

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

iPolytech Journal

Tom **29**, № **2**. 2025 / Vol. **29**, No **2**. 2025



<https://ipolytech.elpub.ru>

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

iPolytech Journal

Том 29, № 2. 2025 / Vol. 29, No. 2. 2025



<https://ipolytech.elpub.ru>



НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

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

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

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

(Ранее действовавшие Свидетельства:

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

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

ПИ № ФС77-47902 от 22 декабря 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:

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)

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

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

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

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

КОРЮКОВ 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)

МЫМИРИН 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 Тунцзи (Шанхай, Китай)

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

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

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

СУНЬ Хуапин, 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.Л., 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, директор Института металловедения Кассельского университета (Кассель, Германия)

Editorial Board

CHIEF EDITOR:

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

DEPUTIES OF CHIEF EDITOR:

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

Nina V. NEMCHINOVA, Dr. Sci. (Eng.), Full Professor, Head of the Department of 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. KORNIakov, 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. BOROVIKOV, Dr. Sci. (Eng.), Rector, Novgorod State University n.a. Yaroslav-the-Wise (Veliky Novgorod, Russia)

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

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

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

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

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)

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

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

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

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

Mohammad Mehdi RASHIDI, Professor Tongji University, (China)

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

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

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

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

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

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

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



Содержание

Машиностроение

Безъязычный В.Ф., Шеховцева Е.В., Шеховцева Т.В. Технологическое наследование механических свойств материала при его направленном формировании	160
Нгуен Хыу Хай, Зайдес С.А. Влияние параметров реверсивного выглаживания на показатель жёсткости схемы напряжённого состояния	170
Овсянников В.Е., Некрасов Р.Ю., Чуйков С.С., Кузнецова Е.М. Повышение точности обработки деталей типа «полый цилиндр» на основе превентивной компенсации погрешностей износа инструмента	184
Репецкий О.В. Разработка математических моделей, численных методов и программного обеспечения для анализа долговечности радиальных роторов турбомашин с расстройкой параметров.....	194
Рыжиков И.Н., Балановский А.Е. Оценка технического состояния металлических конструкций на основе компьютерного моделирования	204
Склярёнок Е.Ф., Шевцов Ю.Д. Разработка устройства составного тормозного диска дисково-колодочного тормоза транспортных средств с повышенными эксплуатационными характеристиками.....	216

Энергетика

Крупенёв Д.С., Щукина В.М. Обзор методов исследования энергетической безопасности. Моделирование (на англ. яз.)	234
Табаров Б.Д. Принципы построения трансформаторной подстанции на основе управляемого реакторно-тиристорного устройства.....	252

Металлургия

Бажин В.Ю., Матильский Б.Э. Современные способы обессеривания высокосернистых нефтяных коксов для применения в углеграфитовых материалах	270
Васюнина Н.В., Дружинин К.Е., Бурдакова Е.А., Дубова И.В., Бакшеев С.П., Иванова И.К., Богданов Е.В., Бакшеева И.И. Модернизация технологической схемы переработки руд Удоканского месторождения	284

Content

Mechanical engineering

- Bezyazychnyi V.F., Shekhovtseva E.V., Shekhovtseva T.V.** Inheritance of mechanical properties of a material during directed formation 160
- Nguyen Huu Hai, Zaides S.A.** Influence of reversible smoothing parameters on the stiffness indicator of the stress state scheme 170
- Ovsyannikov V.E., Nekrasov R.Yu., Chuikov S.S., Kuznetsova E.M.** Improved machining accuracy of hollow cylinder components based on preventive compensation for tool wear errors..... 184
- Repetskii O.V.** Development of mathematical models, numerical methods, and software tools for analyzing the durability of radial turbomachinery with parameter mismatching..... 194
- Ryzhikov I.N., Balanovsky A.E.** Technical condition assessment of metallic structures based on computer modelling..... 204
- Sklyarenko E.F., Shevtsov Yu.D.** Development of a modular brake disc assembly for spot-type disc brake systems with enhanced performance characteristics 216

Power engineering

- Krupenev D.S., Shchukina V.M.** Review of methods for researching energy security. Modeling..... 234
- Tabarov B.D.** Design principles of a transformer substation using a thyristor-controlled reactor..... 252

Metallurgy

- Bazhin V.Yu., Matylsky B.E.** Modern methods for the desulphurisation of high sulphur content petroleum coke for use in carbon graphite materials..... 270
- Vasyunina N.V., Druzhinin K.E., Burdakova E.A., Dubova I.V., Baksheev S.P., Ivanova I.K., Bogdanov E.V., Baksheeva I.I.** Modernized technological scheme for ore processing of the Udokan deposit 284



Уважаемые читатели!

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

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

«iPolytech Journal» реферируется и рецензируется

Приглашаем вас к активному творческому сотрудничеству по научным направлениям:

- **Машиностроение**

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

- **Энергетика**

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

- **Металлургия**

- 2.6.2. Металлургия черных, цветных и редких металлов

Редколлегия

Dear Readers!

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

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

“iPolytech Journal” is included in the “Ulrichs Periodicals Directory”, iPolytech Journal EBSCO database, Scientific electronic library (eLIBRARY.RU). It is presented in the e-library «Cyberleninka», University OXFORD, Scientific Indexing Services (SIS), Directory of Open Access Journals (DOAJ). It is sent to the Russian Book Chamber and All-Russian Institute for Scientific and Technical Information (VINITI) RAS. Each article is assigned a digital indicator **DOI**.

The journal “iPolytech Journal” is abstracted and reviewed

You are welcome for active and creative collaboration
in the following fields:

- **Mechanical Engineering**

- 2.5.2. Mechanical engineering (engineering sciences)
- 2.5.5. Technology and equipment for mechanical and physical and technical machining (engineering sciences)
- 2.5.6. Engineering technology (technical sciences)

- **Power Engineering**

- 2.4.2. Electrotechnical equipment and systems (engineering sciences)
- 2.4.3. Electric power industry (engineering sciences)
- 2.4.5. Energy systems and complexes (engineering sciences)

- **Metallurgy**

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

Editorial Board



Технологическое наследование механических свойств материала при его направленном формировании

В.Ф. Безъязычный¹, Е.В. Шеховцева^{2✉}, Т.В. Шеховцева³

^{1,3}Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева, Рыбинск, Россия

²ПАО «ОДК-Сатурн», Рыбинск, Россия

Резюме. Цель – разработать комплексную модель, учитывающую взаимосвязь между конструкцией зубчатого колеса, свойствами материала и технологическими параметрами обработки. Данная модель должна предсказывать эксплуатационные характеристики колеса, учитывая воздействие как внутренних, так и внешних факторов. Для определения механических характеристик металла были проведены механические испытания с помощью электромеханического разрывного оборудования фирмы Tinius Olsen марки H100KU. Контроль механических показателей материала (предел прочности, предел текучести и др.) с нагрузкой более 100 Н/мм² выполнялись на свидетелях по ГОСТ 1497-84. Контроль механических характеристик металла производился после каждой операции. Были исследованы изменения механических характеристик сталей 16ХЗНВФМБ-Ш, 20ХЗМВФ-Ш, 18Х2Н4МА и 12Х2Н4А-Ш для различных заготовок и видов обработки (формование металла давлением, механическая и абразивная обработки, химико-термическая и термическая обработки). Анализ механических характеристик металла показал существенные различия в твердости, прочности и пластичности образцов, полученных разными способами. Показано, что эти различия обусловлены микроструктурой материала (размер зерна, наличие включений, степень деформации), формирующейся в процессе обработки. Анализ был выполнен по следующим параметрам: коэффициенту технологической наследственности и структурной наследственности. Установлено, что наследование механических свойств материала (способом получения заготовки) обработкой давлением с последующей термической обработкой относительно сортового проката с аналогичной термообработкой характеризуется положительной тенденцией и составляет по пределу прочности прирост до 6,2%, по пределу текучести – до 5,3%. Показано, что прирост количественного показателя по коэффициенту структурной наследственности после химико-термической обработки относительно операции шлифования по упрочненному слою составляет по пределу прочности не менее 49%, по пределу текучести – не менее 68%. Разработанная многомерная модель взаимодействия зубчатых колес учитывает множество факторов, влияющих на их работу: свойства материала, температурные поля в зоне контакта зубьев, динамические нагрузки, воздействие смазочного материала.

Ключевые слова: зубчатое колесо, механические свойства материала и их направленное формирование, технологическое наследование

Благодарности. Авторы благодарят заместителя начальника цеха М.С. Мариеву, кандидата технических наук И.В. Полякова и коллектив специалистов ПАО «ОДК-Сатурн» за многолетнее и плодотворное сотрудничество.

Для цитирования: Безъязычный В.Ф., Шеховцева Е.В., Шеховцева Т.В. Технологическое наследование механических свойств материала при его направленном формировании // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 2. С. 160–169. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-2-160-169>. EDN: OSCDVC.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Inheritance of mechanical properties of a material during directed formation

Vyacheslav F. Bezzyazhnyi¹, Evgenia V. Shekhovtseva^{2✉}, Tatiana V. Shekhovtseva³

^{1,3}P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University, Rybinsk, Russia

²Public joint stock company “UEC - Saturn”, Rybinsk, Russia

Abstract. Objective – development of a comprehensive model that takes into account the interrelationship between the structure of a gear wheel, material properties and technological processing parameters. This model should predict the operational characteristics of the wheel, considering the impact of both internal and external

factors. Mechanical testing was conducted using electromechanical tensile testing equipment from Tinius Olsen, model H100KU, to determine the mechanical properties of the metal. Samples in compliance with GOST 1497-84 were used for monitoring material properties (tensile strength, yield strength, etc.) at loads above 100 N/mm². The mechanical properties of the metal were monitored after each processing operation. The mechanical properties of the steels 16Kh3NVFMB-Sh, 20Kh3MVF-Sh, 18Kh2N4MA and 12Kh2N4A-Sh were investigated for different blanks and types of treatment (pressure forming, mechanical and abrasive, thermochemical and heat treatment). Analysis of the mechanical properties of the metal revealed significant differences in hardness, strength and ductility between samples obtained by different methods. It was shown that these differences are due to the microstructure of the material (grain size, presence of inclusions, degree of deformation) formed during processing. The analysis was based on parameters including the coefficient of technological inheritance and structural inheritance. It was found that the inheritance of the mechanical properties of the material through pressure working followed by heat treatment shows a positive trend relative to rolled material with similar heat treatment. This method results in an increase in tensile strength of up to 6.2% and in yield strength of up to 5.3%. Furthermore, it was shown that the increase in the quantitative indicator of structural inheritance after thermochemical treatment, relative to grinding of the hardened layer, is at least 49% for tensile strength and at least 68% for yield strength. The developed multidimensional model of gear interaction takes into account a wide range of factors that influence its operation, including material properties, temperature fields in the contact zone of the tooth, dynamic loads and the effect of lubricant.

Keywords: gear, material mechanical properties and their directional formation, technical inheritance

Acknowledgements. The authors thank the Workshop Deputy Head M.S. Marieva, Candidate of technical sciences I.V. Polyakov and the team of specialists of the Public joint stock company "UEC-Saturn" for long-term and fruitful cooperation.

For citation: Bezyazychnyi V.F., Shekhovtseva E.V., Shekhovtseva T.V. Inheritance of mechanical properties of a material during directed formation. *iPolytech Journal*. 2025;29(2):160-169. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-2-160-169>. EDN: OSCDVC.

ВВЕДЕНИЕ

Механика технологического наследования – это процесс преобразования свойств обрабатываемого объекта от предыдущих операций технологии к следующим. Механическая система технологического наследования учитывает особенности вида обработки, свойства материалов и воздействия различных факторов технологических процессов обработки [1]. Поверхностный слой материала детали, подверженный значительным механическим воздействиям, также является носителем «памяти» о предшествующих операциях [2–4]. Изменения в его структуре, например, образование упрочненного слоя в результате обработки, влияют на выносливость и долговечность изделия [5–7]. Жесткость системы (сопротивление деформациям) всех элементов технологической системы (оборудование, инструмент, заготовка, приспособления) прямо влияет на точность обработки [8–10]. Это наглядно демонстрирует механизм технологического наследования – погрешности «наследуются» из предыдущей стадии обработки [11–13]. Однако в современных условиях, когда требования к качеству изделий значительно выросли, нужно учитывать не только геометрическую точность, но и целый комплекс свойств качества изделия [14–16]. Современные исследования техно-

логического наследования включают изучение влияния различных факторов: способы обработки и их параметры, используемый инструмент, механические характеристики материала заготовки, а также ее структурное состояние. Более точное прогнозирование изменения свойств материала и конфигурации детали на каждом этапе обработки позволяет оптимизировать технологический процесс и минимизировать негативное влияние технологического наследования. Следовательно, технологическое наследование – это сложный многофакторный процесс, требующий комплексного подхода к его исследованию и управлению. Все это обосновывает актуальность изучения технологического наследования для обеспечения качества и надежности современных изделий [17–19].

Технологическое наследование проявляется как множество положительных и отрицательных факторов, передающихся от одной операции к другой. Это достигается за счет целенаправленного выбора операций в технологии изготовления, которая бы минимизировала влияние отрицательных и усиливала влияние положительных факторов наследования. Суть стратегии – создание технологических «барьеров», препятствующих передаче негативных свойств на последующие стадии обработки.

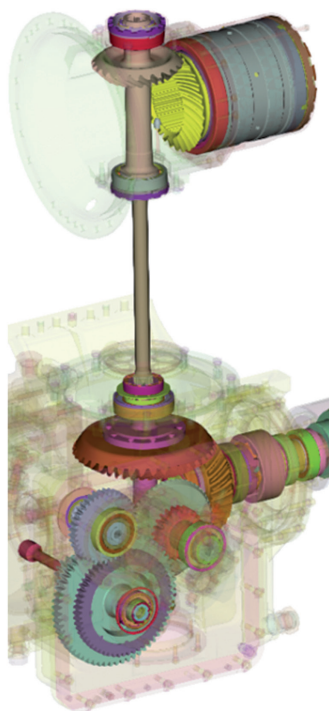


Рис. 1. Типовая кинематическая схема приводов
Fig. 1. Typical kinematic diagram of drives

Зубчатые передачи редукторов газотурбинных двигателей (ГТД) функционируют в условиях высоких нагрузок и температур. По конструктивному и технологическому фактору зубчатые колеса относятся к сложным деталям двигателя. Технология их изготовления, ее построение и ряд операций формируют несущую способность зубчатой передачи. В связи с этим изучение связей технологического наследования при производстве зубчатых колес, их влияния на качество готовых деталей является актуальной научной задачей в области машиностроительной технологии. Одним из важнейших направлений выступает исследование влияния различных способов обработки на механические свойства материала, используемых для изготовления зубчатых колес, которые обладают уникальными свойствами и могут быть оптимизированы в процессе обработки. Трансформация свойств не случайна и подчиняется принципу технологического наследования – концепции, утверждающей, что качество конечного продукта определяется не только финальными операциями, но и всеми предшествующими стадиями обработки. Таким образом, каждая операция оставляет свой «отпечаток» на материале, накапливая изменения в его структуре и свойствах. Изначаль-

ные характеристики полуфабриката, такие как макро- и микроструктура, химический состав (включая легирующие элементы и примеси) и вытекающие из них механические свойства (предел текучести, предел прочности, твердость, ударная вязкость, пластичность и т.д.), закладывают основу для дальнейших преобразований. Важно понимать, что даже незначительные вариации в исходном материале могут привести к существенным различиям в конечных свойствах детали. Для управления сложной цепочкой преобразований, оказывающих существенное воздействие на конечные механические свойства и прочностные характеристики детали, необходимо глубокое понимание принципов технологического наследования.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Проблема обеспечения контактной выносливости зубчатых передач (рис. 1) является одной из ключевых задач в машиностроении. Долговечность и надежность работы таких передач напрямую зависят от способности зубьев выдерживать значительные контактные напряжения, возникающие при передаче крутящего момента. Повреждение поверхности зубьев, ведущее к выкрашиванию, усталостному излому или задирам, приводит к преждевременному выходу передачи из строя и, как следствие, к дорогостоящим простоям и ремонтам. Поэтому разработка методов управления работоспособностью рабочих поверхностей зубчатых колес – задача первостепенной важности. Решение этой задачи требует обобщенного подхода, включающего применение технологического наследования при формировании технологических процессов изготовления. Механические свойства материала зубчатого колеса, такие как твердость, предел текучести и прочности, оказывают существенное влияние на его контактную выносливость. Например, использование высокопрочных сталей с легирующими добавками, повышающими износостойкость, позволяет значительно увеличить срок службы передачи. Однако даже самый высококачественный материал не гарантирует высокой надежности, если технологический процесс изготовления выполнен некорректно. Технологические факторы, такие как качество поверхности зубьев (шероховатость, наличие микротрещин), точ-

ность обработки и термическая обработка, также принципиально важны. Шероховатая поверхность способствует возникновению концентраторов напряжений, ускоряющих процесс разрушения. Неправильный выбор режимов термообработки может привести к изменению структуры материала и снижению его механических свойств. Поэтому контроль качества на всех этапах производства, от заготовки до окончательной сборки, является необходимым условием обеспечения высокой контактной выносливости.

Испытания на растяжения применялись для исследования механических свойств сталей 16ХЗНВФМБ-Ш, 20ХЗМВФ-Ш, 18Х2Н-4МА и 12Х2Н4А-Ш. Испытания проводились на электромеханическом разрывном оборудовании фирмы Tinius Olsen марки H100KU. Процесс испытания начинается с фиксации цилиндрического образца в специальных зажимах. Один зажим жестко соединен с основанием машины, а другой – с подвижной траверсой с датчиком. Движение траверсы вверх осуществляется с контролируемой скоростью не более 20 мм/мин. В ходе испытания программное обеспечение непрерывно регистрирует как величину приложенной силы, так и величину удлинения образца. Это позволяет построить диаграмму «напряжение – деформация», которая содержит ключевую информацию о механических свойствах материала. Анализируя эту диаграмму, определяют основные характеристики – предел прочности (σ_B), предел текучести ($\sigma_{0,2}$) и другие.

Контроль механических свойств материала (σ_B , $\sigma_{0,2}$, δ , ψ , E , $\sigma_{пл}$) с нагрузкой более 100

Н/мм² проводится на образцах-свидетелях (рис. 2) по ГОСТ 1497-2023⁴ (приложение Б, тип IV). Исследования механических свойств материала проводились после каждой операции технологического процесса согласно серийным технологиям изготовления зубчатых колес.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Применено моделирование для анализа механики технологической наследственности (рис. 3) [20].

Технология изготовления в совокупности с условиями эксплуатации представлена как модульная многофакторная система, где на входе – характеристики детали и условия ее работы (материал, нагрузка, тепло), а на выходе – характеристики готовой детали и эксплуатационные свойства (структура, механические свойства, прочностные показатели). Технологические операции моделируются как преобразование входных параметров с учетом технологических факторов (химико-термическая обработка, структурное строение). Рабочие условия моделируются как преобразование входных параметров с учетом эксплуатационных факторов (рабочая среда, механизм нагружения и т.д.).

Многомерная модель демонстрирует тесную связь между поверхностным слоем, сердцевиной материала, механическими свойствами и усталостной прочностью рабочих поверхностей. Здесь ключевую роль играют технологическое наследование ме-

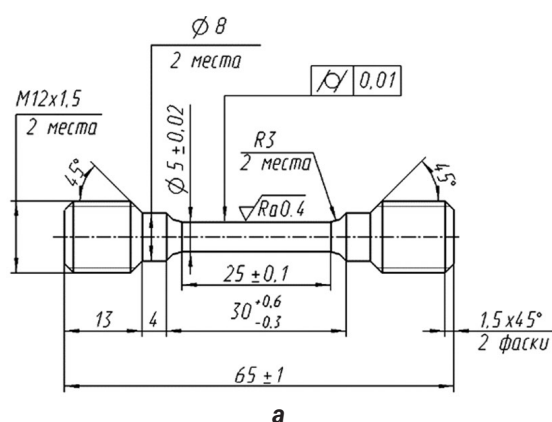


Рис. 2. Пропорциональный цилиндрический образец-свидетель: а – эскиз образца; б – образец-свидетель
 Fig. 2. Proportional cylindrical witness sample: a – sample diagram; b – part-sample

⁴ГОСТ 1497-2023. Металлы. Методы испытаний на растяжение. Введ. 01.07.2024. М.: Российский институт стандартизации, 2024.

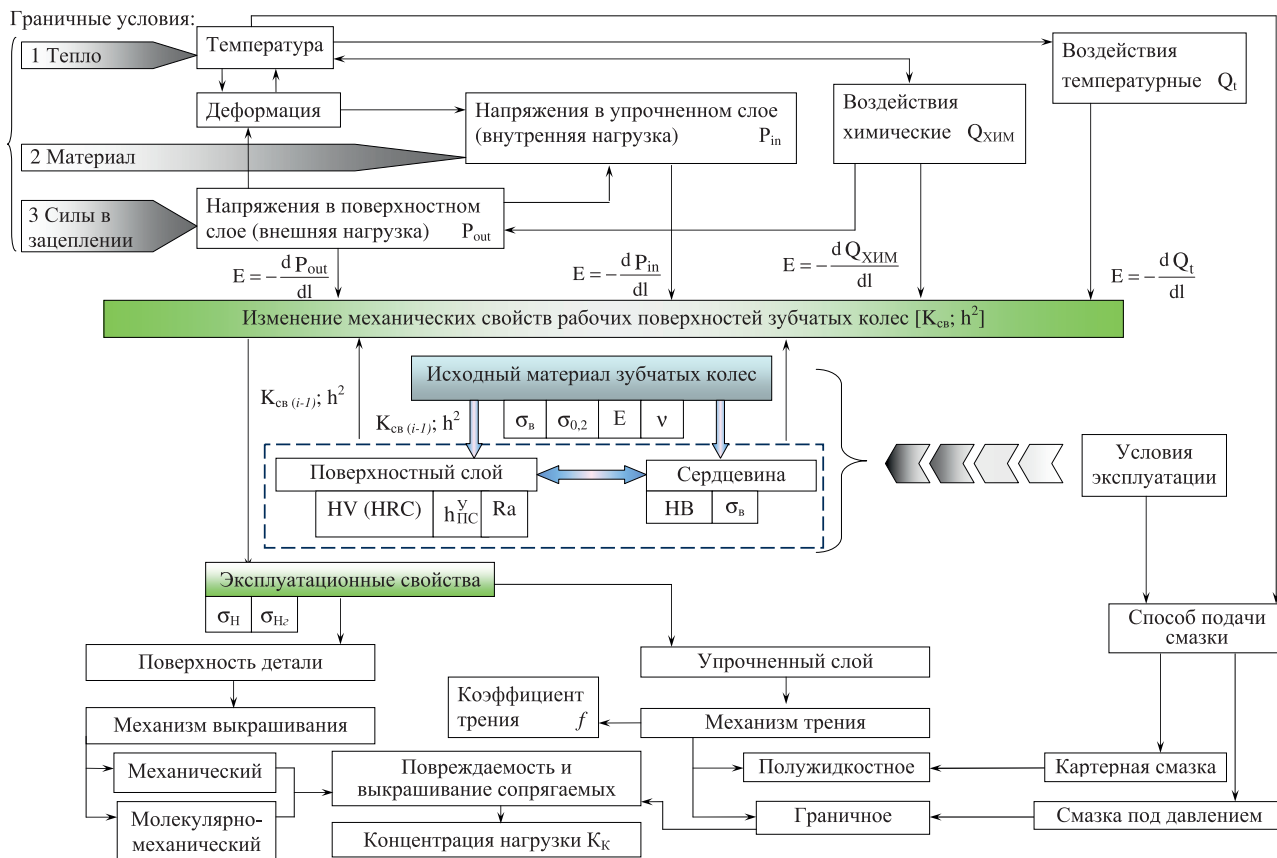


Рис. 3. Модель механики технологической наследственности

Fig. 3. Model of technical inheritance mechanics

ханических свойств материала и величина наследственного зерна от заготовки (штамповки) до готового зубчатого колеса. Задача состоит в получении оптимальной структуры, включающей пластичную сердцевину, обеспечивающую вязкость, и твердый поверхностный слой, гарантирующий высокую износостойкость и сопротивление контактным напряжениям. Технология изготовления зубчатых колес является сложным процессом, базирующимся на принципах технологического наследования. Многомерная модель формирует предпосылки для необходимости количественной оценки влияния каждой операции технологического процесса на формирование поверхностного слоя и сердцевины, а, следовательно, и на эксплуатационные параметры готовой детали.

При проектировании технологического процесса важнейшую роль играет механика технологического наследования, позволяющая спрогнозировать изменение структуры и свойств материала на каждом этапе обработки. Учет наследственных связей между структурой материала, размером зерна и

механическими свойствами на всех этапах производства реализуется через коэффициенты технологической наследственности (K_{cb}) [20] и структурной наследственности (h^2) [1], что соответствует принципам технологического наследования:

$$K_{cb} = \frac{C_i}{C_{i-1}}, \quad (1)$$

где K_{cb} – коэффициент технологической наследственности; C_i – значение на текущей операции; C_{i-1} – значение на предшествующей операции (исходное состояние – пруток):

$$h^2 = \frac{\sigma_{i-1}^2}{\sigma_{i-1}^2 + \sigma_i^2}, \quad (2)$$

где h^2 – коэффициент структурной наследственности; σ_{i-1}^2 – дисперсия на предшествующей операции; σ_i^2 – дисперсия на текущей операции.

Значение коэффициента K_{cb} больше единицы указывает на улучшение свойств (на-

пример, увеличение прочности после термической обработки), значение меньше единицы – на ухудшение (например, снижение пластичности), а равное единице значение свидетельствует об отсутствии значимых изменений. Анализ коэффициентов наследования для каждой операции позволяет идентифицировать «узкие места» в технологическом процессе, где происходит наиболее существенное ухудшение свойств материала. Это позволяет целенаправленно корректировать параметры технологических операций для повышения качества готовой детали. Например, если после операции шлифования коэффициент наследования твердости меньше единицы, это может указывать на избыточное нагревание материала, приводящее к снижению твердости поверхностного слоя. В этом случае оптимизация параметров шлифования (скорость вращения, подача, охлаждение) может улучшить твердость и повысить износостойкость детали. Или, если после операции закалки коэффициент наследования ударной вязкости меньше единицы, можно подобрать оптимальный режим термической обработки для минимизации хрупкости материала. Кроме того, анализ коэффициентов наследования позволяет оценить влияние различных факторов на технологическую наследственность, таких как тип оборудования, квалификация персонала, точность настройки параметров технологических операций, а также вариации в свойствах исходного материала. Это способствует разработке более эффективных и надежных технологических

процессов, обеспечивающих стабильное качество готовой продукции.

