ. С учетом сезонности величины солнечной инсоляции и траектории движения Солнца, эксплуатация ПОС предусмотрена в период с мая по сентябрь, тогда как в остальное время (январь...апрель и октябрь...декабрь) используется исключительно РТ. Вследствие реализации данных мер удельная выработка СЭС достигла $1411,72 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{кВт}$, что на 30,88 % превышает показатели стационарного размещения ФЭМ – $1078 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{кВт}$.

В табл. 5 представлены расчетные значения углов поворота несущей конструкции ФЭМ с часовой дискретностью для ключевых городов Содружества Независимых Государств (СНГ), полученные на основе алгоритмов сферической астрономии. Данные параметры носят характер научно-обоснованных рекомендаций, разработанных для оптимиза-

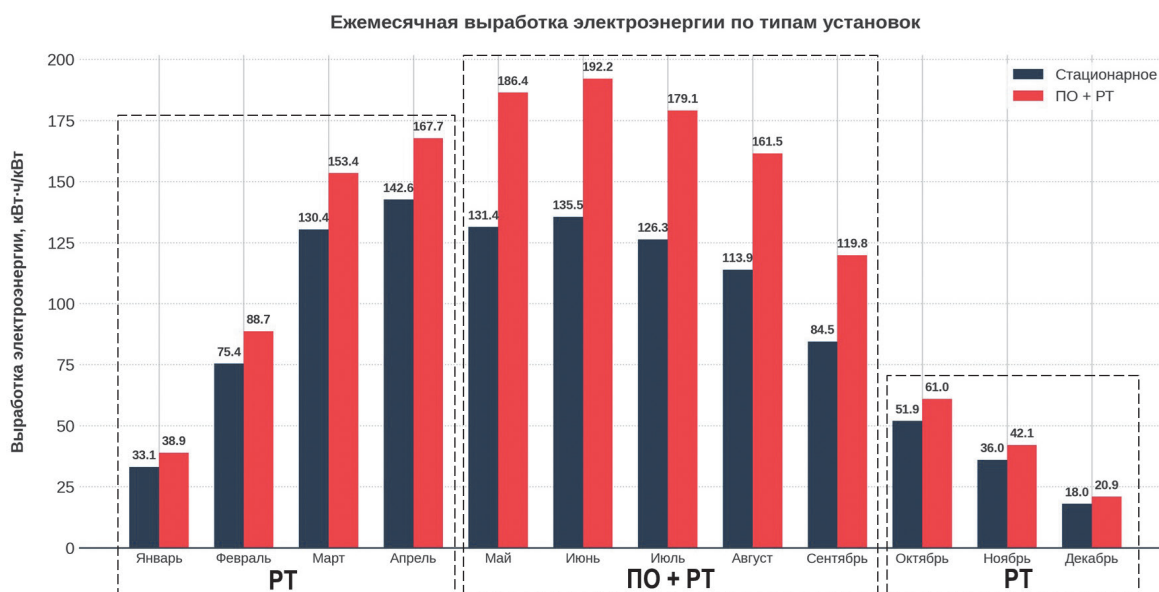


Рис. 8. Годовой график выработки электрической энергии от фото-солнечной электростанции до и после применения отражателей

Fig. 8. Annual graph of electrical energy generation from a photovoltaic power plant before and after the use of reflectors

ции систем ручного трекинга в зависимости от географических координат. Величина угла одного поворота ФЭМ за один час определяется как отношение суточной траектории дневного движения Солнца к фактической продолжительности солнечного дня.

Анализ расчетных данных позволяет выявить корреляцию между географической широтой местности и динамикой угловых перемещений ФЭМ. Установлено, что в северных регионах (например, Мурманск) наблюдается максимальная амплитуда варьирования угла поворота – от 0° в период полярной ночи до 100° в ноябре (что может быть обусловлено спецификой расчетной модели для предельно низкого стояния Солнца), тогда как в летний период значения стабилизируются на уровне $15...18^\circ$. В городах средней полосы и южных широтах (Москва, Алматы, Ташкент и др.) прослеживается более равномерная годовая динамика: значения углов колеблются в узком диапазоне $12...19^\circ$, достигая пика в летние месяцы. Подобная стабильность объясняется меньшим изменением продолжительности светового дня по сравнению с арктическими зонами. Общая тенденция для всех исследуемых локаций указывает на снижение расчетного угла поворота в зимний период, что прямо обусловлено сокращением суточной дуги движения Солнца и соответствующим уменьшением требуемой интенсивности трекинга.

В табл. 6 систематизированы оптимальные значения углов наклона ПОС относительно фронтальной поверхности ФЭМ, полученные расчетным путем для ключевых городов стран СНГ. Данные параметры определены на основе геометрических соотношений между положением Солнца в зените и рабочей плоскостью установки с целью достижения максимального коэффициента отражения на приемную поверхность. В рамках представленного исследования эти значения используются как базовые установочные параметры для настройки отражателей в весенне-летний период, что позволяет обеспечить корректную юстировку оборудования в зависимости от географической широты местности без применения сложных вычислительных комплексов.

Анализ данных позволяет выявить выраженную зависимость оптимального угла наклона ПОС от географической широты и сезонности, обусловленную изменением высоты стояния Солнца. В городах северных и умеренных широт (Мурманск, Москва, Новосибирск) наблюдается значительная амплитуда расчетных значений, достигающая максимума в летние месяцы (июнь...июль), что связано с необходимостью адаптации отражающих поверхностей к высокой околозенитной траектории. В южных регионах (Ташкент, Баку, Алматы) динамика углов более сглажена и характеризуется стабильным

Таблица 5. Величины углов поворота фотоэлектрических модулей к Солнцу

Table 5. Values of the tilt angles of photovoltaic modules relative to the Sun

Месяц	Угол поворота фотоэлектрического модуля с периодичностью 1 поворот в час, $\alpha \pm 1^\circ$												Среднее значение
	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	
Мурманск	0	40	22	18	15	15	15	17	18	23	100	0	24
Москва	14	16	17	17	18	18	18	18	17	16	15	14	16
Краснодар	13	16	17	17	19	19	19	19	18	18	16	13	17
Новосибирск	14	16	17	17	18	18	18	18	17	16	15	14	16
Якутск	16	15	17	18	17	15	16	17	17	16	14	16	16
Владивосток	13	16	17	17	19	19	19	19	18	18	16	13	17
Костанай	13	14	17	17	18	18	18	18	17	16	15	14	16
Караганда	13	14	17	17	18	18	18	18	17	16	15	14	16
Алматы	13	16	17	17	19	19	19	19	18	18	16	13	17
Ташкент	12	15	17	17	19	19	19	19	18	16	14	12	16
Душанбе	12	15	17	17	19	19	19	19	18	16	14	12	16
Ашхабад	12	15	17	17	19	19	19	19	18	16	14	12	16
Баку	12	15	17	17	19	19	19	19	18	16	14	12	16
Бишкек	13	16	17	17	19	19	19	19	18	18	16	13	17

Таблица 6. Углы наклона плоских отражателей для фото солнечных электростанций по городам Содружества Независимых Государств

Table 6. Tilt angles of flat reflectors for photovoltaic plants in cities of the Commonwealth of Independent States

Месяц	Угол наклона плоских отражателей для модулей относительно Земли, $\alpha \pm 4^\circ$											
	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Мурманск	0°	2°	7°	13°	18°	21°	22°	19°	15°	9°	3°	0°
Москва	5°	9°	13°	19°	24°	28°	29°	26°	21°	15°	10°	6°
Краснодар	11°	14°	18°	25°	30°	33°	34°	31°	27°	20°	15°	11°
Новосибирск	6°	9°	13°	20°	25°	28°	29°	26°	22°	15°	10°	7°
Якутск	2°	5°	10°	16°	21°	25°	26°	23°	18°	12°	7°	3°
Владивосток	12°	15°	18°	25°	30°	33°	34°	31°	27°	21°	16°	12°
Костанай	13°	16°	21°	26°	31°	36°	36°	31°	26°	21°	16°	13°
Караганда	15°	19°	24°	29°	34°	39°	39°	34°	29°	24°	19°	15°
Алматы	19°	22°	27°	32°	37°	42°	42°	37°	32°	27°	22°	19°
Ташкент	20°	23°	28°	33°	38°	43°	43°	38°	33°	28°	23°	20°
Душанбе	21°	25°	30°	35°	40°	45°	45°	40°	35°	30°	25°	21°
Ашхабад	21°	25°	30°	35°	40°	45°	45°	40°	35°	30°	25°	21°
Баку	20°	24°	29°	34°	39°	44°	44°	39°	34°	29°	24°	20°
Бишкек	19°	22°	27°	32°	37°	42°	42°	37°	32°	27°	22°	19°

нарастанием значений в весенне-летний период в диапазоне от 19 до 45°, что упрощает техническую реализацию систем позиционирования. Существует значительное различие в порядке цифровых значений между северными городами и регионами Центральной Азии, что может указывать на использование разных точек отсчета (относительно нормали или горизонта) или специфику геометрии ПОС и ФЭМ для разных климатических зон.

Вышеуказанные таблицы служат инструментальной основой для оптимизации энергоэффективности СЭС путем адаптации их пространственной ориентации к географическим и сезонным условиям. Табл. 4 определяет регламент динамического позиционирования ФЭМ, позволяя минимизировать угол падения солнечных лучей в течение светового дня, в то время как табл. 5 устанавливает параметры юстировки отражающих поверхностей для максимизации коэффициента концентрации светового потока. Использование представленных расчетных значений обеспечивает интенсификацию выработки электрической энергии и позволяет проектировать адаптивные системы управления, учитывающие специфическую инсоляцию различных широтных поясов.

Выбор временного интервала корректировки ориентации ФЭМ СЭС (1 раз в 60 мин) обусловлен поиском рационального ком-

промисса между энергоэффективностью и эксплуатационными трудозатратами. В ходе анализа данных установлено:

1. Недопустимость редких корректировок: увеличение интервала позиционирования (до 2–3 ч) ведет к значительному рассогласованию приемной поверхности с положением Солнца. Из-за быстрого азимутального смещения в летний период геометрический фактор концентрации ПОС резко снижается, что сводит эффект от использования ПОС к минимуму.

2. Избыточность частого регулирования: сокращение интервала до 15, 30 или 45 мин физически является трудновыполнимой задачей для конечного потребителя (фермеры, рыбаки, охотники, частные домовладельцы) и ведет к высоким трудозатратам. При этом дополнительный выигрыш в выработке электрической энергии по сравнению с часовым шагом оказывается незначительным и не оправдывает усложнение процесса эксплуатации.

3. Оптимальность 60-минутного шага: процедура ежечасной корректировки угла наклона и азимута блока «ФЭМ – ПОС» занимает не более 1–2 мин, что сопоставимо с обычными хозяйственными операциями. Для автономных потребителей предложенный регламент является выполнимым и позволяет стабильно удерживать среднесуточный прирост мощности на уровне 41,6 % при

полном отсутствии затрат на сложную автоматику, уязвимую в условиях низких температур окружающей среды.

В этой связи ручное регулирование с периодичностью один раз в час является наиболее эффективным режимом эксплуатации для автономных СЭС в северных широтах».

На основании вышеизложенного обоснована применимость ПОС в комбинации с ручным трекингом для повышения энергоэффективности СЭС. Данное решение учитывает комплекс внешних факторов (солнечная инсоляция, сезонная высота стояния Солнца) и внутренних параметров ФЭМ (геометрия размещения, температурный коэффициент). Несмотря на существующий риск избыточного термического воздействия на поверхность ФЭМ при использовании ПОС, проведенные натурные исследования подтвердили, что возникающие при этом электрические потери (составляющие не более 2...3 % при росте температуры) не оказывают критического влияния на итоговую эффективность. Положительный баланс между дополнительной инсоляцией и температурной деградацией обеспечивает существенный чистый прирост среднегодовой выработки электрической энергии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного исследования обоснована и экспериментально подтверждена эффективность комбинированного применения систем дискретного позиционирования фотоэлектрических модулей и плоских отражателей. Разработанный метод ручного управления жестко связанным блоком «ФЭМ – ПОС» представляет собой экономически доступный и надежный инструмент интенсификации выработки электроэнергии, критически значимый для развития распределенной энергетики в изолированных и труднодоступных регионах Севера.

Натурные исследования, проведенные на территории Центральной Якутии в летний период, продемонстрировали существенный прирост энергетических показателей: ежечасная ручная корректировка пространственной ориентации установки (изменение азимута от $+90^\circ$ до -90° и угла наклона от 15° до 55°) обеспечивает увеличение среднесуточной генерации на 41,82 %, а прогнозируемой среднегодовой – на 30,88 % относительно стационарного раз-

мещения. Расчетный КПД модуля с отражателями возрос с базовых 9,86 до 14,35 % исключительно за счет эффекта концентрации излучения и минимизации косинусных потерь. При этом выявленный побочный эффект нагрева поверхности ФЭМ на 12–13 % и сопутствующий рост тепловых потерь на 23,63 % не оказывают критического влияния на итоговый положительный энергобаланс, но служат обоснованием для интеграции систем охлаждения в регионах с высокой инсоляцией.

Сравнительный анализ расчетных данных для различных широтных поясов выявил существенную дифференциацию эффективности предложенного метода в пределах региона. Установлено, что для северных районов Якутии (выше 66° с.ш.) характерна максимальная амплитуда варьирования углов дискретного позиционирования (до 100° в периоды низкого стояния Солнца) и выраженная сезонность: эффективность применения отражателей резко возрастает в период полярного дня, однако требует обязательного демонтажа систем в зимний период из-за экстремально низких углов инсоляции и абразивного износа. Напротив, в южных районах Якутии наблюдается более стабильная годовая динамика углов поворота (в диапазоне 15° – 19°), что упрощает техническую юстировку гелиосистем и обеспечивает более равномерный прирост выработки электроэнергии в течение всего весенне-летнего периода. Таким образом, если в Центральной и Южной Якутии предложенная технология ориентирована на максимизацию пиковой мощности, то в северных районах она выступает критически важным инструментом адаптации ФЭМ к предельно низким зенитным углам Солнца.

Учитывая выраженную неравномерность поступления солнечного излучения и суточного графика потребления, при разработке вариантов комплектации солнечных электростанций для удаленных территорий необходимо предусматривать использование систем накопления электроэнергии. Интеграция накопителей позволяет нивелировать стохастический характер генерации, формировать необходимый запас мощности и обеспечивать бесперебойное энергоснабжение потребителей в периоды отсутствия солнечной инсоляции.

Обоснована рациональность выбранного 60-минутного регламента позиционирования как оптимального компромисса между энергоэффективностью и трудозатратами. Процедура ежечасной корректировки занимает не более 1–2 мин, что для условий автономных хозяйств Якутии является выполнимым и обеспечивает полную энергонеа-

висимость системы без затрат на уязвимую в морозы автоматику. Предложенная технология является технически реализуемым и экономически целесообразным решением для повышения энергетической автономности объектов в изолированных районах при одновременной максимизации удельной выработки электроэнергии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Liu Z., Peng T., Ma Sh., Qi Ch., Song Ya., Zhang Ch., et al. Potential benefits and risks of solar photovoltaic power plants on arid and semiarid ecosystems: an assessment of soil microbial and plant communities // *Frontiers in Microbiology*. 2023. Vol. 14. P. 1190650. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1190650>. EDN: CJEKOL.
2. George A.A., Ghosh D. Advancements in sustainability in the 21st century: a bibliometric analysis of solar power and its applications // *Energy Reports*. 2025. Vol. 14. P. 4291–4307. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2025.11.023>. EDN: TJHJAX.
3. Wei Zh., Fu X., Yang F., Fan Sh. Comprehensive economic benefits evaluation model of greenhouse photovoltaic // *Journal of Solar Energy Research Updates*. 2022. Vol. 9. P. 27–37. <https://doi.org/10.31875/2410-2199.2022.09.04>. EDN: XKEZCT.
4. Saxena A., Brown C., Arneeth A., Rounsevell M. Advanced photovoltaic technology can reduce land requirements for global energy transition // *Communications Earth and Environment*. 2024. Vol. 5. Iss. 1. P. 586. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01754-4>. EDN: FFYQOG.
5. Joshi P., Rao A.B., Banerjee R. Review of solar PV deployment trends, policy instruments, and growth projections in China, the United States, and India // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2025. Vol. 210. P. 115082. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115436>. EDN: CKVKGV.
6. Kishore T.S., Kumar P.U., Ippili V. Review of global sustainable solar energy policies: significance and impact // *Innovation and Green Development*. 2025. Vol. 4. Iss. 2. P. 100224. <https://doi.org/10.1016/j.igd.2025.100224>. EDN: COWNST.
7. Gawusu S., Zhang X., Yakubu S., Debrah S.K., Das O., Bundela N.S. Optimizing solar photovoltaic system performance: insights and strategies for enhanced efficiency // *Energy*. 2025. Vol. 319. P. 135099. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135099>. EDN: CBWERP.
8. Ramanan C.J., Lim K.H., Kurnia Ju.C., Roy S., Bora B.J., Medhi B.J. Towards sustainable power generation: recent advancements in floating photovoltaic technologies // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024. Vol. 194. P. 114322. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114322>. EDN: XRUCYV.
9. Sadeghi R., Parenti M., Memme S., Fossa M., Morchio S. A review and comparative analysis of solar tracking systems // *Energies*. 2025. Vol. 18. Iss. 10. P. 2553. <https://doi.org/10.3390/en18102553>. EDN: RSPLCY.
10. Himan M., Rabby Md.F., Hassan Md.M., Ahmed S., Khalil Md.K. Assessing cooling effects on floating solar PV performance enhancement // *AIP Conference Proceedings*. 2025. Vol. 3307. P. 030003. <https://doi.org/10.1063/5.0262242>.
11. Местников Н.П., Корякин А.К., Васильев П.Ф., Альзаккар А.М.Н. Оценка эффективности внедрения трековых установок в солнечные электростанции в условиях Севера // *Вестник Московского энергетического института*. Вестник МЭИ. 2023. № 6. С. 67–76. <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2023-6-67-76>. EDN: KJRHHА.
12. Местников Н.П., Манусов В.З., Васильев П.Ф. Оценка применимости ручных трековых установок в фотоэлектрических станциях микро-мощности в условиях Севера // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2025. Т. 336. № 6. С. 7–18. <https://doi.org/10.18799/24131830/2025/6/4741>. EDN: CGOQBX.
13. Salih Dr.A. Optimal winter and summer settings of solar photovoltaic panels for many locations in the world // *Tikrit Journal of Pure Science*. 2024. Vol. 29. Iss. 6. P. 40–49. <https://doi.org/10.25130/tjps.v29i6.1691>. EDN: HGZSJN.
14. Kamarzaman N.A., Tan Chee Wei. A comprehensive review of maximum power point tracking algorithms for photovoltaic systems // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 37. P. 585–598. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.045>.
15. Verma R., Gupta Sh., Yadav A. Performance evaluation of different photovoltaic array configurations under partial shading // *Renewable Energy*. 2024. Vol. 237. P. 121796. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121796>. EDN: TUYCTA.
16. Yan H.P., Liao T.W., Hsieh Ch.Ch., Huang Ch.Ya., Juang R.Ch., Kuo Ch.F.J. Performance improvement of vertically installed bifacial solar panels with adjustable reflectors optimized using the Taguchi method // *Energy Nexus*. 2025. Vol. 19. P. 100496. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2025.100496>. EDN: BZDXKV.
17. Michael J.J., Iqbal S.M., Iniyar S., Goic R. Enhanced electrical performance in a solar photovoltaic module using V-trough concentrators // *Energy*. 2018. Vol. 148. P. 605–613. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.01.101>.

18. Bigot D., Miranville F., Fakra A.H., Ingar I., Cuichard S., Boyer H. Thermal performance of photovoltaic systems integrated in buildings // *Solar Collectors and Panels, Theory and Applications*. 2010. P. 406–428. <https://doi.org/10.5772/10347>.
19. Akrouh M.A., Chahine Kh., Faraj Ja., Hachem F., Castelain C., Khaled M. Advancements in cooling techniques for enhanced efficiency of solar photovoltaic panels: a detailed comprehensive review and innovative classification // *Energy and Built Environment*. 2023. Vol. 6. Iss. 2. P. 248–276. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2023.11.002>. EDN: WXNJFC.
20. Salameh W., Ajeeb S., Itawi K., Arnaout M., Murr R., Faraj Ja., et al. Rear-surface water cooling for photovoltaic panels: a thermo-hydrodynamic pathway to high-efficiency and sustainable solar power in hot climates // *Unconventional Resources*. 2026. Vol. 10. P. 100326. <https://doi.org/10.1016/j.unres.2026.100326>. EDN: QCKIRI.