Экспериментальные исследования параметров материала 18Х2Н4МА (табл. 1) наглядно демонстрируют возможности для оптимизации технологии изготовления зубчатых колес на основе механики технологического наследования (табл. 2).

На основе экспериментов установлено, что наследование механических свойств материала (способом получения заготовки) обработкой давлением с последующей термической обработкой относительно сортового проката с аналогичной термообработкой характеризуется положительной тенденцией и составляет по пределу прочности (σ_B) прирост до 6,2%, по пределу текучести ($\sigma_{0,2}$) – до 5,3%. Проработка механических свойств материалов была сделана с акцентом на структурное строение детали, что позволяет более точно оценить влияние различных видов обработки на характеристики конечного продукта. Коэффициент структурной наследственности варьируется от нуля до единицы, где более высокие значения этого коэффициента указывают на более выраженные свойства наследственности. Это означает, что чем выше значение h^2 , тем больше влияние текущего этапа обработки на конечные механические свойства детали (рис. 4–5).

На рис. 4 и 5 приведены следующие сокращения: ТО – термическая обработка; ХТО – химико-термическая обработка; У – упрочненный слой; С – сердцевина материала;

Таблица 1. Свойство материала 18Х2Н4МА
Table 1. Property of 18Х2Н4МА material

Наименование операции		Механические свойства	
Заготовительная	термическая	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа
Прутки сортовой	–	1002,3	1166
Поковка		1020,3	1181,9
Штамповка		1032,2	1199,6
Прутки сортовой	нормализация и высокий отпуск	847,5	957
Поковка		897,3	1026,3
Штамповка		920,2	1045,6

Таблица 2. Коэффициент наследования свойств материала 18Х2Н4МА на заготовительной операции
Table 2. Inheritance coefficient of 18Х2Н4МА material properties during blanking

Наименование операции		Коэффициент наследования K_{CB} по	
Заготовительная	термическая	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа
Прутки сортовой	нормализация и высокий отпуск	0,846	0,821
Поковка		0,879	0,868
Штамповка		0,891	0,872

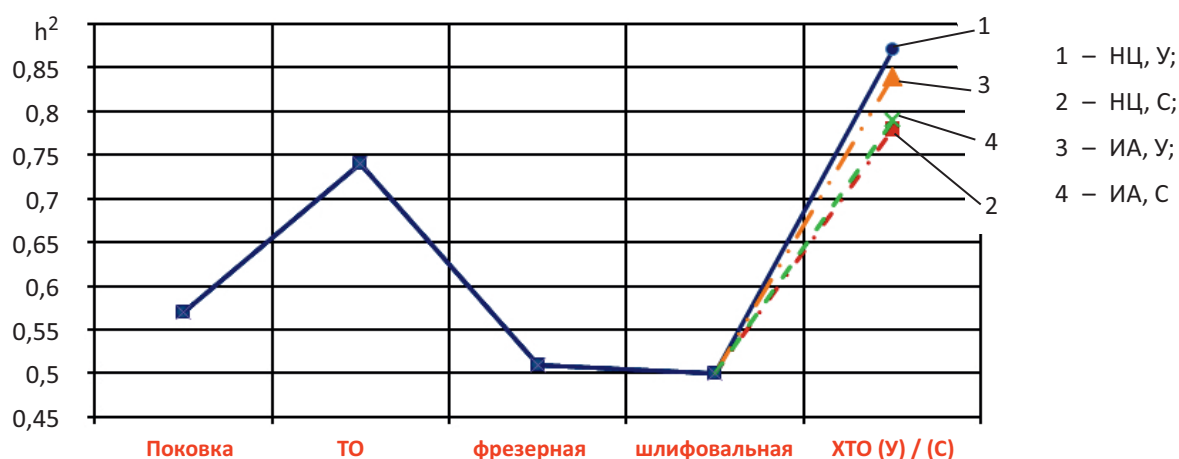


Рис. 4. Распределение коэффициента структурного наследования предела текучести

Fig. 4. Distribution of the yield strength structural inheritance coefficient

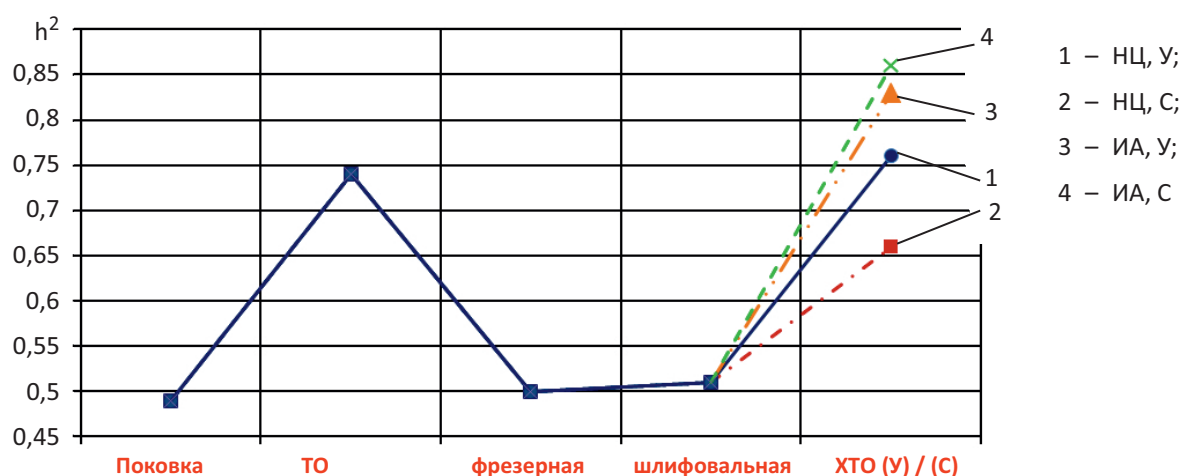


Рис. 5. Распределение коэффициента структурного наследования предела прочности

Fig. 5. Distribution of the tensile strength structural inheritance coefficient

НЦ – нитроцементация; ИА – ионное азотирование.

Анализ коэффициента структурной наследственности доказал наличие направленного формирования полезных качеств материала при таких операциях, как термическая и химико-термическая обработка. Например, прирост количественного показателя по коэффициенту структурной наследственности после ХТО относительно операции шлифования по упрочненному слою составляет по пределу прочности (σ_B) не менее 49%, по пределу текучести ($\sigma_{0.2}$) – не менее 68%. Изменения коэффициента структурной наследственности после ХТО относительно термической операции по сердцевине по пределу прочности и пределу текучести не превышают 10%. Механическая обработка не вносит вклада в механические характеристики материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная многомерная модель механики технологической наследственности механических свойств материала жизненного процесса зубчатой передачи аргументирует возможность управления механическими свойствами материала, позволяя учесть параметры поверхностного слоя и сердцевины материала исходя из технологической наследственности изготовления детали.

Экспериментально доказано, что количественные признаки формируются в процессе изготовления на основе технологической и структурной наследственности, отталкиваясь от факторов технологии. Степень влияния технологии на наследование разных свойств неодинакова.

Эмпирически установлено изменение коэффициента структурной наследствен-

ности механических свойств материала ли – более 30% показателя относительно готового зубчатого колеса, которое составляет для упрочненного поверхностного слоя более 50%; для сердцевины детали – более 30% показателя относительно состояния поставки при наибольшем влиянии термической и химико-термической обработки.

Список источников

1. Кречетов А.А., Блюменштейн В.Ю., Законнова Л.И. Анализ механизмов наследования в живой природе и технике // Научно-технические технологии в машиностроении. 2020. № 11. С. 16–29. <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2020-11-16-29>. EDN: NQTYXQ.
2. Медеяев И.А. Технологическая мутационная наследственность при смазывании деталей машин // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2023. № 3. С. 116–120. <https://doi.org/10.36652/0202-3350-2023-24-3-116-120>. EDN: JJRYKW.
3. Blumenstein V.Yu., Mitrofanova K.S. Study of the parameters of the pure iron structure after surface plastic deformation treatment with a complex-profile tool // Dynamics of Technical Systems. Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2021. Vol. 1029. P. 012013. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1029/1/012013>. EDN: DCAPYD.
4. Blumenstein V.Y., Krechetov A. Regularities of technological inheritance in the categories of loading programs // Dynamics of Technical Systems. Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2021. Vol. 1029. P. 012012. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1029/1/012012>. EDN: IAZVTV.
5. Андрюшкин А.Ю., Рустамова М.У., Кадочникова Е.Н. Влияние остаточных напряжений на прочность корпусов нефтегазового оборудования // Проблемы управления рисками в техносфере. 2022. № 1. С. 6–14. EDN: KTCKNA.
6. Лаптева Е.Н. Применение нейронных сетей для оценки технологической наследственности деталей машин // Справочник. Инженерный журнал. 2022. № 9. С. 39–44. <https://doi.org/10.14489/hb.2022.09.pp.039-044>. EDN: EVNASM.
7. Евдокимов Д.В., Алексенцев А.А., Букатый А.С., Ахтамьянов Р.М., Бычков Д.А. Разработка методики по оценке напряжённо-деформированного состояния изделий с учётом технологической наследственности // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2023. Т. 25. № 3. С. 57–63. <https://doi.org/10.37313/1990-5378-2023-25-3-57-63>. EDN: KUXEKK.
8. Брылев А.В., Лизунов И.В., Николусь А.А., Исаев Ю.Ю. Влияние технологической наследственности на точность получения размеров при механической обработке деталей машин // Главный механик. 2022. № 1. С. 58–70. <https://doi.org/10.33920/pro-2-2201-06>. EDN: VGCUXY.
9. Албагачиев А.Ю., Яковлева А.П. Применение методов комбинированного воздействия на поверхностный слой деталей машин в наукоёмких технологиях // Научно-технические технологии в машиностроении. 2023. № 3. С. 12–18. <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2023-12-18>. EDN: BAFRTN.
10. Fedorov S.K., Yakovleva A.P., Perepelkin Yu.K. Controlling the properties of the surface layers of parts by forming regular micro-reliefs // Materials Science Forum. 2020. Vol. 989. P. 182–186. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.989.182>. EDN: VWIOQF.
11. Третьяков А.Ф. Проектирование технологических процессов изготовления изделий из металлических пористых материалов на основе технологической наследственности // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2022. № 4. С. 185–193. <https://doi.org/10.33979/2073-7408-2022-354-4-185-193>. EDN: COOXUH.
12. Тоиржонов О.З., Малышев Е.Н. Технологическая наследственность // Механика XXI века. 2022. № 21. С. 162–166. EDN: XLZMPS.
13. Makhlov M.S., Blumenstein V.Yu. The residual stress modeling in surface plastic deformation machining processes with the metal hardening effect consideration // Solid State Phenomena. 2022. T. 328 SSP. P. 27–37. <https://doi.org/10.4028/p-z92o0e>. EDN: EHXLXX.
14. Бутенко В.И., Шведова А.С. Влияние технологической наследственности на эксплуатационные показатели поверхностного слоя деталей после отделочно-упрочняющей обработки // Упрочняющие технологии и покрытия. 2023. Т. 19. № 6. С. 254–260. <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2023-19-6-254-260>. EDN: XDIIUC.
15. Blumenstein V.Yu., Mitrofanova K.S. Study on the effects of hydrostatic pressure on the structural state of pure-iron during hardening treatment with a multiradius roller // Solid State Phenomena. 2022. Vol. 328 SSP. P. 17–25. <https://doi.org/10.4028/p-2niz79>. EDN: UIIHJV.
16. Yakovleva A., Dubov A., Sobranin A., Karpovich E., Marchenkov A. Technological heredity effect on fatigue strength of hydropower plant parts after combined processing // Hydraulics. Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2020. № 779. P. 012029. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/779/1/012019>. EDN: QPMNOW.
17. Fedorov S., Zaripov V., Ivanova Yu., Yakovleva A. Improving wear resistance of drill pipe sub thread by using final electromechanical surface hardening // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2020. Vol. 963. Iss. 1. P. 012008. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/963/1/012008>. EDN: FMGGVH.

18. Blumenstein V.Yu., Mitrofanova K.S. Investigation of effect of the state of the deformation zones on the structure of pure-iron samples after surface plastic deformation by a multiradius roller // *Technical Physics Letters*. 2024. Vol. 50. No. 1. P. 19–24. <https://doi.org/10.1134/S1063785024700214>. EDN: ICJPSP.
19. Шеховцева Е.В. Концепция технологического обеспечения эксплуатационных свойств на основе стабилизации механических свойств материалов зубчатых колёс системы приводов газотурбинного двигателя // *Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова*. 2024. Т. 27. № 2. С. 15–24. <https://doi.org/10.22213/2413-1172-2024-2-15-24>. EDN: XZCPRL.
20. Безъязычный В.Ф., Шеховцева Е.В. Технологическое обеспечение изготовления зубчатых колес авиационных газотурбинных двигателей с учетом нестабильности физико-механических свойств их материалов // *Научные технологии в машиностроении*. 2023. № 8. С. 35–42. <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2023-35-42>. EDN: WKULPH.

References

1. Krechetov A.A., Blyumenstein V.Yu., Zakonnova L.I. Analysis of inheritance mechanisms in animate nature and engineering. *Science intensive technologies in mechanical engineering*. 2020;11:16-29. (In Russ.). <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2020-11-16-29>. EDN: NQTYXQ.
2. Medelyaev I.A. Technical mutational inheritance in machine part lubrication. *Assembly in mechanical engineering, instrumentation*. 2023;3:116-120. (In Russ.). <https://doi.org/10.36652/0202-3350-2023-24-3-116-120>. EDN: JJRYKW.
3. Blumenstein V.Yu., Mitrofanova K.S. Study of the parameters of the pure iron structure after surface plastic deformation treatment with a complex-profile tool. In: *Dynamics of Technical Systems. Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2021;1029:012013. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1029/1/012013>. EDN: DCAPYD.
4. Blumenstein V.Y., Krechetov A. Regularities of technological inheritance in the categories of loading programs. In: *Dynamics of Technical Systems. Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2021;1029:012012. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1029/1/012012>. EDN: IAZVTV.
5. Andryushkin A.Yu., Rustamova M.U., Kadochnikova E.N. Effect of residual stresses on the strength of oil and gas equipment housings. *Problems of risk Management in the Technosphere*. 2022;1:6-14. (In Russ.). EDN: KTCKNA.
6. Lapteva E.N. The application of neural networks to evaluate the technological heredity of machine parts. *Handbook. Engineering Journal*. 2022;9:39-44. <https://doi.org/10.14489/hb.2022.09.pp.039-044>. EDN: EVNASM.
7. Evdokimov D.V., Aleksencev A.A., Bukaty A.S., Ahtamjanov R.M., Bychkov D.A. Development of the method on the stress-strain state assessment of products taking into account technological heredity. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2023;25(3):57-63. (In Russ.). <https://doi.org/10.37313/1990-5378-2023-25-3-57-63>. EDN: KUXEKK.
8. Brylev A.V., Lizunov I.V., Nikolus A.A., Isaev Yu.Yu. Effect of technical inheritance on dimensioning accuracy under part machining. *Chief Mechanical Engineer*. 2022;1:58-70. (In Russ.). <https://doi.org/10.33920/pro-2-2201-06>. EDN: VGCUXY.
9. Albagachiev A., Yakovleva A.P. Application of combined action methods for the surface layer of machine parts in science-intensive technologies. *Science intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2023;3:12-18. (In Russ.). <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2023-12-18>. EDN: BAFRTN.
10. Fedorov S.K., Yakovleva A.P., Perepelkin Yu.K. Controlling the properties of the surface layers of parts by forming regular micro-reliefs. *Materials Science Forum*. 2020;989:182-186. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.989.182>. EDN: VWIOQF.
11. Tretyakov A.F. Designing technological manufacturing processes of products from porous metallic materials based on technical inheritance. *Fundamental and Applied Problems of Technics and Technology*. 2022;4:185-193. (In Russ.). <https://doi.org/10.33979/2073-7408-2022-354-4-185-193>. EDN: COOXUH.
12. Toirzhonov O.Z., Malyshev E.N. Technical inheritance. *Mechanical engineers of the XXI century*. 2022;21:162-166. (In Russ.). EDN: XLZMPS.
13. Makhalov M.S., Blumenstein V.Y. The residual stress modeling in surface plastic deformation machining processes with the metal hardening effect consideration. *Solid State Phenomena*. 2022;328 SSP:27-37. <https://doi.org/10.4028/p-z92o0e>. EDN: EHXLXX.
14. Butenko V.I., Shvedova A.S. Effect of technological heredity on performance indicators of parts surface layer after finishing and strengthening treatment. *Strengthening Technologies and coatings*. 2023;19(6):254-260. (In Russ.). <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2023-19-6-254-260>. EDN: XDIUUC.
15. Blumenstein V.Y., Mitrofanova K.S. Study on the effects of hydrostatic pressure on the structural state of pure-iron during hardening treatment with a multiradius roller. *Solid State Phenomena*. 2022;328 SSP:17-25. <https://doi.org/10.4028/p-2niz79>. EDN: UIIHJV.
16. Yakovleva A., Dubov A., Sobranin A., Karpovich E., Marchenkov A. Technological heredity effect on fatigue strength of hydropower plant parts after combined processing. In: *Hydraulics. Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020;779:012029. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/779/1/012029>. EDN: QPMNOW.

17. Fedorov S., Zaripov V., Ivanova Yu., Yakovleva A. Improving wear resistance of drill pipe sub thread by using final electromechanical surface hardening. *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020;963(1):012008. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/963/1/012008>. EDN: FMGGVH.
18. Blumenstein V.Yu., Mitrofanova K.S. Investigation of effect of the state of the deformation zones on the structure of pure-iron samples after surface plastic deformation by a multiradius roller. *Technical Physics Letters*. 2024;50(1):19-24. <https://doi.org/10.1134/S1063785024700214>. EDN: ICJPSP.
19. Shekhovtseva E.V. The concept of technological support of operational properties based on stabilization of mechanical properties of gear materials in a gas turbine engine drive system. *Vestnik IZHGTU imeni M.T. KALASHNIKOVA* 2024;27(2):15-24. (In Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2024-2-15-24. EDN: XZCPRL.
20. Bezyazychnyi V.F., Шеховцева Е.В. Engineering support for the manufacture of gears of aviation gas turbine engines providing for the instability of the physical and mechanical properties of their materials. *Science intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2023;8:35-42. (In Russ.). <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2023-35-42>. EDN: WKULPH.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Безъязычный Вячеслав Феоктистович,
д.т.н., профессор,
профессор кафедры инновационного
машиностроения,
Рыбинская государственная авиационная
технологическая академия имени П.А. Соловьева,
152903, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53, Россия
technology@rsatu.ru

Шеховцева Евгения Владимировна,
к.т.н.,
начальник отдела,
Публичное акционерное общество «ОДК-Сатурн»,
152903, г. Рыбинск, пр. Ленина, 163, Россия
✉ janevsh@mail.ru
evgeniya.shekhovtseva@uec-saturn.ru

Шеховцева Татьяна Владимировна,
к.т.н., доцент,
доцент кафедры прикладной механики,
Рыбинский государственный авиационный
технический университет,
152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53, Россия
prikl_mehanika@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vyacheslav F. Bezyazychnyi,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department
of Innovative Engineering,
P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical
University,
53, Pushkin St., Rybinsk 152934, Russia
technology@rsatu.ru

Evgenia V. Shekhovtseva,
Cand. Sci. (Eng.),
Head of the Department,
Public Joint Stock Company «UEC-Saturn»,
163, Lenin pr., Rybinsk 152934, Russia
✉ janevsh@mail.ru
evgeniya.shekhovtseva@uec-saturn.ru

Tatiana V. Shekhovtseva,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Applied
Mechanics,
P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical
University,
53, Pushkin St., Rybinsk 152934, Russia
prikl_mehanika@mail.ru

Заявленный вклад авторов

В.Ф. Безъязычный – идея, написание статьи, научное редактирование текста. Е.В. Шеховцева – идея, сбор и анализ сведений, написание статьи. Т.В. Шеховцева – обработка информации, написание статьи.

Authors' contribution

Vyacheslav F. Bezyazychnyi – idea, writing the article, scientific editing of the text of the article. Evgenia V. Shekhovtseva – idea, information collection and analysis, writing of the article. Tatiana V. Shekhovtseva – information processing, writing of the article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 20.02.2025 г.; одобрена после рецензирования 02.04.2025 г.; принята к публикации 28.05.2025 г.

Information about the article

The article was submitted 20.02.2025; approved after reviewing 02.04.2025; accepted for publication 28.05.2025.



Влияние параметров реверсивного выглаживания на показатель жёсткости схемы напряжённого состояния

Хыу Хай Нгуен^{1✉}, Семен Азикович Зайдес²

¹Офицерское училище Военно-Воздушных Сил, Нячанг, Вьетнам

²Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Резюме. Целью данной работы является установление влияния параметров реверсивного выглаживания на показатель жесткости схемы напряженного состояния и определение рациональных параметров упрочняющего процесса. В исследованиях использовано программное обеспечение SOLIDWORKS 2019 (для 3D-проектирования) и метод конечных элементов на основе компьютерной программы ANSYS Workbench 19.1 (для построения математической модели). Для решения задачи по получению наилучшего значения показателя жесткости схемы напряженного состояния упрочненных деталей реверсивным выглаживанием использована компьютерная программа Microsoft Visual Studio 2012 путем программирования на языке Python с выявлением рациональных параметров реверсивного выглаживания. Определено влияние основных технологических параметров реверсивного выглаживания на формирование максимальной интенсивности временных напряжений и показателя жесткости схемы временных напряжений упрочненных деталей. По результатам статистической обработки полученных данных установлены рациональные режимы упрочнения, обеспечивающие формирование максимально возможного показателя жесткости схемы напряженного состояния в очаге деформации: величина продольной подачи в диапазоне 0,07–0,08 мм/об; частота вращения заготовки в диапазоне 280–300 об/мин; величина радиального натяга в диапазоне 0,25–0,28 мм; начальный угол установки рабочего инструмента 90°; амплитуда угла реверсивного вращения рабочего инструмента в диапазоне ±55–60° и реверсивная частота вращения рабочего инструмента в диапазоне 270–300 дв.ход/мин. Полученные рациональные режимы упрочнения реверсивным выглаживанием позволяют достичь максимально возможной высокой жесткости схемы напряжений, что приводит к улучшению механических характеристик обрабатываемых деталей. Дальнейшие исследования могут быть направлены на уточнение математических моделей, описывающих процесс реверсивного выглаживания, а также на проведение экспериментальных работ для выявления оптимальных режимов обработки различных материалов.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, конечно-элементное моделирование, реверсивное выглаживание, показатель жесткости схемы напряженного состояния, статистическая обработка

Для цитирования: Нгуен Хыу Хай, Зайдес С.А. Влияние параметров реверсивного выглаживания на показатель жёсткости схемы напряжённого состояния // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 2. С. 170–183. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-2-170-183>. EDN: GLGGYX.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Influence of reversible smoothing parameters on the stiffness indicator of the stress state scheme

Huu Hai Nguyen^{1✉}, Semen A. Zaides²

¹Air Force Officer College, Nha Trang, Viet Nam

²Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The aim of this work is to determine the influence of reversible smoothing parameters on the stiffness index of the stress state scheme and to identify rational parameters for the strengthening process. The research was carried out using the software SOLIDWORKS 2019 (for 3D design) and the finite element method based on the computer program ANSYS Workbench 19.1 (for construction of the mathematical model). In order to obtain the optimal value of the stiffness index for the stress state scheme of parts reinforced by reversible smoothing, the Microsoft Visual Studio 2012 computer program was used, with programming in Python to identify rational parameters for reversible smoothing. The influence of the main technological parameters of reversible smoothing on the formation

of the maximum residual stress intensity and the stiffness index of the residual stress scheme in strengthened parts was determined. On the basis of the statistical analysis of the obtained data, rational strengthening modes have been established, which ensure the formation of the maximum possible stiffness index of the stress state scheme in the deformation zone: the longitudinal feed rate in the range of 0.07–0.08 mm/rev; the rotation frequency of the blank in the range of 280–300 rpm; the radial stress value in the range of 0.25–0.28 mm; the initial setting angle of the working tool at 90°; the amplitude of the reversible rotation angle of the working tool in the range of $\pm 55^\circ$ – $\pm 60^\circ$; and the reversible rotation frequency of the working tool in the range of 270–300 double pass per min. The rational reinforcement modes obtained by reversible smoothing make it possible to achieve the maximum possible high rigidity of the stress scheme, resulting in improved mechanical properties of the machined parts. Future research could be directed towards refining the mathematical models describing the reversible smoothing process and carrying out experimental work to identify the optimum machining modes for different materials.

Keywords: stress-strain state, finite element modeling, reverse burnishing, rigidity index of the stress-strain state diagram, statistical processing

For citation: Nguyen Huu Hai, Zaides S.A. Influence of reversible smoothing parameters on the stiffness indicator of the stress state scheme. *iPolytech Journal*. 2025;29(2):170-183. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-2-170-183>. EDN: GLGGYX.

ВВЕДЕНИЕ

Цилиндрические детали широко применяются в различных отраслях промышленности, включая машиностроение, авиацию, автомобильную и нефтегазовую индустрию. Они используются в качестве валов, осей, втулок, цилиндров и других элементов, обеспечивающих передачу различных движений, нагрузок в машинах и механизмах. Надежность таких деталей во многом зависит от состояния их рабочих поверхностей, подвергающихся значительным нагрузкам в процессе эксплуатации. Отказы цилиндрических деталей чаще всего связаны с износом, усталостным разрушением, коррозией и повреждениями вследствие перегрузок [1, 2]. В современном машиностроении и металлообработке важное значение имеет повышение механических свойств деталей, в частности их статической и усталостной прочности [3–5]. Одним из эффективных методов упрочнения и улучшения характеристик поверхностного слоя является поверхностное пластическое деформирование (ППД) [6–8].

Механические свойства поверхностного слоя оказывают разное влияние на потребительские свойства изделий. Так, детали, работающие в машинах и механизмах, должны обладать определенной твердостью, прочностью, контактной выносливостью. Наличие пластической деформации при эксплуатации крайне недопустимо, так как она приводит к необратимому изменению формы деталей, которое может привести к повреждению или разрушению конструкций.

В то же время, когда из этого же металла обрабатывают заготовку, то на первый план выходит пластичность металла, которая позволяет получить необходимую форму изделия при обработке давлением или снизить энергетические затраты и износ инструмента при обработке металлов резанием.

Металлы с высокой пластичностью лучше поддаются поверхностному пластическому деформированию, так как способны претерпевать значительные пластические деформации без разрушения. Металлы с достаточной пластичностью способны деформироваться под нагрузкой, что позволяет сглаживать микронеровности и дефекты на поверхности. Это снижает концентрацию напряжений и уменьшает вероятность образования трещин и других очагов разрушения. Пластичность способствует тому, что при воздействии внешних нагрузок, например, ударов или трения, металл не разрушается сразу, а сначала деформируется. Это позволяет деталям машин выдерживать значительные механические нагрузки без катастрофических последствий. При пластической деформации металлы могут способствовать образованию тонких окисных или защитных слоев, препятствующих коррозии и износу [9, 10].

Для оценки пластического состояния нагруженного тела наибольшее распространение получил показатель жесткости схемы напряженного состояния, по которому можно оценить влияние напряжений и структурные изменения в материале [11, 12].

Мягкие схемы, т.е. низкое значение показателя жесткости схемы (объемное сжатие, всестороннее сжатие, гидростатическое давление) – повышают пластичность металлов, так как препятствуют образованию и развитию микротрещин.

Жесткие схемы (высокий показатель жесткости, одноосное растяжение, сложное напряженное состояние с высокими касательными напряжениями) – уменьшают пластичность, ускоряя локализацию деформации и зарождение трещин [11].

Поверхностное пластическое деформирование может повышать пластичность за счет измельчения зерен в поверхностном слое (эффект динамической рекристаллизации) [13].

Однако традиционные методы ППД имеют ряд недостатков, которые могут снижать эффективность обработки и приводить к дефектам на поверхности изделий. Для повышения эффективности ППД необходимо применять современные технологии моделирования, адаптивные системы управления, износостойкие инструменты и комбинированные методы обработки. В Иркутском национальном исследовательском техническом университете разработан новый способ ППД на основе реверсивного выглаживания поверхностного слоя тороидальным роликом [14]. В проведенных исследованиях [15, 16] установлено, что разработанный способ упрочнения приводит к формированию тонкого поверхностного слоя с весьма малыми размерами зеренной структуры материала, а также увеличению временных напряжений сжатия, особенно в приповерхностной зоне. Эти изменения положительно сказываются на снижении риска усталостного разрушения и продлении срока службы машинных деталей.

Цель исследования заключается в анализе влияния параметров реверсивного выглаживания на показатель жесткости схемы напряженного состояния и определении полученных данных по результатам статистической обработки рациональных параметров упрочняющего процесса, обеспечивающих формирование максимально возможного показателя жесткости напряженного состояния в очаге деформации.

СПОСОБ РЕВЕРСИВНОГО ВЫГЛАЖИВАНИЯ

На рис. 1 представлена схема реверсивного выглаживания цилиндрических деталей, включающая геометрию рабочего ролика и конечно-элементное моделирование процесса деформации.

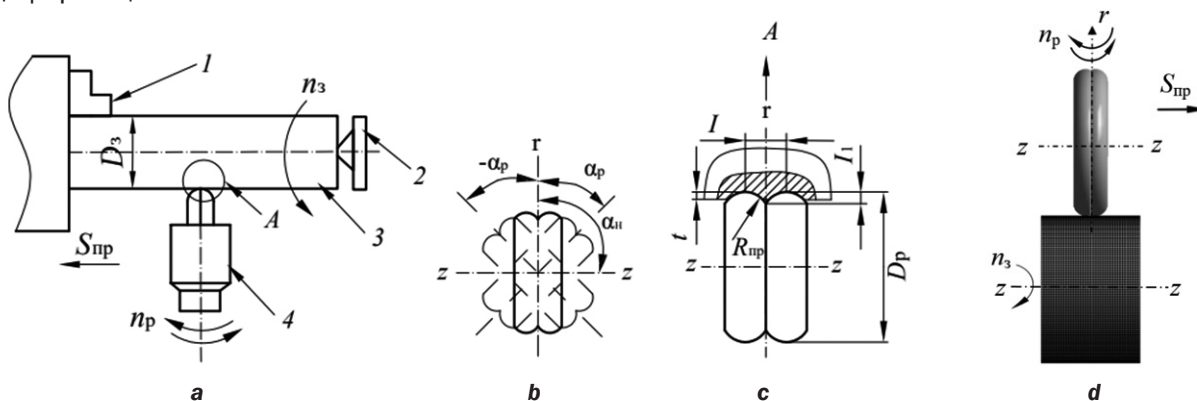


Рис. 1. Принципиальная схема реверсивного выглаживания роликом с двумя радиусами (а), схема реверсивного вращательного движения рабочего инструмента (б), конфигурация рабочего ролика (с) и конечно-элементная модель процесса деформации (д) [15]: 1 – трехкулачковый патрон; 2 – задняя бабка; 3 – заготовка; 4 – рабочий инструмент

Fig. 1. Schematic diagram of reverse burnishing with a two radii roller (a), diagram of reversible rotary motion of the working tool (b), working roller configuration (c), finite element model of the deformation process (d) [15]: 1 – three-jaw chuck; 2 – tailstock; 3 – workpiece; 4 – working tool

Способ реверсивного выглаживания – это способ механической обработки поверхности, при котором выглаживающий инструмент с реверсивным круговым движением перемещается вдоль заготовки с некоторой величиной продольной подачи. Этот процесс основан на пластической деформации поверхностного слоя детали с целью уменьшения микронеровностей и повышения микротвердости. В качестве рабочего инструмента (РИ) использован двухрадиусный ролик с высокой твердостью.

Согласно представленной технологической схеме (см. рис. 1 а), кинематика процесса определяется следующими параметрами: скоростью вращения заготовки (n_3), продольной

подачей рабочего инструмента (S_{np}), амплитудой углового реверсивного вращения рабочего инструмента (α_p), начальными углом его установки (α_n) и частотой реверсивного вращения (n_p).

РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Расчет напряженного состояния является важнейшей задачей при проектировании конструкций, позволяя оценивать их надежность и безопасность. Метод конечных элементов (МКЭ) выделяется своей универсальностью среди различных подходов к расчетам. Его суть состоит в разделении сложной конструкции на небольшие части, называемые конечными элементами, для которых находятся решения упрощенных уравнений равновесия. Одним из наиболее эффективных инструментов, применяемых для реализации МКЭ, считается программа Ansys [17–19]. Методика для проведения компьютерного моделирования процесса реверсивного выглаживания представлена в работе [15].

Для анализа напряженного состояния в различных участках цилиндрического образца, с учетом основных компонент тензора напряжений, была рассчитана интенсивность временных напряжений [15]:

$$\sigma_i^{BP} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(\sigma_z^{BP} - \sigma_\varphi^{BP})^2 + (\sigma_\varphi^{BP} - \sigma_r^{BP})^2 + (\sigma_r^{BP} - \sigma_z^{BP})^2]}, \quad (1)$$

где σ_z^{BP} , σ_r^{BP} , σ_φ^{BP} – главные компоненты временных напряжений в цилиндрической системе координат.

В большинстве исследований рассматривается тип напряженного состояния, который характеризуется показателем жесткости схемы напряженного состояния по В.Л. Колмогорову в виде [19]:

$$\Pi_{BP} = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{\sigma_z^{BP} + \sigma_r^{BP} + \sigma_\varphi^{BP}}{(\sigma_z^{BP} - \sigma_\varphi^{BP})^2 + (\sigma_\varphi^{BP} - \sigma_r^{BP})^2 + (\sigma_r^{BP} - \sigma_z^{BP})^2}}. \quad (2)$$

Знак показателя жесткости схемы напряженного состояния играет важную роль в механике деформируемого твердого тела и теории прочности. Он характеризует тип напряженного состояния в материале, определяя его склонность к хрупкому или пластическому разрушению [20–22]. При положительных значениях коэффициента Π указывает на преобладание одноосного или объемного растяжения. В этом случае материал разрушается по механизму хрупкого разрушения, при отрицательных знаках соответствует сжатию или объемному сжатию, что способствует пластическому течению материала [22].

Исследуем, как ключевые параметры процесса реверсивного выглаживания воздействуют на максимальную интенсивность временных напряжений (σ_i^{BP}), а также на составляющие тензора временных напряжений (σ_z^{BP} , σ_r^{BP} , σ_φ^{BP}) и показатель жесткости схемы напряженного состояния (Π) в упрочненном слое.

На рис. 2 показано воздействие ключевых параметров технологии реверсивного выглаживания на основные составляющие тензора предельных временных напряжений.

Анализ данных, представленных на рис. 2, демонстрирует, что увеличение технологических параметров реверсивного выглаживания вызывает неравномерный рост и снижение основных компонент тензора максимальных напряжений во времени. Например, увеличение радиального натяга первоначально способствует росту главных компонент напряжений (см. рис. 2 а). Однако при увеличении радиального натяга до определенного предела наблюдается снижение главных компонент напряжений. Это объясняется тем, что при достижении критического значения натяга происходит перенапряжение и перераспределение напряжений вглубь материала, при этом материал начинает демонстрировать эффект пластической релаксации [23].

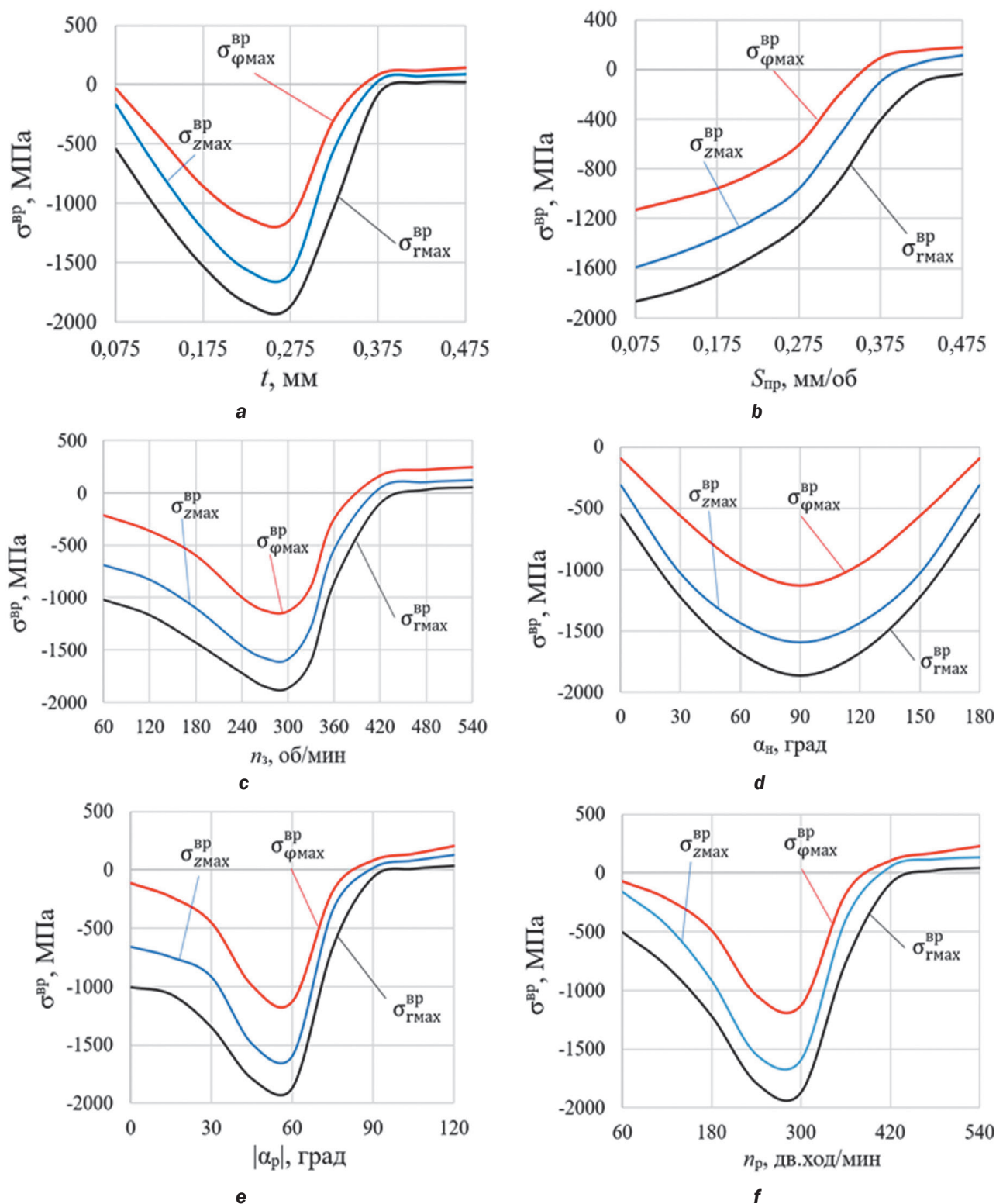


Рис. 2. Воздействие ключевых параметров процесса реверсивного выглаживания на основные составляющие тензора предельных временных напряжений: а – t ; б – $S_{пр}$; в – n_3 ; д – α_n ; е – α_p ; ф – n_p

Fig. 2. Effect of key parameters of reverse burnishing on the main components of the ultimate temporary stress tensor: а – t ; б – $S_{пр}$; в – n_3 ; д – α_n ; е – α_p ; ф – n_p

На рис. 3 представлена зависимость максимальной интенсивности временных напряжений от ключевых технологических параметров, полученная после обработки цилиндрической детали методом реверсивного выглаживания.

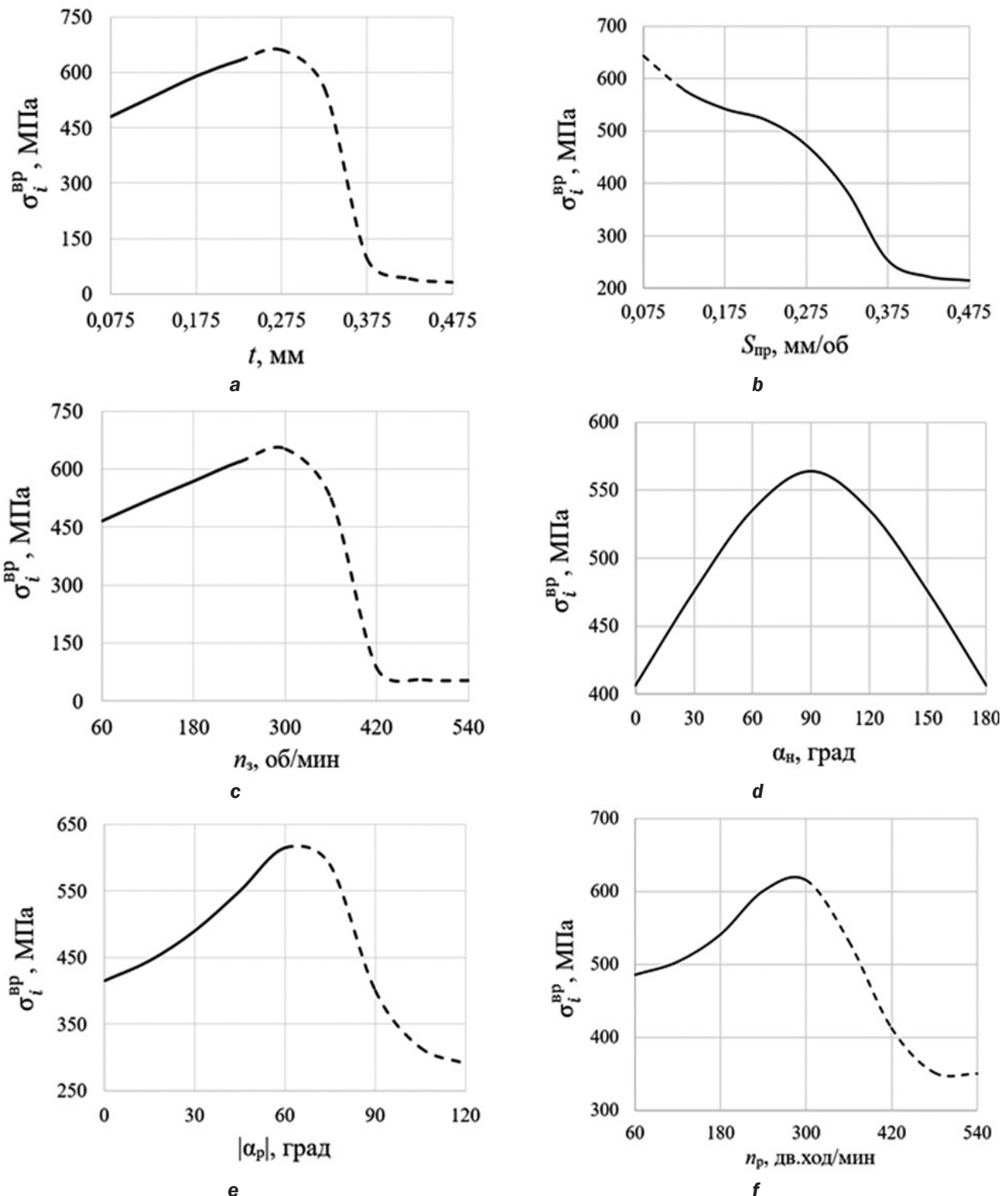


Рис. 3. Графики изменения предельных временных напряжений в зависимости от основных режимов обработки при упрочнении цилиндрических деталей способом реверсивного выглаживания: а – t ; б – $S_{пр}$; в – n_3 ; д – α_n ; е – α_p ; ф – n_p
Fig. 3. Graphs of changes in ultimate temporary stresses depending on the main processing modes when cylindrical part hardening by reverse burnishing: а – t ; б – $S_{пр}$; в – n_3 ; д – α_n ; е – α_p ; ф – n_p

Результаты, представленные на рис. 3, демонстрируют, что при варьировании радиально-го натяга в интервале 0,075–0,275 мм, частоты вращения заготовки от 60 до 300 об/мин и реверсивной частоты вращения РИ в диапазоне 60–300 дв.ход/мин величина максималь-

ных напряжений возрастает на 7% (с 21 до 28%). Установленная закономерность обусловлена увеличением контактного давления в зоне инструмент-заготовка при повышении радиального натяга. Это вызывает рост напряжений в материале заготовки, особенно в зоне контакта. В результате максимальные напряжения увеличиваются. С увеличением частоты вращения заготовки возрастают центробежные силы и инерционные нагрузки. Это может привести к увеличению напряжений в материале. Реверсивное вращение (периодическая смена направления вращения) создает дополнительные циклические нагрузки на материал. Это может вызвать усталостные напряжения и увеличить интенсивность максимальных напряжений, особенно в зонах концентрации напряжений. Однако при достижении критического уровня напряжений наблюдается их последующее снижение, сопровождаемое значительным ростом интенсивности временных напряжений, их величина превышает предел прочности материала заготовки ($\sigma_b = 600$ МПа), так как после предела прочности материал повреждается или разрушается (пунктирные линии). Это связано с несколькими факторами [24]:

1) перенаклеп – в процессе пластической деформации материал сначала упрочняется, но при достижении определенного уровня напряжений (предел прочности) начинается разрушение структуры, что может приводить к снижению несущей способности материала;

2) образование и развитие трещин – после достижения предела прочности материал начинает разрушаться: сначала появляются микротрещины, которые затем разрастаются, снижая эффективное сечение, воспринимающее нагрузку;

3) динамические явления и релаксация напряжений в постразрушающей стадии – в процессе разрушения материала, особенно при динамическом нагружении, наблюдаются кратковременные пики напряжений, величина которых может превосходить статический предел прочности. Данный эффект обусловлен распространением ударных волн, скачкообразным изменением внешней нагрузки, а также нестационарными процессами релаксации.

Как видно из рис. 3, снижение продольной подачи с 0,475 до 0,075 мм/об вызывает увеличение пиковой интенсивности временных напряжений на 66,5%. При этом установлено, что существуют оптимальные значения начального угла установки резца ($\alpha_n = 90^\circ$) и амплитуды угла реверса ($\alpha_p \approx \pm 60^\circ$), при которых достигается максимальный уровень динамических напряжений.

На рис. 4 отображены радиальные распределения компонент тензорного поля напряжений и параметра жесткости при временном нагружении цилиндрической заготовки

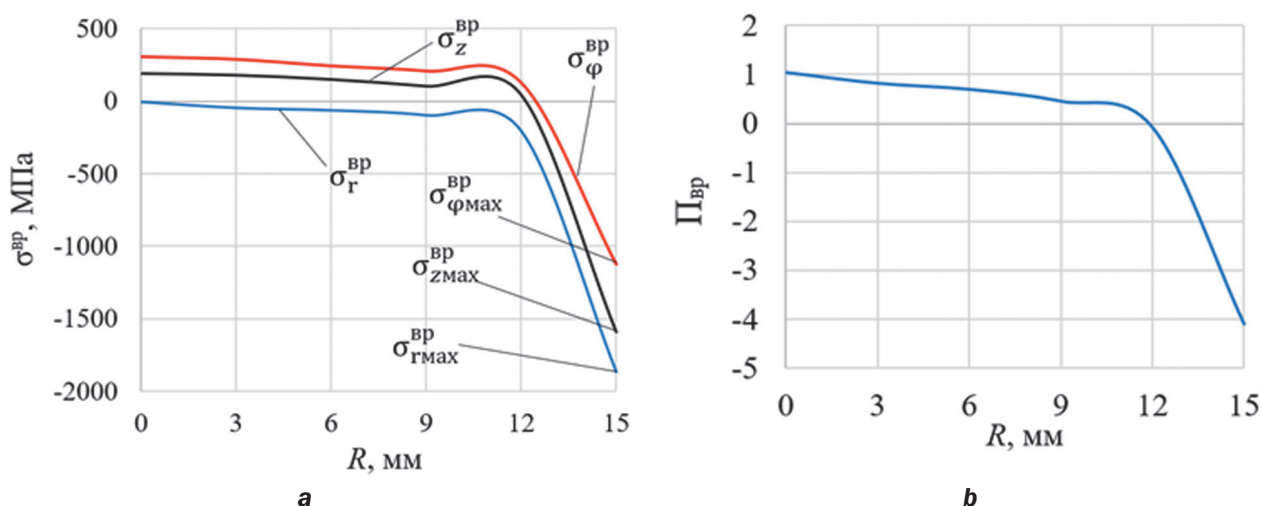


Рис. 4. Зависимости компонент тензора (а) и значения показателя жесткости схемы временных напряжений (б) от радиуса цилиндрического образца, полученные в процессе реверсивного выглаживания (при $t = 0,075$ мм, $S_{np} = 0,075$ мм/об, $n_s = 300$ мин⁻¹, $n_p = 300$ дв.ход/мин, $\alpha_n = 90^\circ$, $\alpha_p = \pm 60^\circ$)

Fig. 4. Dependences of the tensor components (a) and the rigidity index of the temporatry stress circuit (b) on the radius of the cylindrical sample obtained during reverse burnishing (at $t = 0.075$ mm, $S_{np} = 0.075$ mm/rev, $n_s = 300$ min⁻¹, $n_p = 300$ double stroke/min, $\alpha_n = 90^\circ$, $\alpha_p = \pm 60^\circ$)

после процесса реверсивного выглаживания (параметры обработки: $t = 0,075$ мм, $S_{np} = 0,075$ мм/об, $n_3 = 300$ мин⁻¹, $n_p = 300$ дв.ход/мин, $\alpha_n = 90^\circ$, $\alpha_p = \pm 60^\circ$). Как видно из графических данных, в приповерхностной зоне, непосредственно контактирующей с деформирующим инструментом, возникает трехосное сжатие с доминирующей радиальной компонентой. Внутренние слои демонстрируют локальные зоны растяжения в осевой и тангенциальной плоскостях с амплитудой напряжений, составляющей 35–45% от величины σ_v обрабатываемого сплава (рис. 4 а). Это объясняется тем, что при упрочнении цилиндрической заготовки роликом поверхностные слои сжимаются и уплотняются, но объемный эффект пластической деформации приводит к неравномерному перераспределению напряжений. В результате внутренняя часть заготовки, стремясь компенсировать деформацию внешних слоев, испытывает временные растягивающие напряжения. Аналогичным образом наибольшее отрицательное значение показателя Π наблюдается на поверхности заготовки, после чего оно постепенно возрастает по мере приближения к центральной области (см. рис. 4 б).

На рис. 5 представлено влияние основных технологических параметров реверсивного выглаживания на показатель жесткости схемы временных напряжений. Как показано на рис. 5, на начальном этапе обработки рост радиального натяга, скорости вращения заготовки, амплитуды реверса инструмента и частоты его реверсивного вращения способствует увеличению показателя жесткости схемы, напряженной на 84–96%. При дальнейшем увеличении таких параметров упрочнения значение показателя жесткости схемы напряжений уменьшается и затем выравнивается. Это связано с динамическими процессами в системе:

- увеличение радиального натяга приводит к росту контактных напряжений, что может вызвать пластическую деформацию или перераспределение напряжений, снижая жесткость системы;
- рост частоты вращения заготовки усиливает динамические нагрузки, что может привести к вибрациям и снижению эффективной жесткости системы;
- реверсивная частота вращения инструмента вызывает циклические нагрузки, способствуя усталостным явлениям и снижению жесткости.

Как видно из рис. 5, снижение продольной подачи с 0,475 до 0,075 мм/об способствует увеличению жесткости схемы напряжений на 82%. Кроме того, проведенные исследования выявили наличие оптимального начального угла установки режущего инструмента ($\alpha_n = 90^\circ$), при котором данный показатель достигает максимума.