References

1. Liu Z., Peng T., Ma Sh., Qi Ch., Song Ya., Zhang Ch., et al. Potential benefits and risks of solar photovoltaic power plants on arid and semiarid ecosystems: an assessment of soil microbial and plant communities. *Frontiers in Microbiology*. 2023;14:1190650. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1190650>. EDN: CJEKOL.
2. George A.A., Ghosh D. Advancements in sustainability in the 21st century: a bibliometric analysis of solar power and its applications. *Energy Reports*. 2025;14:4291-4307. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.11.023>. EDN: TJHJAX.
3. Wei Zh., Fu X., Yang F., Fan Sh. Comprehensive economic benefits evaluation model of greenhouse photovoltaic. *Journal of Solar Energy Research Updates*. 2022;9:27-37. <https://doi.org/10.31875/2410-2199.2022.09.04>. EDN: XKEZCT.
4. Saxena A., Brown C., Arneth A., Rounsevell M. Advanced photovoltaic technology can reduce land requirements for global energy transition. *Communications Earth and Environment*. 2024;5(1):586. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01754-4>. EDN: FFYQOG.
5. Joshi P., Rao A.B., Banerjee R. Review of solar PV deployment trends, policy instruments, and growth projections in China, the United States, and India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2025;210:115082. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115436>. EDN: CKVKGv.
6. Kishore T.S., Kumar P.U., Ippili V. Review of global sustainable solar energy policies: significance and impact. *Innovation and Green Development*. 2025;4(2):100224. <https://doi.org/10.1016/j.igd.2025.100224>. EDN: COWNST.
7. Gawusu S., Zhang X., Yakubu S., Debrah S.K., Das O., Bundela N.S. Optimizing solar photovoltaic system performance: insights and strategies for enhanced efficiency. *Energy*. 2025;319:135099. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135099>. EDN: CBWERP.
8. Ramanan C.J., Lim K.H., Kurnia Ju.C., Roy S., Bora B.J., Medhi B.J. Towards sustainable power generation: recent advancements in floating photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024;194:114322. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114322>. EDN: XRUCYV.
9. Sadeghi R., Parenti M., Memme S., Fossa M., Morchio S. A review and comparative analysis of solar tracking systems. *Energies*. 2025;18(10):2553. <https://doi.org/10.3390/en18102553>. EDN: RSPLCY.
10. Himan M., Rabby Md.F., Hassan Md.M., Ahmed S., Khalil Md.K. Assessing cooling effects on floating solar PV performance enhancement. In: *AIP Conference Proceedings*. 2025;3307:030003. <https://doi.org/10.1063/5.0262242>.
11. Mestnikov N.P., Koryakin A.K., Vasiliev P.F., Alzaccar A.M.N. Evaluating the effectiveness of using tracker installations at solar power plants in the northern regions. *Bulletin of Moscow Power Engineering Institute*. 2023;6:67-76. (In Russ.). <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2023-6-67-76>. EDN: KJRHHa.
12. Mestnikov N.P., Manusov V.Z., Vasilyev P.F. Assessing the applicability of manual trackers in PV-micropower stations in the North. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2025;336(6):7-18. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2025/6/4741>. EDN: CGOQBX.
13. Salih Dr.A. Optimal winter and summer settings of solar photovoltaic panels for many locations in the world. *Tikrit Journal of Pure Science*. 2024;29(6):40-49. <https://doi.org/10.25130/tjps.v29i6.1691>. EDN: HGZSJN.
14. Kamarzaman N.A., Tan Chee Wei. A comprehensive review of maximum power point tracking algorithms for photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014;37:585-598. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.045>.
15. Verma R., Gupta Sh., Yadav A. Performance evaluation of different photovoltaic array configurations under partial shading. *Renewable Energy*. 2024;237:121796. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121796>. EDN: TUYCTA.
16. Yan H.P., Liao T.W., Hsieh Ch.Ch., Huang Ch.Ya., Juang R.Ch., Kuo Ch.F.J. Performance improvement of vertically installed bifacial solar panels with adjustable reflectors optimized using the Taguchi method. *Energy Nexus*. 2025;19:100496. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2025.100496>. EDN: BZDXKV.
17. Michael J.J., Iqbal S.M., Iniyan S., Goic R. Enhanced electrical performance in a solar photovoltaic module using V-trough concentrators. *Energy*. 2018;148:605-613. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.01.101>.
18. Bigot D., Miranville F., Fakra A.H., Ingar I., Cuichard S., Boyer H. Thermal performance of photovoltaic systems integrated in buildings. *Solar Collectors and Panels, Theory and Applications*. 2010;406-428. <https://doi.org/10.5772/10347>.
19. Akrouh M.A., Chahine Kh., Faraj Ja., Hachem F., Castelain C., Khaled M. Advancements in cooling techniques for enhanced efficiency of solar photovoltaic panels: a detailed comprehensive review and innovative classification. *Energy and Built Environment*. 2023;6(2):248-276. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2023.11.002>. EDN: WXNJFC.

20. Salameh W., Ajeeb S., Itawi K., Arnaout M., Murr R., Faraj Ja., et al. Rear-surface water cooling for photovoltaic panels: a thermo-hydrodynamic pathway to high-efficiency and sustainable solar power in hot climates. *Unconventional Resources*. 2026;10:100326. <https://doi.org/10.1016/j.unres.2026.100326>. EDN: QCKIRI.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Местников Николай Петрович,

кандидат технических наук,
доцент кафедры электроснабжения,
Северо-Восточный федеральный университет
им. М.К. Аммосова,
677000, Республика Саха (Якутия),
Российская Федерация,
г. Якутск, ул. Белинского, 58;
ведущий инженер отдела электроэнергетики,
Институт физико-технических проблем Севера
им. В.П. Ларионова СО РАН,
677007, Республика Саха (Якутия),
Российская Федерация,
г. Якутск, ул. Кулаковского, 42;
доцент кафедры технических
направлений подготовки,
Якутский институт водного транспорта (филиал)
Сибирского государственного университета
водного транспорта,
677007, Республика Саха (Якутия),
Российская Федерация,
г. Якутск, ул. Кулаковского, 46
✉ sakhacase@bk.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7090-4839>

Манусов Вадим Зиновьевич,

доктор технических наук, профессор,
профессор политехнической школы,
Югорский государственный университет,
628012, Ханты-Мансийский автономный округ,
Российская Федерация,
г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16
manusov36@mail.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 23.12.2025 г.; одобрена после рецензирования 06.02.2026 г.; принята к публикации 20.02.2026 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nikolay P. Mestnikov,

Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department
of Power Supply,
Ammosov North-Eastern Federal University,
58 Belinsky St., Yakutsk 677000, Republic
of Sakha (Yakutia);
Leading Engineer of the Electric Power Engineering
Department,
Larionov Institute of the Physical-Technical
Problems of the North SB RAS,
42 Kulakovskiy St., Yakutsk 677007;
Associate Professor of the Engineering Training Areas
Department,
Yakut Institute of Water Transport (branch)
of the Siberian State University of Water Transport,
46 Kulakovskiy St., Yakutsk 677007,
Russian Federation
✉ sakhacase@bk.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7090-4839>

Vadim Z. Manusov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor at the Polytechnic School,
Yugra State University,
16 Chekhov St., Khanty-Mansiysk 628012,
Russian Federation
manusov36@mail.ru

Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 23.12.2025; approved after reviewing 06.02.2026; accepted for publication 20.02.2026.



Изучение кинетики сорбции лития сорбентом на основе слоистого двойного гидроксида алюминия-лития

С.А. Алейников^{1✉}, Н.В. Белоусова²

^{1,2}Сибирский федеральный университет, Красноярск, Российская Федерация

Резюме. Цель исследования – провести детальный анализ механизма процесса сорбции лития из природного гидроминерального сырья. Объектом исследования явился многокомпонентный хлоридно-кальциевый природный рассол с концентрацией лития 0,24 г/дм³. Для извлечения лития использовали синтезированный гранулированный сорбент на основе слоистого двойного гидроксида алюминия-лития в статических условиях при температуре 25 °С. Кинетические данные были обработаны с использованием моделей псевдопервого и псевдовторого порядка, модели Еловича, а также диффузионных моделей Бойда и Вебера–Морриса. Для объективной оценки применимости кинетических моделей применяли как традиционный метод линеаризации, так и строгий нелинейный регрессионный анализ. Статическая обменная емкость сорбента была экспериментально определена и составила 5,5 мг/г. Анализ кинетической кривой методом линеаризации по моделям псевдопервого, псевдовторого порядка и Еловича показал, что сорбция лития лучше всего описывается моделью псевдовторого порядка (коэффициент детерминации R^2 составил 0,9966) и моделью Еловича ($R^2 = 0,9847$). Результаты более строгого нелинейного регрессионного анализа с последующим сравнением моделей Еловича, псевдопервого и псевдовторого порядка показали, что наилучшим образом сорбция лития на изучаемый сорбент описывается моделью Еловича. Проведенный диффузионный анализ механизма процесса сорбции выявил его двухстадийность. Результаты модели Вебера–Морриса с двумя линейными участками ($R^2 > 0,98$) наглядно продемонстрировали смену лимитирующей стадии: короткая по времени начальная стадия сменяется более длительной по времени конечной стадией. Модель Бойда (линейная зависимость, $R^2 = 0,9751$) показала, что процесс не лимитируется исключительно внутренней диффузией. Полученные результаты позволяют заключить, что сорбция лития на сорбент на основе слоистого двойного гидроксида алюминия-лития имеет сложный механизм, в котором определяющую роль играет хемосорбция на гетерогенной поверхности, а внутричастичная диффузия вносит существенный вклад, особенно на поздних стадиях процесса.

Ключевые слова: сорбция, литий, извлечение лития, рассол, кинетика

Для цитирования: Алейников С.А., Белоусова Н.В. Изучение кинетики сорбции лития сорбентом на основе слоистого двойного гидроксида алюминия-лития // iPolytech Journal. 2026. Т. 30. № 3. С. 544–557. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2026-3-544-557>. EDN: PSKUIZ.

METALLURGY

Original article

Lithium sorption kinetics on a sorbent based on lithium-aluminum layered double hydroxide

Sergey A. Aleynikov^{1✉}, Natalia V. Belousova²

^{1,2}Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

Abstract. This study presents a detailed analysis of the mechanism of lithium sorption from natural calcium chloride brine with a lithium concentration of 0.24 g/L. Lithium was extracted using a synthesized granular sorbent based on lithium-aluminum layered double hydroxide under static conditions at 25 °C. The kinetic data were analyzed using the pseudo-first-order, pseudo-second-order, and Elovich models, as well as the Boyd and Weber–Morris diffusion models. To assess the applicability of the kinetic models, both conventional linearization and rigorous nonlinear regression analysis were employed. The equilibrium sorption capacity of the sorbent was experimentally determined to be 5.5 mg/g. Linearization of the kinetic data using the pseudo-first-order, pseudo-second-order, and Elovich models showed that lithium sorption was best described by the pseudo-second-order model (coefficient of determination $R^2 = 0.9966$) and the Elovich model ($R^2 = 0.9847$). More rigorous nonlinear regression and subsequent comparison of the Elovich, pseudo-first-order, and pseudo-second-order models identified the Elovich model

as providing the best fit to the lithium sorption data. Diffusion analysis of the sorption mechanism revealed two distinct stages. The Weber–Morris model, characterized by two linear segments ($R^2 > 0.98$), demonstrated a change in the rate-limiting step: a short initial stage was followed by a longer final stage. The Boyd model (linear relationship, $R^2 = 0.9751$) showed that the process was not controlled exclusively by intraparticle diffusion. These results indicate that lithium sorption onto the lithium-aluminum layered double hydroxide sorbent involves a complex mechanism dominated by chemisorption on a heterogeneous surface, with intraparticle diffusion making a substantial contribution, particularly at later stages of the process.

Keywords: sorption, lithium, lithium recovery, brine, kinetics

For citation: Aleynikov S.A., Belousova N.V. Lithium sorption kinetics on a sorbent based on lithium-aluminum layered double hydroxide. *iPolytech Journal*. 2026;30(3):544-557. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2026-3-544-557>. EDN: PSKUIZ.

ВВЕДЕНИЕ

Литий, обладающий уникальным сочетанием низкой плотности, высокого электрохимического потенциала и исключительной теплоемкости, давно перестал быть узкоспециализированным элементом и превратился в стратегический ресурс XXI века. Его соединения являются ключевым компонентом литий-ионных аккумуляторов (ЛИА) – основы портативной электроники, электромобилей и систем накопления энергии для возобновляемых источников [1]. Помимо энергетики, литий находит применение в производстве жаропрочных стекол и керамики, легких алюминиевых сплавов для авиации и космонавтики [2], специальных смазок [3], в том числе в ядерной энергетике, где изотоп Li^6 служит сырьем для производства трития [4], а соединения лития рассматриваются в качестве перспективного компонента теплоносителей для реакторов нового поколения [5]. Ожидается, что глобальный спрос на литий будет расти экспоненциально в рамках мирового энергетического перехода, создавая дефицит и стимулируя поиск новых источников и эффективных технологий его получения [6].

Традиционно литий добывается из двух типов первичного сырья: твердых руд (сподумен, петалит, лепидолит) и солевых рассолов подземных водоносных горизонтов или солевых озер. Переработка руд включает энергоемкие стадии обогащения [7], кислотного выщелачивания и многостадийного очищения от сопутствующих элементов. В то же время гидроминеральные источники (рассолы) рассматриваются как более перспективные ввиду их больших прогнозных ресурсов и потенциально более низкой себестоимости переработки. Однако извлечение лития из рассолов осложняется его низкой концентрацией (0,05–0,5 г/дм³) и присутствием

большого количества примесных элементов (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}).

Среди гидрометаллургических способов извлечения лития из рассолов [8] наиболее эффективным методом концентрирования лития из многокомпонентных рассолов признана селективная сорбция. В последние десятилетия особое внимание уделяется неорганическим сорбентам на основе слоистых двойных гидроксидов, в частности алюминия-лития (Al-Li СДГ), способным обратимо интеркалировать ионы Li^+ в свою кристаллическую структуру [9–11]. Преимуществом таких сорбентов является высокая селективность к литию в средах с высокой ионной силой и возможность регенерации водой [12, 13].

Ранее нами была доказана возможность селективно извлекать литий из рассола с использованием синтезированного литий-селективного сорбента на основе слоистого двойного гидроксида алюминия-лития [14]. Были изучены свойства сорбента, его емкость по литию и получены данные по сорбции лития в статических и динамических условиях. Целью данной работы стало исследование кинетических закономерностей сорбции лития из литийсодержащего рассола сорбентом на основе слоистого двойного гидроксида алюминия-лития.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ растворов проводили методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (АЭС-ИСП) с помощью iCAP 7400 Radial (Thermo Fisher Scientific, США).

Для изучения кинетических закономерностей сорбции лития использовали литийсодержащий хлоридно-кальциевый рассол с общим содержанием солей на уровне 321 г/дм³. Выбор многокомпонентного рассола в качестве объекта исследования обу-

словлен необходимостью оценки кинетических параметров в условиях, максимально приближенных к реальным технологическим процессам переработки гидроминерального сырья. Результаты анализа используемого рассола методом АЭС-ИСП представлены в табл. 1.

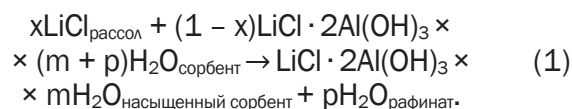
Воспроизводимость результатов оценивали по результатам многократных измерений трех модельных растворов с различным содержанием лития (от 0,06 до 1,2 г/дм³). Для каждого раствора проводили от 5 до 7 параллельных измерений. Относительное стандартное отклонение составило 1,05–1,41 %, относительная погрешность определения лития при доверительной вероятности $P = 0,95$ не превышала 2 %, для примесных элементов относительная погрешность не превышала 4 %.

Литий-селективный сорбент (далее – Al-Li-СДГ) был синтезирован по методике [14].

Структура Al-Li СДГ (рис. 1) представляет собой смешанный гидроксид алюминия и лития, где ионы лития занимают гексаго-

нальные позиции в промежутках между октаэдрическими позициями AlO_6 , а ионы хлора расположены между слоями $[\text{Al}_2\text{Li}(\text{OH})_6]^+$ [15, 16].

В общем виде сорбцию лития слоистым двойным гидроксидом алюминия лития из хлоридного рассола можно представить реакцией (1) [14]:



Методика снятия кинетической кривой сорбции лития из рассола в статических условиях. Для построения кинетической кривой сорбции в статических условиях навеску сорбента массой 2,76 г помещали в мерный цилиндр, заполненный водой, и определяли объем набухшего сорбента (4 см³). Затем сорбент переносили в колонку и промывали 8-ю колоночными объемами воды при удельной скорости потока 2 колоночных объема в час для десорбции лития. После этого сор-

Таблица 1. Результаты анализа атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой литийсодержащего рассола

Table 1. Analysis results of inductively coupled plasma atomic emission spectrometry of lithium-containing brine

Концентрация, г/дм ³						
Li^+	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	BO_3^{3-}	SO_4^{2-}
0,24	30,59	12,80	64,93	10,86	1,20	0,15

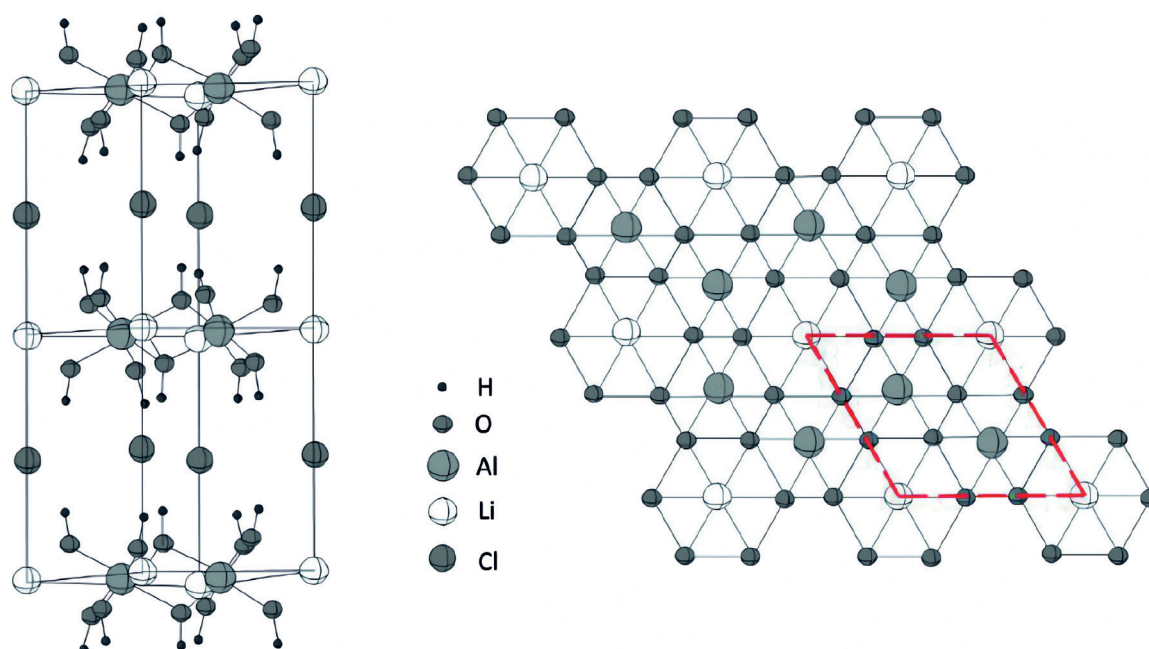


Рис. 1. Фрагмент кристаллической структуры Al-Li СДГ [15, 16]

Fig. 1. Fragment of the crystal structure of the lithium-selective sorbent (Al-Li LDH) [15, 16]

бент извлекали из колонки, отделяли от воды вакуум-фильтрацией на фильтре Шотта и сушили. Высушенный сорбент помещали в колбу объемом 250 см³, наполненную 150 см³ литийсодержащего рассола, и запускали перемешивание рассола и сорбента на орбитальном шейкере. Пробы рассола из колбы отбирали по 5 см³ с интервалом 2, 5, 10, 30, 60 и 120 мин. Статическую обменную емкость (COE) определяли по формуле (2) [10]:

$$COE = \frac{(C_0 - C_\infty) \cdot V}{m_{\text{сорбента}}}, \quad (2)$$

где C_∞ – равновесная концентрация ионов лития в растворе, мг/дм³; C_0 – концентрация ионов лития в исходном рассоле, мг/дм³; $m_{\text{сорбента}}$ – масса сорбента, г; V – объем рассола, дм³.

Методика построения кинетических моделей. Для анализа экспериментальных данных по кинетике сорбции лития использовали пять распространенных кинетических моделей:

- 1) псевдопервого порядка PFO (Pseudo-First-Order);
- 2) псевдовторого порядка PSO (Pseudo-Second-Order);
- 3) Еловича;
- 4) Бойда;
- 5) Вебера–Морриса.

Модель псевдопервого порядка (Лагергрена) [17] применяется для описания процессов, скорость которых определяется, прежде всего, диффузией через граничный слой у поверхности сорбента. Эта модель часто описывает начальные стадии сорбции или растворения, когда движущая сила процесса наиболее велика.

Интегральная форма уравнения скорости псевдопервого порядка (3) имеет вид [17]:

$$Q_t = Q_e(1 - e^{-k_1 t}), \quad (3)$$

где Q_t – количество извлеченного вещества в момент времени t (сорбционная емкость в момент времени t), мг/г; Q_e – количество извлеченного вещества (сорбционная емкость при равновесии), мг/г; k_1 – константа скорости псевдопервого порядка, мин⁻¹; t – время, мин.

Для проверки применимости модели экспериментальные данные представляют в

координатах $\ln(Q_e - Q_t)$ от t . Оценка применимости модели, как и во всех последующих случаях, производится по линейному характеру зависимости с высоким коэффициентом детерминации (R): $R^2 \rightarrow 1$.

Модель PSO [18] часто применяется для описания процессов, скорость которых преимущественно определяется химической стадией – например, поверхностной химической реакцией (хемосорбцией, растворением) с участием активных центров на поверхности твердой фазы.

Интегральная форма классического уравнения скорости псевдовторого порядка (4) имеет вид [16]:

$$Q_t = \frac{t}{\frac{1}{k_2 \cdot Q_e^2} + \frac{t}{Q_e}}, \quad (4)$$

где k_2 – константа скорости псевдовторого порядка, г/мг·мин.

Для проверки применимости модели экспериментальные данные представляют в координатах t/Q_t от t .

Модель Еловича [19, 20] часто применяется для описания кинетики сорбционных процессов, когда механизм включает хемосорбцию на гетерогенной поверхности. Интегральная форма уравнения (5) имеет вид [20]:

$$Q_t = \frac{1}{\beta} \ln(1 + \alpha \beta t), \quad (5)$$

где α – начальная скорость сорбции, мг/г·мин; β – параметр, связанный с энергией активации и степенью покрытия поверхности, г/мг.

Применимость модели Еловича оценивается по детерминации линеаризованной зависимости $Q_t = f(\ln t)$.

С целью получения достоверных кинетических параметров и последующего объективного сравнения моделей PFO, PSO и Еловича проводили нелинейный регрессионный анализ экспериментальных данных, используя программу Microsoft Excel с надстройкой «Поиск решения нелинейных задач методом ОПГ» (метод обобщенного понижающего градиента от англ. GRG – Generalized Reduced Gradient) (GRG Nonlinear), минимизируя сумму квадратов отклонений (ошибок) SSE

(Sum of Squared Errors). Начальные приближения параметров (Q_e , k_1 , k_2 , α , β) задавали исходя из экспериментальной равновесной емкости и линеаризованных графиков.

Для сравнения качества моделей использовали информационные критерии Акаике AIC [21] (Akaike Information Criterion) с поправкой на малую выборку [22] ($AICc$) и Байеса BIC [23] (Bayesian Information Criterion), рассчитанные по формулам (6) и (7):

$$AICc = n \cdot \ln\left(\frac{SSE}{n}\right) + 2k + \frac{2k(k+1)}{n-k-1}; \quad (6)$$

$$BIC = n \cdot \ln\left(\frac{SSE}{n}\right) + k \cdot \ln(n), \quad (7)$$

где n – число точек ($n = 7$); k – число параметров модели ($k = 2$).

Наилучшей считали модель с минимальными значениями $AICc$ и BIC .

Для анализа применимости диффузионных моделей использовали модели Вебера-Морриса и Бойда.

Первая из упомянутых [24] является широко используемым эмпирическим инструментом для идентификации лимитирующей стадии в гетерогенных процессах сорбции. В основе анализа лежит уравнение (8):

$$Q_t = k_{id} \cdot \sqrt{t} + C, \quad (8)$$

где k_{id} – константа скорости внутренней диффузии, мг/г·мин^{1/2}; C – константа, связанная с толщиной пограничного диффузионного слоя, мг/г.

Для проверки применимости модели экспериментальные данные представляют в координатах $Q_t = f(\sqrt{t})$. Цель использования модели Вебера-Морриса – выявить один или несколько линейных участков на полученной зависимости, каждый из которых описывает соответствующую лимитирующую стадию процесса.

Модель Бойда [25] позволяет дифференцировать вклад внешней и внутренней диффузии в общую скорость процесса. Когда процесс лимитируется диффузией внутри сферических частиц сорбента, базовое уравнение имеет вид (9):

$$F = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp(-Bt n^2), \quad (9)$$

где $F = Q_t/Q_e$ – доля достижения равновесия в момент времени t ; n – целые числа 1, 2, 3...; B – безразмерный кинетический коэффициент ($B = D\pi^2/r_0^2$, мин⁻¹, где D – эффективный коэффициент внутренней диффузии, см²/мин; r_0 – средний радиус зерна сорбента, см); t – время контакта сорбента с раствором адсорбата, мин.

Если экспериментальные данные подчиняются модели внутренней диффузии Бойда, то B является константой. В этом случае линейная зависимость Bt от t , проходящая через начало координат, указывает на то, что процесс контролируется внутренней диффузией в частицах сорбента [26].

Для построения зависимости $Bt = f(t)$ были использованы табличные значения $Bt = f(F)$ [27]. Тангенс угла наклона $Bt = f(t)$ численно равен константе B , по которой можно рассчитать эффективный коэффициент внутренней диффузии (D , см²/с) (10) [28]:

$$D = \frac{B \cdot t \cdot r_0^2}{\pi^2 \cdot t} \quad (10)$$

Нелинейность графика Bt от t указывает на то, что процесс контролируется внешней диффузией или химической реакцией на поверхности [25, 29, 30].

В работе Г.Е. Бойда и соавторов [25] получены уравнения, описывающие два последних случая, но их вид совпадает с формой уравнения псевдопервого порядка – отличие заключается в физическом смысле коэффициента при аргументе. По этой причине линейность зависимости в соответствующих координатах ($-\ln(1-F) = f(t)$) не позволяет делать однозначные выводы.

Вклад внешней диффузии в процесс сорбции можно оценить по коэффициенту внешней диффузии ($D_{вн}$, см²/с), который определяют по формуле (11) [26]:

$$D_{вн} = \frac{r_0 \cdot \delta \cdot \gamma \cdot Q_e}{3 \cdot C_{\infty}}, \quad (11)$$

где δ – толщина пленки раствора вокруг гранул сорбента, см, значение которой принимается равным $5 \cdot 10^{-3}$ см [31]; γ – некоторая величина, постоянная для данных условий и определяемая как тангенс угла наклона прямой $-\ln(1-F) = f(t)$, с⁻¹; C_{∞} – равновесная концентрация ионов лития в растворе, г/дм³.

Для количественной оценки соотношения сопротивлений внешней и внутренней диффузии в процессе сорбции лития использовали безразмерный критерий Био для массопереноса (Bi) [32], определяемый согласно общепринятому подходу [10, 26] по формуле:

$$Bi = \frac{k_f \cdot r_0}{D} = \frac{D_{вн} \cdot r_0}{\delta \cdot D}, \quad (12)$$

где k_f – коэффициент внешнего (пленочного) массопереноса, см/с.

Интерпретация критерия Био позволяет определить лимитирующую стадию массопереноса. При $Bi < 0,1$ сопротивление массопереносу в граничном слое жидкости (внешняя диффузия) превышает внутреннее сопротивление диффузии в пористом материале, и процесс контролируется внешней диффузией. При $Bi > 40$ внутреннее сопротивление диффузии в сорбенте становится доминирующим, и процесс лимитируется внутренней диффузией. Промежуточные значения $0,1 < Bi < 40$ указывают на смешанный диффузионный контроль, при котором скорости внешней и внутренней диффузии сопоставимы [32].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Кинетическая кривая сорбции лития (рис. 2) показала, что емкость сорбента в статических условиях СОЕ получилась 5,5 мг/г (3,9 г/дм³). Время полунасыщения составило 3 мин и согласуется с данными,

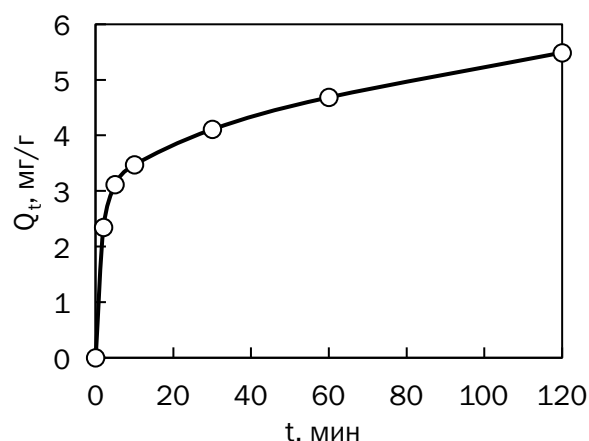


Рис. 2. Кинетическая кривая сорбции лития из рассола
 Fig. 2. Kinetic curve of lithium sorption from brine

полученными в работах³ [33]. Контроль концентраций методом АЭС-ИСП сопутствующих ионов (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) в растворе после достижения равновесия показал, что их концентрации остаются на уровне исходных значений, что подтверждает высокую селективность сорбента к литию в динамике процесса, согласующуюся с данными работы [14].

После обработки кинетической кривой сорбции лития в статических условиях были построены зависимости $\ln(Q_e - Q_t)$ от t для модели псевдопервого порядка (рис. 3 а) и t/Q_t от t для модели псевдовторого порядка (рис. 3 б).

Согласно представленным результатам, модель PSO демонстрирует высокую детерминацию ($R^2 = 0,9966$), в отличие от модели PFO ($R^2 = 0,9578$), что может указывать на

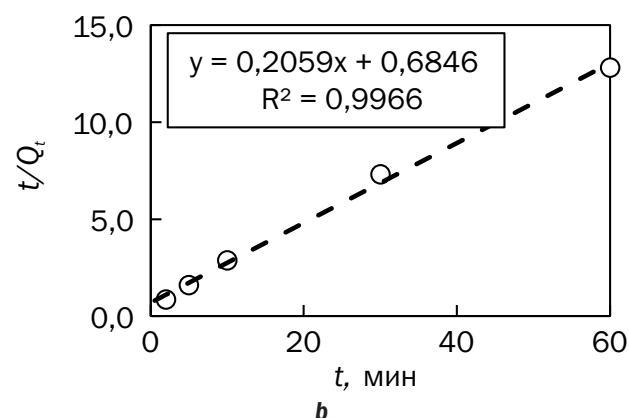
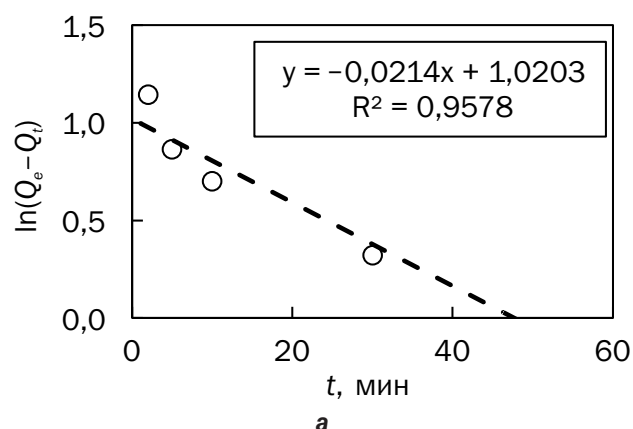


Рис. 3. Кинетические модели сорбции лития: а – модель псевдопервого порядка; б – модель псевдовторого порядка
 Fig. 3. Kinetic models of lithium sorption: a – Pseudo-First-Order model; b – Pseudo-Second-Order model

³Рябцев А.Д. Переработка литиеносного поликомпонентного гидроминерального сырья на основе его обогащения по литию: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.17.02. Томск, 2011. 39 с.

химическую природу лимитирующей стадии сорбции.

Хорошая согласованность значений расчетной (4,9 мг/г) и экспериментальной (5,5 мг/г) равновесной емкости (табл. 2) указывает на то, что кинетика сорбции ионов лития на исследуемом сорбенте адекватно описывается моделью PSO и согласуется с результатами исследований [10, 34].

Попытка описания кинетики сорбции лития с помощью модели Еловича (рис. 4), которая обычно применяется для описания кинетики хемосорбции на гетерогенных поверхностях, тоже показала высокую детерминацию ($R^2 = 0,9847$).

Найденный коэффициент α , характеризующий начальную скорость сорбции составил $\alpha = 9,20$ мг/г-мин, коэффициент β , связанный с энергией активации и гетерогенностью поверхности, составил 1,39 г/мг. Высокий коэффициент детерминации модели Еловича и согласие с результатами кинетической модели псевдвторого порядка, полученными ранее, указывают на то, что хемосорбция вносит существенный вклад в общий механизм сорбции лития на Al-Li СДГ.

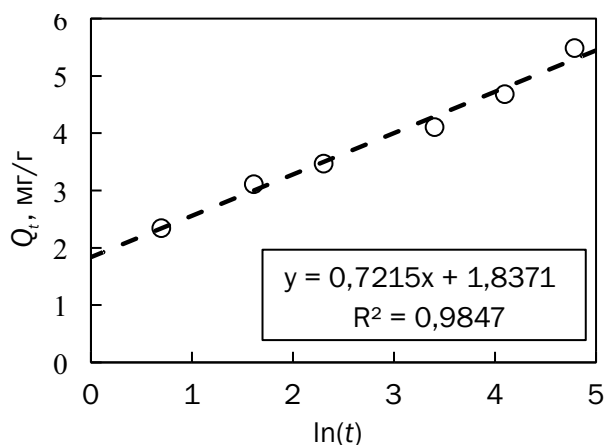


Рис. 4. Линейная аппроксимация в рамках модели Еловича

Fig. 4. Linear approximation within the Elovich model

Таблица 2. Кинетические параметры сорбции лития из рассола по моделям псевдопервого и псевдвторого порядков

Table 2. Kinetic parameters of lithium sorption from brine using Pseudo-First-Order and Pseudo-Second-Order models

Параметр	Модель псевдопервого порядка	Модель псевдвторого порядка
Уравнение	$\ln(Q_e - Q_t) = -0,0214t + 1,0203$	$t/Q_t = 0,2059t + 0,6846$
Константа	$k_1 = 0,0214 \text{ мин}^{-1}$	$k_2 = 0,0619 \text{ г/мг-мин}$
Емкость расчетная	2,8 мг/г	4,9 мг/г
COE экспериментальная	5,5 мг/г	5,5 мг/г
R^2	0,9578	0,9966

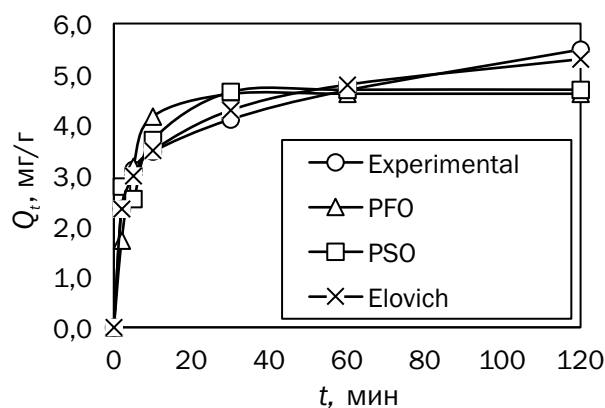


Рис. 5. Кинетические кривые сорбции лития сорбентом Al-Li слоистых двойных гидроксидов моделей PFO, PSO, Еловича после нелинейного регрессионного анализа в сравнении с экспериментальной кривой

Fig. 5. Kinetic curves of lithium sorption by the Al-Li sorbent of layered double hydroxides of PFO, PSO models, and Elovich model after nonlinear regression analysis in comparison with the experimental curve

Для объективного сравнения применимости кинетических моделей и исключения искажений, связанных с линеаризацией [35], была выполнена нелинейная подгонка экспериментальных данных к моделям PFO, PSO и Еловича. На рис. 5 представлены экспериментальные данные в сравнении с расчетными кривыми, полученными после оптимизации параметров методом наименьших квадратов.

Визуально кинетическая кривая для модели Еловича (рис. 5) наиболее близка к экспериментальным данным на всем временном интервале, тогда как модели PFO и PSO систематически отклоняются, особенно в области равновесия. Количественные характеристики нелинейной подгонки, включая SSE, AICс и BIC, приведены в табл. 3 и подтверждают статистическое превосходство модели Еловича.

Как следует из представленных данных, модели PFO и PSO дают существенно зани-

Таблица 3. Результаты нелинейного регрессионного анализа
Table 3. Nonlinear regression analysis results

Модель	Q_e расч., мг/г	k_1 , мин ⁻¹	k_2 , г/мг·мин	α , мг/г·мин	β , г/мг	SSE	AIC	BIC
PFO	4,6	0,233	–	–	–	1,892	-2,16	-5,27
PSO	4,7	–	0,155	–	–	1,506	-3,76	-6,87
Еловича	5,3	–	–	8,716	1,372	0,096	-23,02	-26,13

женные значения равновесной емкости по сравнению с экспериментальной (5,5 мг/г), а также высокие значения SSE. При этом модель Еловича не только обеспечивает близкую к эксперименту расчетную емкость, но и характеризуется наименьшим значением SSE. Информационные критерии *AIC* и *BIC*, учитывающие как качество подгонки, так и число параметров, однозначно указывают на предпочтительность модели Еловича: соответствующие значения информационных критериев *AIC* и *BIC* значительно ниже, чем для моделей PFO и PSO.

Для проверки применимости диффузионных моделей Бойда и Вебера–Морриса были получены зависимости, представленные на рис. 6.

Анализ данных в рамках модели Вебера–Морриса (рис. 6 а) позволил выявить на графике $Q_t = f(\sqrt{t})$ два линейных участка с высокими коэффициентами детерминации. Первый участок соответствует стадии внешней диффузии, второй – внутренней, что указывает на смену лимитирующей стадии в процессе сорбции.

Значения времени на оси абсцисс рис. 6 б приведены в секундах, что обусловлено необходимостью использования стандарт-

ных единиц времени в уравнении Бойда для корректного расчета эффективного коэффициента диффузии с размерностью см²/с.

Анализ кинетических данных в рамках диффузионной модели Бойда (рис. 6 б) показал удовлетворительную линейность зависимости Bt от t ($R^2 = 0,9751$), однако смещение прямой выше нулевой координаты свидетельствует о том, что процесс лимитируется не исключительно внутренней диффузией, а имеет более сложный характер.

Количественные параметры, полученные при обработке кинетических данных в рамках диффузионных моделей Бойда и Вебера–Морриса, были сведены в табл. 4.

К сожалению, использовать применительно к моделям Бойда и Вебера–Морриса такой же подход, как и в случае моделей псевдопервого, псевдвторого порядка и модели Еловича (нелинейную обработку данных), не представлялось возможным, поскольку нелинейная подгонка для модели Бойда возможна только для полного уравнения $F(t)$ с физическими параметрами (в частности r_0 и т.д.) [36], а прямое сравнение *AIC/BIC* для кусочно-линейной модели Вебера–Морриса с остальными моделями статистически некорректно из-за разного числа наблюдений.

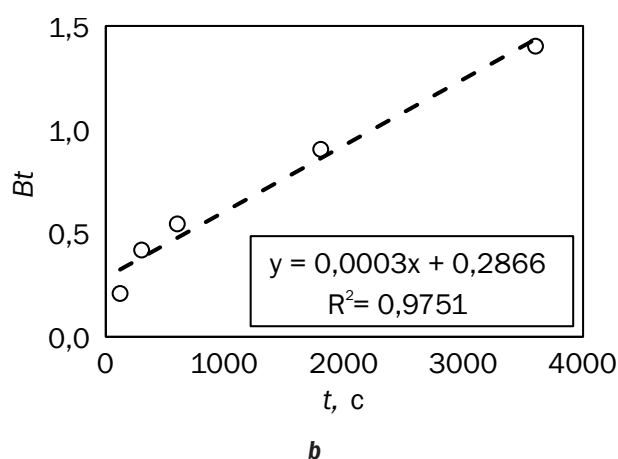
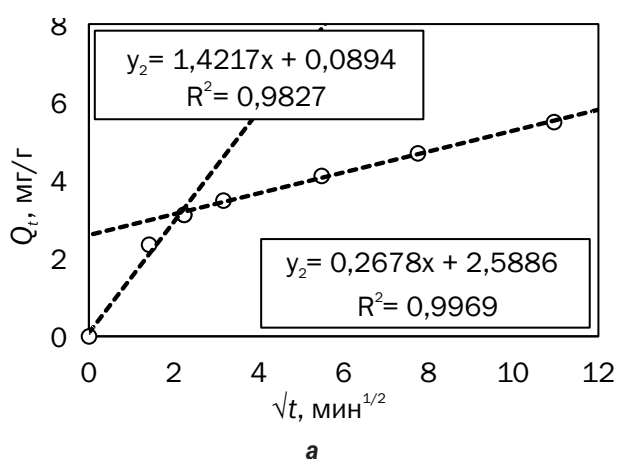


Рис. 6. Кинетические зависимости, построенные в рамках моделей: а – Вебера–Морриса; б – Бойда
Fig. 6. Kinetic dependences plotted using the following models: а – Weber–Morris; б – Boyd

Таблица 4. Кинетические параметры сорбции лития из рассола, описываемые диффузионными моделями
Table 4. Kinetic parameters of lithium sorption from brine described by diffusion models

Параметр	Модель Бойда*	Модель Вебера–Морриса
Уравнение	$Bt = 0,0003 \cdot t + 0,2866$ $-\ln(1 - F) = 0,0004 \cdot t + 0,6821$	$Q_t = 1,4217 \cdot \sqrt{t} + 0,0894$ $Q_t = 0,2678 \cdot \sqrt{t} + 2,5886$
Константа	$D = 7,61 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2/\text{с}$ $D_{\text{вн}} = 7,95 \cdot 10^{-7} \text{ см}^2/\text{с}$	$k_{\text{id1}} = 1,4217 \text{ мг/г·мин}^{1/2}$ $k_{\text{id2}} = 0,2678 \text{ мг/г·мин}^{1/2}$
R^2	$R^2 = 0,9751$ для $Bt = f(t)$ $R^2 = 0,9578$ для $-\ln(1 - F) = f(t)$	$R_1^2 = 0,9827$ $R_1^2 = 0,9969$

Примечания. *Были рассмотрены два случая: 1) лимитирующей внутричастичной диффузии (первая строка в каждой из трех ячеек столбца (см. рис. 5 б)); 2) внешней диффузии (вторая строка; график зависимости не приведен).