Определение оптимальных режимов обработки способом реверсивного выглаживания представляет собой критически важный фактор для формирования устойчивого напряженно-деформированного состояния и повышения эксплуатационного ресурса деталей. В исследовании применен алгоритм численного моделирования, реализованный в среде Microsoft Visual Studio 2012, с целью максимизации критерия жесткости напряженного состояния. В качестве варьируемых параметров рассматривались следующие: S_{np} в диапазоне 0,075–0,425 мм/об; n_3 в диапазоне 60–540 об/мин; t в диапазоне 0,075–0,425 мм; α_n в диапазоне 0–180°; α_p в диапазоне 0–120° и n_p в диапазоне 60–540 дв.ход/мин. Методика для проведения оптимизации процесса реверсивного выглаживания представлена в работе [14]. При этом показатель жесткости схемы временных напряжений определяется следующими выражениями:

$$\Pi_{вр} = \begin{cases} -34,9S_{np}^2 + 33,1S_{np} - 7,0 \\ (7E - 05)n_3^2 - 0,04n_3 + 1,54 \\ 108,2t^2 - 51,1t + 2,6 \\ (6E - 05)n_p^2 - 0,03n_p + 0,39 \\ (1E - 03)\alpha_p^2 - 0,1\alpha_p - 0,6 \\ (5E - 04)\alpha_n^2 - 0,09\alpha_n - 0,02 \end{cases} \quad (3)$$

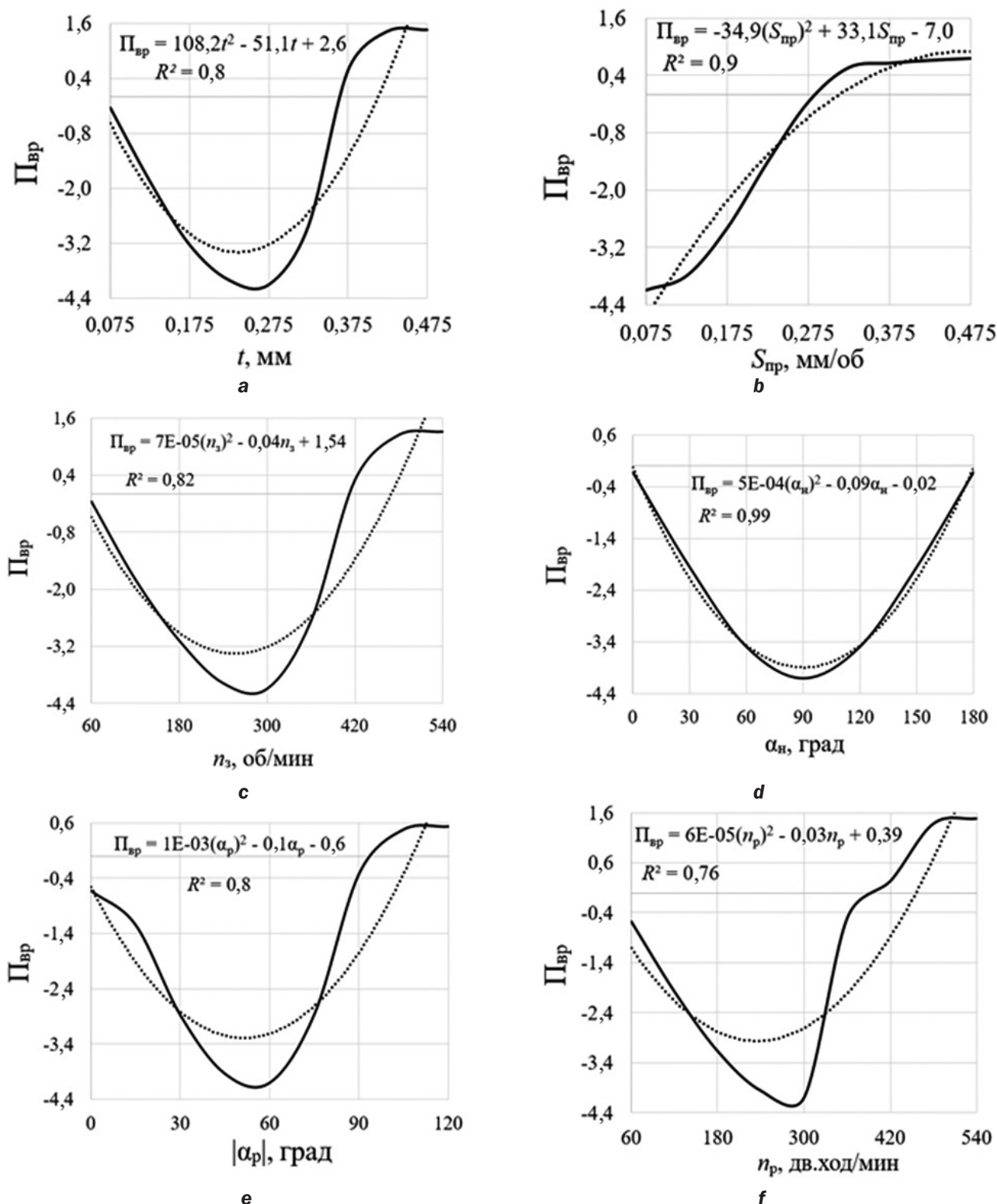


Рис. 5. Зависимость показателя жесткости схемы временных напряжений от ключевых технологических параметров процесса реверсивного выглаживания: а – t ; б – S_{np} ; в – n_z ; д – α_n ; е – α_p ; ф – n_p

Fig. 5. Dependence of the rigidity index of the temporary stress circuit on the key technological parameters of reverse burnishing: а – t ; б – S_{np} ; в – n_z ; д – α_n ; е – α_p ; ф – n_p

Обработка представленных уравнений осуществляется в среде Microsoft Visual Studio 2012 с использованием языка программирования Python, что позволяет определить рациональные параметры процесса реверсивного сглаживания.

Результаты численного моделирования. На рис. 6 приведены данные статистического анализа, позволяющего определить рациональные параметры процесса упрочнения, при которых достигается максимальная жесткость схемы временных напряжений деталей, обработанных методом реверсивного выглаживания.

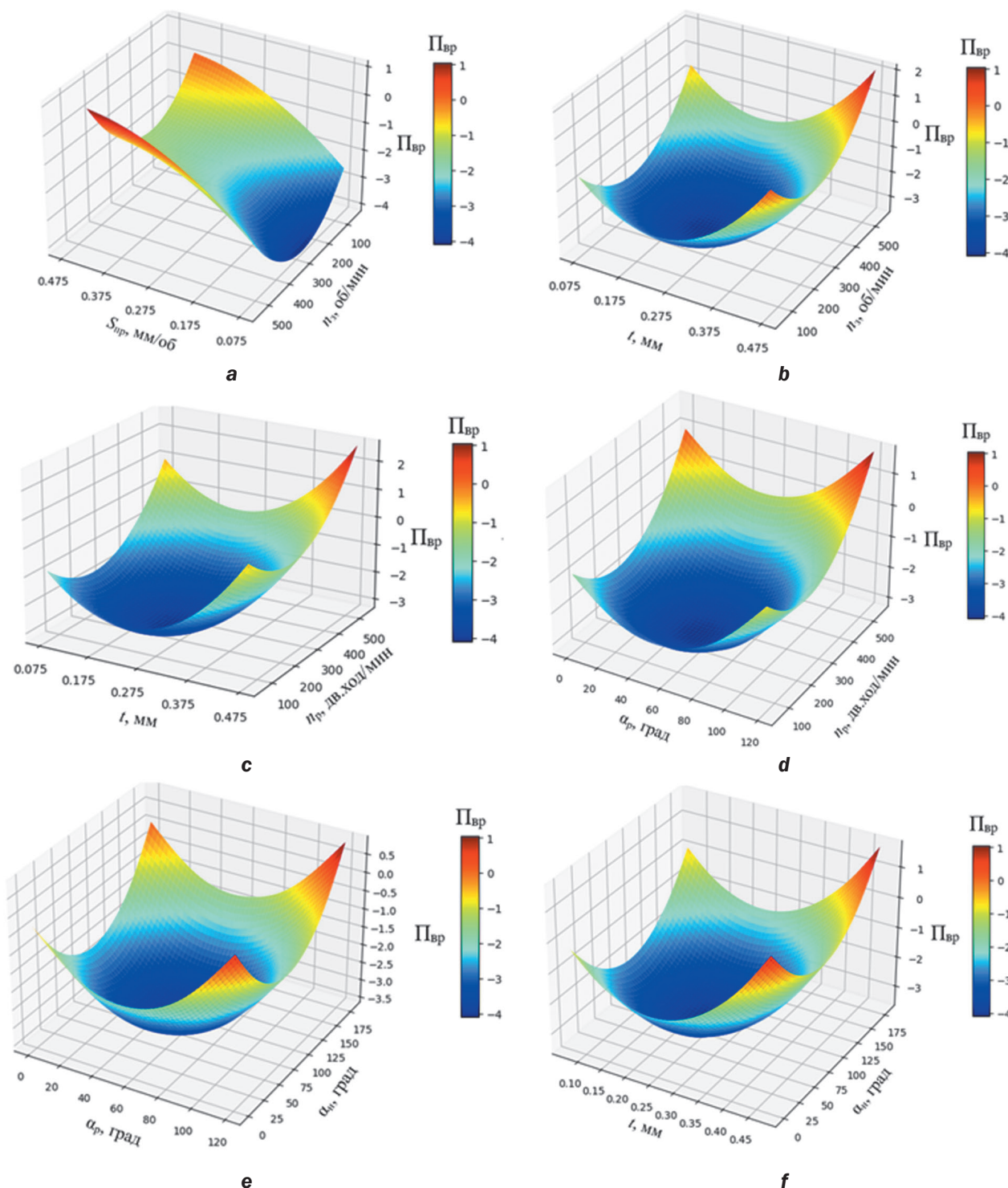


Рис. 6. Графическое представление взаимосвязи между параметрами обработки реверсивным выглаживанием и показателем жесткости схемы временных напряжений упрочняемых деталей при реверсивном выглаживании: а – $S_{пр}$ и n_3 ; б – n_3 и t ; в – t и n_p ; д – n_p и α_p ; е – α_p и α_n ; ф – t и α_n

Fig. 6. Graphical representation of the relationships between the parameters of reverse burnishing and the rigidity index of the temporary stress circuit of the hardened parts during reverse burnishing: а – $S_{пр}$ and n_3 ; б – n_3 and t ; в – t and n_p ; д – n_p and α_p ; е – α_p and α_n ; ф – t and α_n

Согласно результатам, представленным на рис. 6, рациональные параметры упрочнения, обеспечивающие достижение максимальной жесткости схемы временных напряжений (-3,5–4,1), включают следующие диапазоны: продольная подача – 0,07–0,08 мм/об, частота вращения заготовки – 280–300 об/мин, радиальный натяг – 0,25–0,28 мм. При этом реверсивная частота вращения рабочего инструмента (РИ) должна составлять 270–300 дв. ход/мин, начальный угол установки РИ – 90°, а амплитуда угла реверсивного вращения – в пределах ± 55 –60°.

Из рис. 6 следует, что при рациональных режимах упрочнения показатель жесткости схемы временных напряжений достигает наилучшего своего значения, при этом $P_{вр} \approx -4$, а при дальнейшем увеличении, например, радиального натяга, частоты вращения заготовки и реверсивной частоты вращения ролика $P_{вр}$ больше 1 приводит к разрушению поверхности заготовки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате конечно-элементного моделирования процесса реверсивного выглаживания установлено влияние параметров реверсивного выглаживания на показатель жесткости схемы напряженного состояния. Результаты исследования свидетельствуют о существенном влиянии ключевых технологических параметров (t ; $S_{пр}$; n_3 ; α_n ; α_p ; n_p) на динамику формирования максимальной интенсивности временных напряжений и критерия жесткости схемы напряжений в упрочненных деталях.

Установлены рациональные режимы упрочняющей обработки, при которых достигается максимальная жесткость схемы временных напряжений: $S_{пр}$ в диапазоне 0,07–0,08 мм/об; n_3 в диапазоне 280–300 об/мин; t в диапазоне 0,25–0,28 мм; α_n 90°; α_p в диапазоне ± 55 –60° и n_p в диапазоне 270–300 дв.ход/мин. Рациональные режимы упрочнения реверсивным выглаживанием позволяют достичь максимально возможной высокой жесткости схемы напряжений, что приводит к улучшению механических характеристик обрабатываемых деталей. Это открывает возможности для более точного управления механическими свойствами материалов и повышения надежности конструкций. Дальнейшие исследования могут быть направлены на уточнение математических моделей, описывающих процесс реверсивного выглаживания, а также на проведение экспериментальных работ для выявления оптимальных режимов обработки различных материалов.

Список источников

1. Кисленко А.С., Храмцов Р.О. Изменение технического состояния автомобиля в процессе эксплуатации // Научный Альманах. 2020. № 2-2. С. 48–53. EDN: WKQAOC.
2. Марьина Н.Л., Овчинникова Е.В. Исследование характера отказов кривошипно-шатунного механизма высокофорсированного дизеля // Современные материалы, техника и технологии. 2015. № 3. С. 154–161. EDN: VEJBVX.
3. Чибухчан С.С., Чибухчан О.С., Чибухчан Г.С. Повышение механических свойств тонкостенных деталей транс портных средств и горных машин // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2024. № 2. С. 27–33. <https://doi.org/10.31857/S0235711924020043>. EDN: QWINDQ.
4. Нотин И.А., Киселев И.А., Синавчиан С.Н. Влияние метода механической обработки на усталостную прочность деталей машиностроения из дисперсно-упрочненных полимерных композиционных материалов // Научно-технические технологии в машиностроении. 2019. № 6. С. 12–16. https://doi.org/10.30987/article_5ce675a169dde6.03417198. EDN: UVAIRO.
5. Овчинников В.В., Сбитнев А.Г., Поляков Д.А. Влияние размеров литого ядра на свойства точечных соединений алюминиевых сплавов // Технология металлов. 2023. № 10. С. 20–27. <https://doi.org/10.31044/1684-2499-2023-0-10-20-27>. EDN: GXCHOI.
6. Мураткин Г.В., Сарафанова В.А. Правка валов поверхностным пластическим деформированием с упругим изгибом заготовки в процессе обработки // Вестник машиностроения. 2020. № 5. С. 62–66. <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2020-5-62-66>. EDN: XOFABQ.
7. Дин Кай Цзянь. Выбор оптимального способа поверхностного пластического деформирования // Интерактивная наука. 2023. № 7. С. 52–54. <https://doi.org/10.21661/r-560324>. EDN: PAOSTN.
8. Savel'ev A.V., Bobrovskii N.M. Dry machining of machine parts: surface plastic deformation // Russian Engineering Research. 2024. Vol. 44. Iss. 2. P. 250–253. <https://doi.org/10.3103/s1068798x24020230>.

9. Гвоздев А.Е., Кузовлева О.В. Экстремальные эффекты прочности и пластичности в металлических гетерофазных слитковых и порошковых системах и композиционных материалах: монография. Тула: Тульский государственный университет, 2020. 498 с. EDN: USTZWB.
10. Киричек А.В., Баринев С.В., Куканова Н.А. Оценка влияния пластической деформации на коррозионную стойкость сталей // Вестник машиностроения. 2024. Т. 103. № 10. С. 853–858. <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2024-103-10-853-858>. EDN: GUJTNK.
11. Букатый А.С., Букатый С.А. Расчёты деталей на прочность с учётом жёсткости напряжённого состояния // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2022. Т. 21. № 1. С. 34–41. <https://doi.org/10.36652/10.18287/2541-7533-2022-21-1-34-41>.
12. Грушко О.В. Параметр напряженного состояния, учитывающий свойства материала, и его влияние на пластичность // Вестник национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». Серия: Машиностроение. 2012. № 64. С. 220–226.
13. Митрофанова К.С. Влияние поверхностного пластического деформирования мультисегментным роликом на структурно-фазовое состояние и микротвердость образцов из стали 45 // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2022. № 3. С. 4–12. <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2022-3-4-12>. EDN: ZCGGKB.
14. Пат. № 2758713, Российская Федерация, С1, В24В 39/04. Способ поверхностного пластического деформирования наружных поверхностей тел вращения / С.А. Зайдес, Хыу Хай Нгуен; заявитель и правообладатель Иркутский национальный исследовательский технический университет. Заявл. 14.01.2021; опубл. 01.11.2021.
15. Зайдес С.А., Нгуен Хыу Хай. Влияние основных параметров реверсивного поверхностного пластического деформирования на напряженно-деформированное состояние цилиндрических деталей // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 3. С. 7–15. <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2022-3-7-15>. EDN: WLQLFZ.
16. Зайдес С.А., Нгуен Хыу Хай. Влияние реверсивного поверхностного пластического деформирования на изменение зеренной структуры углеродистой стали // Черные металлы. 2023. № 6. С. 61–70. <https://doi.org/10.17580/chm.2023.06.09>. EDN: CJOCDE.
17. Saurabh A., Joshi K., Verma P.C. Load-dependent finite element wear simulation of semi-metallic and ceramic friction materials using ANSYS // Transactions of the Indian Institute of Metals. 2023. Vol. 76. P. 2473–2482. <https://doi.org/10.1007/s12666-023-02917-1>.
18. Biroş M.T., Andó M., Jeganmohan S. Finite element method modeling of additive manufactured compressor wheel // Journal of The Institution of Engineers (India): Series D. 2021. Vol. 102. P. 79–85. <https://doi.org/10.1007/s40033-021-00251-8>.
19. Yu Wen Yan, Qiang Lei. Finite element analysis of finishing mill roll based on ANSYS // Applied Mechanics and Materials. 2013. Vol. 321-324. P. 226–229. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.321-324.226>.
20. Фам Д.Ф. Напряженно-деформированное состояние цилиндрических деталей при поперечной обкатке плоскими инструментами // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2015. Т. 1. № 2. С. 8–17. EDN: VNUJSX.
21. Сивак Р.И., Сивак И.О. Пластичность металлов при сложном нагружении // Вестник национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». Серия: Машиностроение. 2010. № 60. С. 129–132. EDN: VAXVQN.
22. Букатый А.С., Букатый С.А., Сурков О.С., Сараев А.С. Оптимизация конструкции авиационных деталей на основе критерия жёсткости напряжённого состояния // Материалы пула научно-практических конференций (г. Сочи, 23–27 января 2023 г.). Керчь: КГМУ, 2023. С. 319–321. EDN: ROADZE.
23. Митрофанов Ю.П., Гончарова Е.В., Zhou H., Wilde G., Хоник В.А. Релаксация модуля сдвига в металлическом стекле pd40ni40p20 после пластической деформации кручением под давлением // Релаксационные явления в твердых телах: матер. XXIV Междунар. конф. (г. Воронеж, 24–27 сентября 2019 г.). Воронеж: ВГТУ, 2019. С. 40–41. EDN: JKTVOŠ.
24. Тмаркин М.А., Тищенко Э.Э., Шведова А.С. Увеличение жизненного цикла изделий при обработке деталей динамическими методами поверхностного пластического деформирования // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 9. С. 403–408. EDN: RYUJBN.

References

1. Kislenco A.S., Khrantsov R.O. Changing the technical condition of the vehicle during operation. *Nauchnyy Al'manah*. 2020;2-2:48-53. (In Russ.). EDN: WKQAOC.
2. Mar'ina N.L., Ovchinnikova E.V. Studying the failure mode of the crank mechanism of a high-powered diesel engine. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii*. 2015;3:154-161. (In Russ.). EDN: VEJBBX.
3. Chibuhchyan S.S., Chibuhchyan O.S., Chibuhchyan G.S. Improving mechanical properties of thin-walled parts of vehicles and mining machines. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*. 2024;2:27-33. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0235711924020043>. EDN: QWIHDQ.
4. Notin I.A., Kiselev I.A., Sinavchian S.N. Machining impact upon fatigue strength of engineering parts made of dispersion-strengthened composites. *Science intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2019;6:12-16. (In Russ.). https://doi.org/10.30987/article_5ce675a169dde6.03417198. EDN: UVAIRO.
5. Ovchinnikov V.V., Sbitnev A.G., Polyakov D.A. Influence of cast core sizes on properties of point joints of aluminum alloys. *Technology of Metals*. 2023;10:20-27. (In Russ.). <https://doi.org/10.31044/1684-2499-2023-0-10-20-27>. EDN: GXCHOI.

6. Muratkin G.V., Sarafanova V.A. Straightening of shafts by surface plastic deformation with elastic flexure of the workpiece. *Russian Engineering Research*. 2020;5:62-66. (In Russ.). <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2020-5-62-66>. EDN: XOFABQ.
7. Ding Kai Jian. Methodology for choosing an optimal technique for surface plastic forming. *Interactive Science*. 2023;7:52-54. (In Russ.). <https://doi.org/10.21661/r-560324>. EDN: PAOSTN.
8. Savel'ev A.V., Bobrovskii N.M. Dry machining of machine parts: surface plastic deformation. *Russian Engineering Research*. 2024;44(2):250-253. <https://doi.org/10.3103/s1068798x24020230>.
9. Gvozdev A.E., Kuzovleva O.V. *Extreme effects of strength and ductility in metallic heterophase ingot and powder systems and composite materials*. Tula: Tula State University; 2020, 498 p. EDN: USTZWB.
10. Kirichek A.V., Barinov S.V., Kukanova N.A. Evaluation of the influence of plastic deformation on the corrosion resistance of steels. *Russian Engineering Research*. 2024;103(10):853-858. (In Russ.). <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2024-103-10-853-858>. EDN: GUJTNK.
11. Bukatyi A.S., Bukatyi S.A. Strength calculation of parts based on stress state stiffness. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2022;21(1):34-41. (In Russ.). <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2022-21-1-34-41>.
12. Grushko O.V. Stress state parameter taking into account material properties and its effect on plasticity. *Vestnik nacional'nogo tekhnicheskogo universiteta Ukrainy "Kievskij politekhnicheskij institute". Seriya: Mashinostroenie*. 2012;64:220-226. (In Russ.).
13. Mitrofanova K.S. The effect of surface plastic deformation by a multiradius roller on the structural phase state and microhardness of steel 45 samples. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2022;3:4-12. (In Russ.). <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2022-3-4-12>. EDN: ZCGGKB.
14. Zaides S.A., Nguen Hyu Haj. *The method of surface plastic deformation of the outer surfaces of solids of revolution*. Patent RF, no. 2758713; 2021. (In Russ.).
15. Zaides S.A., Nguen Hyu Haj. The influence of the main parameters of the reversible surface plastic deformation on the stress-strain state of cylindrical parts. *Systems. Technologies*. 2022;3:7-15. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2022-3-7-15>. EDN: WLQLFZ.
16. Zaides S.A., Nguen Hyu Haj. Influence of reversible surface plastic deformation on changes in the grain structure of carbon steel. *Chernye metally*. 2023;6:61-70. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/chm.2023.06.09>. EDN: CJOCDE.
17. Saurabh A., Joshi K., Verma P.C. Load-dependent finite element wear simulation of semi-metallic and ceramic friction materials using ANSYS. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2023;76:2473-2482. <https://doi.org/10.1007/s12666-023-02917-1>.
18. Birosz M.T., Andó M., Jeganmohan S. Finite element method modeling of additive manufactured compressor wheel. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*. 2021;102:79-85. <https://doi.org/10.1007/s40033-021-00251-8>.
19. Yu Wen Yan, Qiang Lei. Finite element analysis of finishing mill roll based on ANSYS. *Applied Mechanics and Materials*. 2013;321-324:226-229. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.321-324.226>.
20. Pham D.Ph. Stressedly-deformed state of cylindrical parts at transverse rolling by flat tool. *Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii*. 2015;1(2):8-17. (In Russ.). EDN: VNUJSX.
21. Sivak R.I., Sivak I.O. Metal plasticity under complex loading. *Vestnik nacional'nogo tekhnicheskogo universiteta Ukrainy "Kievskij politekhnicheskij institute". Seriya: Mashinostroenie*. 2010;60:129-132. (In Russ.). EDN: VAXVQN.
22. Bukatyj A.S., Bukatyj S.A., Surkov O.S., Saraev A.S. Optimization of aircraft part design based on stress state stiffness criterion. In: *Materialy pula nauchno-prakticheskikh konferencij = Proceedings of the pool of scientific and practical conferences*. 23–27 January 2023, Sochi. Kerch': Kerch State Maritime Technological University; 2023, p. 319-321. (In Russ.). EDN: ROADZE.
23. Mitrofanov Yu.P., Goncharova E.V., Zhou H., Wilde G., Khonik V.A. Relaxation of the shear modulus in metallic glass pd40ni40p20 after plastic deformation by torsion under pressure. In: *Relaksacionnye yavleniya v tverdyh telah: materialy XXIV Mezhdunarodnoj konferencii = Relaxation phenomena in solids: proceedings of the 24th International conference*. 24–27 September 2019, Voronezh. Voronezh: Voronezh State Technical University; 2019, p. 40-41. (In Russ.). EDN: JKTVOs.
24. Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Shvedova A.S. Increase in the life cycle of products when processing parts by dynamic methods of surface plastic deformation. *Automation. Modern technologies*. 2018;72(9):403-408. (In Russ.). EDN: RYUJBN.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Нгуен Хью Хай,

к.т.н., преподаватель,
Офицерское училище Военно-Воздушных Сил,
57163, г. Нячанг, ул. Бьетхы, 3, Вьетнам
✉ nquan6799@gmail.com
orcid.org/0000-0001-7909-385X

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Huu Hai Nguyen,

Cand. Sci. (Eng.), Lecturer,
Air Force Officer College,
3 Biet Thu St., Nha Trang 57163, Viet Nam
✉ nquan6799@gmail.com
orcid.org/0000-0001-7909-385X

Зайдес Семен Азикович,
д.т.н., профессор,
профессор кафедры материаловедения,
сварочных и аддитивных технологий,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
zsa@istu.edu
orcid.org/0000-0001-9416-7749

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, Russia
zsa@istu.edu
orcid.org/0000-0001-9416-7749

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 10.01.2025 г.; одобрена после рецензирования 15.02.2025 г.; принята к публикации 26.04.2025 г.

Information about the article

The article was submitted 10.01.2025; approved after reviewing 15.02.2025; accepted for publication 26.04.2025.



Повышение точности обработки деталей типа «полый цилиндр» на основе превентивной компенсации погрешностей износа инструмента

В.Е. Овсянников¹, Р.Ю. Некрасов², С.С. Чуйков³, Е.М. Кузнецова⁴✉

¹⁻³Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

⁴Курганский государственный университет, Курган, Россия

Резюме. Цель – повышение точности чистового растачивания деталей типа «полый цилиндр» на основе использования превентивных компенсаций износа режущего инструмента. В качестве объекта исследования рассматриваются детали типа «полый цилиндр» на примере втулок цилиндров буровых насосов. Рассматривается операция окончательной обработки центрального отверстия. Обработка производится на токарном станке с числовым программным управлением. В работе предлагается подход, заключающийся в том, что при изготовлении пробной партии изделий осуществляется мониторинг состояния режущей кромки инструмента в динамике. При этом режущее лезвие описывается в виде набора точек, которые в дальнейшем аппроксимируют контур режущей кромки. Учитывая, что характер изнашивания каждой отдельно взятой пластины является случайным, в работе используется подход искусственного интеллекта для решения задачи прогнозирования. Разработана нейро-нечеткая модель, которая описывает режущее лезвие в динамике изнашивания. В модели имеется база знаний, которая пополняется на основе результатов мониторинга формы режущего лезвия. Также модель имеет логический блок, содержащий набор условий, которые позволяют выдавать результаты моделирования с требуемой точностью. Тестирование разработанной модели показывает, что погрешность описания контуров режущего лезвия не превышает 8%. На основе вычисления описаний контура лезвия производится вычисление коррекций траекторий движения режущего инструмента, которые позволяют компенсировать возникающий износ пластины. В результате исследований эффективности полученных решений было установлено, что возможно увеличить эффективность использования инструмента (по критерию стойкости) на 35–45%. Кроме того, созданная нейро-нечеткая модель может быть интегрирована в экспертную систему, которая позволяет снизить риски внезапного отказа режущего инструмента, что особенно важно в случае изготовления деталей гидравлических машин.