По этой причине для диффузионных моделей придерживались стандартных линейных проверок как диагностических.

Результаты расчетов по модели Вебера–Морриса, представленные двумя линейными уравнениями, количественно указывают на двухстадийный механизм. Значения констант скорости внутренней диффузии $k_{\text{id1}} = 1,4217 \text{ мг/г·мин}^{1/2}$ и $k_{\text{id2}} = 0,2678 \text{ мг/г·мин}^{1/2}$ различаются более чем в 5 раз, что подтверждает смену лимитирующей стадии. Малое значение величины отрезка, отсекаемого на оси ординат для первой стадии ($C_1 = 0,0894 \text{ мг/г}$), указывает на незначительное сопротивление граничного слоя.

Модель Бойда позволила оценить эффективный коэффициент диффузии, который составил $7,61 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2/\text{с}$. С учетом $D_{\text{вн}} = 7,95 \cdot 10^{-7} \text{ см}^2/\text{с}$, рассчитанного по формуле (11), полученное значение Bi составило ≈ 104 , что может указывать на преобладание внутренней диффузии в лимитировании процесса сорбции лития. Следует отметить, что ввиду высокой ионной силы и присутствия сопутствующих ионов рассчитанные в данном разделе коэффициенты диффузии и константы скорости являются эффективными параметрами, характеризующими процесс в условиях реальной технологической матрицы, и отражают суммарное влияние наведенной энергетической гетерогенности поверхности.

С учетом смешанной обработки данных (нелинейной для кинетических моделей и линейной для диффузионных) окончательный выбор моделей осуществлялся по уровням анализа, а не по прямому сравнению R^2 или информационных критериев.

Как показано выше, в результате нелинейной обработки была выявлена предпочтительность модели Еловича, что указывает на важную роль химического взаимодействия

(хемосорбции) на гетерогенной поверхности сорбента и экспоненциальное замедление скорости по мере заполнения активных центров. При этом диффузионный анализ по модели Вебера–Морриса количественно указывает на двухстадийность кинетики сорбции лития и вклад внутренней диффузии, а модель Бойда подтверждает внутридиффузионный контроль на поздних стадиях (при $F > 0,6$).

Можно отметить, что в работе [37], где в качестве литий-селективного сорбента использовали чистый гидроксид алюминия, кинетика процесса удовлетворительно описывалась моделью PFO. Предполагаем, что такое различие может быть связано со структурными различиями чистого гидроксида алюминия и слоистого двойного гидроксида алюминия-лития, где в случае Al-Li СДГ ионы лития и хлора уже частично интеркалированы в слоистую структуру сорбента. В работе [10], где также изучалась кинетика сорбции лития Al-Li СДГ, было обнаружено, что кинетика описывается моделью PSO, однако значение рассчитанного Bi , равное $2,2 \cdot 10^3$, указывает на преобладание внутренней диффузии в контроле процесса сорбции лития.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе было выполнено детальное исследование кинетики сорбции лития из многокомпонентного хлоридно-кальциевого рассола на гранулированном сорбенте на основе слоистого двойного гидроксида алюминия-лития. Экспериментально снятая кинетическая кривая была проанализирована с помощью кинетических моделей, включая модели псевдопервого и псевдovторого порядков, модель Еловича, а также диффузионных моделей Бойда и Вебера–Морриса.

Совместный анализ данных с использованием линеаризованных моделей псевд второго порядка и Еловича показал высокую степень детерминации для обеих моделей (0,9966 и 0,9847, соответственно). Нелинейный регрессионный анализ с использованием информационных критериев AIC_c и BIC показал, что модель Еловича описывает экспериментальные данные существенно лучше, чем модели PFO и PSO.

Диффузионный анализ с использованием модели Бойда показал, что процесс лимитируется не исключительно внутренней диффузией, а имеет более сложный

характер. Диффузионный анализ с использованием модели Вебера–Морриса выявил двухстадийный характер процесса. Наличие двух линейных участков на графике модели Вебера–Морриса, а также линейная зависимость Bt от t со смещением от начала координат в модели Бойда указывают на смену лимитирующей стадии во времени.

Таким образом, установлено, что сорбция лития на Al-Li СДГ имеет сложный механизм с определяющей ролью хемосорбции на неоднородной поверхности и существенным вкладом внутримолекулярной диффузии.

Список источников

1. Кудрявцев П.Г. Литий: мировые запасы и перспективы применения // Альтернативная энергетика и экология. 2016. № 13-14(201-202). С. 72–88. <https://doi.org/10.15518/isjaee.2016.13-14.072-088>. EDN: WFQKEH.
2. Khokhlatova L.B., Kolobnev N.I., Oglodkov M.S., Mikhaylov E.D. Aluminum-lithium alloys for aircraft building // Metallurgist. 2012. Vol. 56. Iss. 5-6. P. 336–341. <https://doi.org/10.1007/s11015-012-9580-1>. EDN: OLEOMT.
3. Donahue C.J. Lubricating grease: a chemical primer // Journal of chemical education. 2006. Vol. 83. Iss. 6. P. 862. <https://doi.org/10.1021/ed083p862>.
4. Blynskiy P., Chikhray Y., Kulsartov T., Gabdullin M., Zaurbekova Z., Kizane G., et al. Experiments on tritium generation and yield from lithium ceramics during neutron irradiation // International Journal of Hydrogen Energy. 2021. Vol. 46. Iss. 13. P. 9186–9192. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.12.224>. EDN: NKQTGM.
5. Игнатьев В.В., Фейнберг О.С., Загнитько А.В., Мерзляков А.В., Суренков А.И., Панов А.В. [и др.]. Жидкосольевые реакторы: новые возможности, проблемы и решения // Атомная энергия. 2012. Т. 112. № 3. С. 135–143. EDN: OWOOWX.
6. Kushnir D., Sandén B.A. The time dimension and lithium resource constraints for electric vehicles // Resources Policy. 2012. Vol. 37. Iss. 1. P. 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2011.11.003>.
7. Tadesse B., Makuei F., Albijanic B., Dyer L. The beneficiation of lithium minerals from hard rock ores: a review // Minerals Engineering. 2019. Vol. 131. P. 170–184. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.11.023>. EDN: DRPKWM.
8. Sun Y., Wang Q., Wang Y., Yun R., Xiang X. Recent advances in magnesium/lithium separation and lithium extraction technologies from salt lake brine // Separation and Purification Technology. 2021. Vol. 256. P. 117807. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117807>. EDN: GKWRXL.
9. Luo Q., Dong M., Nie G., Liu Z., Wu Z., Li J. Extraction of lithium from salt lake brines by granulated adsorbents // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2021. Vol. 628. P. 127256. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.127256>. EDN: UCJREX.
10. Zhong J., Lin S., Yu J. Lithium recovery from ultrahigh Mg^{2+}/Li^+ ratio brine using a novel granulated Li/Al-LD-Hs adsorbent // Separation and Purification Technology. 2021. Vol. 256. P. 117780. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117780>. EDN: DYMNHS.
11. Isupov V.P., Kotsupalo N.P., Nemudry A.P., Menzeres L.T. Aluminium hydroxide as selective sorbent of lithium salts from brines and technical solutions // Studies in surface science and catalysis. 1999. Vol. 120. P. 621–652. [https://doi.org/10.1016/S0167-2991\(99\)80567-9](https://doi.org/10.1016/S0167-2991(99)80567-9).
12. Li D., Zhang N., Gao D., Zhuang Z., Zeng D. Phase chemistry for hydration sensitive (de)intercalation of lithium aluminum layered double hydroxide chlorides // ACS Materials Au. 2023. Vol. 4. Iss. 1. P. 45–54. <https://doi.org/10.1021/acsmaterialsau.3c00063>. EDN: UOSSQO.
13. Zhong J., Lin S., Yu J. Effects of excessive lithium deintercalation on Li^+ adsorption performance and structural stability of lithium/aluminum layered double hydroxides // Journal of Colloid and Interface Science. 2020. Vol. 572. P. 107–113. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.03.081>. EDN: BHEWSW.
14. Алейников С.А., Белоусова Н.В. Сорбционное извлечение лития из рассола // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 3. С. 376–388. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-3-376-388>. EDN: YNRNQC.
15. Besserguenev A.V., Fogg A.M., Francis R.J., Price S.J., O'Hare D., Isupov V.P., et al. Synthesis and structure of the gibbsite intercalation compounds $[LiAl_2(OH)_6]X$ $\{X = Cl, Br, NO_3\}$ and $[LiAl_2(OH)_6]Cl \cdot H_2O$ using synchrotron X-ray and neutron powder diffraction // Chemistry of Materials. 1997. Vol. 9. Iss. 1. P. 241–247. <https://doi.org/10.1021/cm960316z>. EDN: LEKRWP.
16. Zhang Y., Cheng X., Wu C., Köhler J., Deng S. Electronic structure and lithium diffusion in $LiAl_2(OH)_6Cl$ studied by first principle calculations // Molecules. 2019. Vol. 24. Iss. 14. P. 2667. <https://doi.org/10.3390/molecules24142667>. EDN: OGQSSN.

17. Lagergren S. Zur theorie der sogenannten adsorption gelöster stoffe // Zeitschrift für Chemie und Industrie der Kolloide. 1907. Vol. 2. Iss. 1. P. 15. <https://doi.org/10.1007/BF01501332>. EDN: LDPCCK.
18. Ho Y.S., McKay G. Pseudo-second order model for sorption processes // Process Biochemistry. 1999. Vol. 34. Iss. 5. P. 451–465. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(98\)00112-5](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(98)00112-5).
19. Elovich S.Y., Larinov O.G. Theory of contact kinetics of sorption // Doklady Akademii Nauk SSSR. 1949. Vol. 66. Iss. 2. P. 401–404.
20. Peers A.M. Elovich adsorption kinetics and the heterogeneous surface // Journal of Catalysis. 1965. Vol. 4. Iss. 4. P. 499–503. [https://doi.org/10.1016/0021-9517\(65\)90054-0](https://doi.org/10.1016/0021-9517(65)90054-0).
21. Akaike H. A new look at the statistical model identification // IEEE Transactions on Automatic Control. 1974. Vol. 19. Iss. 6. P. 716–723. <https://doi.org/10.1109/tac.1974.1100705>.
22. Sugiura N. Further analysis of the data by Akaike's information criterion and the finite corrections // Communications in Statistics – Theory and Methods. 1978. Vol. 7. Iss. 1. P. 13–26. <https://doi.org/10.1080/03610927808827599>.
23. Schwarz G. Estimating the dimension of a model // The Annals of Statistics. 1978. Vol. 6. Iss. 2. P. 461–464. <https://doi.org/10.1214/aos/1176344136>.
24. Weber W.J., Morris J.C. Kinetics of adsorption on carbon from solution // Journal of the Sanitary Engineering Division. 1963. Vol. 89. Iss. 2. P. 31–59. <https://doi.org/10.1061/jseai.0000430>.
25. Boyd G.E., Adamson A.W., Myers L.S. The exchange adsorption of ions from aqueous solutions by organic zeolites. II. Kinetics // Journal of the American Chemical Society. 1947. Vol. 69. Iss. 11. P. 2836–2848. <https://doi.org/10.1021/ja01203a066>.
26. Wang J., Guo X. Adsorption kinetic models: physical meanings, applications, and solving methods // Journal of Hazardous Materials. 2020. Vol. 390. P. 122156. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122156>. EDN: PBWIMV.
27. Reichenberg D. Properties of ion-exchange resins in relation to their structure. III. Kinetics of exchange // Journal of the American Chemical Society. 1953. Vol. 75. Iss. 3. P. 589–597. <https://doi.org/10.1021/ja01099a022>.
28. Мифтахова Ф.Р., Нгуен Т.К.Т., Галимова Р.З., Шайхиев И.Г. Влияние концентрации ортофосфорной кислоты при обработке опилок акации ушковой (Acacia auriculiformis) на сорбционные характеристики по ионам цинка // Вестник технологического университета. 2019. Т. 22. № 2. С. 37–43. EDN: IVJJIF.
29. Caceres-Jensen L., Rodriguez-Becerra J., Escudey M., Joo-Nagata J., Villagra C.A., Dominguez-Vera V., et al. Nicosulfuron sorption kinetics and sorption/desorption on volcanic ash-derived soils: proposal of sorption and transport mechanisms // Journal of Hazardous Materials. 2020. Vol. 385. P. 121576. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121576>. EDN: JYZOSF.
30. Крижановская О.О., Синяева Л.А., Карпов С.И., Селеменев В.Ф., Бородин Е.В., Рёсснер Ф. Кинетические модели при описании сорбции жирорастворимых физиологически активных веществ высокоупорядоченными неорганическими кремнийсодержащими материалами // Сорбционные и хроматографические процессы. 2014. Т. 14. № 5. С. 784–794. EDN: SXLCFF.
31. Сигодина А.Б., Николаев Н.И., Туницкий Н.Н. Кинетика ионного обмена на сульфокатионитах // Успехи химии. 1964. Т. 33. № 4. С. 440–461. <https://doi.org/10.1070/RC1964v033n04ABEH001396>.
32. Winiczenko R., Górnicki K., Kaleta A. Evaluation of the mass diffusion coefficient and mass Biot number using a nondominated sorting genetic algorithm // Symmetry. 2020. Vol. 12. Iss. 2. P. 260. <https://doi.org/10.3390/sym12020260>. EDN: EWKJIM.
33. Менжерес Л.Т., Рябцев А.Д., Мамылова Е.В. Селективный сорбент для извлечения лития из хлоридных высокоминерализованных рассолов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2004. Т. 307. № 7. С. 76–80. EDN: HPMUMN.
34. Dong M., Luo Q., Li Ju., Wu Zh., Liu Zh. Lithium adsorption properties of porous LiAl-layered double hydroxides synthesized using surfactants // Journal of Saudi Chemical Society. 2022. Vol. 26. Iss. 5. P. 101535. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2022.101535>. EDN: ZPPYTO.
35. Simonin J.-P. On the comparison of pseudo-first order and pseudo-second order rate laws in the modeling of adsorption kinetics // Chemical Engineering Journal. 2016. Vol. 300. P. 254–263. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.04.079>.
36. Zamora F., Sabio E., Román S., González-García C.M., Ledesma B. Modelling the adsorption of p-nitrophenol by the Boyd method in conjunction with the finite element method // Adsorption Science & Technology. 2010. Vol. 28. Iss. 8-9. P. 671–687. <https://doi.org/10.1260/0263-6174.28.8-9.671>.
37. Al-dhawi B.N.S., Kutty Sh.R.M., Baloo L., Alawag A.M., Almahbashi N.M.Ya., Naji G.M.A., et al. Lithium adsorption from aqueous solution using aluminum hydroxide: Characterization, optimization by response surface methodology, kinetic modelling, and isotherm studies // Case Studies in Chemical and Environmental Engineering. 2023. Vol. 7. P. 100350. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100350>. EDN: RVCRQG.

References

1. Kudryavtsev P.G. Lithium: global reserves and application prospects. *Alternative Energy and Ecology*. 2016;13-14(201-202):72-88. (In Russ.). <https://doi.org/10.15518/isjaee.2016.13-14.072-088>. EDN: WFQKEH.
2. Khokhlatova L.B., Kolobnev N.I., Oglovkov M.S., Mikhaylov E.D. Aluminum-lithium alloys for aircraft building. *Metallurgist*. 2012;56(5-6):336-341. <https://doi.org/10.1007/s11015-012-9580-1>. EDN: OLEOMT.

3. Donahue C.J. Lubricating grease: a chemical primer. *Journal of Chemical Education*. 2006;83(6):862. <https://doi.org/10.1021/ed083p862>.
4. Blynskiy P., Chikhray Y., Kulsartov T., Gabdullin M., Zaurbekova Z., Kizane G., et al. Experiments on tritium generation and yield from lithium ceramics during neutron irradiation. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021;46(13):9186-9192. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.12.224>. EDN: NKQTGM.
5. Ignatiev V.V., Feynberg O.S., Zagnitko A.V., Merzlyakov A.V., Surenkov A.I., Panov A.V., et al. Molten-salt reactors: new possibilities, problems and solutions articles. *Atomic Energy*. 2012;112(3):135-143. (In Russ.). EDN: OWOOWX.
6. Kushnir D., Sandén B.A. The time dimension and lithium resource constraints for electric vehicles. *Resources Policy*. 2012;37(1):93-103. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2011.11.003>.
7. Tadesse B., Makuei F., Albijanic B., Dyer L. The beneficiation of lithium minerals from hard rock ores: a review. *Minerals Engineering*. 2019;131:170-184. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.11.023>. EDN: DRPKWM.
8. Sun Y., Wang Q., Wang Y., Yun R., Xiang X. Recent advances in magnesium/lithium separation and lithium extraction technologies from salt lake brine. *Separation and Purification Technology*. 2021;256:117807. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117807>. EDN: GKWRXL.
9. Luo Q., Dong M., Nie G., Liu Z., Wu Z., Li J. Extraction of lithium from salt lake brines by granulated adsorbents. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2021;628:127256. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.127256>. EDN: UCJREX.
10. Zhong J., Lin S., Yu J. Lithium recovery from ultrahigh Mg^{2+}/Li^{+} ratio brine using a novel granulated Li/Al-LD-Hs adsorbent. *Separation and Purification Technology*. 2021;256:117780. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117780>. EDN: DYMNHS.
11. Isupov V.P., Kotsupalo N.P., Nemudry A.P., Menzeres L.T. Aluminium hydroxide as selective sorbent of lithium salts from brines and technical solutions. *Studies in surface science and catalysis*. 1999;120:621-652. [https://doi.org/10.1016/S0167-2991\(99\)80567-9](https://doi.org/10.1016/S0167-2991(99)80567-9).
12. Li D., Zhang N., Gao D., Zhuang Z., Zeng D. Phase chemistry for hydration sensitive (de)intercalation of lithium aluminum layered double hydroxide chlorides. *ACS Materials Au*. 2023;4(1):45-54. <https://doi.org/10.1021/acsmaterialsau.3c00063>. EDN: UOSSQO.
13. Zhong J., Lin S., Yu J. Effects of excessive lithium deintercalation on Li^{+} adsorption performance and structural stability of lithium/aluminum layered double hydroxides. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2020;572:107-113. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.03.081>. EDN: BHEWSW.
14. Aleynikov S.A., Belousova N.V. Lithium sorption from natural brine. *iPolytech Journal*. 2025;29(3):376-388. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-3-376-388>. EDN: YNRNQC.
15. Besserguenev A.V., Fogg A.M., Francis R.J., Price S.J., O'Hare D., Isupov V.P., et al. Synthesis and structure of the gibbsite intercalation compounds $[LiAl_2(OH)_6]X$ [$X = Cl, Br, NO_3$] and $[LiAl_2(OH)_6]Cl \cdot H_2O$ using synchrotron X-ray and neutron powder diffraction. *Chemistry of Materials*. 1997;9(1):241-247. <https://doi.org/10.1021/cm960316z>. EDN: LEKRWP.
16. Zhang Y., Cheng X., Wu C., Köhler J., Deng S. Electronic structure and lithium diffusion in $LiAl_2(OH)_6Cl$ studied by first principle calculations. *Molecules*. 2019;24(14):2667. <https://doi.org/10.3390/molecules24142667>. EDN: OGQSSN.
17. Lagergren S. Zur theorie der sogenannten adsorption gelöster stoffe. *Zeitschrift für Chemie und Industrie der Kolloide*. 1907;2(1):15. <https://doi.org/10.1007/BF01501332>. EDN: LDPCKC.
18. Ho Y.S., McKay G. Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochemistry*. 1999;34(5):451-465. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(98\)00112-5](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(98)00112-5).
19. Elovich S.Y., Larinov O.G. Theory of contact kinetics of sorption. *Doklady Akademii Nauk SSSR*. 1949;66(2):401-404.
20. Peers A.M. Elovich adsorption kinetics and the heterogeneous surface. *Journal of Catalysis*. 1965;4(4):499-503. [https://doi.org/10.1016/0021-9517\(65\)90054-0](https://doi.org/10.1016/0021-9517(65)90054-0).
21. Akaike H. A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1974;19(6):716-723. <https://doi.org/10.1109/tac.1974.1100705>.
22. Sugiura N. Further analysis of the data by Akaike's information criterion and the finite corrections. *Communications in Statistics - Theory and Methods*. 1978;7(1):13-26. <https://doi.org/10.1080/03610927808827599>.
23. Schwarz G. Estimating the dimension of a model. *The Annals of Statistics*. 1978;6(2):461-464. <https://doi.org/10.1214/aos/1176344136>.
24. Weber W.J., Morris J.C. Kinetics of adsorption on carbon from solution. *Journal of the Sanitary Engineering Division*. 1963;89(2):31-59. <https://doi.org/10.1061/jsedai.0000430>.
25. Boyd G.E., Adamson A.W., Myers L.S. The exchange adsorption of ions from aqueous solutions by organic zeolites. II. Kinetics. *Journal of the American Chemical Society*. 1947;69(11):2836-2848. <https://doi.org/10.1021/ja01203a066>.
26. Wang J., Guo X. Adsorption kinetic models: physical meanings, applications, and solving methods. *Journal of Hazardous Materials*. 2020;390:122156. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122156>. EDN: PBWIMV.
27. Reichenberg D. Properties of ion-exchange resins in relation to their structure. III. Kinetics of exchange. *Journal of the American Chemical Society*. 1953;75(3):589-597. <https://doi.org/10.1021/ja01099a022>.

28. Miftakhova F.R., Nguyen T.K.T., Galimova R.Z., Shaikhiev I.G. The effect of orthophosphoric acid concentration in Earleaf acacia (*Acacia auriculiformis*) sawdust treatment on sorption characteristics of zinc ions. *Herald of Technological University*. 2019;22(2):37-43. (In Russ.). EDN: IVJJIF.
29. Caceres-Jensen L., Rodriguez-Becerra J., Escudey M., Joo-Nagata J., Villagra C.A., Dominguez-Vera V., et al. Nicosulfuron sorption kinetics and sorption/desorption on volcanic ash-derived soils: proposal of sorption and transport mechanisms. *Journal of Hazardous Materials*. 2020;385:121576. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121576>. EDN: JYZOSF.
30. Krizhanovskaya O.O., Siniaeva L.A., Karpov S.I., Selemenev V.F., Borodina E.V., Roessner F. Application of kinetic models for the description of fat-soluble physiologically active substances adsorption onto highly ordered inorganic siliceous materials. *Statute of Roskomnadzor*. 2014;14(5):784-794. (In Russ.). EDN: SXLCFF.
31. Sigodina A.B., Nikolaev N.I., Tunitskii N.N. The kinetics of ion exchange on sulphonated cation exchangers. *Russian Chemical Reviews*. 1964;33(4):440-461. (In Russ.). <https://doi.org/10.1070/RC1964v-033n04ABEH001396>.
32. Winiczenko R., Górnicki K., Kaleta A. Evaluation of the mass diffusion coefficient and mass Biot number using a nondominated sorting genetic algorithm. *Symmetry*. 2020;12(2):260. <https://doi.org/10.3390/sym12020260>. EDN: EWKJMM.
33. Menzheres L.T., Ryabtsev A.D., Mamilova E.V. Selective sorbent for lithium recovery from highly mineralized chloride brines. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2004;307(7):76-80. (In Russ.). EDN: HPMUMN.
34. Dong M., Luo Q., Li Ju., Wu Zh., Liu Zh. Lithium adsorption properties of porous LiAl-layered double hydroxides synthesized using surfactants. *Journal of Saudi Chemical Society*. 2022;26(5):101535. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2022.101535>. EDN: ZPPYTO.
35. Simonin J.-P. On the comparison of pseudo-first order and pseudo-second order rate laws in the modeling of adsorption kinetics. *Chemical Engineering Journal*. 2016;300:254-263. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.04.079>.
36. Zamora F., Sabio E., Román S., González-García C.M., Ledesma B. Modelling the adsorption of p-nitrophenol by the Boyd method in conjunction with the finite element method. *Adsorption Science & Technology*. 2010;28(8-9):671-687. <https://doi.org/10.1260/0263-6174.28.8-9.671>.
37. Al-dhawi B.N.S., Kutty Sh.R.M., Baloo L., Alawag A.M., Almahbashi N.M.Ya., Naji G.M.A., et al. Lithium adsorption from aqueous solution using aluminum hydroxide: Characterization, optimization by response surface methodology, kinetic modelling, and isotherm studies. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2023;7:100350. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100350>. EDN: RVCRQG.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Алейников Сергей Александрович,
аспирант,
Сибирский федеральный университет,
660041, Российская Федерация,
г. Красноярск, пр. Свободный, 79
✉ saaleynikov@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0001-7589-7049>

Белоусова Наталья Викторовна,
доктор химических наук, профессор,
заведующий кафедрой металлургии
цветных металлов,
Сибирский федеральный университет,
660041, Российская Федерация,
г. Красноярск, пр. Свободный, 79
netmamba@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1355-7399>

Заявленный вклад авторов

Алейников С.А. определял цель работы, проводил эксперименты, проводил АЭС-ИСП анализы, писал статью. Белоусова Н.В. определяла цель работы, участвовала в обсуждении результатов и в подготовке статьи.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey A. Aleynikov,
Postgraduate Student,
Siberian Federal University,
79 Svobodny pr., Krasnoyarsk,
660041, Russian Federation
✉ saaleynikov@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0001-7589-7049>

Natalia V. Belousova,
Dr. (Chem. Sci.), Professor,
Head of the Department of Non-Ferrous
Metals Metallurgy,
Siberian Federal University,
79 Svobodny pr., Krasnoyarsk,
660041, Russian Federation
netmamba@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1355-7399>

Authors' contribution

Sergey A. Aleynikov determined the purpose of the work, conducted experiments, carried out inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy analyses, wrote the article. Natalia V. Belousova determined the purpose of the work, participated in the result discussion and prepared the article for publication.

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 24.02.2026 г.; одобрена после рецензирования 03.04.2026 г.; принята к публикации 27.04.2026 г.

Information about the article

The article was submitted 24.02.2026; approved after reviewing 03.04.2026; accepted for publication 27.04.2026.

МЕТАЛЛУРГИЯ

Научная статья

УДК 669.213.6:669.822:536.7

EDN: JTLFTR

DOI: 10.21285/1814-3520-2026-3-558-571



Термодинамическая оценка процесса одновременного выщелачивания золота и урана серноокислыми тиоцианатными растворами

А.А. Шипнигов^{1✉}, А.В. Епифоров², Т.С. Минеева³^{1,3}Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Российская Федерация^{1,2}Иркутский научно-исследовательский институт благородных и редких металлов и алмазов, Иркутск, Российская Федерация

Резюме. Цель – термодинамическая оценка одновременного выщелачивания Au и U из комплексных окисленных золотоурановых руд серноокислыми тиоцианатными растворами при различных температурах, а также выявление физико-химических условий для последующего растворения пассивирующих пленок тиоцианата золота (I). Расчеты изменений энергий Гиббса реакций выщелачивания золота выполнены методом термодинамических циклов растворения и комплексообразования в интервале 298–358 К с применением констант устойчивости дитиоцианатоаурата золота (I) $[\text{Au}(\text{SCN})_2]^-$ тетратиоцианатоаурата золота (III) $[\text{Au}(\text{SCN})_4]^-$, простого тиоцианата золота (I) AuSCN, а также всех координационных форм тиоцианатов Fe(III). Оценка поведения системы U(IV) и U(VI) рассчитана классическим методом по разности стандартных энергий образования Гиббса соединений и ионов при температуре 298 К. Термодинамическими расчетами доказано, что при тиоцианатном выщелачивании золото переходит в раствор преимущественно в виде термодинамически стабильного комплекса $[\text{Au}(\text{SCN})_4]^-$. Показано, что комплексообразование, при котором золото окисляется, характеризуется наибольшей движущей силой при участии свободных ионов Fe(III) и монокомплекса $[\text{FeSCN}]^{2+}$. Установлено, что при температуре выше 303–305 К происходит пассивация золота с образованием AuSCN. Термодинамически обоснован механизм растворения AuSCN за счет поддержания избытка SCN^- -ионов. При анализе урансодержащей системы установлено, что введение окислителя – ионов Fe(III) – повышает вероятность выщелачивания упорного UO_2 (изменение энергии Гиббса составляет –105,5 кДж). Термодинамическими расчетами доказано, что в условиях серноокислотно-тиоцианатного выщелачивания уран в растворе преобладает в форме уранил-сульфатов. Таким образом, в серноокислотно-тиоцианатной системе золото переходит в устойчивые комплексы $[\text{Au}(\text{SCN})_2]^-$ и $[\text{Au}(\text{SCN})_4]^-$, а тиоцианат не расходуется на связывание с ураном. При этом образующиеся пленки AuSCN растворяются за счет избытка свободных SCN^- , ионов Fe(III) и тиоцианатов железа. Полученные результаты могут быть использованы для моделирования лабораторных исследований по совместному сульфатно-тиоцианатному выщелачиванию золота и урана.

Ключевые слова: золотоурановая руда, тиоцианатное выщелачивание золота, серноокислотно-тиоцианатное выщелачивание урана, термодинамическое моделирование, метод термодинамических циклов, энергия Гиббса, тиоцианатные комплексы золота, простой тиоцианат золота, тиоцианаты железа (III), пассивация золота, сульфатные соединения урана.

Для цитирования: Шипнигов А.А., Епифоров А.В., Минеева Т.С. Термодинамическая оценка процесса одновременного выщелачивания золота и урана серноокислыми тиоцианатными растворами // iPolytech Journal. 2026. Т. 30. № 3. С. 558–571. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2026-3-558-571>. EDN: JTLFTR.

METALLURGY

Original article

Thermodynamic assessment of simultaneous gold and uranium leaching with acidic thiocyanate solutions

Anton A. Shipnigov^{1✉}, Alexander V. Epiforov², Tatiana S. Mineeva³^{1,3}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation^{1,2}Irkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and Diamonds, Irkutsk, Russian Federation

Abstract. This study presents a thermodynamic assessment of the simultaneous leaching of Au and U from complex oxidized gold-uranium ores with acidic thiocyanate solutions at different temperatures. In addition, the physicochemical

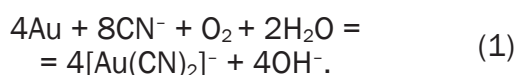
conditions required for the subsequent dissolution of gold(I) thiocyanate passivation layers are identified. Variations in the Gibbs free energy of gold leaching reactions were calculated over the temperature range of 298–358 K using thermodynamic cycles of dissolution and complex formation and the stability constants of dithiocyanatoaurate(I), $\text{Au}(\text{SCN})_2^-$, tetrathiocyanatoaurate(III) $\text{Au}(\text{SCN})_4^-$, gold(I) thiocyanate, AuSCN , and all coordination forms of Fe(III) thiocyanates. The behavior of the U(IV)–U(VI) system was evaluated by the conventional method based on differences in the standard Gibbs free energies of formation of the compounds and ions at 298 K. Thermodynamic calculations showed that during thiocyanate leaching, gold enters solution predominantly as the thermodynamically stable $\text{Au}(\text{SCN})_4^-$ complex. The greatest driving force for complex formation, accompanied by gold oxidation, was observed in reactions involving free Fe(III) ions and the FeSCN^{2+} complex. At temperatures above 303–305 K, gold undergoes passivation through the formation of AuSCN . Thermodynamic analysis demonstrated that AuSCN can be dissolved by maintaining an excess of SCN^- ions. Analysis of the uranium-containing system showed that the addition of Fe(III) ions as an oxidant promotes the leaching of refractory UO_2 , with a Gibbs free energy change of -105.5 kJ/mol. Thermodynamic calculations further showed that under acidic sulfate-thiocyanate leaching conditions, uranium occurs in solution predominantly as uranyl sulfates. Thus, in the acidic sulfate-thiocyanate system, gold forms stable $\text{Au}(\text{SCN})_2^-$ and $\text{Au}(\text{SCN})_4^-$ complexes, while thiocyanate is not consumed through complex formation with uranium. The resulting AuSCN films are dissolved in the presence of excess free SCN^- ions, Fe(III) ions, and iron thiocyanate complexes. These findings provide a basis for further laboratory studies of the simultaneous sulfate-thiocyanate leaching of gold and uranium.

Keywords: gold–uranium ore, thiocyanate leaching of gold, sulfuric acid leaching of uranium, thermodynamic modeling, method of thermodynamic cycles, Gibbs energy, gold (I) and gold (III) thiocyanate complexes, simple gold (I) thiocyanate, iron (III) thiocyanates, gold passivation, uranium sulfate compounds

For citation: Shipnigov A.A., Epiforov A.V., Mineeva T.S. Thermodynamic assessment of simultaneous gold and uranium leaching with acidic thiocyanate solutions. *iPolytech Journal*. 2026;30(3):558-571. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2026-3-558-571>. EDN: JTLFTR.

ВВЕДЕНИЕ

Переработка комплексных золотоурановых руд представляет собой сложную научно-техническую задачу, решение которой сдерживается химической спецификой извлекаемых компонентов [1]. Традиционная гидрометаллургическая технология извлечения золота основана на классическом цианировании ($\text{pH} > 10$) [2], протекающем по реакции (1):



Данный процесс принципиально не может быть совмещен с сернокислотным выщелачиванием урана ($\text{pH} < 3$) [3], в ходе которого уран переходит в раствор по реакции (2):



Особенности условий выщелачивания золота и урана вынуждают осуществлять их раздельное последовательное извлечение, что существенно усложняет аппаратно-технологическую схему и увеличивает капитальные затраты. Раздельная переработка золотоурановых руд может осуществляться двумя способами [4, 5]:

1. Последовательное выщелачивание урана и золота – предусматривает сернокислотное выщелачивание урана. Хвосты после выщелачивания отмывают от серной кислоты, за-

щелачивают до $\text{pH} \geq 10$ и выщелачивают золото цианидом.

2. Последовательное выщелачивание золота и урана – выщелачивание золота щелочными цианидными растворами. Хвосты выщелачивания отмывают от цианида, закисляют раствором серной кислоты до $\text{pH} < 3$ и проводят сернокислотное выщелачивание урана.

В связи с этим весьма актуален поиск альтернативных бесцианидных растворителей, способных стабильно работать в сернокислой среде и обеспечивать совместный перевод золота и урана в единый раствор.

В качестве альтернативных цианиду растворителей золота активно исследуются тиомочевина, тиосульфат, галогены (хлориды, бромиды, йодиды) и др. [6, 7] (табл. 1).

Показано, что цианидный комплекс обладает высокой устойчивостью, однако область его применения строго ограничена щелочной средой ($\text{pH} > 9$). Применение тиосульфатных, бромидных и йодидных систем исключено в сернокислых средах ($\text{pH} < 3$), необходимых для извлечения урана.

В сильноокислых растворах пригодны тиомочевина, хлориды и тиоцианаты. Однако тиомочевина подвержена высокому окислительному разрушению в присутствии ионов Fe(III), используемых в качестве окислителя при выщелачивании урана (IV). Ионы железа могут попадать в выщелачивающий раствор

Таблица 1. Сравнительные характеристики реагентов-растворителей золота
Table 1. Comparative characteristics of gold dissolving agents (leaching agents)

Реагент	Лиганд	Комплекс золота	Константа устойчивости ($\lg\beta$)*	$E^0 \text{ Au}^{n+}/\text{Au}^0$, В	pH
Цианид	CN^-	$[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$	38,3	-0,57	>9
Тиосульфат	$\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$	$[\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2]^{3-}$	28,7	0,17	8–9
Тиомочевина	$\text{CS}(\text{NH}_2)_2$	$[\text{Au}(\text{NH}_2\text{CSNH}_2)_2]^+$	23,3	0,38	<3
Хлорид	Cl^-	$[\text{AuCl}_2]^-$	9,1	1,11	<3
		$[\text{AuCl}_4]^-$	25,3	1,00	
Бромид	Br^-	$[\text{AuBr}_2]^-$	12,0	0,98	5–8
		$[\text{AuBr}_4]^-$	32,8	0,97	
Йодид	I^-	$[\text{AuI}_2]^-$	18,6	0,58	5–9
		$[\text{AuI}_4]^-$	47,7	0,69	
Тиоцианат	SCN^-	$[\text{Au}(\text{SCN})_2]^-$	19,1	0,66	<3
		$[\text{Au}(\text{SCN})_4]^-$	43,6	0,69	

Примечание. *Величина $\lg\beta$ – десятичный логарифм константы устойчивости соединений.

при взаимодействии серной кислоты с компонентами руды, а также могут искусственно вводиться в виде растворимых солей. Поддержание необходимой концентрации ионов Fe(III) в растворе осуществляется окислением ионов Fe(II) окислителями (MnO_2 , H_2O_2 , NaNO_2 и др.) [8, 9].

Хлоридный процесс, несмотря на умеренную стабильность комплекса $[\text{AuCl}_4]^-$ ($\lg\beta = 25,3$), характеризуется высоким электродным потенциалом ($E^0 = 1,0 - 1,11$ В), что требует применения «жестких» окислителей и вызывает сильную коррозию оборудования.

В данных условиях наиболее сбалансированной является тиоцианатная система [10]. За счет формирования прочных комплексов $[\text{Au}(\text{SCN})_2]^-$ и $[\text{Au}(\text{SCN})_4]^-$ с константами устойчивости – $\lg\beta = 19,1$ и $43,6$ соответственно [11].

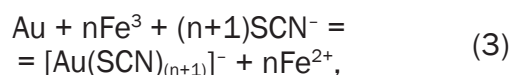
Тиоцианатное выщелачивание золота изучалось ранее рядом отечественных и зарубежных исследователей. Были заложены фундаментальные теоретические основы механизма растворения золота в чистых тиоцианатных растворах [11–14]. Также предпринимались попытки извлечения золота непосредственно из рудного сырья тиоцианатными растворами [15, 16].

Тем не менее физико-химические закономерности формирования единой многокомпонентной системы $\text{Au}-\text{U}-\text{H}_2\text{SO}_4-\text{SCN}^- - \text{Fe}$, а также влияние температурного фактора на термодинамическое равновесие в ней до сих пор остаются малоизученными.

В данной системе для перевода драгоценного металла в ионную форму требуется окис-

литель, способный преодолеть высокий стандартный потенциал золота ($E_{\text{Au}^+/\text{Au}}^0 = 1,69$ В, $E_{\text{Au}^{3+}/\text{Au}}^0 = 1,50$ В, $E_{\text{Au}^{3+}/\text{Au}^{2+}}^0 = 1,41$ В). В тиоцианатной системе за счет связывания золота в прочные комплексы $[\text{Au}(\text{SCN})_2]^-$ и $[\text{Au}(\text{SCN})_4]^-$ реальный потенциал его окисления снижается до 0,66 и 0,69 В. Окислителем золота, как и четырехвалентного урана, в данном случае являются ионы Fe(III) с потенциалом пары $E_{\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}}^0 = 0,77$ В.

Выделение золота протекает с образованием дитиоцианоаурат (I)-иона $[\text{Au}(\text{SCN})_2]^-$ или тетратиоцианоаурат (III)-иона $[\text{Au}(\text{SCN})_4]^-$ по реакции (3):

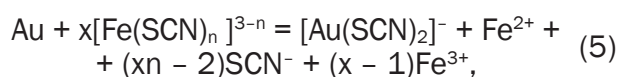


где $n = 1$ или 3 .

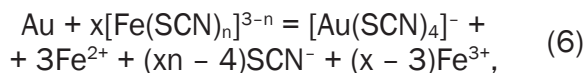
При тиоцианатном выщелачивании золота Fe(III) может образовывать тиоцианатные комплексы с координационным числом (n) от 1 до 5 в соответствии с уравнением (4), которые одновременно могут являться и окислителем, и комплексообразователем для золота [17] в соответствии с реакциями (5) и (6):



где $n = \text{от } 1 \text{ до } 5$;



где $x = 1$ при $n = \text{от } 2 \text{ до } 5$; $x = 2$ при $n = 1$;

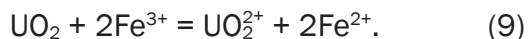
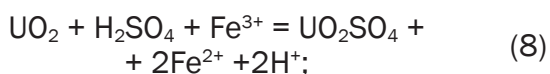


где $x = 3$ при $n =$ от 2 до 5; $x = 4$ при $n = 1$.

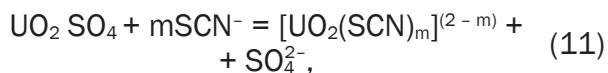
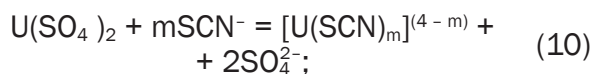
Однако извлечение золота в раствор может усложняться тем, что на границе раздела фаз может происходить конкурирующая реакция образования труднорастворимого осадка простого тиоцианата золота (I) (AuSCN), который блокирует поверхность золота согласно реакции (7) [18]:



Уран в рудах часто присутствует в упорной для сернокислотного выщелачивания четырехвалентной форме (UO_2), и для перевода его в раствор основную роль играют ионы $\text{Fe}(\text{III})$. Обладая высокой окислительной способностью, данные ионы окисляют труднорастворимый диоксид четырехвалентного урана (UO_2) в сернокислой среде до растворимого шестивалентного уранил-иона (UO_2^{2+}) по реакциям (8) и (9) [19, 20]:



При этом существует вероятность побочного расхода реагента вследствие взаимодействия сульфатных комплексов четырех- и шестивалентного урана с тиоцианат-ионами по вероятным реакциям (10) и (11):



где $m =$ от 1 до 5.

В связи с этим возникает необходимость системного термодинамического анализа взаимного влияния компонентов системы в едином растворе.

Целью настоящей работы явилась термодинамическая оценка выщелачивания золота и урана сернокислыми тиоцианатными растворами, определение влияния температуры на протекание химических взаимодействий, а также выявление физико-химических условий для последующего

растворения пассивирующих пленок тиоцианата золота (I).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для оценки термодинамической вероятности совместного сернокисотно-тиоцианатного выщелачивания золота и урана, а также определения условий самопроизвольного протекания реакций был выполнен расчет изменений энергии Гиббса изучаемых процессов:

тиоцианатное выщелачивание золота (расчеты выполнены в интервале температур 298–358 К с шагом 10 К. Нижняя граница (298 К) отвечает стандартным условиям гидрометаллургических процессов, верхний предел (358 К) ограничен повышенным риском разложения тиоцианат-ионов в кислых средах) [11, 18];

сернокислотное выщелачивание оксидов урана и оценка побочных взаимодействий (расчеты выполнены для температуры 298 К, т.к. в данном случае уран является попутным компонентом и для оценки его поведения в тиоцианатных растворах рассматривали стандартные условия).