Ключевые слова: полый цилиндр, стойкость, растачивание, модель, мониторинг, коррекции

Для цитирования: Овсянников В.Е., Некрасов Р.Ю., Чуйков С.С., Кузнецова Е.М. Повышение точности обработки деталей типа «полый цилиндр» на основе превентивной компенсации погрешностей износа инструмента // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 2. С. 184–193. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-2-184-193>. EDN: MOQKFJ.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Improved machining accuracy of hollow cylinder components based on preventive compensation for tool wear errors

Viktor E. Ovsyannikov¹, Roman Yu. Nekrasov²,
Sergey S. Chuikov³, Elena M. Kuznetsova⁴✉

¹⁻³Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

⁴Kurgan State University, Kurgan, Russia

Abstract. Objective – improvement of the precision of finish reaming of hollow cylinder type components by using preventive compensation for cutting tool wear. The study focuses on hollow cylinder type components, exemplified by the liners of drilling pump cylinders, where the finish machining of the central bore is studied. The machining is performed on a numerically controlled lathe. The proposed approach involves dynamic monitoring of the cutting-edge condition during the production of a test batch. The cutting blade is described as a set of points that subsequently approximate the contour of the cutting edge. Since the wear pattern of each individual insert is random, the study uses an artificial intelligence approach to solve the prediction problem. A neuro-fuzzy model was developed to de-

scribe the cutting edge during wear. The model includes a knowledge base that is updated based on the monitoring results of the cutting edge shape. The model also includes a logical block containing a set of conditions that enable the simulation results to be produced with the required accuracy. Testing of the developed model shows that the error in describing the cutting edge contours does not exceed 8%. On the basis of the calculated descriptions of the blade contour, corrections to the cutting tool trajectories are calculated, which allow compensation for the wear of the cutting plate. Research into the effectiveness of the solutions obtained has shown that it is possible to increase tool efficiency (in terms of tool life) by 35–45%. In addition, the developed neuro-fuzzy model can be integrated into an expert system that helps to reduce the risk of sudden cutting tool failure. This is particularly important in the manufacture of hydraulic machine components.

Keywords: hollow cylinder, cutting-tool life, boring, model, monitoring, corrections

For citation: Ovsyannikov V.E., Nekrasov R.Yu., Chuikov S.S., Kuznetsova E.M. Improved machining accuracy of hollow cylinder components based on preventive compensation for tool wear errors. *iPolytech Journal*. 2025;29(2):184-193. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-2-184-193>. EDN: MOQKFJ.

ВВЕДЕНИЕ

В гидравлических машинах разного назначения одним из наиболее ответственных элементов, который определяет работоспособность в целом, является пара «поршень-цилиндр» [1, 2]. Не являются исключением в этом отношении и буровые насосы. Отличительной характеристикой цилиндрических узлов для машин данного класса является то, что они имеют довольно большую длину и очень часто изготавливаются сборными [3, 4]. Втулка выполняется в виде сборочной единицы, наружная часть (устанавливаемая в корпусе) является стальной, а внутренняя – чугуновой [5, 6]. Такая комбинация позволяет обеспечить сопротивление воздействию абразивной среды, которая содержится в буровом растворе. Технологической операцией окончательной обработки центрального отверстия втулки является чистовое растачивание. Учитывая малую долговечность и большую потребность в запасных частях, существует необходимость изготовления данных изделий на станках с числовым программным управлением.

СЛОЖНОСТИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ

Существенной проблемой, которая возникает при изготовлении деталей, является износ режущего инструмента, что, в свою очередь, требует внесения коррекций. Геометрическая интерпретация данного процесса приведена на рис. 1.

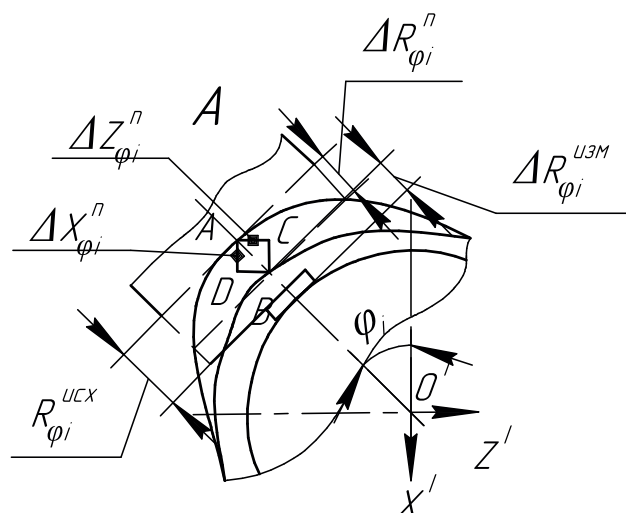


Рис. 1. Геометрическая интерпретация процесса изменения формы инструмента [7]

Fig. 1. Geometric interpretation of the tool reshaping process [7]

В случае изготовления детали в условиях использования станков с ручным управлением проблема учета изменения формы режущего лезвия по мере изнашивания решается за счет настройки станка, которая выполняется по результатам выполнения обмеров детали [7–9]. Однако при изготовлении цилиндрических втулок буровых насосов с использованием оборудования с числовым программным управлением имеется необходимость выполнения данного процесса в автоматизированном режиме.

В ряде исследований [10–15] предлагается оценивать состояние режущего инструмента в процессе обработки с использованием косвенных методов. В качестве информационного признака предлагается использовать силы резания, температуру или характеристики вибраций элементов технологической системы. К недостаткам данных подходов можно отнести то, что их внедрение требует внесения изменений в конструкцию технологической системы, установки датчиков и т.д.

Также существует проблема внезапных отказов режущего инструмента [16, 17]. Данная сложность актуальна при изготовлении цилиндрических узлов буровых насосов, т.к. поломка инструмента в процессе обработки приведет к браку всего узла. Ситуация усугубляется тем, что характер изменения формы режущего лезвия и потери его работоспособности случайный. Граница стойкости инструмента нечеткая (рис. 2).

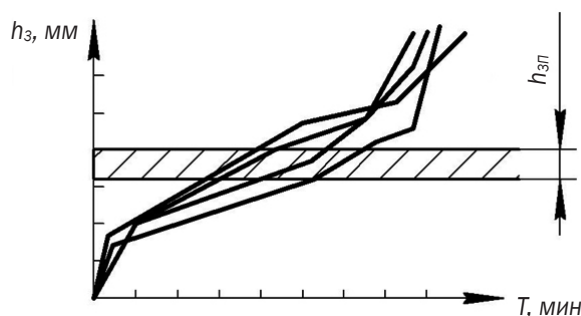


Рис. 2. Нечеткая граница стойкости режущего инструмента (T , мин) в зависимости от фаски износа по задней поверхности (h_z , мм), h_{zp} – предельное значение фаски износа (соответствует зоне катастрофического износа), мм [18]

Fig. 2. Fuzzy limit of the cutting tool life (T , min), depending on the wear chamfer on the rear surface (h_z , mm), h_{zp} is the limit value of the wear chamfer (corresponds to the zone of catastrophic wear), mm [18]

Для того, чтобы корректно учитывать указанный выше характер процесса, целесообразно использовать аппарат нечеткой логики [18–20]. Затем на основе нечеткой логики разработать модель оценки риска выхода инструмента из строя.

Обучение нейронных сетей целесообразно производить на основе данных, полученных в ходе предварительной настройки станка. Это позволит в дальнейшем реализовать превентивную компенсацию погрешностей. Достоинством указанного подхода является то, что отпадает необходимость в использовании дополнительных датчиков и других устройств контроля.

Цель данной работы – повышение точности чистового растачивания деталей типа полого цилиндра на основе использования превентивных компенсаций износа режущего инструмента. В качестве объекта исследования рассматриваются детали типа полого цилиндра на примере втулок цилиндров буровых насосов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе исследований измерение геометрии режущего лезвия осуществлялось с использованием оптического микроскопа (пресеттера). На рис. 3 приведен пример снимка режущей пластины.

По результатам измерений формировались массивы данных, которые содержат данные по смещению точек контура лезвия по осям x и z . При этом имеется возможность вычислить величину смещения точек по формулам [19, 20]:

$$\Delta x_{\varphi_i}^n = \Delta R_{\varphi_i}^n \cdot \cos \varphi_i; \quad (1)$$

$$\Delta z_{\varphi_i}^n = \Delta R_{\varphi_i}^n \cdot \sin \varphi_i, \quad (2)$$

где $\Delta R_{\varphi_i}^n$ – начальное положение измеряемой точки контура; φ – угол измеряемого сечения, °.

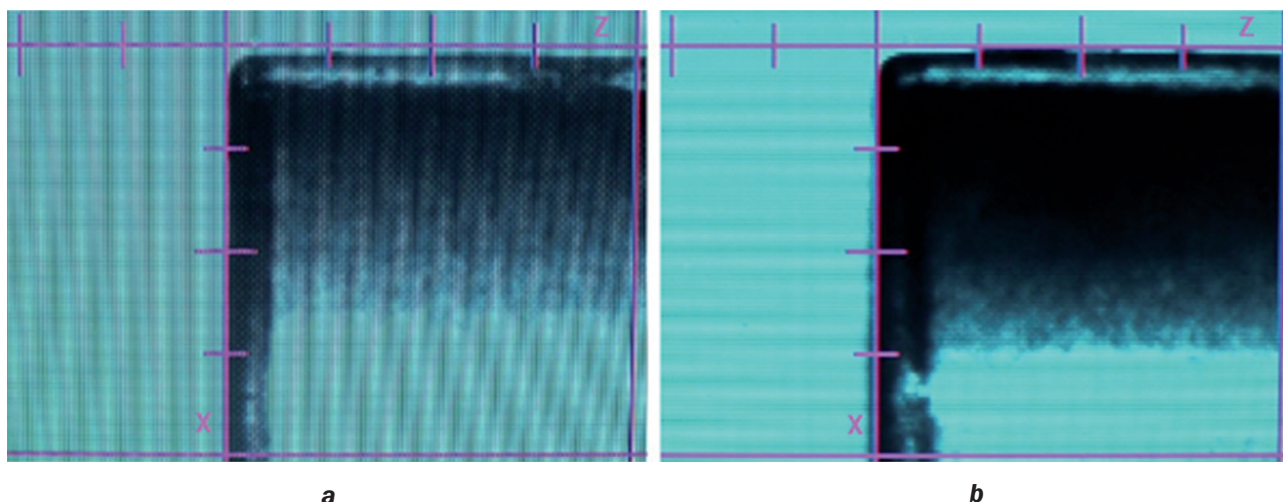


Рис. 3. Пример снимка режущей пластины: а – первое измерение, второй проход, фаска износа по задней поверхности 0,095 мм, $T_0 = 1,85$ мин, $L_{рез} = 222,18$; б – шестое измерение, четырнадцатый проход, фаска износа по задней поверхности 0,161 мм, $T_0 = 10,14$ мин, $L_{рез} = 1217,17$ м

Fig. 3. Example of a cutting insert image: а – first measurement, second pass, wear chamfer on the rear surface is 0.095 mm, $T_0 = 1.85$ min, $L_{рез} = 222.18$; б – sixth measurement, fourteenth pass, wear chamfer on the rear surface is 0.161 mm, $T_0 = 10.14$ min, $L_{рез} = 1217.17$ m

Величина смещения определяется как разница между исходным контуром и контуром, который образуется в результате n -го измерения:

$$\Delta R_{\varphi_i}^n = R_{\varphi_i}^{ucx} - R_{\varphi_i}^n. \quad (3)$$

Учитывая тот факт, что характер изменения геометрии лезвия нечеткий, данные, полученные по формулам (1)–(3), загружались в нейро-нечеткую модель.

По результатам измерений и последующей аппроксимации посредством нейро-нечетких моделей имеется возможность вычисления величины коррекции через величину F_{line}^n [21]:

$$\begin{aligned} F_{Line}^n(\varphi, R_{\varphi_i}^n) = & \prod_{i=1}^{p-1} \left[\frac{\varphi - \varphi_{[i,2j]}}{\varphi_{[0,2j]} - \varphi_{[i,2j]}} \right] \times R_{\varphi_i[0,2j]}^n + \\ & + \sum_{k=1}^{p-2} R_{\varphi_i[k,2j]}^n \times \prod_{i=0}^{k-1} \left[\frac{\varphi - \varphi_{[i,2j]}}{\varphi_{[k,2j]} - \varphi_{[i,2j]}} \right] \times \prod_{i=k+1}^{p-1} \left[\frac{\varphi - \varphi_{[i,2j]}}{\varphi_{[k,2j]} - \varphi_{[i,2j]}} \right] + \\ & + \prod_{i=0}^{p-2} \left[\frac{\varphi - \varphi_{[i,2j]}}{\varphi_{[p-1,2j]} - \varphi_{[i,2j]}} \right] \times R_{\varphi_i[p-1,2j]}^n, \end{aligned} \quad (4)$$

где j – номер линии измерения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Пример вектора измерений состояния кромки режущего инструмента приведен ниже:

$$\Delta R_{\varphi_i}^1 = \begin{cases} 0,843; 1,085; 1,264; 1,374; 1,411; 1,376; 1,268; 1,091; 0,851; 0,555; \\ 0,827; 1,064; 1,239; 1,346; 1,383; 1,348; 1,243; 1,069; 0,834; 0,539; \\ 0,017; 0,022; 0,025; 0,028; 0,0278; 0,025; 0,022; 0,017; 0,016... \end{cases} \quad (5)$$

На рис. 4 представлена структура и результаты тестирования нейро-нечеткой модели определения коррекций на изменение геометрии режущего лезвия при обработке цилиндрических узлов буровых насосов.

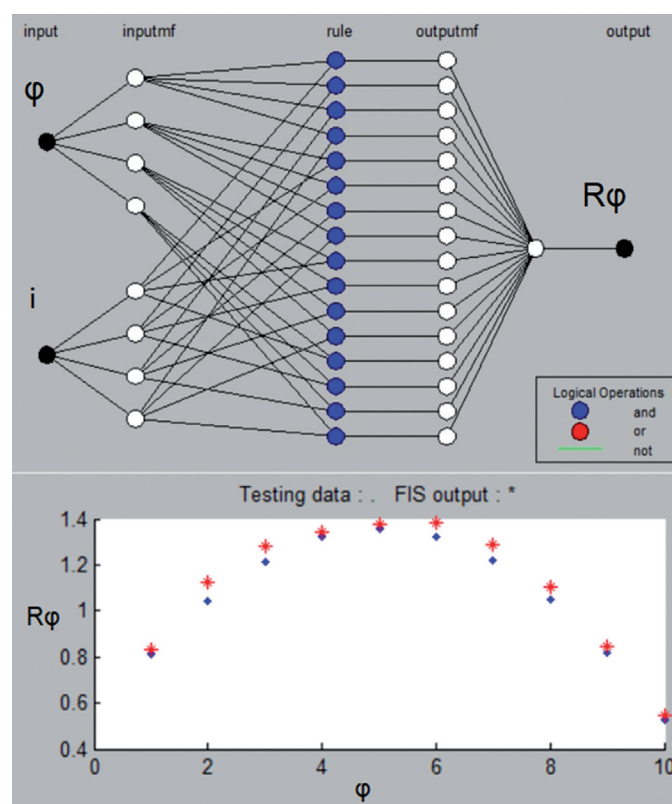


Рис. 4. Структура и результаты тестирования нейро-нечеткой модели определения коррекций

Fig. 4. Structure and results of testing a neuro-fuzzy model for determining corrections

В качестве функций принадлежности были использованы термы трапецеидального вида. Применялся комбинированный метод обучения нейронных сетей. В результате обучения и последующего тестирования модели было установлено, что погрешность полученных результатов не превышает 8%. Таким образом, разработанную модель возможно использовать для решения поставленной задачи.

Результаты, получаемые с использованием модели (см. рис. 4), были подставлены в выражение (4) для вычисления величины коррекций. При этом полученные данные сопоставлялись с результатами испытаний на стойкость. Были установлены диапазоны значений, которые соответствуют приработке, нормальному и катастрофическому износу инструмента. С учетом того, что зависимость стойкости имеет нечеткий характер (см. рис. 2), целесообразно рассматривать риск выхода из строя инструмента. Определение величины риска осуществлялось при помощи функции нечеткой логики.

Входными переменными в нашем случае являются величина коррекции F_n^{line} и значение числа проходов инструмента i . В качестве выходной переменной можно рассматривать риск поломки пластины Rpl . Уровень риска определяется следующими градациями:

- «низкий уровень» – когда инструмент вошел в зону нормального износа;
 - «приемлемый уровень» – инструмент находится в зоне нормального износа;
 - «высокий уровень» – инструмент подходит к зоне катастрофического изнашивания;
 - «критический риск» – вероятность отказа инструмента выходит за допустимые границы.
- Внешний вид функции нечеткой логики для указанного случая приведен на рис. 5.

Для подтверждения состоятельности полученных результатов было проведено тестирование разработанной системы. Обрабатывались образцы с диаметром отверстия 50 мм и длиной 100 мм. Коррекции вносились в виде смещения контура режущей кромки

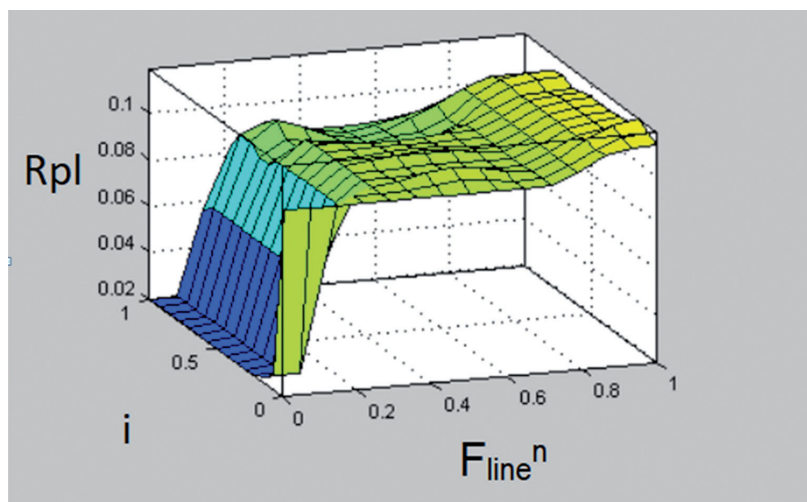


Рис. 5. Функция нечеткой логики для оценки риска отказа инструмента
Fig. 5. Fuzzy logic function for tool failure risk assessment

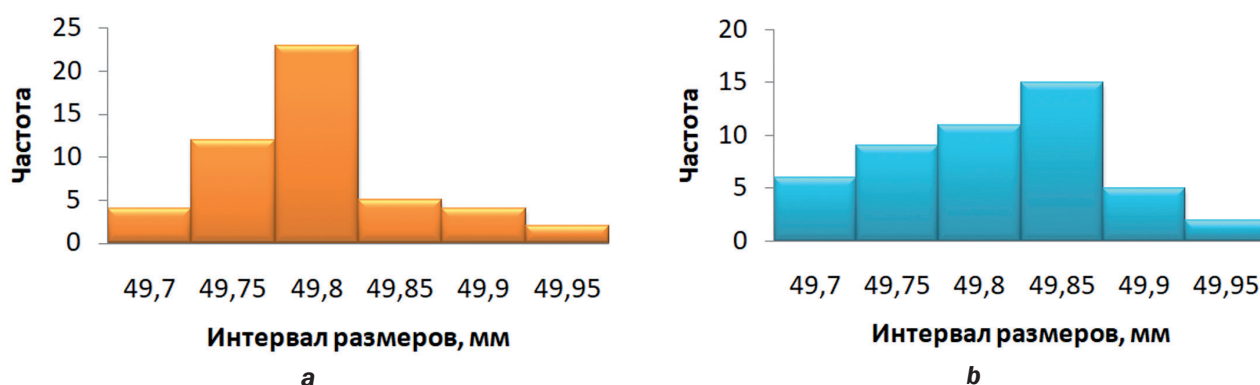


Рис. 6. Результаты опытной обработки деталей: а – с внесением коррекций; б – без внесения коррекций
Fig. 6. Results of part experimental machining: a – with corrections; b – without corrections

с использованием массивов вида (5) на основе вычислений по модели, представленной на рис. 4.

Было выполнено две серии опытов для сравнения полученных результатов. В первом случае обработка производилась с использованием коррекций на положение режущей кромки инструмента в зависимости от износа (превентивной компенсации) погрешностей. Во втором случае коррекция не производилась.

На рис. 6 приведены гистограммы распределения размеров деталей в результате обработки с использованием системы внесения коррекций (рис. 6 а) и без внесения коррекций (рис. 6 б).

Выше была произведена предварительная обработка результатов исследований в области повышения точности при обработке на токарном станке с ЧПУ, что позволяет перейти к формулированию заключительных положений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученная модель вычисления коррекции на изменение формы режущего лезвия при растачивании цилиндрических втулок буровых насосов позволяет вносить изменения в траекторию движения режущего инструмента. Это дает возможность превентивно устранять возникающие погрешности и увеличить эффективность эксплуатации инструмента, производительность и качество обработанной поверхности.

В результате тестирования нейро-нечеткой модели было установлено, что погрешность не превышает 8%. На основе обработки результатов опытных испытаний (см. рис. 6)

и измерений кромки режущего инструмента с использованием оптического микроскопа (см. рис. 3) было установлено, что в результате использования превентивной коррекции возможно увеличить среднюю точность обработки на 1–2 качества (с 11 до 9), производительность – до 20% (по общему количеству удаленного материала режущей кромкой до катастрофического износа) и эффективность эксплуатации инструмента – до 25% (для пластины с четырьмя гранями).

Список источников

1. Гасанов Б.Г., Сиротин П.В., Исмаилов М.А., Харченко Е.В. Повышение ударно-абразивной износостойкости деталей клапана бурового насоса // Научные исследования: итоги и перспективы. 2023. Т. 4. № 1. С. 39–44. <https://doi.org/10.21822/2713-220X-2023-4-1-39-44>. EDN: LCBCWX.
2. Иванов Е.А., Иванова О.В., Грицына Н.И. Изготовление биметаллических подшипников скольжения для буровых насосов в условиях ТОО «Венчурная фирма «Поиск» // Вестник Северо-Казахстанского университета им. Манаша Козыбаева. 2022. № 3. С. 149–158. <https://doi.org/10.54596/2309-6977-2022-3-149-158>. EDN: YLGEIK.
3. Пат. № 24529, Российская Федерация, U1, F16J, 1/00. Поршень бурового насоса / патентообладатели: С.Б. Юрочкин, А.И. Павлов, Л.В. Кисельникова. № 2001133902/20. Заявл. 13.12.2001; опубл. 10.08.2002. EDN: CQANWN.
4. Пат. № 117553, Российская Федерация, U1, 15/06, F16K, 1/36. Клапан бурового насоса / Д.О. Макушкин, А.Ф. Мурашко, А.В. Давыдов; заявитель и патентообладатель Сибирский федеральный университет. № 2010145971/06. Заявл. 10.11.2010; опубл. 27.06.2012. EDN: MOGFQR.
5. Пат. № 2770342, Российская Федерация, C1, F04B, 47/00. Насос буровой трехпоршневой одностороннего действия / Р.Ф. Файрушин; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Иж-Дрил Холдинг». № 2021119163. Заявл. 29.06.2021; опубл. 15.04.2022. EDN: EELKXO.
6. Пат. № 30383, Российская Федерация, U1, E21B, 21/06, 21/10. Насос для буровой установки / заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Уральский машиностроительный завод». № 2003104460/20. Заявл. 19.02.2003; опубл. 27.06.2003. EDN: NIXYSO.
7. 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.
8. Kotlyarov V.P., Maslakov A.P., Tolstoles A.A. Digital modelling of production engineering for metalworking machine shops // Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS. 2019. Vol. 31. No. 3. P. 85–98. [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2019-31\(3\)-8](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2019-31(3)-8). EDN: LSIJGC.
9. Пухов А.С. Организационно-технические и экологические принципы создания автоматизированных систем // Безопасность жизнедеятельности: проблемы и решения – 2017: матер. Междунар. науч.-практ. конф. (с. Лесниково, 25–26 мая 2017 г.). Лесниково: Курганская гос. сельскохозяйств. акад. им. Т.С. Мальцева, 2017. С. 336–342. EDN: YQXKKK.
10. Карлина Ю.И. Интеграция этапов подготовки производства высокоточных малогабаритных деталей на станках с числовым программным управлением // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2021. № 1. С. 17–23. [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2021.1\(69\).17-23](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2021.1(69).17-23). EDN: WQHCPV.
11. Artamonov E.V., Tveryakov A.M., Shtin A.S. Investigation of electromagnetic properties of tool hard alloys under the influence of high temperatures // Materials Research Proceedings (Temryuk, 6–10 September 2021). Temryuk, 2022. P. 323–328. <https://doi.org/10.21741/97816444901755-57>. EDN: ZBJDOV.
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 & Technologies. 2023. № 3. С. 43–51. <https://doi.org/10.18323/2782-4039-2023-3-65-4>.
13. 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.
14. 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.
15. Безъязычный В.Ф., Паламарь И.Н. Современные аспекты автоматизации научных исследований качества поверхности деталей машин с использованием методов машинного обучения // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2021. № 7. С. 12–19. <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2021-7-12-19>. EDN: VIPEMD.
16. Artamonov E., Vasilega N., Yadygin A. Analysis of factors affecting operability to assess risks and opportunities in the operation of built-up cutting tools // Key Engineering Materials. 2022. Vol. 910. P. 220–225. <https://doi.org/10.4028/p-wu7wdy>.

17. 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.
18. Ovsyannikov V., Nekrasov R., Putilova U., Il'yaschenko D., Verkhoturova E. On the issue of automatic form accuracy during processing on CNC machines // Revista Facultad de Ingenieria. 2022. No. 103. P. 88–95. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20201111>. EDN: HCVDFL.
19. Stupnytsky V., Dragašius E., Baskutis S., Xianning Sh. Modeling and simulation of machined surface layer microgeometry parameters // Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science. 2022. Vol. 8. No. 1. P. 1–11. <https://doi.org/10.23939/ujmems2022.01.001>. EDN: FGAHMG.
20. Proskuryakov N.A., Nekrasov R.Y., Starikov A.I., Solov'ev I.V., Barbyshev B.V., Tempel' Y.A. Fuzzy controllers in the adaptive control system of a CNC lathe // Russian Engineering Research. 2018. Vol. 38. No. 3. P. 220–222. <https://doi.org/10.3103/S1068798X18030188>. EDN: XMQTZ.
21. Темпель Ю.А., Некрасов Р.Ю., Темпель О.А. Моделирование влияния сил резания на геометрию детали и алгоритм автоматизации коррекции управляющей программы // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 4. С. 533–537. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-4-533-538>. EDN: JKPXBZ.