В расчетах не учитывались кинетические факторы системы (только термодинамические), а также влияние сопутствующих в руде элементов-примесей.

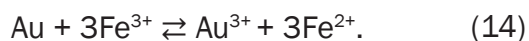
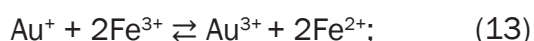
Ввиду отсутствия справочных данных по стандартным энергиям Гиббса образования высших тиоцианатных комплексов железа ($n = 3-5$) прямое определение энергии Гиббса для многокомпонентных реакций в растворе классическим методом затруднено. В связи с этим в работе использован метод термодинамических циклов [21], при котором суммарный процесс выщелачивания золота разделялся на отдельные промежуточные стадии: переход металла в ионную форму, образование/разрушение тиоцианатных соединений/комплексов золота и железа.

В связи с отсутствием в литературных источниках справочной термодинамической информации для различных температур, в качестве исходных данных для расчета изменений энергии Гиббса реакций использовали константы устойчивости соединений при температуре (298 К). Данное допущение, по мнению авторов, не должно принципиально исказить полученные результаты расчетов, но позволяет оценить вероятность протекания

процессов при изменении температурного режима. Справочные данные по константам устойчивости представлены в табл. 2.

Алгоритм расчета включал в себя последовательное вычисление следующих величин:

1. Изменение энергии Гиббса окислительно-восстановительной стадии (ΔG_1^0), отвечающей за переход металлического золота в ионную форму под действием ионов Fe(III), протекает согласно реакциям (12)–(14):



Расчет выполнялся по уравнению (15):

$$\Delta G_1^0 = -\frac{nFE^0}{1000}, \quad (15)$$

где $E^0 = E^0_{\text{ОКИСЛИТЕЛЯ}} - E^0_{\text{ВОССТАНОВИТЕЛЯ}}$ (разность стандартных электродных потенциалов систем Au^+/Au , Au^{3+}/Au , $\text{Au}^{3+}/\text{Au}^+$ и $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$; в качестве окислителя выступает пара $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$, в качестве восстановителя – соответствующие пары золота), В; n – количество электронов; F – число Фарадея (96500 Кл/моль), 1000 – коэффициент перехода из Дж в кДж.

2. Изменение энергии Гиббса процессов образования и разложения соединений (ΔG_2^0 и $\Delta G_{3,4}^0$) рассчитывали с использованием констант устойчивости комплексов согласно уравнениям (16)–(21).

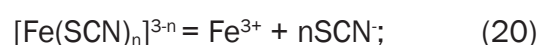
Для стадии образования золототиоцианатных комплексов $m = 1$ или 3; $n = 2$ или 4, для простого тиоцианата золота (I) – $m = 1$; $n = 1$:

$$\Delta G_2^0 = -\frac{RT \ln K}{1000} = -\frac{2,303 \cdot RT \lg \beta}{1000}; \quad (16)$$



Для разложения исходных тиоцианатных комплексов Fe(III) (при $n = 1-5$), а также соединений простого тиоцианата золота (I):

$$\Delta G_{3,4}^0 = \frac{RT \ln K}{1000} = \frac{2,303 \cdot RT \lg \beta}{1000}; \quad (19)$$



где R – универсальная газовая постоянная (8,314 Дж/(моль·К)); T – температура, К; 2,303 – коэффициент перехода от натурального логарифма к десятичному.

3. Изменение энергии Гиббса суммарной реакции (ΔG_p^0) рассчитывали как алгебраическую сумму изменений энергий Гиббса отдельных стадий процесса по уравнению (22):

$$\Delta G_p^0 = \Sigma \Delta G_x^0, \quad (22)$$

где $x = 1-4$.

Термодинамический анализ процессов сернокислотного выщелачивания урана из оксидов UO_2 и UO_3 , а также оценку вероятности побочного взаимодействия ионов UO_4^{4+} и UO_2^{2+} с тиоцианат-ионами проводили по значениям изменений энергий Гиббса образования индивидуальных веществ и ионов (ΔG_f^0) при температуре 298 К [22, 23].

Исходные данные представлены в табл. 3.

Таблица 2. Константы устойчивости

Table 2. Stability constants

Вещество	$\lg \beta$
$[\text{Au}(\text{SCN})_2]^-$	19,16
$[\text{Au}(\text{SCN})_4]^-$	43,66
AuSCN	15,27
$[\text{FeSCN}]^{2+}$	2,53
$[\text{Fe}(\text{SCN})_2]^+$	3,88
$\text{Fe}(\text{SCN})_3$	5,19
$[\text{Fe}(\text{SCN})_4]^-$	6,3
$[\text{Fe}(\text{SCN})_5]^{2-}$	6,2

Таблица 3. Изменение энергии Гиббса образования веществ
Table 3. Change in Gibbs free energy of formation of substances

Продукт	Изменение энергии Гиббса образования, кДж/моль	Продукт	Изменение энергии Гиббса образования, кДж/моль	Продукт	Изменение энергии Гиббса образования, кДж/моль
UO ⁴⁺	-529	Fe ³⁺	-16,2	U(SCN) ₄	-177
UO ₂ ²⁺	-952	Fe ²⁺	-91,5	[U(SCN) ₅] ⁻	-87,1
UO ₂	-1031	SO ₄ ²⁻	-744	[UO ₂ SCN] ⁺	-862
UO ₃	-1140	SCN ⁻	92,7	UO ₂ (SCN) ₂	-770
H ₂ SO ₄	-744	[USCN] ³⁺	-442	[UO ₂ (SCN) ₃] ⁻	-678
U(SO ₄) ₂	-2079	[U(SCN) ₂] ²⁺	-355	[UO ₂ (SCN) ₄] ²⁻	-586
UO ₂ SO ₄	-1714	[U(SCN) ₃] ⁺	-274	[UO ₂ (SCN) ₅] ³⁻	-492

Расчет (ΔG_p^0) проводили по принципу аддитивности согласно уравнению (23):

$$\Delta G_p^0 = \Sigma(n \cdot \Delta G_{f, \text{продукты}}^0) - \Sigma(m \cdot \Delta G_{f, \text{исходные}}^0), \quad (23)$$

где n, m – стехиометрические коэффициенты в уравнении реакции.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Выщелачивание золота. Результаты расчета изменений энергии Гиббса реакций, описывающих выщелачивание золота с образованием тиоцианатных комплексов [Au(SCN)₂]⁻ и [Au(SCN)₄]⁻, представлены в табл. 4.

Показано, что наиболее вероятным механизмом растворения золота является его взаимодействие (окисление) с тиоцианат-ионами в присутствии ионов Fe(III), реакции (24) и (31). Растворение золота тиоцианатными комплексами железа имеет меньшую вероятность, которая может усиливаться с ростом температуры процесса. Также вероятность растворения золота тиоцианатными комплексами железа будет тем больше, чем меньше координационное число в этих комплексах.

Несмотря на образование устойчивых комплексов золота, реальные показатели

Таблица 4. Изменение энергии Гиббса реакций образования тиоцианатных комплексов Au(I) и Au(III)
Table 4. Change in Gibbs free energy of Au(I) and Au(III) thiocyanate complex formation reactions

№ реакции	Уравнение реакции	Изменение энергии Гиббса реакций при различной температуре, кДж						
		298 К	308 К	318 К	328 К	338 К	348 К	358 К
Образование тиоцианатного комплекса золота (I)								
24	$\text{Au} + 2\text{SCN}^- + \text{Fe}^{3+} = [\text{Au}(\text{SCN})_2]^- + \text{Fe}^{2+}$	-20,5	-24,2	-27,9	-31,5	-35,2	-38,9	-42,6
25	$\text{Au} + [\text{FeSCN}]^{2+} + \text{SCN}^- = [\text{Au}(\text{SCN})_2]^- + \text{Fe}^{2+}$	-6,1	-9,3	-12,5	-15,7	-18,8	-22	-25,2
26	$\text{Au} + 2[\text{FeSCN}]^{2+} = [\text{Au}(\text{SCN})_2]^- + \text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+}$	8,3	5,6	2,9	0,2	-2,5	-5,2	-7,9
27	$\text{Au} + [\text{Fe}(\text{SCN})_2]^+ = [\text{Au}(\text{SCN})_2]^- + \text{Fe}^{2+}$	1,6	-1,3	-4,3	-7,2	-10,1	-13,0	-16,0
28	$\text{Au} + \text{Fe}(\text{SCN})_3 = [\text{Au}(\text{SCN})_2]^- + \text{SCN}^- + \text{Fe}^{2+}$	9,1	6,4	3,7	1,0	-1,6	-4,3	-7,0
29	$\text{Au} + [\text{Fe}(\text{SCN})_4]^- = [\text{Au}(\text{SCN})_2]^- + 2\text{SCN}^- + \text{Fe}^{2+}$	15,4	12,9	10,5	8,0	5,6	3,1	0,6
30	$\text{Au} + [\text{Fe}(\text{SCN})_5]^{2-} = [\text{Au}(\text{SCN})_2]^- + 3\text{SCN}^- + \text{Fe}^{2+}$	14,8	12,4	9,9	7,4	4,9	2,4	-0,1
Образование тиоцианатного комплекса золота (III)								
31	$\text{Au} + 4\text{SCN}^- + 3\text{Fe}^{3+} = [\text{Au}(\text{SCN})_4]^- + 3\text{Fe}^{2+}$	-37,8	-46,1	-54,5	-62,9	-71,2	-79,6	-87,9
32	$\text{Au} + 3\text{SCN}^- + [\text{FeSCN}]^{2+} + 2\text{Fe}^{3+} = [\text{Au}(\text{SCN})_4]^- + 3\text{Fe}^{2+}$	-23,3	-31,2	-39,1	-47,0	-54,8	-62,7	-70,6
33	$\text{Au} + 4[\text{FeSCN}]^{2+} = [\text{Au}(\text{SCN})_4]^- + 3\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+}$	20	13,5	7,1	0,7	-5,7	-12,1	-18,6
34	$\text{Au} + 3[\text{Fe}(\text{SCN})_2]^+ = [\text{Au}(\text{SCN})_4]^- + 2\text{SCN}^- + 3\text{Fe}^{2+}$	28,6	22,5	16,4	10,2	4,1	-2,0	-8,2
35	$\text{Au} + 3\text{Fe}(\text{SCN})_3 = [\text{Au}(\text{SCN})_4]^- + 5\text{SCN}^- + 3\text{Fe}^{2+}$	51,1	45,7	40,3	34,9	29,5	24,2	18,8
36	$\text{Au} + 2\text{Fe}(\text{SCN})_3 + \text{Fe}^{3+} = [\text{Au}(\text{SCN})_4]^- + 2\text{SCN}^- + 3\text{Fe}^{2+}$	21,4	15,1	8,7	2,3	-4,0	-10,4	-16,8
37	$\text{Au} + 3[\text{Fe}(\text{SCN})_4]^- = [\text{Au}(\text{SCN})_4]^- + 8\text{SCN}^- + 3\text{Fe}^{2+}$	70,1	65,3	60,6	55,8	51,1	46,4	41,6
38	$\text{Au} + [\text{Fe}(\text{SCN})_4]^- + 2\text{Fe}^{3+} = [\text{Au}(\text{SCN})_4]^- + 3\text{Fe}^{2+}$	-1,8	-9,0	-16,1	-23,3	-30,4	-37,6	-44,8
39	$\text{Au} + 3[\text{Fe}(\text{SCN})_5]^{2-} = [\text{Au}(\text{SCN})_4]^- + 11\text{SCN}^- + 3\text{Fe}^{2+}$	68,3	63,5	58,7	54	49,2	44,4	39,6

извлечения в тиоцианатных растворах могут ограничиваться образованием нерастворимого осадка на поверхности металла (золотин). Термодинамический анализ возможности образования AuSCN при тиоцианатном выщелачивании представлен в табл. 5.

Показано, что AuSCN с наибольшей вероятностью может образоваться в соответствии с реакцией (40) при нагревании системы. Вероятность образования AuSCN при взаимодействии с комплексами железа во всем интервале температур очень мала.

На графике (рис. 1) представлены зависимости изменения энергии Гиббса основных реакций тиоцианатного выщелачивания золота от температуры процесса.

Сравнительный анализ изменений стандартных энергий Гиббса реакций тиоцианатного выщелачивания золота наглядно демонстрирует конкурирующий характер протекания процессов в интервале 298–358 К. При этом реакции образования комплекса $[\text{Au}(\text{SCN})_4]^-$ (реакции (31) и (32)) являются наиболее вероятными. Увеличе-

Таблица 5. Изменение энергии Гиббса реакций образования простого тиоцианата золота (I) при различных температурах

Table 5. Change in Gibbs free energy of the formation reactions of simple gold (I) thiocyanate at various temperatures

№ реакции	Образование простого тиоцианата золота (I)	Изменение энергии Гиббса реакций при различной температуре, кДж						
		298 К	308 К	318 К	328 К	338 К	348 К	358 К
40	$\text{Au} + \text{Fe}^{3+} + \text{SCN}^- = \text{AuSCN} + \text{Fe}^{2+}$	1,7	-1,3	-4,2	-7,1	-10,0	-13,0	-15,9
41	$\text{Au} + [\text{FeSCN}]^{2+} = \text{AuSCN} + \text{Fe}^{2+}$	16,1	13,6	11,2	8,8	6,3	3,9	1,5
42	$\text{Au} + [\text{Fe}(\text{SCN})_2]^+ = \text{AuSCN} + \text{SCN}^- + \text{Fe}^{2+}$	23,8	21,6	19,4	17,2	15,1	12,9	10,7
43	$\text{Au} + \text{Fe}(\text{SCN})_3 = \text{AuSCN} + 2\text{SCN}^- + \text{Fe}^{2+}$	31,3	29,3	27,4	25,5	23,5	21,6	19,7
44	$\text{Au} + [\text{Fe}(\text{SCN})_4]^- = \text{AuSCN} + 3\text{SCN}^- + \text{Fe}^{2+}$	37,6	35,9	34,2	32,4	30,7	29,0	27,3
45	$\text{Au} + [\text{Fe}(\text{SCN})_5]^{2-} = \text{AuSCN} + 4\text{SCN}^- + \text{Fe}^{2+}$	37,0	35,3	33,6	31,8	30,1	28,3	26,6

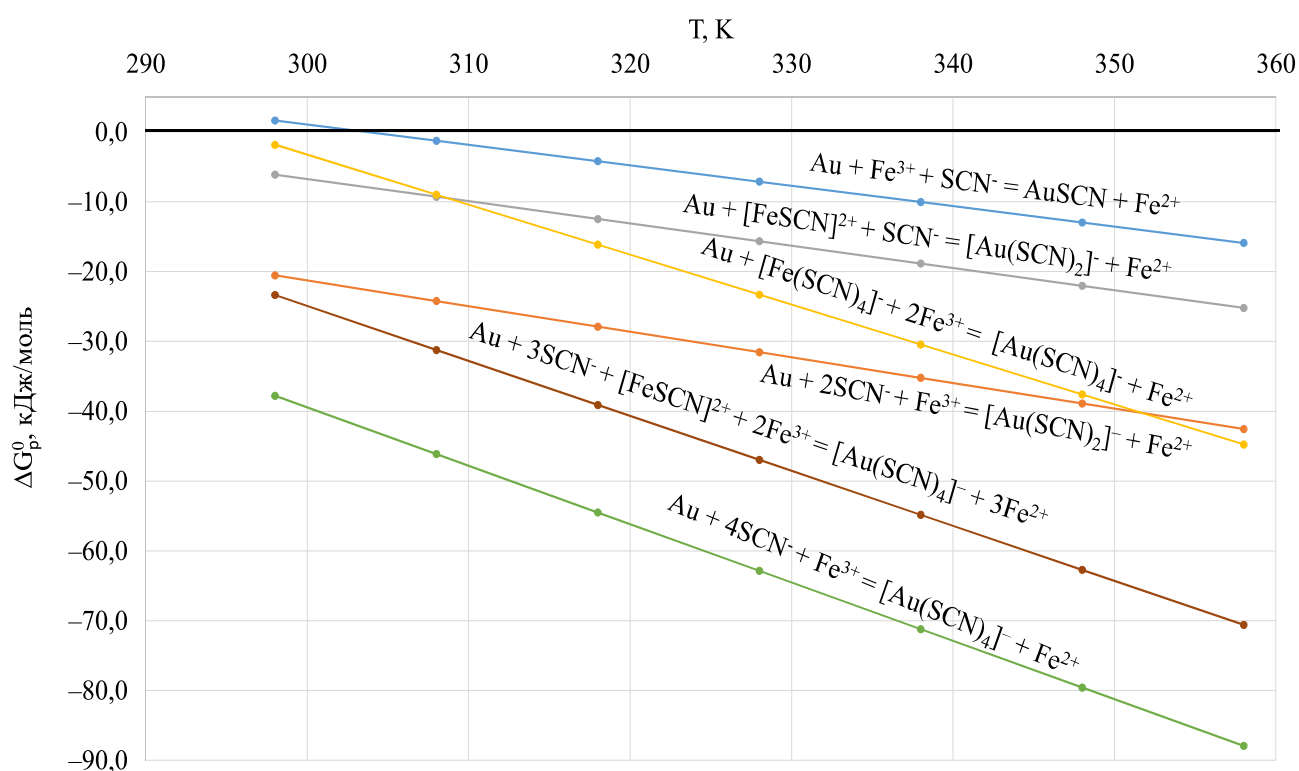


Рис. 1. Зависимости изменения энергии Гиббса основных реакций тиоцианатного выщелачивания золота от температуры процесса

Fig. 1. Gibbs energy change of the main gold thiocyanate leaching reactions vs process temperature

ние температуры процесса смещает равновесие реакций в сторону образования продуктов.

Образование осадка AuSCN на поверхности золота в процессе тиоцианатного выщелачивания может снижать его извлечение в раствор, однако система способна поддерживать режим динамического конкурирующего равновесия.

Результаты расчета изменений энергии Гиббса предполагаемых реакций, описывающих растворение простого тиоцианата золота, представлены в табл. 6.

Показано, что наиболее вероятным механизмом растворения AuSCN является его взаимодействие со свободным тиоцианат-ионом как с образованием $[\text{Au}(\text{SCN})_2]^-$, так и с образованием $[\text{Au}(\text{SCN})_4]^-$. Растворение AuSCN тиоцианатными комплексами железа имеет меньшую вероятность и относится в большей степени к образованию $[\text{Au}(\text{SCN})_2]^-$, реакции (46)–(50).

Также показано, что изменения энергии Гиббса реакций (53)–(55) при нормальных условиях имеют положительные значения, что указывает на то, что равновесие данных реакций направлено влево. Таким образом, показано, что образование AuSCN может протекать восстановлением комплексов $[\text{Au}(\text{SCN})_4]^-$ ионами Fe(II) при нагреве выше 308–318 К.

В целом тенденция растворения AuSCN усиливается (образование AuSCN снижается) с увеличением в системе количества тиоцианата в свободном виде либо в комплексах железа.

На графике (рис. 2) представлены зависимости изменения энергии Гиббса основных реакций растворения AuSCN от температуры процесса.

Показано, что наиболее эффективным способом минимизации процесса осаждения AuSCN является поддержание повышенной концентрации тиоцианата до 3 моль на 1 моль Au (см. реакцию (51)) и поддержание высокого окислительно-восстановительного потенциала системы (концентрации ионов Fe(III) в растворе, препятствующих восстановлению золота). Увеличение температуры процесса смещает равновесие реакций в сторону образования продуктов.

Выщелачивание урана. Проведен термодинамический анализ реакций выщелачивания урана сернокислыми растворами, а также реакций взаимодействия урана и его соединений с тиоцианатом в сернокислых тиоцианатных растворах. В табл. 7 представлены энергии Гиббса реакций сернокислотного растворения оксидов UO_2 и UO_3 как в отсутствие окислителя, так и при непосредственном участии ионов Fe(III).