References

1. Gasanov B.G., Sirotin P.V., Ismailov M.A., Harchenko E.V. Improving the shock-abrasive wear resistance of mud pump valve parts. *Scientific Research: Results and Prospects*. 2023;4(1):39-44. (In Russ.). <https://doi.org/10.21822/2713-220X-2023-4-1-39-44>. EDN: LCBCWX.
2. Иванов Е.А., Иванова О.В., Грицына Н.И. Production of bimetallic sliding bearings for drilling pumps in conditions venture firm Poisk LLP. *Vestnik of M. Kozymbayev North Kazakhstan University*. 2022;3:149-158. (In Russ.). <https://doi.org/10.54596/2309-6977-2022-3-149-158>. EDN: YLGEIK.
3. Yurochkin S.B., Pavlov A.I., Kisel'nikova L.V. *Drilling pump piston*. Patent RF, no. 24529; 2002. (In Russ.). EDN: CQANWN.
4. Makushkin D.O., Murashko A.F., Davydov A.V. *Mud pump valve*. Patent RF, no. 117553; 2012. (In Russ.). EDN: MOGFQR.
5. Fairushin R.F. *Single-acting three-piston drilling pump*. Patent RF, no. 2770342; 2022. (In Russ.). EDN: EELKXO.
6. Urals Machine-Building Plant. *Pump for a drilling rig*. Patent RF, no. 30383; 2003. (In Russ.). EDN: NIXYSO.
7. Smirnova E.N., Krylov E.G. Issues of technological process computer-aided design based on technological heredity. *Bulletin of the Technological University*. 2011;13:100-102. (In Russ.). EDN: ONCNMF.
8. 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.
9. Pukhov A.S. Organizational, technical and environmental principles for automated system creation. In: *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti: problemy i resheniya – 2017: materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Life Safety: Problems and Solutions - 2017: Proceedings of the International scientific and practical conference*. 25–26 May 2017, Lesnikovo. Lesnikovo: Kurgan State Agricultural Academy named after T.S. Maltsev; 2017, 336-342. (In Russ.). EDN: YQQXKK.
10. Karlina Yu.I. Integration of stages of preparation of production of high-precision small parts on CNC machines. *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2021;1:17-23. (In Russ.). [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2021.1\(69\).17-23](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2021.1(69).17-23). EDN: WQHCPV.
11. Artamonov E.V., Tveryakov A.M., Shtin A.S. Investigation of electromagnetic properties of tool hard alloys under the influence of high temperatures. In: *Materials Research Proceedings*. 6–10 September 2021, Temryuk. Temryuk; 2022, p. 323-328. <https://doi.org/10.21741/9781644901755-57>. EDN: ZBJDOB.
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 & Technologies*. 2023;3:43-51. (In Russ.). <https://doi.org/10.18323/2782-4039-2023-3-65-4>.
13. 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.
14. 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.
15. 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.

16. Artamonov E., Vasilega N., Yadygin A. Analysis of factors affecting operability to assess risks and opportunities in the operation of built-up cutting tools. *Key Engineering Materials*. 2022;910:220-225. <https://doi.org/10.4028/p-wu7wdy>.
17. 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.
18. 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.
19. Stupnytsky V., Dragašius E., Baskutis S., Xianning Sh. Modeling and simulation of machined surface layer microgeometry parameters. *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*. 2022;8(1):1-11. (In Russ.). <https://doi.org/10.23939/ujmems2022.01.001>. EDN: FGAHMG.
20. Proskuryakov N.A., Nekrasov R.Y., Starikov A.I., Solov'ev I.V., Barbyshev B.V., Tempel' Y.A. Fuzzy controllers in the adaptive control system of a CNC lathe. *Russian Engineering Research*. 2018;38(3):220-222. <https://doi.org/10.3103/S1068798X18030188>. EDN: XMQTZ.
21. Tempel Yu.A., Nekrasov R.Yu., Tempel O.A. Simulation of the influence of cutting forces on the part geometry and algorithm for automation of correction of the control program. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Technical Sciences*. 2022;4:533-537. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-4-533-538>. EDN: JKPXBZ.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Овсянников Виктор Евгеньевич,

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

Некрасов Роман Юрьевич,

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

Чуйков Сергей Сергеевич,

к.т.н., доцент,
заведующий кафедрой металлорежущих станков,
Тюменский индустриальный университет,
625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38, Россия
chuiikovss@tyuiu.ru
orcid.org/0000-0002-1823-8255

Кузнецова Елена Михайловна,

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Viktor E. Ovsyannikov,

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

Roman Yu. Nekrasov,

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

Sergey S. Chuikov

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Head of the Department of Metal-Cutting
Machines, Industrial University of Tyumen,
38 Volodarsky St., Tyumen 625000, Russia
chuiikovss@tyuiu.ru
orcid.org/0000-0002-1823-8255

Elena M. Kuznetsova,

Cand. Sci. (Eng.),
Senior Lecturer of the Department of
Industrial Process Automation,
Kurgan State University,
63/4 Sovetskaya St., Kurgan 640669, Russia
lenkuz@bk.ru
<https://orcid.org/0009-0002-0057-8550>

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.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 20.03.2025 г.; одобрена после рецензирования 05.05.2025 г.; принята к публикации 10.06.2025 г.

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 20.03.2025; approved after reviewing 05.05.2025; accepted for publication 10.06.2025.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Научная статья

УДК 62-135.1

EDN: UQVSFA

DOI: 10.21285/1814-3520-2025-2-194-203



Разработка математических моделей, численных методов и программного обеспечения для анализа долговечности радиальных роторов турбомашин с расстройкой параметров

О.В. Репецкий¹✉¹Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского, Иркутск, Россия

Резюме. Цель – развитие математических моделей и численно-аналитических методов анализа статических напряжений, свободных и вынужденных колебаний, а также долговечности энергетических и транспортных турбомашин радиального типа с учетом преднамеренной расстройки геометрических, массовых и механических параметров. В качестве базового метода исследования выбран метод конечных элементов. В настоящей работе использованы теории упругости и колебаний, механика деформируемого твердого тела и газовая динамика. Применены матричные вычисления и методы решения алгебраических систем уравнений. Развита математическая модель и численные методы для прогнозирования ресурсных характеристик рабочих колес турбомашин. Созданы оригинальные программы, имеющие интерфейс стыковки с коммерческой программной системой ANSYS. Проведенные комплексные расчетные исследования влияния преднамеренной расстройки на уровень динамических нагрузок и долговечность рабочих колес радиальных турбомашин показали высокий уровень воздействия расстройки параметров на ресурсные характеристики роторных конструкций как модельных, так и промышленных компрессоров и турбин. Так, для реальной радиальной установки фирмы Schiele AG (Германия) для перекачки и вентиляции воздуха варьирование долговечности рабочего колеса турбомшины составило от -10,76 до +14,84%. Результаты численного анализа и программное обеспечение внедрены в 2024 г. в проектную деятельность АО «Иркутский научно-исследовательский и конструкторский институт химического и нефтяного машиностроения» (г. Иркутск). Проведенные вычислительные эксперименты демонстрируют эффективность предложенного подхода для прогнозирования долговечности и прочностной оптимизации конструкций роторов радиальных турбомашин при проектировании и доводке новых изделий или продлении остаточного эксплуатационного ресурса. Предложенный подход является рабочим инструментом для дальнейшего исследования и анализа влияния расстройки параметров рабочих лопаток на ресурсные характеристики рабочих колес осевых и радиальных турбомашин.

Ключевые слова: математические модели, вычислительный эксперимент, численные методы анализа, преднамеренная расстройка параметров, радиальные турбомшины, долговечность

Финансирование. Данная работа выполнена в рамках гранта РНФ № 24-29-00135. Автор благодарит РНФ за поддержку настоящих исследований.

Для цитирования: Репецкий О.В. Разработка математических моделей, численных методов и программного обеспечения для анализа долговечности радиальных роторов турбомашин с расстройкой параметров // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 2. С. 194–203. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-2-194-203>. EDN: UQVSFA.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Development of mathematical models, numerical methods, and software tools for analyzing the durability of radial turbomachinery with parameter mismatching

Oleg V. Repetskii¹✉¹Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky, Irkutsk, Russia

Abstract. This study presents mathematical models and numerical-analytical methods for analysing static stresses, free/forced vibrations, and the durability of radial turbomachinery used in power and transportation systems. The research incorporates deliberate disturbances in geometric, mass, and mechanical parameters to evaluate their effects. The finite element method is used as the primary analytical tool, supported by the theories of

elasticity and vibration, the mechanics of deformable solids, and gas dynamics. The methodology employs matrix computations and algebraic equation systems to predict the service life characteristics of turbomachine rotors. Custom software interfaces compatible with ANSYS commercial software were developed. Computational studies demonstrated the influence of deliberate parameter mismatches on dynamic loads and durability in both prototype and industrial compressors/turbines. For a radial air handling unit manufactured by Schiele AG (Germany), parameter variations resulted in the alteration of rotor service life characteristics by –10.76% to +14.84%. The numerical analysis tools were implemented in 2024 at the Irkutsk Research and Design Institute of Chemical and Petrochemical Engineering (Russia). The efficiency of the method for durability prediction and strength optimisation during rotor design, fine-tuning, or residual life extension was confirmed by computational experiments. This approach provides a practical tool for further research on the influence of blade parameter mismatches on service life characteristics in axial and radial turbomachines.

Keywords: mathematical models, computational experiment, numerical analysis methods, deliberate parameter mistuning, radial turbomachines, durability

Funding. This work was carried out within the framework of the Russian Science Foundation grant No. 24-29 00135. The author thanks the Russian Science Foundation for the support of the study.

For citation: Repetskii O.V. Development of mathematical models, numerical methods, and software tools for analyzing the durability of radial turbomachinery with parameter mismatching. *iPolytech Journal*. 2025;29(2):194-203. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-2-194-203>. EDN: UQVSFA.

ВВЕДЕНИЕ

Известные экспериментальные и теоретические работы других авторов показывают, что влияние расстройки параметров на вибрационные характеристики лопаток и дисков исследовано достаточно давно. Среди более ранних работ упоминают научные труды Д.Дж. Эйванс и З.С. Хан [1, 2], в которых показано решающее влияние увеличения амплитуды в расстроенных системах. В то же время были разработаны вычислительные модели для описания расстроенных колебательных систем, например Л.Е. Эль-Байоми, А.В. Шринивасан [3]. Также в более поздних работах по этой теме исследовано моделирование данной проблемы в основном на дискретных связанных пружинно-массовых колебательных системах Д.М. Файнера, Дж.А. Кеньона, Дж.Х. Гриффина [4, 5], А.Дж. Ривас-Гуэрра, М.П. Миньоле [6], Е.П. Петрова [7], М. Николича, Е.П. Петрова и Д.Дж. Эйванс [8]. Результаты исследований чаще подтверждаются и уточняются благодаря применению современных компьютерных технологий, позволяющих выполнять численные расчеты на реальных конструкциях лопаток роторов турбомашин. В этом контексте особый интерес представляет диссертационная работа Т. Клауке², в которой подробно анализируется явление расстройки параметров и его влияние на ресурсные характеристики реальных рабочих колес. Кроме того, расстроенные рабочие колеса изучаются как в экспериментальных,

так и в численных исследованиях, что отражено в публикациях [9, 10].

Целью исследования данной работы является анализ воздействия конструктивных и технологических факторов, включая преднамеренную расстройку параметров, на увеличение ресурсных характеристик турбомашин, с использованием примера радиально-го рабочего колеса.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Расчет ресурсных характеристик проведен на реальном радиальном колесе с применением МКЭ. На рис. 1 – общий вид и конечноеэлементная модель конструкции [11, 12].

Представленные в настоящей работе численные результаты получены с помощью МКЭ и верифицированы на многочисленных вычислительных тестах, в том числе на модельных задачах: пластинах и академических радиальных рабочих колесах. Настоящее исследование обосновывает применяемую степень дискретизации КЭМ, выбор типа конечного элемента, включая анализ моделей стыковки трехмерных и оболочечных конечных элементов, сравнение с известными расчетными и экспериментальными данными, а также аналитическими решениями для тестовых моделей [18]. Выполненный анализ позволил уточнить предлагаемые автором математические модели и выбрать наиболее эффективные по точности расчета и затратам времени ЭВМ при исследовании стати-

²Klaue T. Schaufelschwingungen realer integraler verdichterräder im hinblick auf verstimmung und lokalisierung: Dissertation Doktor-Ingenieurs. Tönning, 2007.

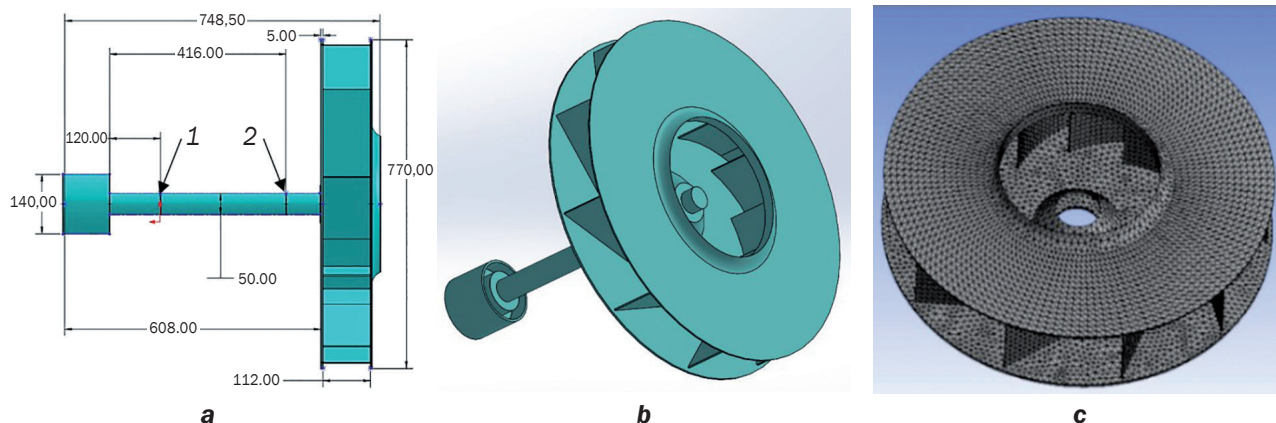


Рис. 1. Радиальное рабочее колесо с десятью лопатками: а – размеры колеса; б – 3D модель; с – конечноэлементная модель

Fig. 1. 10-bladed radial impeller: a – impeller dimensions; б – 3D model; с – finite element model

ческих напряжений, собственных частот и форм колебаний, а также чувствительности и других параметров, с учетом вращения и температурного нагрева, и применить их в дальнейшем для анализа реальных радиальных рабочих колес турбомашин.

Масса рабочей лопатки (кг) может быть определена из выражения [10–12]:

$$m_i = m_0 + \Delta m_i, \quad (1)$$

здесь m_i – масса i -й лопатки, кг; m_0 – среднее значение масс лопатки, кг; Δm_i – отклонение массы i -й рабочей лопатки турбомшины, кг.

Дисбаланс рабочего колеса U имеет численный вид:

$$U = R_0 \sqrt{\left(\sum_{i=1}^N \Delta m_i \cos \theta_i \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N \Delta m_i \sin \theta_i \right)^2}, \quad (2)$$

где θ_i – угол, определяющий положение i -й лопатки на диске, начиная с 1-й лопатки, °; R_0 – средний радиус центра тяжести исследуемой механической системы, м.

Коэффициент увеличения амплитуды γ описывает отношение максимального перемещения расстроенной системы к максимальному перемещению настроенной системы и равен

$$\gamma = \frac{\delta_{\text{расс. (максимум)}}}{\delta_{\text{настр. (максимум)}}}. \quad (3)$$

Максимальный коэффициент увеличения амплитуды [15]

$$\gamma_{\max} = \frac{1}{2} (1 + \sqrt{N}), \quad (4)$$

где N – число лопаток в рабочем колесе.

Алгоритм применения программы ANSYS Workbench для определения коэффициентов увеличения амплитуды конструкций включает следующие основные этапы:

- *подготовку исходных данных* – это определение геометрических параметров конструкции, задание физических свойств материала, формулировка граничных условий, включая условия закрепления и внешние нагрузки;

- *создание конечно-элементной модели* – генерация сетки конечных элементов, оптимизация сетки для повышения точности расчетов при минимальном числе элементов;

- *формирование и решение математической модели* – определение элементов в локальных координатах, вычисление матриц жесткости и массы, преобразование локальных матриц в глобальную систему координат, формирование глобальных матриц жесткости и массы всей конструкции;

- *расчет собственных колебаний конструкции* – вычисление собственных частот и форм, сравнение полученных результатов с первоначальными данными для определения значений расстройки;

- *обработка и интерпретация результатов* – построение графиков распределения амплитуд колебаний, оценка динамических напряжений и перемещений в различных режимах нагружения. Затем осуществляется *сохранение результатов* для дальнейшего анализа.

Расстройка параметров приводит к увеличению амплитуд колебаний и динамических напряжений по сравнению с идеальной системой. В данной работе применен метод конечных элементов (МКЭ), реализованный в коммерческой программе ANSYS для определения максимальных перемещений и напряжений с учетом расстройки лопаток радиального колеса.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На первой стадии исследованы численные модели с одинаковыми лопатками толщиной 3,3 мм. При этом 1-й тип анализа описывал изменение толщины всех лопаток на -10%, а 2-й – на +10% (рис. 2). В вариантах № 3 и 4 предполагается уве-

личение толщины лопатки на 10% на середине пера и уменьшение толщины на 10% на двух краях кромки. В варианте № 5 толщина лопатки увеличена на 20% на середине пера и уменьшена на 20% на двух краях кромки.

Также исследовано различное (линейное или криволинейное) изменение длины всех лопаток (рис. 3, варианты № 1–4). Результаты анализа представлены в виде графика распределения долговечности блочных моделей, в которых геометрия всех лопаток колеса была изменена. Этот график приведен на рис. 4, при условии трапециевидного нагружения лопатки и всего рабочего колеса, схематически изображенного на рис. 5 [11, 12], где s – ширина сопловой части, μ – рассто-

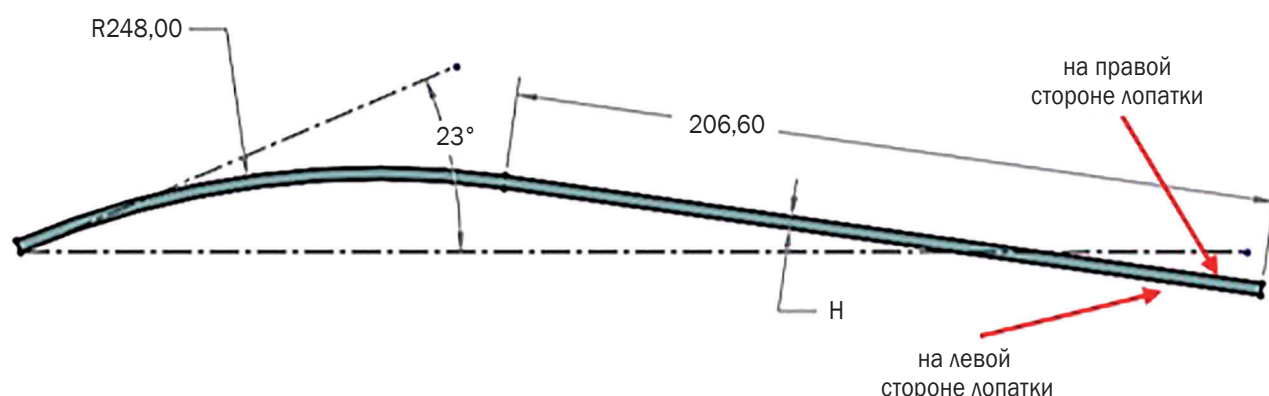


Рис. 2. Исходный вид лопатки для исследования расстройки от толщины H (мм)
Fig. 2. Initial view of the radial blade to study thickness-dependent mistuning H (mm)

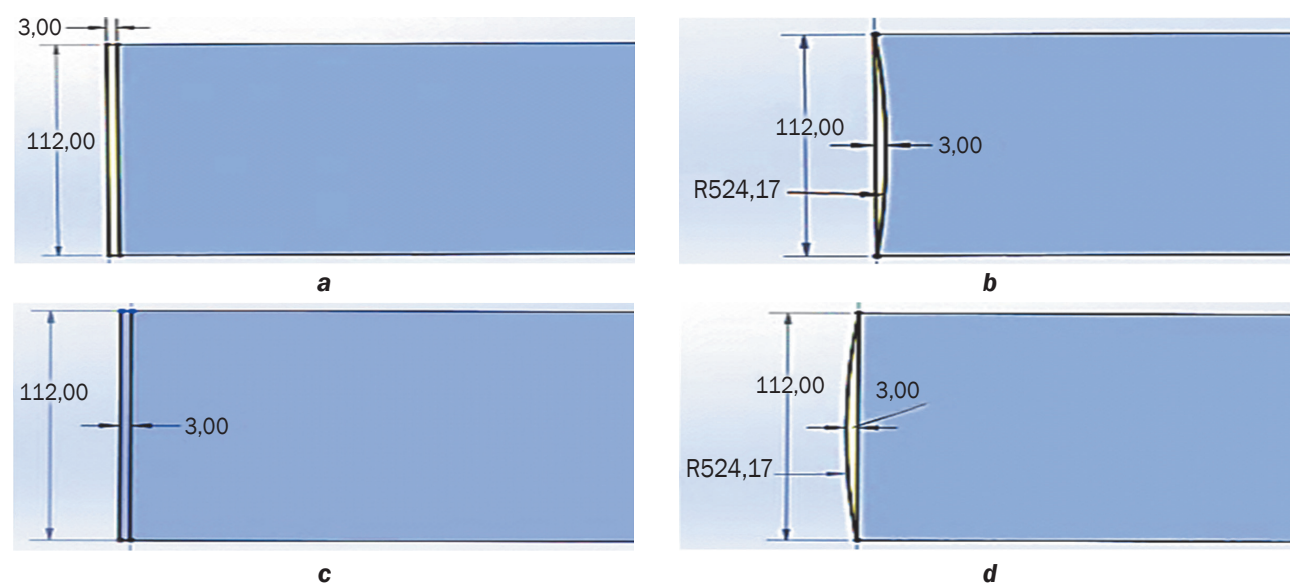


Рис. 3. Предложенные варианты изменения радиальной лопатки: а – вариант № 1 (линейная отрезка); б – вариант № 2 (линейное удлинение); с – вариант № 3 (криволинейная отрезка); д – вариант № 4 (криволинейное увеличение длины)
Fig. 3. Proposed options for radial blade alterations: а – option no. 1 (linear section); б – option no. 2 (linear extension); с – option no. 3 (curved section); д – option no. 4 (curved increase in length)

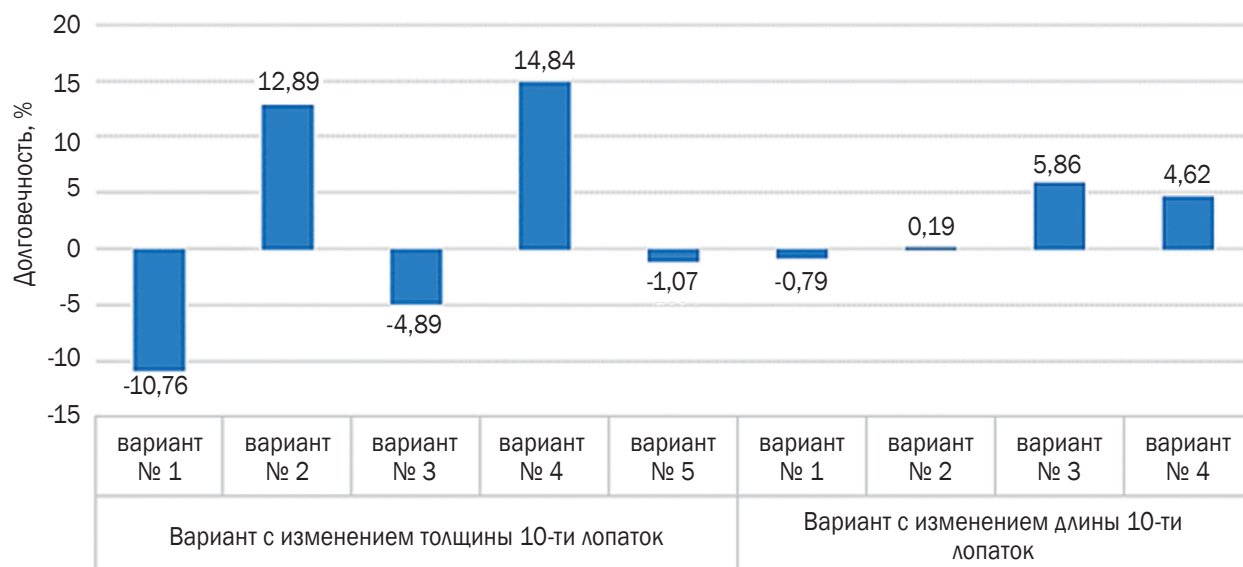


Рис. 4. Долговечность на уровне блочных моделей с изменением всех лопаток колеса

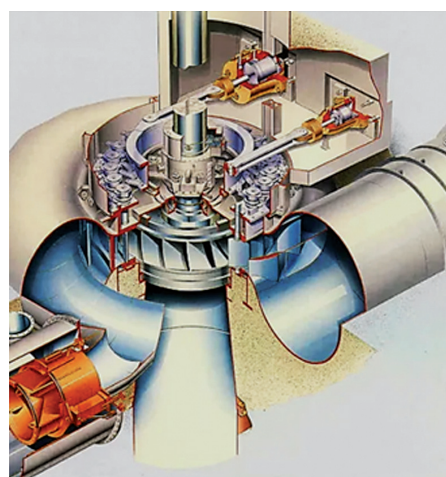
Fig. 4. Durability of block models with changed impeller blades

яние между лопатками статора в сопловой части.

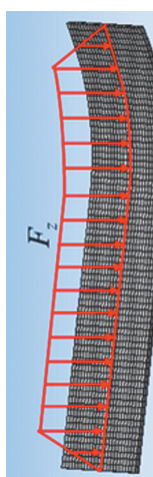
Для расчета ресурсных характеристик, а именно долговечности лопаток колеса (рис. 4 и табл. 2) в зависимости от конструктивных и технологических факторов, используется известная математическая модель, основанная на гипотезе повреждаемости Пальмгрен-Майнера, суммирование поврежде-

ний разного уровня происходит по методу «дождя». Долговечность рассчитывается как количество циклов нагружения до наступления разрушения, когда накопленное усталостное повреждение становится равным единице [11, 12, 17, 20].

Расчет долговечности выполнен на основе программы коммерческой программы ANSYS и авторской программы³.



a



b

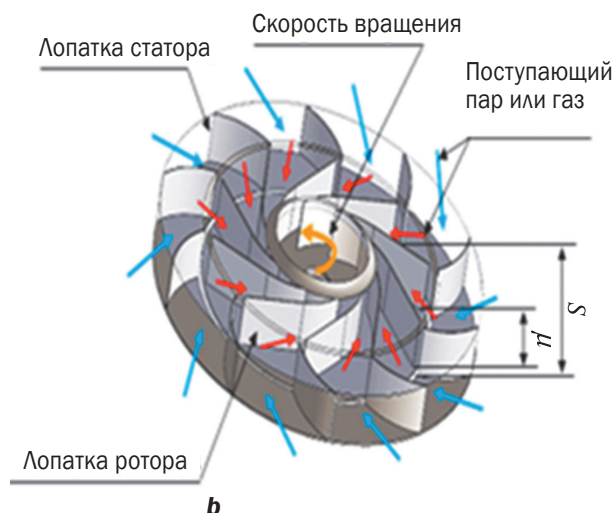


Рис. 5. Общий вид и модель трапециевидного спектра нагружения радиального рабочего колеса: а – общий вид радиального колеса; б – распределение нагрузки на лопатке

Fig. 5. General view and a model of the trapezoidal loading spectrum of radial impeller: а – general view of a radial wheel; б – load distribution on the blade

³Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023665054, Российская Федерация. Программа для расчета ресурсных характеристик радиальных рабочих колес с учетом динамической нагрузки (RES_RAD) / О.В. Репецкий, Динь Кыонг Хоанг; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ. Заявка № 2023663623, заявл. 29.06.2023; опубл. 11.07.2023.

Анализ результата вычислительного эксперимента показал, что первая блочная модель (БМ) с увеличением толщины лопатки на 10% способна увеличить долговечность радиального рабочего колеса на +1,48% (рис. 6 а). Следовательно, БМ с изменением механических свойств материала повышает ресурс радиального колеса на +1,53% (рис. 6 б), а вариант № 3 позволяет увеличить долговечность радиального колеса на +2,01% (рис. 6 с).

На следующем этапе проведен анализ влияния количества и глубины нарезных каналов на основном диске колеса для оценки ресурсных характеристик радиального рабочего колеса. Примеры с четырьмя и восьмью каналами между лопатками приведены на рис. 7.

Формула для массы рабочего колеса с учетом количества и глубины каналов может быть записана в следующем варианте:

$$\Delta m \approx 0,08875ka, \quad (5)$$

где Δm – изменение массы основного диска; k – количество нарезных каналов в одном секторе колеса ($k = 1, \dots, 8$); a – глубина нарезных каналов.

Из рис. 8 видно, что с увеличением количества нарезных каналов на основном диске площадь синей зоны уменьшается. Данный эффект указывает на рост скорости потока в колесе при увеличении количества нарезных каналов в каждом секторе.

Результаты расчета показали, что наличие нарезных каналов на радиальном рабочем колесе способствует увеличению его долговечности. В табл. 2 приведены значения долговечности радиального рабочего колеса с учетом наличия нарезных каналов.

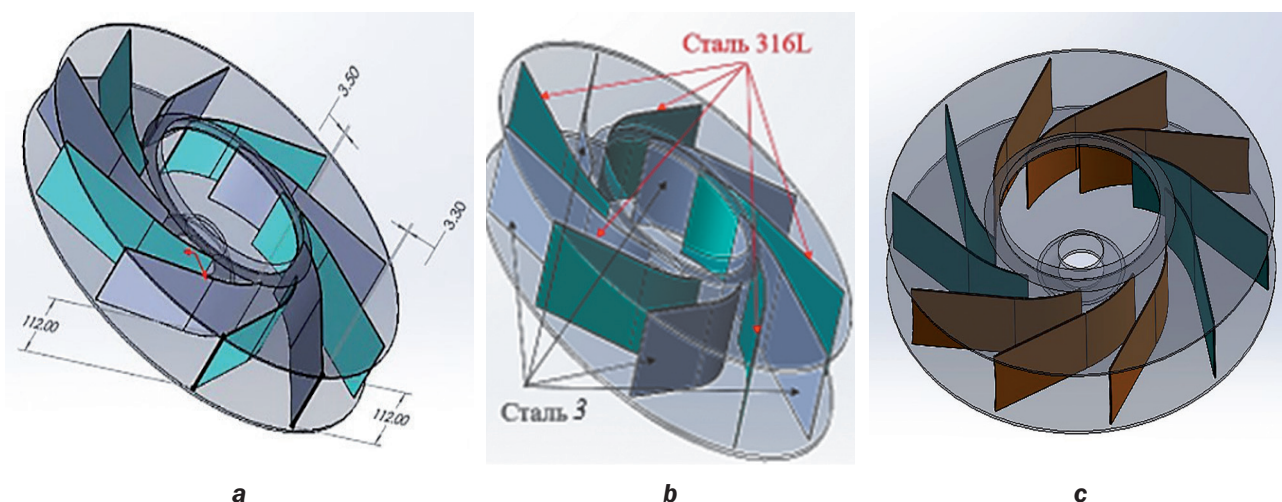


Рис. 6. Блочные модели с увеличением толщины (а), разными материалами (б), криволинейным отрезом (с)
Fig. 6. Block models with the thickness increased with (a), different materials (b), curved section (c)

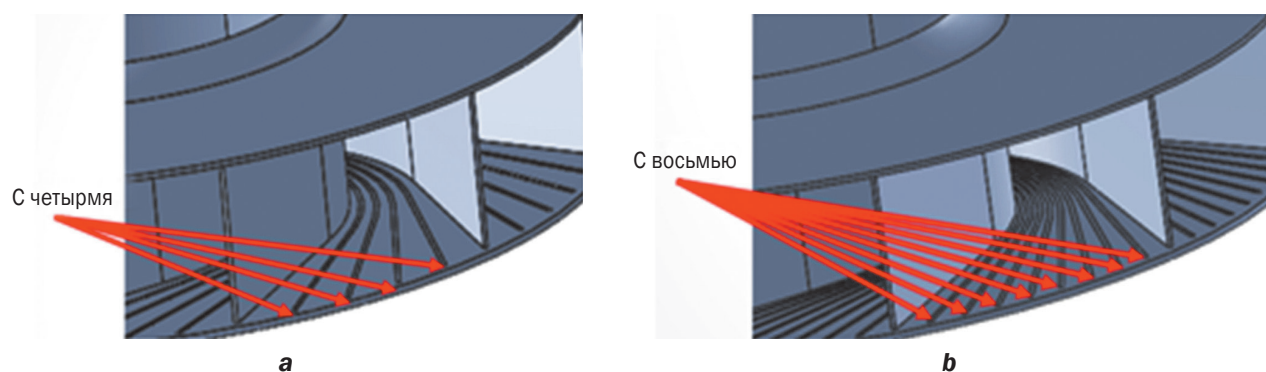


Рис. 7. Анализ количества нарезных каналов в секторе радиального колеса
Fig. 7. Analysis of the number of grooves in a radial wheel sector

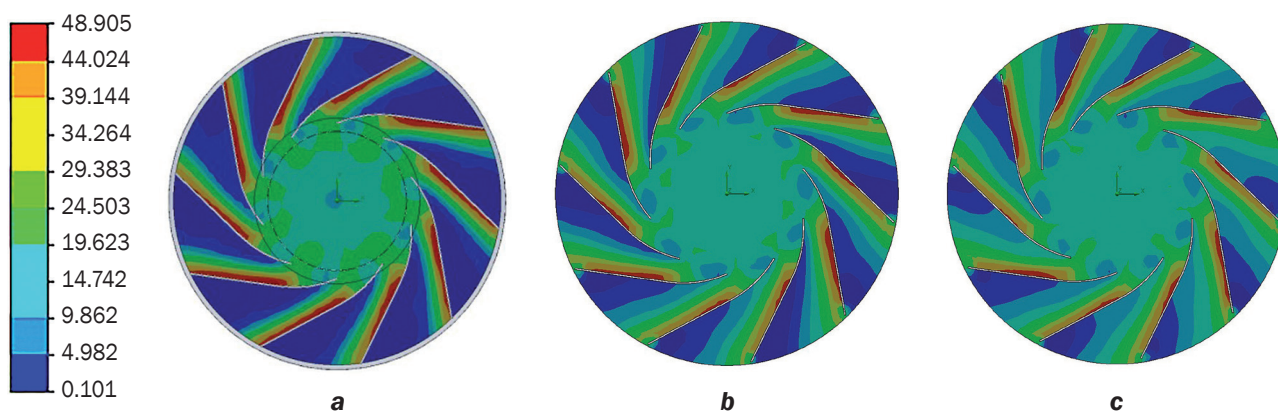


Рис. 8. Скорость потока: а – без нарезного канала; b – с четырьмя каналами; с – с восемью каналами
Fig. 8. Flow rate: a – without a groove; b – with four grooves; c – with eight grooves

Таблица 2. Количество циклов до разрушения
Table 2. Number of cycles before destruction

Вид	Долговечность (в циклах)	$\Delta N, \%$
С четырьмя нарезными каналами	$2,1764 \cdot 10^5$	+3,95
С восемью нарезными каналами	$2,2950 \cdot 10^5$	+9,61

Проведенный анализ демонстрирует, что увеличение количества нарезных каналов на основном диске напрямую способствует повышению долговечности конструкции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного математического моделирования и численного анализа определены ресурсные характеристики радиальных турбомашин без и с расстройкой параметров. Анализ результатов показал, что могут существенно меняться максимальный коэффициент увеличения амплитуды (до 44,72%) и долговечность радиального колеса турбомашин от -10,76 до +14,84%.

Использование МКЭ позволило провести численное моделирование и выявить закономерности влияния расстройки на усталостную долговечность реального радиального рабочего колеса, применяемого

в химическом и вентиляционном оборудовании.

Результаты вычислительных экспериментов подтвердили эффективность разработанных моделей и алгоритмов, а также показали возможность их применения для прогнозирования ресурса и оптимизации конструкций роторов радиальных турбомашин. Полученные данные могут быть использованы при проектировании новых турбомашин и совершенствовании существующих конструкций в целях повышения их эксплуатационной надежности и долговечности в рабочих условиях.

Настоящее исследование вносит вклад в развитие методов расчета динамических и ресурсных характеристик турбомашин и открывает перспективы для дальнейших исследований в области оптимизации долговечности радиальных роторных конструкций с учетом эксплуатационных факторов.

Список источников

1. Ewins D.J. Vibration modes of mistuned bladed disks // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 1976. Vol. 98. Iss. 3. P. 349–355. <https://doi.org/10.1115/1.3446180>.
2. Ewins D.J., Han Z.S. Resonant vibration levels of a mistuned bladed disk // Journal of vibration and acoustics. 1984. Vol. 106. Iss. 2. P. 211–217. <https://doi.org/10.1115/1.3269171>.
3. El-Bayoumy L.E., Srinivasan A.V. Influence of mistuning on rotor-blade vibrations // AIAA Journal. 1975. Vol. 13. Iss. 4. P. 460–464. <https://doi.org/10.2514/3.49731>.
4. Feiner D.M., Griffin J.H. A fundamental model of mistuning for a single family of modes // Journal of Turbomachinery. 2002. Vol. 124. Iss. 4. P. 597–605. <https://doi.org/10.1115/1.1508384>.

5. Kenyon J.A, Griffin J.H. Forced response of turbine engine bladed disks and sensitivity to harmonic mistuning // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2003. Vol. 125. Iss. 1. P. 113–120. <https://doi.org/10.1115/1.1498269>.
6. Rivas-Guerra A.J., Mignolet M.P. Maximum amplification of blade response due to mistuning: localization and mode shapes aspects of the worst disks // *Journal of Turbomachinery*. 2003. Vol. 125. Iss. 3. P. 442–454. <https://doi.org/10.1115/1.1506958>.
7. Petrov E.P. Analysis of sensitivity and robustness of forced response for nonlinear dynamic structures // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2009. Vol. 23. Iss. 1. P. 68–86. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2008.03.008>.
8. Nikolic M., Petrov E.P., Ewins D.J. Robust strategies for forced response reduction of bladed disks based on large mistuning concept // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2008. Vol. 130. Iss. 2. P. 022501. <https://doi.org/10.1115/1.2799524>.
9. Manetti M., Giovannetti I., Pieroni N., Horculescu H., Peano G., Zonfrillo G., et al. The dynamic influence of crystal orientation on a second generation single crystal material for turbine buckets // *Power for Land, Sea, and Air: ASME Turbo Expo 2009 (Orlando, Florida, 8–12 June 2009)*. Orlando, Florida: ASME, 2009. Vol. 6. P. 125–133. <https://doi.org/10.1115/GT2009-59091>.
10. Roy S.C., Goyal S., Sandhya R., Ray S.K. Analysis of hysteresis loops of 316L(N) stainless steel under low cycle fatigue loading conditions // *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 55. P. 165–170. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.237>.
11. Repetskii O.V., Cuong Hoang Dinh. Fatigue life of radial turbomachines at changing thickness blades taking into account intentional mistuning // *State and Prospects for the Development of Agribusiness – INTERAGROMASH 2022: 15th International Scientific Conference on Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry*. E3S Web of Conferences. 2022. Vol. 363. Iss. 1. P. 01044. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202236301044>.
12. Repetskii O.V., Cuong Hoang Dinh. Physical and mathematical modeling and computer analysis of radial impellers for chemical and power engineering, taking into account ecology // *Actual problems of the energy complex: physical processes, mining, production, transmission, processing and environmental protection: 4th International scientific and practical Conference*. IOP Conference Series. 2022. Vol. 990. P. 012044. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/990/1/012044>.
13. Kaneko Ya., Watanabe T., Furukawa T. Study on the reduction of the resonant stress of turbine blades caused by the stage interaction force (Simultaneous optimization of blade resonant stress and amount of unbalance) // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2020. Vol. 143. Iss. 6. P. 061022. <https://doi.org/10.1115/1.4049471>.
14. Beck J.A., Brown J.M., Kaszynski A.A., Gillaugh D.L. Numerical methods for calculating component modes for geometric mistuning reduced-order models // *Turbomachinery Technical Conference and Exposition: ASME Turbo Expo 2021*. 2021. Vol. 9B. P. V09BT29A016. <https://doi.org/10.1115/GT2021-59126>.
15. Whitehead D.S. The maximum factor by which forced vibration of blades can increase due to mistuning // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 1998. Vol. 120. Iss. 1. P. 115–119. <https://doi.org/10.1115/1.2818061>.
16. Хоанг Динь Кыонг. Численный анализ ресурсных характеристик радиальных рабочих колес роторов турбомашин // *System Analysis & Mathematical Modeling*. 2024. Т. 6. № 3. С. 387–395. [https://doi.org/10.17150/2713-1734.2024.6\(3\).387-395](https://doi.org/10.17150/2713-1734.2024.6(3).387-395). EDN: UAWXWN.
17. Repetsky O.V., Nguyen Tien Quyet, Ryzhikov I.N. Investigation of vibration and fatigue life of mistuned bladed disks // *Actual Issues of Mechanical Engineering: Proceedings of the International Conference*. 2017. P. 702–707. <https://doi.org/10.2991/aime-17.2017.114>.
18. Repetski O., Rygikov I., Springer H. Numerical analysis of rotating flexible blade-disk-shaft systems // *ASME International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition*. 1999. Vol. 4. P. V004T03A034. <https://doi.org/10.1115/99-GT-317>.
19. Repetskii O.V. Use of the FEM to solve the thermoelasticity problem of turbine blades // *Strength of Materials*. 1990. Vol. 22. Iss. 12. P. 1848–1854. <https://doi.org/10.1007/BF00769137>.
20. Репецкий О.В., Нгуен Ван Мань. Верификация разработанных математических моделей и созданного программного обеспечения на тестовых моделях пластин и академических рабочих колесах осевых турбомашин // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2024. № 2. С. 134–144. [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2024.2\(82\).134-144](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2024.2(82).134-144).

References

1. Ewins D.J. Vibration modes of mistuned bladed disks. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 1976;98(3):349-355. <https://doi.org/10.1115/1.3446180>.
2. Ewins D.J., Han Z.S. Resonant vibration levels of a mistuned bladed disk. *Journal of vibration and acoustics*. 1984;106(2):211-217. <https://doi.org/10.1115/1.3269171>.
3. El-Bayoumy L.E., Srinivasan A.V. Influence of mistuning on rotor-blade vibrations. *AIAA Journal*. 1975;13(4):460-464. <https://doi.org/10.2514/3.49731>.

4. Feiner D.M., Griffin J.H. A fundamental model of mistuning for a single family of modes. *Journal of Turbomachinery*. 2002;124(4):597-605. <https://doi.org/10.1115/1.1508384>.
5. Kenyon J.A., Griffin J.H. Forced response of turbine engine bladed disks and sensitivity to harmonic mistuning. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2003;125(1):113-120. <https://doi.org/10.1115/1.1498269>.
6. Rivas-Guerra A.J., Mignolet M.P. Maximum amplification of blade response due to mistuning: localization and mode shapes aspects of the worst disks. *Journal of Turbomachinery*. 2003;125(3):442-454. <https://doi.org/10.1115/1.1506958>.
7. Petrov E.P. Analysis of sensitivity and robustness of forced response for nonlinear dynamic structures. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2009;23(1):68-86. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2008.03.008>.
8. Nikolic M., Petrov E.P., Ewins D.J. Robust strategies for forced response reduction of bladed disks based on large mistuning concept. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2008;130(2):022501. <https://doi.org/10.1115/1.2799524>.
9. Manetti M., Giovannetti I., Pieroni N., Horculescu H., Peano G., Zonfrillo G., et al. The dynamic influence of crystal orientation on a second generation single crystal material for turbine buckets. In: *Power for Land, Sea, and Air: Conference Turbo Expo*. 8–12 June 2009, Orlando, Florida. Orlando, Florida: ASME; 2009, vol. 6, p. 125-133. <https://doi.org/10.1115/GT2009-59091>.
10. Roy S.C., Goyal S., Sandhya R., Ray S.K. Analysis of hysteresis loops of 316L(N) stainless steel under low cycle fatigue loading conditions. *Procedia Engineering*. 2013;55:165-170. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.237>.
11. Repetskii O.V., Cuong Hoang Dinh. Fatigue life of radial turbomachines at changing thickness blades taking into account intentional mistuning. In: *State and Prospects for the Development of Agribusiness – INTERAGROMASH 2022: 15th International Scientific Conference on Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry*. E3S Web of Conferences. 2022;363(1):01044. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202236301044>.
12. Repetskii O.V., Cuong Hoang Dinh. Physical and mathematical modeling and computer analysis of radial impellers for chemical and power engineering, taking into account ecology. In: *Actual problems of the energy complex: physical processes, mining, production, transmission, processing and environmental protection: 4th International scientific and practical Conference*. IOP Conference Series. 2022;990:012044. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/990/1/012044>.
13. Kaneko Ya., Watanabe T., Furukawa T. Study on the reduction of the resonant stress of turbine blades caused by the stage interaction force (Simultaneous optimization of blade resonant stress and amount of unbalance). *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2020;143(6):061022. <https://doi.org/10.1115/1.4049471>.
14. Beck J.A., Brown J.M., Kaszynski A.A., Gillaugh D.L. Numerical methods for calculating component modes for geometric mistuning reduced-order models. In: *Turbomachinery Technical Conference and Exposition: ASME Turbo Expo 2021*. 2021;9B:V09BT29A016. <https://doi.org/10.1115/GT2021-59126>.
15. Whitehead D.S. The maximum factor by which forced vibration of blades can increase due to mistuning. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 1998;120(1):115-119. <https://doi.org/10.1115/1.2818061>.
16. Hoang Dinh Cuong. Numerical analysis of the resource characteristics radial impellers of turbomachine rotors. *System Analysis & Mathematical Modeling*. 2024;6(3):387-395. (In Russ.). [https://doi.org/10.17150/2713-1734.2024.6\(3\).387-395](https://doi.org/10.17150/2713-1734.2024.6(3).387-395). EDN: UAWXWN.
17. Repetsky O.V., Nguyen Tien Quyet, Ryzhikov I.N. Investigation of vibration and fatigue life of mistuned bladed disks. In: *Actual Issues of Mechanical Engineering: Proceedings of the International Conference*. 2017;702-707. <https://doi.org/10.2991/aime-17.2017.114>.
18. Repetski O., Rygikov I., Springer H. Numerical analysis of rotating flexible blade-disk-shaft systems. *ASME International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition*. 1999;4:V004T03A034. <https://doi.org/10.1115/99-GT-317>.
19. Repetskii O.V. Use of the FEM to solve the thermoelasticity problem of turbine blades. *Strength of Materials*. 1990;22(12):1848-1854. <https://doi.org/10.1007/BF00769137>.
20. Repetskii O.V., Nguyen Van Man'. Verification of the developed mathematical models and the created software on test models of plates and bladed disks of axial turbomachines. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*. 2024;2:134-144. [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2024.2\(82\).134-144](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2024.2(82).134-144).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Репецкий Олег Владимирович,

д.т.н., профессор,
проректор по международным связям,
Иркутский государственный аграрный
университет имени А.А. Ежевского,
664038, г. Иркутск, Россия
✉ repetckii@igsha.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2560-2721>

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Oleg V. Repetskii,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Vice-Rector for International Relations,
Irkutsk State Agrarian University named
after A.A. Ezhevsky,
Irkutsk 664038, Russia
✉ repetckii@igsha.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2560-2721>

Заявленный вклад автора

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

Конфликт интересов

Авторы заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 12.12.2024 г.; одобрена после рецензирования 30.01.2025 г.; принята к публикации 10.03.2025 г.

Author contribution

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

Conflict of interests

The author declares no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 12.12.2024; approved after reviewing 30.01.2025; accepted for publication 10.03.2025.



Оценка технического состояния металлических конструкций на основе компьютерного моделирования

И.Н. Рыжиков^{1✉}, А.Е. Балановский²

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

Резюме. Цель – установление причин разрушения конструкций с помощью компьютерного моделирования на основе исследования их напряженно-деформированного состояния. Исходными данными для компьютерного моделирования являлись фотоматериалы с места происшествия, конструкторская документация, технические характеристики автомобиля (нагруженного пиломатериалами) и гидроножниц. Использовались программные комплексы APM WinMachine, NX и Autodesk Inventor. В качестве основного метода для исследований был выбран метод конечных элементов в перемещениях. Рассматривались различные версии появления трещины, были разработаны компьютерные модели и проведен инженерный анализ конструкции рамы автомобиля. С помощью компьютерного моделирования также была установлена наиболее вероятная причина разрушения верхней части гидроножниц – превышение критического (345 МПа – предел текучести стали 09Г2С) для данного материала уровня напряжений. Исследуемые конструкции отличались сложностью геометрии и разнообразием действующих на них нагрузок. При их моделировании были учтены сварные швы. В программных комплексах на основе метода конечных элементов были построены геометрические модели конструкций, включая сварные швы, на основе которых были сформированы и исследованы конечноэлементные модели конструкций. В результате проведенных расчетов напряженного состояния гидроножниц было определено максимальное значение напряжения (391 МПа), значительно превышающее предел текучести, а также локализация напряжений для разных случаев нагружения конструкции. Анализ результатов расчетов прочности и жесткости конструкций в используемых программных комплексах для всех моделей, разработанных для проверки рассматриваемых гипотез, позволил указать наиболее вероятные причины их разрушения. Разработанная методика, компьютерные модели и результаты проведенных исследований могут быть использованы при инженерно-технической экспертизе различных технических объектов.

Ключевые слова: техническое состояние, метод конечных элементов, сварная рама, гидроножницы, компьютерное моделирование, напряженно-деформированное состояние, прочность

Благодарности. Авторы выражают благодарность за участие в данных исследованиях Н.А. Астафьевой и Н.О. Тютрину.

Для цитирования: Рыжиков И.Н., Балановский А.Е. Оценка технического состояния металлических конструкций на основе компьютерного моделирования // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 2. С. 204–215. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-2-204-215>. EDN: ONYJLJ.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Technical condition assessment of metallic structures based on computer modelling

Igor N. Ryzhikov^{1✉}, Andrey E. Balanovsky²

^{1,2}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. Objective – determination of the causes of structural failure using computer modelling based on stress-strain state analysis. The initial data for the computer modelling included photographic material from the site of the accident, design documentation and technical specifications of the vehicle (loaded with timber) and the hydraulic shears. The software packages used were APM WinMachine, NX and Autodesk Inventor. The Finite Element Method in displacements was selected as the primary research method. Various crack initiation scenarios were considered, computer models were developed and an engineering analysis of the vehicle frame structure was performed. Computer modelling also identified the most likely cause of failure of the upper part of the hydraulic shear – exceeding the critical stress level (345 MPa, the yield strength of the 09G2S steel) for the material. The studied

structures were characterised by complex geometries and a variety of loads acting on them. Welded seams were considered in their modelling. Geometric models of the structures, including the welded seams, were created in the software packages using the finite element method. On this basis finite element models of the structures were developed and analysed. As a result of the stress state calculations for the hydraulic shear, the maximum stress value (391 MPa), which is significantly higher than the yield strength, and the stress localisation for different loading cases were determined. Analysis of the results of the strength and stiffness calculations for all the models developed were used to test the hypotheses considered in the software packages. This made allowed identification of the most probable causes of failure. The developed methodology, along with the computer models and the results obtained, can be applied in the engineering and technical analysis of a variety of technical objects.

Keywords: technical condition, finite element method, welded frame, hydraulic shears, computer modeling, stress-strain state, strength

Acknowledgments. The authors thank N.A. Astafieva and N.O. Tyutrin for their participation in the present research.

For citation: Ryzhikov I.N., Balanovsky A.E. Technical condition assessment of metallic structures based on computer modelling. *iPolytech Journal*. 2025;29(2):204-215. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-2-204-215>. EDN: ONYJLJ.

ВВЕДЕНИЕ

Современная судебная инженерно-техническая экспертиза (ИТЭ) является не только процессуальным действием, но и полноценным научным исследованием на основе использования таких научных методов, как анализ, моделирование и др. [1]. Методы анализа и моделирования играют важную роль в инженерно-технической экспертизе, позволяя более глубоко исследовать технические объекты и процессы, что, в свою очередь, способствует установлению причин отказов техники. Эти методы основаны на использовании математических моделей и компьютерных технологий.

В рамках ИТЭ часто прибегают к компьютерному моделированию [2]. Компьютерное моделирование в современных программных комплексах на основе метода конечных элементов (МКЭ) широко применяется для анализа прочности и жесткости различных конструкций, в частности конструкций автомобильного транспорта. Современное программное обеспечение на основе МКЭ позволяет проводить с достаточно высокой точностью виртуальные краш-тесты разрабатываемых автомобилей, учитывая при этом всю историю нагружений материала деталей конструкции на разных стадиях их изготовления и сборки. Из множества публикаций в области конечноэлементного анализа прочности конструкций можно отметить работы³ [3–27].