Таблица 6. Изменение энергии Гиббса реакций растворения осадка AuSCN с образованием комплексов Au(I) и Au(III) при различных температурах

Table 6. Change in Gibbs free energy of AuSCN precipitate dissolution reactions with the formation of Au(I) and Au(III) complexes at various temperatures

№ реакции	Уравнение реакции	Изменение энергии Гиббса реакций при различной температуре, кДж						
		298 К	308 К	318 К	328 К	338 К	348 К	358 К
Растворение простого тиоцианата золота (I) с образованием комплекса золота (I)								
46	$\text{AuSCN} + \text{SCN}^- = [\text{Au}(\text{SCN})_2]^-$	-22,2	-22,9	-23,7	-24,4	-25,2	-25,9	-26,7
47	$\text{AuSCN} + [\text{FeSCN}]^{2+} = [\text{Au}(\text{SCN})_2]^- + \text{Fe}^{3+}$	-7,8	-8,0	-8,3	-8,5	-8,8	-9,1	-9,3
48	$\text{AuSCN} + [\text{Fe}(\text{SCN})_2]^+ = [\text{Au}(\text{SCN})_2]^- + [\text{FeSCN}]^{2+}$	-14,5	-15,0	-15,5	-16	-16,4	-16,9	-17,4
49	$\text{AuSCN} + \text{Fe}(\text{SCN})_3 = [\text{Au}(\text{SCN})_2]^- + [\text{Fe}(\text{SCN})_2]^+$	-14,7	-15,2	-15,7	-16,2	-16,7	-17,2	-17,7
50	$\text{AuSCN} + [\text{Fe}(\text{SCN})_4]^- = [\text{Au}(\text{SCN})_2]^- + \text{Fe}(\text{SCN})_3$	-15,9	-16,4	-16,9	-17,5	-18,0	-18,5	-19,1
Растворение простого тиоцианата золота (I) с образованием комплекса золота (III)								
51	$\text{AuSCN} + 3\text{SCN}^- + 2\text{Fe}^{3+} = [\text{Au}(\text{SCN})_4]^- + 2\text{Fe}^{2+}$	-38,5	-43,9	-49,3	-54,8	-60,2	-65,6	-71,1
52	$\text{AuSCN} + \text{SCN}^- + 2[\text{FeSCN}]^{2+} = [\text{Au}(\text{SCN})_4]^- + 2\text{Fe}^{2+}$	-9,6	-14,1	-18,5	-23,0	-27,5	-31,9	-36,4
53	$\text{AuSCN} + 2[\text{Fe}(\text{SCN})_2]^+ = [\text{Au}(\text{SCN})_4]^- + 2\text{Fe}^{2+} + \text{SCN}^-$	5,8	1,9	-2,1	-6,0	-10,0	-13,9	-17,9
54	$\text{AuSCN} + 2\text{Fe}(\text{SCN})_3 = [\text{Au}(\text{SCN})_4]^- + 2\text{Fe}^{2+} + 3\text{SCN}^-$	20,8	17,3	13,9	10,4	7,0	3,5	0,1
55	$\text{AuSCN} + 2[\text{Fe}(\text{SCN})_4]^- = [\text{Au}(\text{SCN})_4]^- + 2\text{Fe}^{2+} + 5\text{SCN}^-$	33,4	30,4	27,4	24,4	21,3	18,3	15,3

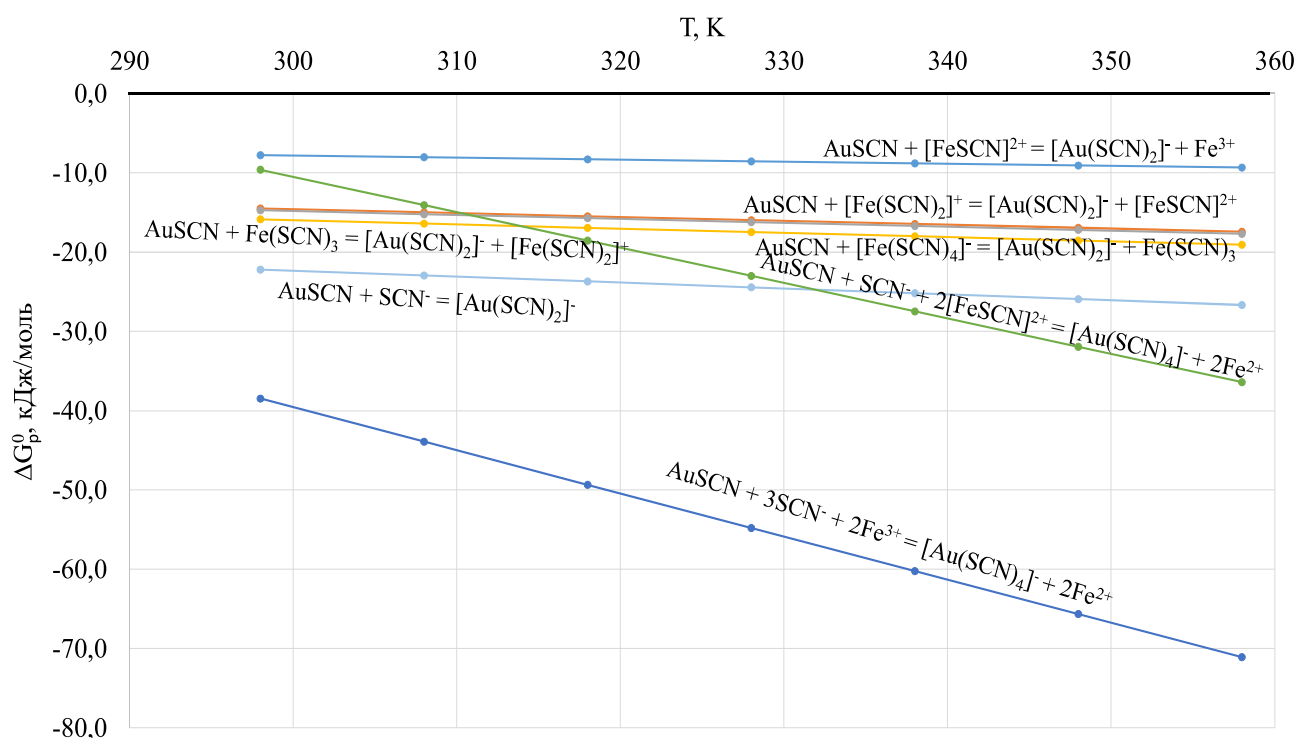


Рис. 2. Зависимости изменения энергии Гиббса основных реакций растворения AuSCN от температуры процесса

Fig. 2. Gibbs energy change of the main AuSCN dissolution reactions vs process temperature

Показано, что прямое сернокислотное выщелачивание UO_3 по реакции (57) характеризуется высокой термодинамической вероятностью ($\Delta G_{298}^0 = -67,4$ кДж) и протекает самопроизвольно без использования окислителя. В то же время выщелачивание UO_2 исключительно растворами серной кислоты, согласно реакции (56), термодинамически более затруднено ($\Delta G_{298}^0 = -33,7$ кДж). Ситуация меняется при введении в систему ионов Fe(III), которые окисляют U(IV) до U(VI) по реакциям (58)–(60). При этом вероятность процесса выщелачивания значительно повышается.

Поскольку исследуемый раствор содержит ионы тиоцианата, важной задачей является оценка вероятности протекания побочных реакций взаимодействия урана с

тиоцианат-ионами, способных вызвать повышенный расход этого реагента. Результаты расчетов представлены в табл. 8.

Показано, что вероятность взаимодействия ионов U^{4+} и UO_2^{2+} с SCN^- термодинамически возможна (ΔG_{298}^0 = от $-2,2$ до $-22,6$ кДж). Данная вероятность тем больше, чем выше молярная концентрация тиоцианат-иона в системе.

Однако термодинамическая вероятность протекания реакций образования тиоцианата урана и уранила значительно меньше, чем у реакций образования их сульфатов, что говорит о малой вероятности взаимодействия урана с тиоцианатом в сернокислой среде.

Несмотря на то, что взаимодействие ионов урана и уранила с тиоцианат-ионом термодинамически возможно ($\Delta G_{298}^0 < 0$),

Таблица 7. Изменение энергии Гиббса реакций выщелачивания оксидов урана

Table 7. Change in Gibbs free energy of uranium oxide leaching reactions

№ реакции	Реакции	ΔG_{298}^0 , кДж
56	$\text{UO}_2 + 2\text{H}_2\text{SO}_4 = \text{U}(\text{SO}_4)_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	-33,7
57	$\text{UO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 = \text{UO}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}$	-67,4
58	$\text{UO}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 + 2\text{Fe}^{3+} = \text{UO}_2\text{SO}_4 + 2\text{Fe}^{2+} + 2\text{H}^+$	-105,5
59	$\text{UO}_2 + \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 = \text{UO}_2\text{SO}_4 + 2\text{FeSO}_4$	-77,71
60	$\text{UO}_2 + 2\text{Fe}^{3+} = \text{UO}_2^{2+} + 2\text{Fe}^{2+}$	-70,8

Таблица 8. Изменение энергии Гиббса реакций взаимодействия ионов урана с тиоцианат-ионом
Table 8. Change in Gibbs free energy of the interaction reactions between uranium ions and thiocyanate ions

№ реакции	Реакции	ΔG_{298}^0 , кДж
61	$U^{4+} + SCN^- = [USCN]^{3+}$	-6,7
62	$U^{4+} + 2SCN^- = [U(SCN)_2]^{2+}$	-11,5
63	$U^{4+} + 3SCN^- = [U(SCN)_3]^+$	-22,6
64	$U^{4+} + 4SCN^- = U(SCN)_4$	-18,9
65	$U^{4+} + 5SCN^- = [U(SCN)_5]^-$	-21,6
66	$UO_2^{2+} + SCN^- = [UO_2SCN]^+$	-2,2
67	$UO_2^{2+} + 2SCN^- = UO_2(SCN)_2$	-3,4
68	$UO_2^{2+} + 3SCN^- = [UO_2(SCN)_3]^-$	-4,1
69	$UO_2^{2+} + 4SCN^- = [UO_2(SCN)_4]^{2-}$	-4,3
70	$UO_2^{2+} + 5SCN^- = [UO_2(SCN)_5]^{3-}$	-4,1

Таблица 9. Изменение энергии Гиббса взаимодействия уран- и уранил-сульфатов с тиоцианатом
Table 9. Change in Gibbs free energy of interaction reactions between uranium- and uranyl sulfates with thiocyanate

№ реакции	Реакции	ΔG_{298}^0 , кДж
71	$U(SO_4)_2 + SCN^- = [USCN]^{3+} + 2SO_4^{2-}$	54,1
72	$U(SO_4)_2 + 2SCN^- = [U(SCN)_2]^{2+} + 2SO_4^{2-}$	49,2
73	$U(SO_4)_2 + 3SCN^- = [U(SCN)_3]^+ + 2SO_4^{2-}$	38,1
74	$U(SO_4)_2 + 4SCN^- = U(SCN)_4 + 2SO_4^{2-}$	41,8
75	$U(SO_4)_2 + 5SCN^- = [U(SCN)_5]^- + 2SO_4^{2-}$	39,1
76	$UO_2SO_4 + SCN^- = [UO_2SCN]^+ + SO_4^{2-}$	15,7
77	$UO_2SO_4 + 2SCN^- = UO_2(SCN)_2 + SO_4^{2-}$	14,5
78	$UO_2SO_4 + 3SCN^- = [UO_2(SCN)_3]^- + SO_4^{2-}$	13,8
79	$UO_2SO_4 + 4SCN^- = [UO_2(SCN)_4]^{2-} + SO_4^{2-}$	13,6
80	$UO_2SO_4 + 5SCN^- = [UO_2(SCN)_5]^{3-} + SO_4^{2-}$	13,8

вероятность образования соответствующих тиоцианатных комплексов уступает образованию сульфатов. Особенно для ионов уранила, которые при сернокислотном выщелачивании будут преобладать в растворе в виде сульфатов.

Оценка вероятности взаимодействия сульфатных соединений урана с тиоцианатом представлена в табл. 9.

Показано, что термодинамическая вероятность протекания процессов замещения сульфатных ионов на тиоцианатные крайне мала, так как $\Delta G_p^0 > 0$. Таким образом, уран в растворе будет преобладать в форме устойчивых сульфатных комплексов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что метод термодинамических циклов применим для расчета изменений энергий Гиббса реакций в условиях дефицита справочных данных по величинам ΔG_f^0 для высших тиоцианатных комплексов же-

леза. Использование констант устойчивости позволило рассчитать изменение энергии Гиббса реакций и установить вероятность перехода золота в раствор.

Установлено, что повышение температуры сдвигает равновесие реакций выщелачивания золота тиоцианатом в сторону образования продуктов, при этом термодинамически доминирующей формой при нагреве является комплекс $[Au(SCN)_4]^-$. Процесс комплексообразования золота со свободными тиоцианат-ионами характеризуется наибольшей движущей силой при участии свободных ионов Fe(III) и моно-тиоцианатного комплекса железа $[FeSCN]^{2+}$ во всем температурном диапазоне. В то же время окислительно-восстановительные взаимодействия с высшими тиоцианатами железа ($n = 3-5$) имеют значительно меньшую вероятность.

Показано, что при тиоцианатном выщелачивании может образовываться труд-

норастворимый AuSCN при температурах выше 303–305 К. Данный продукт может пассивировать поверхность золота, снижая его извлечение. AuSCN образуется при недостатке тиоцианата и окислителя в растворе. Также AuSCN может быть продуктом восстановления комплексов $[\text{Au}(\text{SCN})_4]^-$ ионами Fe(II). Однако при избытке свободных тиоцианат-ионов AuSCN может растворяться с образованием преимущественно комплексов $[\text{Au}(\text{SCN})_2]$.

Термодинамическими расчетами доказано, что растворение диоксида урана в сернокислых растворах протекает преимущественно в присутствии ионов Fe(III) (ΔG_{298}^0 до $-105,5$ кДж). В то же время триоксид урана растворяется в серной кислоте и в отсутствие окислителя.

Взаимодействие ионов урана и уранила с тиоцианатом имеет меньшую термодинамическую вероятность в сравнении с образо-

ванием сульфатов. При этом образующиеся сульфаты урана с точки зрения термодинамики с тиоцианат-ионом не взаимодействуют. Таким образом, в условиях сернокислотно-тиоцианатного выщелачивания уран находится только в виде устойчивых сульфатных комплексов. Это исключает нецелевой расход и потери тиоцианата.

В целом расчеты подтвердили и обосновали возможность сульфатно-тиоцианатного выщелачивания золотоурановых руд. При этом золото будет выщелачиваться в форме тиоцианатных, а уран – в форме сульфатных комплексов. Для стабилизации комплексов золота в растворе необходимо поддерживать молярное соотношение SCN/Au, приблизительно равное 3. Для повышения извлечения золота и урана необходимо поддерживать постоянную концентрацию Fe^{3+} в растворе и препятствовать накоплению Fe^{2+} .

Список источников

1. Лодейщиков В.В. Комплексное использование золотоурановых руд // Золотодобыча. 2010. № 135. С. 6–10.
2. Лодейщиков В.В. Технология извлечения золота и серебра из упорных руд: в 2 т. Иркутск: ОАО «Иргиредмет», 1999. Т. 1. 342 с.
3. Молоков П.Б., Буйновский А.С., Макасеев Ю.Н., Арутюнян Д.Р. Разработка технологии совместного извлечения урана, золота и редкоземельных металлов из комплексных руд // Ядерная энергетика: технология, безопасность, экология, экономика, управление: сб. науч. тр. I Всерос. науч.-практ. конф. молодых атомщиков Сибири (г. Томск, 19–25 сентября 2010 г.). Томск: Томский политехнический университет, 2010. С. 47–48.
4. Шипнигов А.А., Собенников Р.М., Епифоров А.В., Мусин Е.Д. Кучное выщелачивание окисленных золотоурановых руд // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: материалы XXVII Междунар. науч.-техн. конф., проводимой в рамках XX Уральской горнопромышленной декады (г. Екатеринбург, 7–8 апреля 2022 г.). Екатеринбург: ИП Русских А.В., 2022. С. 190–194. EDN: FGAJHQ.
5. Шипнигов А.А., Собенников Р.М., Епифоров А.В., Мусин Е.Д., Григорьев С.Г. Кучное выщелачивание золота и урана из окисленной золотоурановой руды // Рациональное освоение недр. 2022. № 2. С. 66–71. <https://doi.org/10.26121/RON.2022.73.14.009>. EDN: BDRHMA.
6. Aylmore M.G. Alternative lixiviants to cyanide for leaching gold ores // Gold Ore Processing. Project Development and Operations. 2016. Chapt. 27. P. 447–484. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63658-4.00027-X>.
7. Епифоров А.В., Баиков С.В., Шипнигов А.А., Лукьянов А.А. Нецианидные реагенты для извлечения золота из продуктов автоклавного окисления сульфидных концентратов // Цветные металлы. 2021. № 7. С. 37–44. <https://doi.org/10.17580/tsm.2021.07.04>. EDN: OHYZBZ.
8. Venter R., Boylett M. The evaluation of various oxidants used in acid leaching of uranium // Hydrometallurgy Conference 2009 (Gauteng, 24–26 February 2009). Gauteng: The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2009. P. 445–455.
9. Ahmed S.H., Sheta M.E., Saleh G.M., Mahfouz M.G., Mohammed S.A., Abdel Aal M.M. Sulphuric acid leaching of uranium ore using MnO_2 as an oxidizing agent // Chemical Technology an Indian Journal. 2015. Vol. 10. Iss. 2. P. 60–68.
10. Fleming C.A. A process for the simultaneous recovery of gold and uranium from South African ores // Gold 100. Vol. 2. Extractive Metallurgy of Gold. Johannesburg: The South African Institute of Mining and Metallurgy. 1986. P. 301–319.
11. Barbosa F.O., Monhemius A.J. Thermochemistry of thiocyanate systems for leaching gold and silver ores // Precious Metals '89 / eds. M.C. Jha, S.D. Hill. 1988. P. 307–339.
12. Жучков И.А., Минеев Г.Г., Аксенов А.В. Серосодержащие растворители благородных металлов в геохимических и металлургических процессах: монография. Иркутск: ИрГТУ, 2010. 388 с. EDN: TOGLHH.
13. Li Jinshan, Safarzadeh M.S., Moats M.S., Miller J.D., LeVier K.M., Dietrich M., et al. Thiocyanate hydrometallurgy for the recovery of gold. Part I: Chemical and thermodynamic considerations // Hydrometallurgy. 2012. Vol. 113–114. P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.11.005>.

14. Broadhurst J.L., du Preez J.G.H. A thermodynamic study of the dissolution of gold in an acidic aqueous thiocyanate medium using iron (III) sulphate as an oxidant // *Hydrometallurgy*. 1993. Vol. 32. P. 317–344.
15. Ширяева В.В. Разработка технологического режима извлечения золота из комплексных золотоурановых руд с использованием роданидных растворов методом кучного выщелачивания // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2012. № 12. С. 403–412.
16. Шипнигов А.А., Епифоров А.В., Собенников Р.М., Мусин Е.Д., Баликов С.В. Кучное сернокислотно-тиоцианатное выщелачивание золота и урана // *iPolytech Journal*. 2023. Т. 27. № 4. С. 821–828. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-821-828>. EDN: KDVAMS.
17. Кононова О.Н., Холмогоров А.Г., Кононов Ю.С. Сорбционное извлечение золота из растворов и пульп. Химизм процесса, селективность, технология. Красноярск: СФУ, 2011. 197 с. EDN: PZWTKX.
18. Azizitorghabeh A., Wang J., Ramsay J.A., Ghahreman A. A review of thiocyanate gold leaching – chemistry, thermodynamics, kinetics and processing // *Minerals Engineering*. 2021. Vol. 160. P. 106689. <https://doi.org/10.1016/j.mining.2020.106689>.
19. Литвиненко В.Г., Шелудченко В.Г., Филоненко В.С. Совершенствование процесса агитационного выщелачивания урановых руд // *Горный журнал*. 2018. № 7. P. 69–72. <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.07.13>. EDN: XVMDRB.
20. Sole K.C., Cole P.M., Feather A.M., Kotze M.H. Solvent extraction and ion exchange applications in Africa's resurging uranium industry: a review // *Solvent Extraction and Ion Exchange*. 2011. Vol. 29. Iss. 5-6. P. 868–899. <https://doi.org/10.1080/07366299.2011.581101>.
21. Cohen E.R., Cvitaš T., Frey J.G., Holmström B., Kuchitsu K., Marquardt R., et al. Quantities, units and symbols in physical chemistry. 3rd ed. Cambridge: RSC Publishing, 2007. 234 p.
22. Grenthe I., Fuger J., Konings R.J.M., Lemire R.J., Muller A.B., Nguyen-Trung C., et al. Chemical thermodynamics of uranium / eds. H. Wanner, I. Forest. Paris: OECD, 2004. 735 p.
23. Lemire R.J., Berner U., Musikas C., Palmer D.A., Taylor P., Tochiyama O. Chemical thermodynamics of iron. Issy-les-Moulineaux: OECD Nuclear Energy Agency, 2013. Vol. 13a. Part 1. 1126 p.

References

1. Lodeishchikov V.V. Complex use of gold-uranium ores. *Zolotodobycha*. 2010;135:6-10. (In Russ.).
2. Lodeishchikov V.V. *Technology of gold and silver recovery from refractory ores*. Irkutsk: AO "Irgiredmet"; 1999, vol. 1, 342 p. (In Russ.).
3. Molokov P.B., Buynovskiy A.S., Makaseev Yu.N., Arutyunyan D.R. Developing technology for the joint recovery of uranium, gold and rare earth metals from complex ores. In: *Nuclear energy: technology, safety, ecology, economics, management: collection of scientific works of the 1st All-Russian scientific and practical conference of young nuclear workers of Siberia*. 19–25 September 2010, Tomsk. Tomsk: Tomsk Polytechnic University; 2010; p. 47-48. (In Russ.).
4. Shipnigov A.A., Sobennikov R.M., Epiforov A.V., Musin E.D. Heap leaching of oxidized gold-uranium ores. In: *Scientific Foundations and Practice of Processing Ores and Technogenic Raw Materials: Proceedings of the 27th International Scientific and Technical Conference Held within the Framework of the 20th Ural Mining Decade*. 7–8 April, 2022, Yekaterinburg, Yekaterinburg: IP Russkih A.V.; 2022, p. 190-194. (In Russ.). EDN: FGAJHQ.
5. Shipnigov A.A., Sobennikov R.M., Epiforov A.V., Musin E.D., Grigoriev S.G. Heap leaching of gold and uranium from oxidized gold-uranium ore. *Ratsionalnoe osvoenie nedr*. 2022;2:66-71. (In Russ.). <https://doi.org/10.26121/RON.2022.73.14.009>. EDN: BDRHMA.
6. Aylmore M.G. Alternative lixiviants to cyanide for leaching gold ores. In: *Gold Ore Processing. Project Development and Operations*. 2016;27:447-484. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63658-4.00027-X>.
7. Epiforov A.V., Balikov S.V., Shipnigov A.A., Lukyanov A.A. Non-cyanide reagents for gold extraction from the products of pressure oxidation of sulphide concentrates. *Tsvetnye Metally*. 2021;7:37-44. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2021.07.04>. EDN: OHYZBZ.
8. Venter R., Boylett M. The evaluation of various oxidants used in acid leaching of uranium. In: *Hydrometallurgy Conference 2009*. 24–26 February 2009, Gauteng. Gauteng: The Southern African Institute of Mining and Metallurgy; 2009. P. 445–455.
9. Ahmed S.H., Sheta M.E., Saleh G.M., Mahfouz M.G., Mohammed S.A., Abdel Aal M.M. Sulphuric acid leaching of uranium ore using MnO₂ as an oxidizing agent. *Chemical Technology an Indian Journal*. 2015;10(2):60-68.
10. Fleming C.A. A process for the simultaneous recovery of gold and uranium from South African ores. In: *Gold 100*. Vol. 2. *Extractive Metallurgy of Gold*. Johannesburg: The South African Institute of Mining and Metallurgy; 1986, pp. 301-319.
11. Barbosa O.F., Monhemius A.J. Thermochemistry of thiocyanate systems for leaching gold and silver ores. In: Jha M.C., Hill S.D. (eds.). *Precious Metals '89*. 1988, p. 307-339.
12. Zhuchkov I.A., Mineev G.G., Aksekov A.V. *Sulfur-containing solvents for noble metals in geochemical and metallurgical processes: monograph*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2010, 388 p. (In Russ.). EDN: TOGLHH.

13. Li Jinshan, Safarzadeh M.S., Moats M.S., Miller J.D., LeVier K.M., Dietrich M., et al. Thiocyanate hydrometallurgy for the recovery of gold. Part I: Chemical and thermodynamic considerations. *Hydrometallurgy*. 2012;113-114:1-9. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.11.005>.
14. Broadhurst J.L., du Preez J.G.H. A thermodynamic study of the dissolution of gold in an acidic aqueous thiocyanate medium using iron (III) sulphate as an oxidant. *Hydrometallurgy*. 1993;32:317-344.
15. Shiryayeva V.V. Development of a process technology for gold recovery from complex gold-uranium ores using heap thiocyanate leaching. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2012;12:403-412. (In Russ.).
16. Shipnigov A.A., Epiforov A.V., Sobennikov R.M., Musin E.D., Balikov S.V. Heap sulphuric-thiocyanate leaching of gold and uranium. *iPolytech Journal*. 2023;27(4):821-828. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-821-828>. EDN: KDVAMS.
17. Kononova O.N., Holmogorov A.G., Kononov Yu.S. *Sorption extraction of gold from solutions and pulps*. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2011; 197 p. (In Russ.). EDN: PZWTKX.
18. Azizitorghabeh A., Wang J., Ramsay J.A., Ghahreman A. A review of thiocyanate gold leaching – chemistry, thermodynamics, kinetics and processing. *Minerals Engineering*. 2021;160:106689. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106689>.
19. Litvinenko V.G., Sheludchenko V.G., Filonenko V.S. Improvement of agitation leaching of uranium ore. *Gornyi zhurnal*. 2018;7:69-72. (In Russ.). EDN: XVMDRB.
20. Sole K.C., Cole P.M., Feather A.M., Kotze M.H. Solvent extraction and ion exchange applications in Africa's resurging uranium industry: a review. *Solvent Extraction and Ion Exchange*. 2011;29(5-6):868-899. <https://doi.org/10.1080/07366299.2011.581101>.
21. Cohen E.R., Cvitaš T., Frey J.G., Holmström B., Kuchitsu K., Marquardt R., et al. *Quantities, units and symbols in physical chemistry*. 3rd ed. Cambridge: RSC Publishing; 2007, 234 p.
22. Grenthe I., Fuger J., Konings R.J.M., Lemire R.J., Muller A.B., Nguyen-Trung C., et al. Chemical thermodynamics of uranium. In: Wanner H., Forest I. (eds.). Paris: OECD; 2004, 735 p.
23. Lemire R.J., Berner U., Musikas C., Palmer D.A., Taylor P., Tochiyama O. *Chemical thermodynamics of iron*. Issy-les-Moulineaux: OECD Nuclear Energy Agency; 2013, vol. 13a, part 1, 1126 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Шипнигов Антон Андреевич,

научный сотрудник лаборатории металлургии,
Иркутский научно-исследовательский институт
благородных и редких металлов и алмазов,
664025, Российская Федерация,
г. Иркутск, б-р Гагарина, 38;
аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, Российская Федерация,
г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83
✉ shipn.anton@yandex.ru

Anton A. Shipnigov,

Researcher of the Metallurgy Laboratory,
Irkutsk Research Institute of Precious and Rare
Metals and Diamonds,
38, Gagarin Boulevard, Irkutsk 664025,
Russian Federation;
Postgraduate Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074,
Russian Federation
✉ shipn.anton@yandex.ru

Епифоров Александр Владимирович,

кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник лаборатории
металлургии,
Иркутский научно-исследовательский институт
благородных и редких металлов и алмазов,
664025, Российская Федерация,
г. Иркутск, б-р Гагарина, 38
epiforov@irgiredmet.ru

Alexander V. Epiforov,

Cand. Sci. (Eng.),
Leading Researcher of the Metallurgy Laboratory,
Irkutsk Research Institute of Precious and Rare
Metals and Diamonds,
38, Gagarin Boulevard, Irkutsk 664025,
Russian Federation
epiforov@irgiredmet.ru

Минеева Татьяна Султановна,

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры металлургии цветных металлов,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, Российская Федерация,
г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83
ksu@inbox.ru

Tatiana S. Mineeva,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Non-Ferrous Metals Metallurgy,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074,
Russian Federation
ksu@inbox.ru

Заявленный вклад авторов

Шипнигов А.А. собрал аналитические данные, обобщил полученные результаты. Епифоров А.В. осуществлял научное руководство и провел общее редактирование текста рукописи. Минеева Т.С. осуществляла консультирование и подбор литературы.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 02.02.2026 г.; одобрена после рецензирования 09.04.2026 г.; принята к публикации 27.04.2026 г.

Authors' contribution

Anton A. Shipnigov collected analytical data and summarized the obtained results. Alexander V. Epiforov provided scientific supervision and performed the general editing of the manuscript. Tatiana S. Mineeva provided consultations and selected literature.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 02.02.2026; approved after reviewing 09.04.2026; accepted for publication 27.04.2026.

ПЕРСОНАЛИЯ

На взлёте мудрости

К 80-летию профессора Б.И. Зельберга

После окончания в 1969 г. металлургического факультета Иркутского политехнического института Борис Ильич Зельберг прошел большой творческий путь от младшего научного сотрудника Иркутского филиала ВАМИ (Всероссийского алюминиево-магниевого института) до заместителя генерального директора по научной работе АО «Сибирский научно-исследовательский, конструкторский и проектный институт алюминиевой и электродной промышленности» (1998–2010 гг.), с 2010 г. является основателем ООО «Спецстройинвест».

В 1977 г. в Уральском политехническом институте Б.И. Зельберг защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук по теме «Исследование, разработка и применение брикетированных материалов для выплавки технического кремния», в 1990 г. – защита в Иркутском государственном техническом университете докторской диссертации на тему «Теория и практика создания и применения новых листовых материалов для производства кремния».

В 1981 г. Борису Ильичу Зельбергу присвоено звание доцента, в 1993 г. – звание профессора; в 1996 г. Б.И. Зельберг избран действительным членом Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности.

За работу «Рациональное использование сырьевых ресурсов» Б.И. Зельберг награжден свидетельством участника ВДНХ (1973 г.), за работу «Брикетирование кварцсодержащих шихт для выплавки кремния высокой частоты» награжден серебряной медалью ВДНХ (1977 г.), за работу «Брикетирование гидролизного лигнина в условиях торфобрикетных заводов» награжден бронзовой медалью ВДНХ (1978 г.), за создание технологии брикетирования целлюлозного лигнина в условиях Шушерлинского химического завода награжден свидетельством участника ВДНХ (1979 г.), за работу «Использование брикетированного целлюлозного лигнина с целью частичной замены древесного угля в условиях электротермического цеха Запорожского алюминиевого завода» награжден золотой медалью ВДНХ (1980 г.).

За вклад в развитие научно-технического прогресса Б.И. Зельберг награжден почетным дипломом ВДНХ СССР (1981 г.).

За разработку теоретических аспектов и технологии выплавки кремния Б.И. Зельбергу присуждена Премия Правительства Российской Федерации в области науки и техники (1995 г.).

За работу «Разработка и внедрение технологии получения алюминиевых сплавов и лигатур» Б.И. Зельбергу в составе авторского коллектива присуждена Премия Губернатора Иркутской области по науке и технике (2002 г.).

Б.И. Зельберг внес большой вклад в научно-исследовательские, конструкторские и проектные работы, в результате которых была создана технология производства алюминия в электролизерах с обожженными анодами силой тока 300 кА. Технология была апробирована в условиях опытного участка на Уральском алюминиевом заводе; в дальнейшем технология получения алюминия с использованием обожженных анодов силой тока 300 кА была успешно внедрена на новой V серии Иркутского алюминиевого завода производительностью 170000 т алюминия в год.



Борис Ильич Зельберг принимал непосредственное участие в разработке и внедрении новых технологий по следующим направлениям:

- технология совместного брикетирования гидролизного лигнина и окислов редкоземельных металлов для дальнейшего использования брикетов в ферросплавном цехе Новолипецкого металлургического комбината с целью раскисления стали и получения труб северного исполнения;
- технология карботермического восстановления красных шламов с целью извлечения оксида скандия;
- технология получения кремния высокой частоты в рудовосстановительных печах постоянного тока из чистых рудных материалов и углеродистых восстановителей, с дальнейшим рафинированием и получением кремния для солнечной энергетики;
- угольно-сорбционная технология извлечения золота из растворов, создание новой обогатительной установки и внедрение аппаратов «Кнелсона» для извлечения «тонкого золота» в условиях ПО «Алданзолото»;
- создание компаундированных связующих на основе каменноугольного пека и продуктов нефтепереработки (нефтяной пек, битум) с целью снижения содержания бенз(а)пирена в анодной массе для производства алюминия;
- технология выплавки кремния с использованием в качестве восстановителя нефтяного кокса повышенной активности в условиях ЗАО «Кремний».

Б.И. Зельберг является инициатором и организатором шести Всероссийских научно-технических конференций молодых ученых и специалистов алюминиевой и электродной промышленности, а также организатором в разные годы восьми научно-технических конференций,



Лауреаты премии губернатора Иркутской области в области науки и техники (2002 г.): генеральный директор ОАО «СибВВАМИ» В.В. Веселков; профессор, доктор технических наук Б.И. Зельберг; профессор, доктор технических наук А.Е. Черных; профессор, кандидат технических наук В.И. Чалых

направленных на создание, совершенствование и внедрение ресурсо-энергосберегающей, экологически чистой технологии получения кремния.

Доктор технических наук, профессор Б.И. Зельберг является автором 460 научных трудов, в том числе 38 монографий, учебников и справочников, участником 76 Всероссийских, Всесоюзных и Международных конгрессов, в том числе в США, Канаде, Австралии, Франции и др., имеет 128 авторских свидетельств и патентов, из которых 32 внедрены в производство с большими экономическим и экологическим эффектами.

Под руководством Зельберга Бориса Ильича защищены 2 докторские и 16 кандидатских диссертаций.

Профессор Б.И. Зельберг является автором новой внедренной в учебный процесс ИрГТУ системы подготовки элитных инженерных кадров высшей квалификации для Иркутского и Братского алюминиевых заводов, получившей название «ВТУЗ-завод», по которой подготовлены сотни инженерно-технических работников.

Б.И. Зельберг – инициатор создания и соавтор цикла «Библиотечка рабочего», состоящего из 12 наименований книг, освещающих вопросы производства алюминия и кремния, производства анодной массы, капитального ремонта алюминиевых электролизеров различной мощности и рудовосстановительных печей, охраны труда, промышленной безопасности и экологии. Цикл направлен на улучшение профессиональной подготовки рабочих и инженерно-технических работников с целью повышения эффективности и безопасности ведения технологических процессов.

Борис Ильич Зельберг был членом ученого совета факультета машиностроения и автотранспорта Иркутского института народного хозяйства, членом ученого совета металлургического факультета Иркутского политехнического института, заместителем председателя областного совета по научно-исследовательской работе студентов, заместителем председателя научно-технического совета ОАО «СибВAMI», ответственным редактором сборника научных трудов «Электрометаллургия легких металлов», членом секции «Металлургия легких металлов», издательство «Металл», председателем секции «Производство кремния» Международного конгресса «Цветные металлы и минералы», председателем комиссии государственной экологической экспертизы по строительству Тайшетской анодной фабрики, заместителем председателя комиссии по оценке воздействия на окружающую среду на Красноярском, Братском и Иркутском алюминиевых заводах, заместителем председателя и председателем Восточно-Сибирского научного центра МАНЭБ, а также председателем федерации легкой атлетики Иркутской области (1995–2000 гг.).

В качестве генерального директора ООО «Спецстройинвест» Б.И. Зельберг непосредственно участвовал в строительстве крупнейших объектов агропромышленного комплекса, в том числе капитального ремонта рудовосстановительной печи IV ЗАО «Кремний» с изменением ее конструкции, что позволило повысить технико-экономические показатели получения кремния, строительно-монтажных и ремонтных работ на Иркутском алюминиевой заводе, АО «Ангарский нефтехимический комбинат», и проведение научно-исследовательских и опытно-промышленных работ по обезвреживанию и рекультивации шлам-лигнина ОАО «Байкальский целлюлозно-бумажный комбинат».

С 2014 г. заслуженный деятель науки, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники, доктор технических наук, профессор, академик МАНЭБ Б.И. Зельберг является научным руководителем проекта «Технология обезвреживания и рекультивации шлам-лигнина ОАО «Байкальский целлюлозно-бумажный комбинат».

Б.И. Зельберг – отличный семьянин, любящий отец двух дочерей и дед пяти внуков.

Почетные звания и награды Б.И. Зельберга

Почетный диплом (1981), золотая (1980), серебряная (1977) и бронзовая (1978) медали ВДНХ СССР. Дипломы «Участник ВДНХ СССР» (1973, 1979). Лауреат премии им. Н.Г. Янгеля в области науки и техники (1979). Лауреат премии правительства РФ в области науки и техники (1995). Лауреат премии банка «Кейптротер» за лучшую научно-исследовательскую работу среди вузов Иркутской области (1996, 1997). Золотая медаль им. М.В. Ломоносова (1997). Орден «Дружбы» МНР (1998). Лауреат премии губернатора Иркутской области в области науки и техники (2002). Орден звезды Вернадского I степени (2005), орден «Звезда Ученого» (2006). Заслуженный деятель науки Российской Федерации (2006). Медаль «Петр Великий» (2010). Орден «За гуманизм» III степени (2014). Орден «За заслуги перед МАНЭБ» (2016).

С Юбилеем!

Говорят, что настоящая наука куется не в тишине академических кабинетов, а на стыке смелых инженерных идей, живого производства и масштабных экологических вызовов. Если это так, то профессор Борис Ильич Зельберг – один из главных архитекторов этой прикладной научной синергии в истории Иркутского политеха.

Юбилей профессора Б.И. Зельберга – это не просто круглая дата, это чествование человека, чье имя прочно ассоциируется с прорывными технологиями рационального природопользования и экологической безопасности. Его заслуги, отмеченные еще в советские годы наградами ВДНХ за уникальные разработки в металлургии и химической промышленности, заложили прочный фундамент для многих современных технологических процессов.

Велика заслуга Б.И. Зельберга в организации и деятельности возглавляемого им Восточно-Сибирского центра МАНЭБ – Международной Академии наук экологии и безопасности человека, где открывается широкий простор научно-техническому творчеству и свободным дискуссиям.

Для Иркутского политеха Борис Ильич всегда был и остается знаковой фигурой – ученым, который умеет переводить сложнейший язык формул на язык реальной практики и пользы для региона.

Однако масштаб личности Бориса Ильича никогда не ограничивался рамками одной лишь преподавательской кафедры. Люди, которым посчастливилось идти с ним рука об руку за пределами университетских стен – на производственных площадках, в экспедициях, в решении сложнейших хозяйственных и экологических задач или просто по извилистым дорогам долгой и крепкой дружбы, – знают его ещё и с другой стороны. Они знают Б.И. Зельберга как надежного соратника, человека стальной воли, острого ума и безупречной личной чести. Про таких людей говорят: с ним можно уверенно идти в любую разведку и затевать самое рискованное дело.

Удивительно, но в свои 80 лет Борис Ильич сохраняет ту редкую, завидную внутреннюю энергию, которой всегда славились сибирские инженеры. Это состояние вечной устремленности вперед, когда каждый новый день – это поиск, а каждая жизненная веха – лишь очередная точка на взлете к новым высотам.

Дорогой Борис Ильич! Родной Иркутский политех, коллеги, единомышленники, Ваши ученики и Ваши давние, верные друзья, знающие Вас с самых разных (и порой далеких от академических) сторон, единодушны в своем желании: пусть Ваше сибирское здоровье будет крепким, как байкальский лед, а оптимизм и созидательная энергия не иссякают. Спасибо Вам за колоссальный вклад в науку, за преданность делу и за то, что в любой роли Вы всегда остаетесь Человеком с большой буквы!

С юбилеем!

Ректор ИРНИТУ,
д.т.н. М.В. Корняков

Уважаемые коллеги!

Мы приглашаем Вас к участию в нашем журнале в качестве авторов, рекламодателей и читателей и сообщаем требования к статьям, принимаемым к публикации

I. Рукопись статьи направляется в редакцию через online-форму (после предварительной регистрации авторов). Рекомендуемый объем статьи не менее 20 000 знаков.

К статье прилагаются:

1. Экспертное заключение от аффилированной организации о возможности публикации в открытой печати.
2. Лицензионный договор.

3. Название рубрики, в которой должна быть размещена Ваша статья; УДК; название статьи; реферат (аннотация), количество слов в реферате – не менее 200; ключевые слова (5–7); сведения об авторах: название учреждения, его адрес; фамилия, имя, отчество (полностью); ученая степень; звание и должность; контактный телефон, e-mail и ORCID (вся информация предоставляется одним файлом).

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 *.DOCX** – документа, построенного средствами Microsoft Word 97 или последующих версий.

При наборе статьи в Microsoft Word рекомендуются следующие установки:

1) параметры страницы и абзаца: отступы сверху и снизу – 2 см; слева и справа – 2 см; табуляция – 2 см; ориентация – книжная;

2) шрифт – **Times New Roman**, размер – **12**, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;

3) при вставке формул использовать **Microsoft Equation 3** при установках: элементы формулы выполняются курсивом; для греческих букв и символов назначать шрифт **Symbol**, для остальных элементов – **Times New Roman**. Размер символов: обычный – 12 пт, крупный индекс – 7 пт, мелкий индекс – 5 пт, крупный символ – 18 пт, мелкий символ – 12 пт. Все экспликации элементов формул необходимо также выполнять в виде формул;

4) рисунки, вставленные в текст, должны быть выполнены с разрешением 300 dpi, B&W – для черно-белых иллюстраций, Grayscale – для полутонов, максимальный размер рисунка с надписью: ширина 150 мм, высота 245 мм и представлены в виде файла с расширением *.BMP, *.TIFF, *.JPG, должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. **Схемы, графики** выполняются во встроенной программе **MS Word** или в **MS Excel**, с приложением файлов (представляемые иллюстрации должны быть четкими и ясными во всех элементах);

5) библиографические ссылки должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ Р 7.05 2008.

Внимание! Публикация статьи является бесплатной.

Журнал включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, утвержденный ВАК Министерства науки и высшего образования РФ (**Категория К-1**), в Единый государственный перечень научных изданий «Белый список» (**Уровень 2**), международную базу данных Chemical Abstracts Service (CAS), в DOAJ, международный каталог периодических изданий «Ulrichs Periodicals Directory», EBSCO, Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU), представлен в Научной электронной библиотеке «Киберленинка» (CYBERLENINKA), рассылается в Российскую книжную палату, ВИНТИ РАН.

Статьи, опубликованные в журнале «iPolytech Journal», реферируются и рецензируются.

Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям.

По вопросам публикации статей обращаться: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Д-215.

Телефон: **(3952) 40-57-56** – Привалова Галина Петровна, ответственный секретарь.

Факс: **(3952) 405-100**, e-mail: pgp@istu.edu.

Редактор Я.В. Макшанцева
Дизайнер В.Г. Лисицин
Ответственный секретарь
Г.П. Привалова
Перевод на английский язык
Tomas A. Beavitt,
Н.Г. Поповой, В.В. Батицкой
Верстка Ю.В. Макаровой

Выход в свет 30.09.2025 г.
Формат 60х90/8.
Бумага офсетная. Печать трафаретная.
Усл. печ. л. 24.
Тираж 500 экз. Номер по реестру 79/Зн.

Издание распространяется бесплатно



iPolytech Journal

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