В данной статье представлены результаты компьютерного моделирования двух конструкций: рамы грузового автомобиля и верх-

ней части гидроножниц. В случае с груженым пиломатериалами автомобилем рассматривались две версии появления трещины:

1) в результате совершенного дорожно-транспортного происшествия (ДТП) (переезда бордюра и наезда на ограду);

2) в результате эвакуации автомобиля методом частичной погрузки. В соответствии с этими версиями были разработаны компьютерные модели и проведен инженерный анализ конструкции рамы автомобиля. Компьютерное моделирование верхней части гидроножниц также проводилось с целью установления наиболее вероятной причины их разрушения.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЙ МЕТОД АНАЛИЗА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ

Для анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) рамы использовался МКЭ в перемещениях, основные положения которого лежат в основе программных комплексов инженерного анализа конструкций NX и Autodesk Inventor. Основная идея МКЭ состоит в замене дифференциального уравнения в частных производных, описывающего физический процесс, системой линейных алгебраических уравнений, легко решаемой компьютером. При анализе методом конечных элементов вводится допущение, что соотношение между перемещениями точек тела U и силами, приложенными к телу F , является линейным и однородным. Это соотношение выражается следующим уравнением:

³Лагереv А.В., Вершинский А.В., Лагереv И.А., Шубин А.Н. Подъемно-транспортные машины: расчет металлических конструкций методом конечных элементов: учеб. пособ. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Юрайт, 2023. 178 с.

$$F = KU, \quad (1)$$

где F – вектор нагрузок, Н; K – глобальная матрица коэффициентов жесткости конструкции; U – вектор узловых перемещений, мм.

В матричном виде соотношение (1) можно записать следующим образом:

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_i \\ \vdots \\ F_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \cdot & K_{1i} & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \cdot & K_{2i} & K_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ K_{i1} & K_{i2} & \cdot & K_{ii} & K_{in} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ K_{n1} & K_{n2} & \cdot & K_{ni} & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_i \\ \vdots \\ U_n \end{Bmatrix}.$$

В самом общем случае в каждом узле конечно-элементной модели могут действовать еще и моменты относительно координатных осей. В этом случае блоки узловых сил и перемещений для каждого узла будут состоять из шести компонент: трех моментов M и трех углов поворота Γ :

$$F_i = \{F_{ix} \ F_{iy} \ F_{iz} \ M_{ix} \ M_{iy} \ M_{iz}\};$$

$$U_i = \{U_{ix} \ U_{iy} \ U_{iz} \ \Gamma_{ix} \ \Gamma_{iy} \ \Gamma_{iz}\}.$$

Поле деформаций ε можно выразить через степени свободы узлов элемента $\{u\}$ посредством дифференцирования поля перемещений:

$$\varepsilon = [D]\{u\},$$

где матрица дифференцирования.

Соответственно, чтобы рассчитать поле напряжений, необходимо связать напряжения с деформациями, а через них – с найденными ранее узловыми перемещениями:

$$\sigma = [H]\varepsilon$$

или

$$\sigma = [H][D]\{u\}.$$

Матрица $[H]$ содержит коэффициенты, описывающие механические характеристики заданного конструкционного материала.

При компьютерном моделировании с помощью программного комплекса на основе метода конечных элементов основными этапами являются:

- создание геометрической модели;
- дискретизация геометрической модели (построение конечноэлементной сетки);
- приложение нагрузки;
- наложение условий закрепления (граничных условий);
- расчет;
- анализ результатов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ напряженно-деформированного состояния рамы автомобиля. В рамках данной работы было исследовано НДС рамы автомобиля при действии различных нагрузок с целью установления причины появления трещины. Грузовый пиломатериалом автомобиль Nissan Diesel совершил дорожно-транспортное происшествие – переехал бордюр и сломал ограду (рис. 1). После ДТП эвакуация происходила методом частичной погрузки (см. рис. 1). Грузовик закатывали на эвакуатор при помощи лебедки за передние такелажные крюки под углом 23° .

Впоследствии при осмотре автомобиля была обнаружена трещина в раме справа за передней осью (рис. 2).

Для ответа на вопрос (в отчете), что послужило истинной причиной появления трещины – эвакуация перегруженного автомобиля или переезд им бордюра – была назначена ИТЭ. В рамках судебной ИТЭ было проведено компьютерное моделирование НДС конструкции рамы автомобиля в программных комплексах NX и Autodesk Inventor.

Рама автомобиля (рис. 3) лонжеронной конструкции состоит из двух лонжеронов (продольных балок) П-образного профиля, соединенных между собой посредством сварки отдельными поперечинами, профиль которых – двутавр. Для лонжеронов в модели был принят швеллер 210х57х4 ГОСТ 8278-83⁴ из стали Ст 20 ГОСТ 1050-2013⁵, для поперечин – двутавр 20 из той же стали.

⁴ГОСТ 8278-83. Швеллеры стальные гнутые равнополочные. Сортамент. Введ. 01.01.1984 (изм. 01.01.1989; 01.04.2003). М.: Стандартинформ, 2003.

⁵ГОСТ 1050-2013. Металлопродукция из легированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия. Введ. 01.01.2015 (изм. 23.08.2021). М.: Стандартинформ, 2022.



a



b

Рис. 1. Фото с места дорожно-транспортного происшествия (a) и эвакуация автомобиля (b)

Fig. 1. Photos from the traffic accident scene (a) and vehicle evacuation (b)

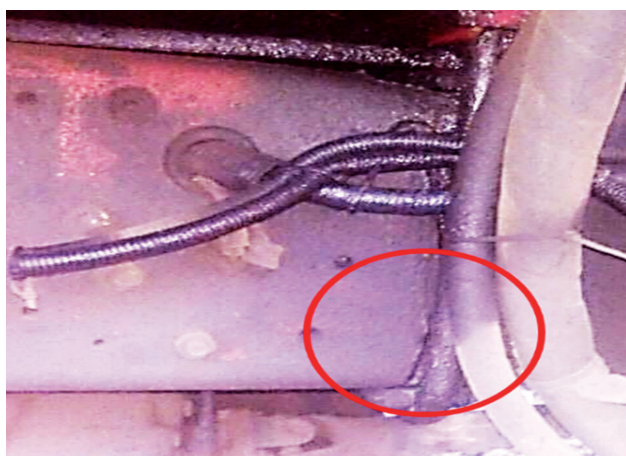


Рис. 2. Трещина в раме, обнаруженная после его эвакуации с места дорожно-транспортного происшествия

Fig. 2. A crack in the frame discovered after vehicle evacuation from the traffic accident scene

Геометрическая модель рамы была подготовлена в программном комплексе NX в соответствии с чертежом. Модель включает сварные швы, наложенные на места сварки (рис. 4).

При расчете учитывался собственный вес конструкции автомобиля. Нагрузка от масс кабины, двигателя и оборудования была определена с использованием конструкторской документации и технических характеристик автомобиля и приложена в модели в местах их установки. Величина нагрузки от массы перевозимого груза была определена, основываясь на фото груза эвакуированного автомобиля (рис. 5). При этом был выполнен расчет массы груза по трем вариантам в зависимости от степени влажности древесины. Оказалось, что масса груза для всех вариан-

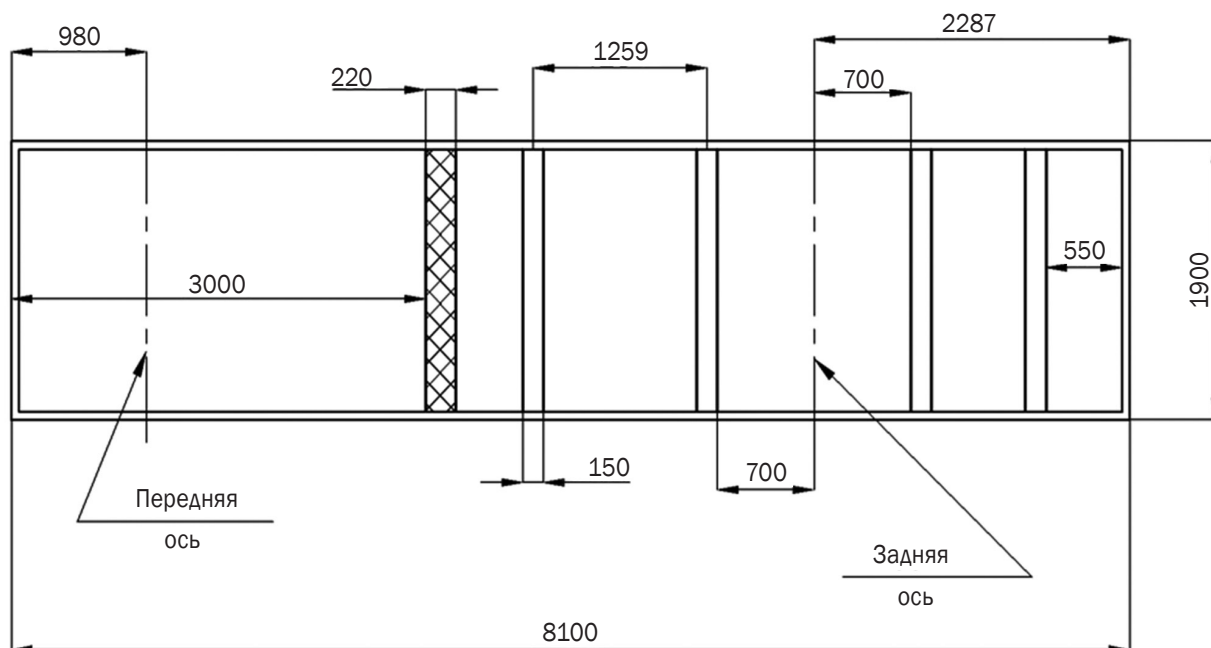


Рис. 3. Чертеж рамы автомобиля

Fig. 3. Vehicle frame drawing

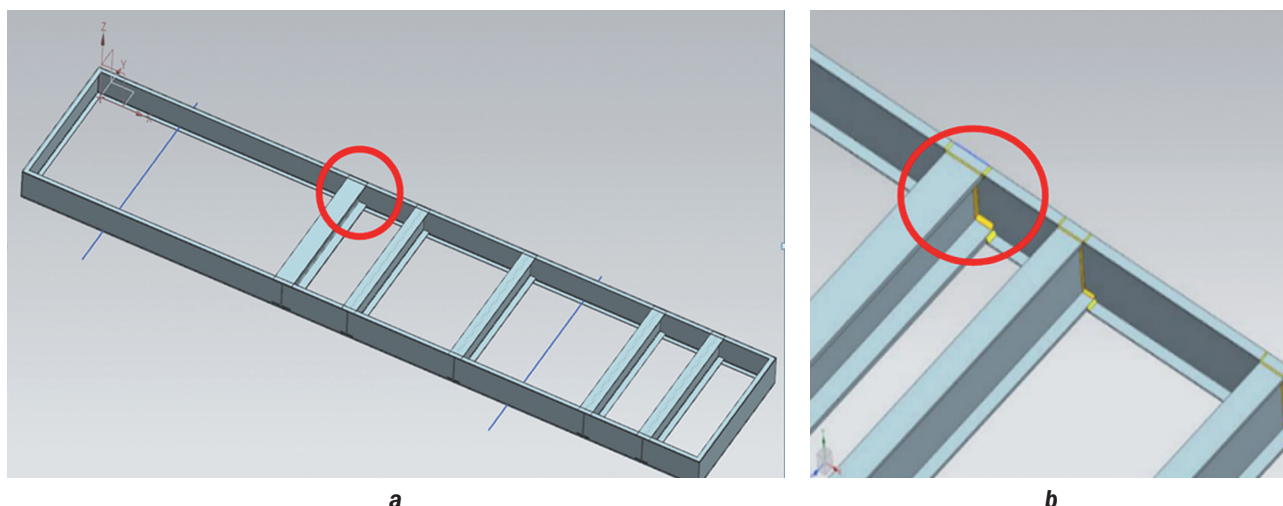


Рис. 4. Геометрическая модель рамы автомобиля с учетом сварных швов (а) и место разрушения (b)
Fig. 4. Geometric model of the vehicle frame taking into account welds (a) and failure spot (b)

тов существенно превышала грузоподъемность данного автомобиля, которая составляет 4565 кг. В дальнейших расчетах была принята минимальная величина массы груза (для сухой древесины), равная 4683 кг.

В соответствии с двумя основными версиями расследуемого события (повреждение рамы при эвакуации или повреждение рамы при ДТП) были подготовлены две расчетные схемы нагруженной рамы:

1) нагруженная рама под углом 23° (моделирование погрузки груженого автомобиля на эвакуатор);

2) нагруженная рама с опорами на переднее правое и заднее левое колеса (моделирование переезда бордюра).

Для обеих расчетных схем были приняты следующие граничные условия:

– для передней оси автомобиля – жесткое закрепление рамы в месте расположения данной оси;

– в месте расположения задней оси – закрепление, позволяющее раме линейно перемещаться вдоль своей оси, а также допускающее поворот вокруг задней оси.

Конечно-элементная модель в обоих случаях была сформирована из стержневых конечных элементов, которым был задан соответствующий профиль (швеллер или двутавр). Была проверена сходимость результатов расчетов для трех разных сеток конечных элементов, содержащих 19, 38 и 57 стержневых элементов. Различие в итоговых показателях первых двух составило более 30%, а двух последних – менее 10%, что говорит о достаточно близких результатах, т.е. указывает на их сходимость. Для расчетов была применена конечно-элементная модель, содержащая 57 стержневых элементов.

Как показал анализ результатов расчетов первой модели, максимальные напряжения в раме при погрузке автомобиля на эвакуатор



а



б

Рис. 5. К определению нагрузки от массы перевозимого груза: а – от массы бруса; б – от массы досок

Fig. 5. Determination of load vs weight of the cargo transported: a – from the mass of the beams; b – from the mass of the boards

составили 65,13 МПа, что значительно ниже предела текучести материала рамы (рис. 6). К тому же они возникали в районе задней оси. В этой связи можно утверждать, что погрузка и эвакуация груженого автомобиля не могли привести к возникновению трещины в его раме.

Расчет второй модели показал, что рама при переезде бордюра работает на скручивание (рис. 7). На том же рис. 7 представлена карта рассчитанных перемещений рамы при приложенной нагрузке от массы оборудования и груза. Ударная нагрузка при этом не учитывалась.

Однако даже без учета ударной нагрузки максимальные напряжения составляют 840 МПа, что значительно превышает предел текучести материала рамы.

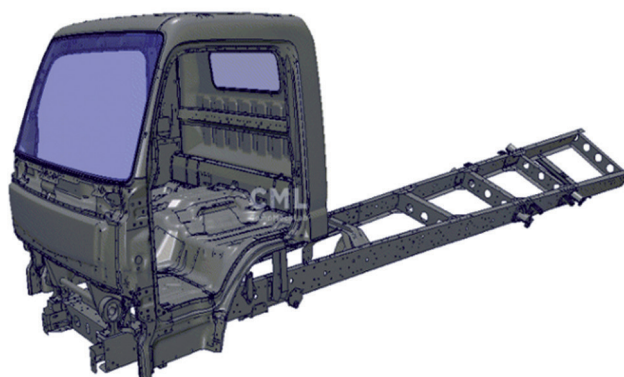
При этом на карте напряжений наблюдается четкая локализация максимальных напряжений в месте обнаружения трещины (рис. 8).

Анализ результатов расчета НДС рамы дает основание утверждать, что истинной причиной возникновения трещины в раме стал переезд перегруженного автомобиля через бордюр.

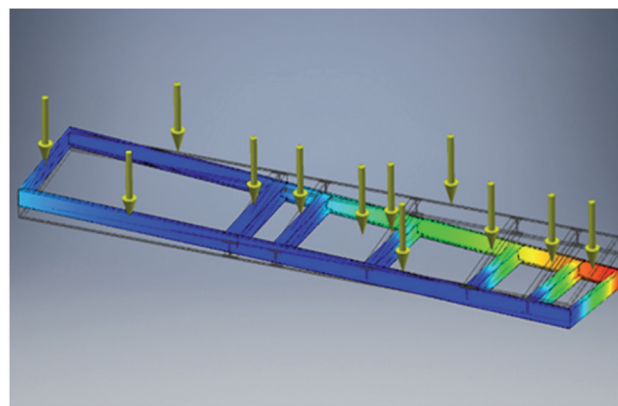
Анализ напряженно-деформированного состояния верхней части гидроножниц.

Второй задачей в рамках данной работы было установление причины разрушения верхней части гидроножниц после введения их в эксплуатацию. Повторному разрушению в том же месте эта конструкция подверглась после ремонта с применением сварки (рис. 9).

Ознакомившись с конструкцией и принципом ее работы, можно сделать вывод, что



a



b

Рис. 7. Деформации рамы автомобиля (a) и результаты расчета перемещений при переезде через бордюр (b)

Fig. 7. Vehicle frame deformations (a) and calculation results of movements when driving over the curb (b)

верхняя часть гидроножниц испытывает при работе сложное напряженное состояние.

В этом случае необходимо определить эквивалентные напряжения, при расчете кото-

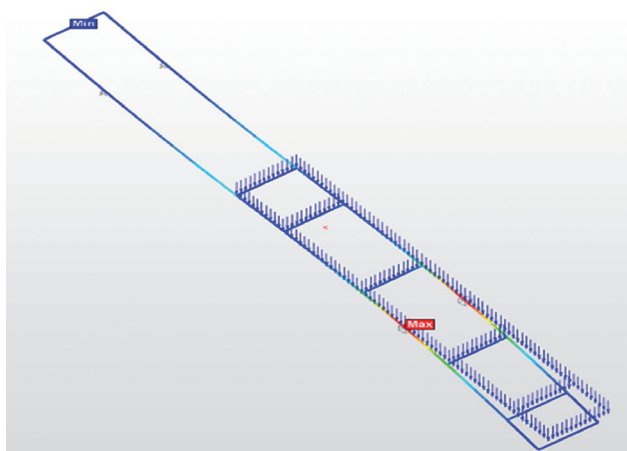


Рис. 6. Напряжения в раме автомобиля при его эвакуации. Максимальное напряжение составило 65,13 МПа

Fig. 6. Frame stresses during vehicle evacuation. Maximum stress is 65.13 MPa

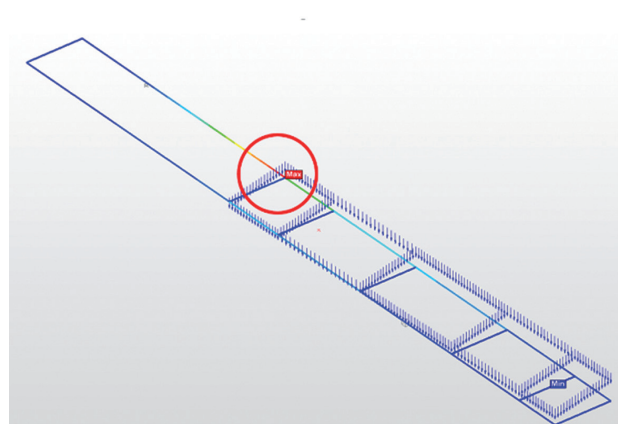


Рис. 8. Результаты расчета напряжений в раме автомобиля при переезде через бордюр. Максимальные напряжения составили 840 МПа

Fig. 8. Calculation results of stresses in the vehicle frame when driving over the curb. Maximum stress is 840 MPa



a



b

Рис. 9. Фото с указанием места возникновения трещины: а – место возникновения трещины; б – трещина крупным планом

Fig. 9. An image with indicated crack location: a – location of crack occurrence; b – close-up of crack

рых учитываются нормальные напряжения, возникающие при растяжении-сжатии и изгибе, а также касательные напряжения при сдвиге.

Учитывая массивную (явно трехмерную) конструкцию детали с поперечными сечениями большой площади и направление нагрузки от штока гидроцилиндра, можно с достаточной долей уверенности сказать, что доля растягивающих напряжений будет незначительной, а изгибная и сдвиговая составляющие будут преобладающими.

Изгиб является наиболее опасным с точки зрения прочности видом деформации, характеризующимся неравномерным распределением напряжений по сечению детали и

приводящим к возникновению максимальных напряжений у поверхности.

Твердотельная геометрическая модель построена в модуле APM Studio. На рис. 10 показаны:

- модель верхней части гидронажниц (а);
- оси шарнира (b);
- верхней части в сборе (с).

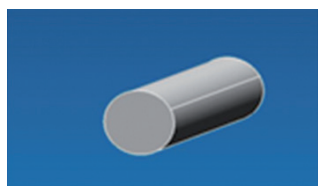
Конечноэлементная сетка представлена на рис. 11. Она содержит 37234 конечных элемента (10-узловых гексаэдров) и 64049 узла.

Рассмотрим исходные данные для расчета.

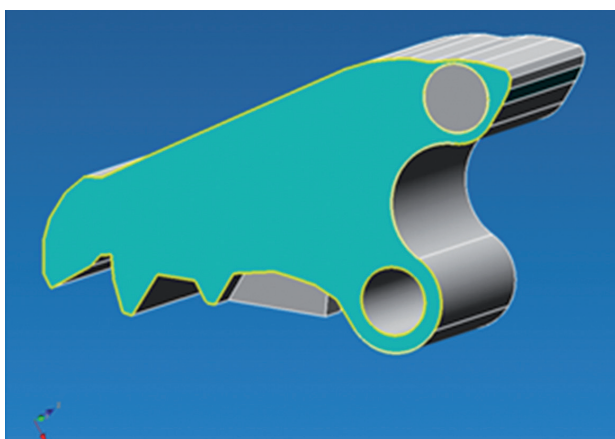
Давление в гидросистеме – 350 кг/см² (34,32 МПа), диаметр гидроцилиндра наруж-



a



b



c

Рис. 10. Твердотельная геометрическая модель: а – верхняя часть гидронажниц; б – ось шарнира; с – верхняя часть в сборе

Fig. 10. Solid geometric model: a – upper part of hydraulic shears; b – hinge axis; c – upper part assembled

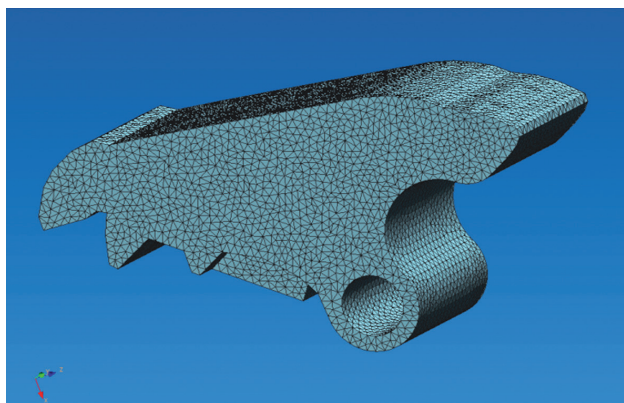


Рис. 11. Конечноеэлементная сетка
Fig. 11. Finite element mesh

ный – 280 мм (для расчета принимаем диаметр поршня, равный 260 мм).

Расчет нагрузки выполнен по формуле:

$$F = P \cdot A,$$

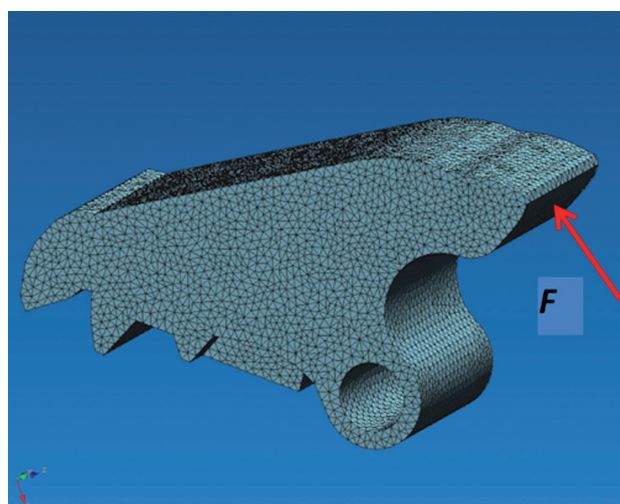
где F – сила со стороны штока, Н; P – давление в гидроцилиндре, Па; A – площадь сечения поршня, м². По расчету усилие F на штоке составило 1857 кН.

Максимальные напряжения изгиба возникнут в случае большого плеча и малой площади поперечного сечения в основании (в месте закрепления). Такой предполагаемый случай изображен на рис. 12, когда измельчаемый (разрушаемый) материал строительных конструкций оказался максимально близко к нижнему шарниру и зазор в отверстии этого шарнира нулевой (ось шарнира прижата) в нижней части внутренней поверхности отверстия. На рис. 12 показаны место приложения и направление силы F , а также граничные условия, соответствующие описанному случаю.

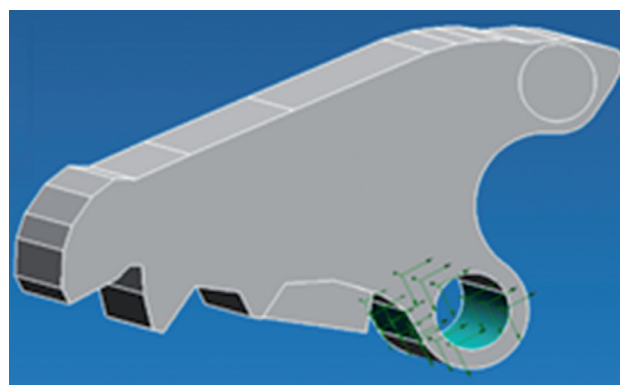
Были проведены расчеты при значениях F : 1400 кН, 1600 кН и 1857 кН. На рис. 13 представлены результаты расчета эквивалентных напряжений для наиболее нагруженного случая. Как видно из рис. 13, максимальные напряжения возникают в месте, соответствующем месту разрушения.

На диаграмме рис. 14 представлено сравнение результатов расчетов максимальных напряжений при разных нагрузках и пределов текучести стали 20 и 09Г2С.

На данной диаграмме видно, что при максимальной нагрузке в материале в месте разрушения возникают напряжения,



a



b

Рис. 12. Приложение нагрузки (a) и граничные условия (b)
Fig. 12. Load application (a) and boundary conditions (b)

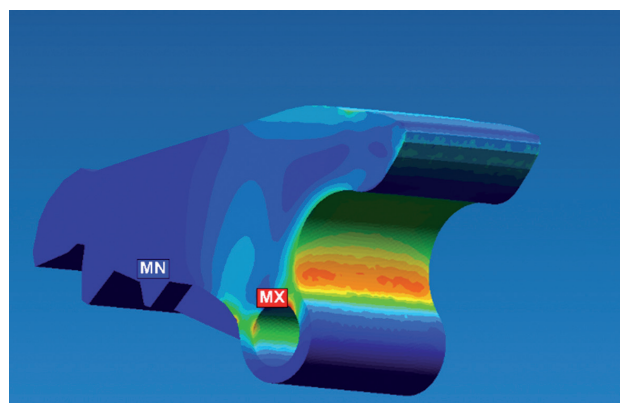


Рис. 13. Результаты при силе 1857000 Н. Максимальное напряжение составило 391 МПа

Fig. 13. Results at the force of 1857000 Н. Maximum stress is 391 MPa

превышающие пределы текучести применяемых для данной конструкции материалов: стали 20 и стали 09Г2С. Из сказанного можно сделать вывод о том, что прочност-

Максимальные
напряжения, МПа

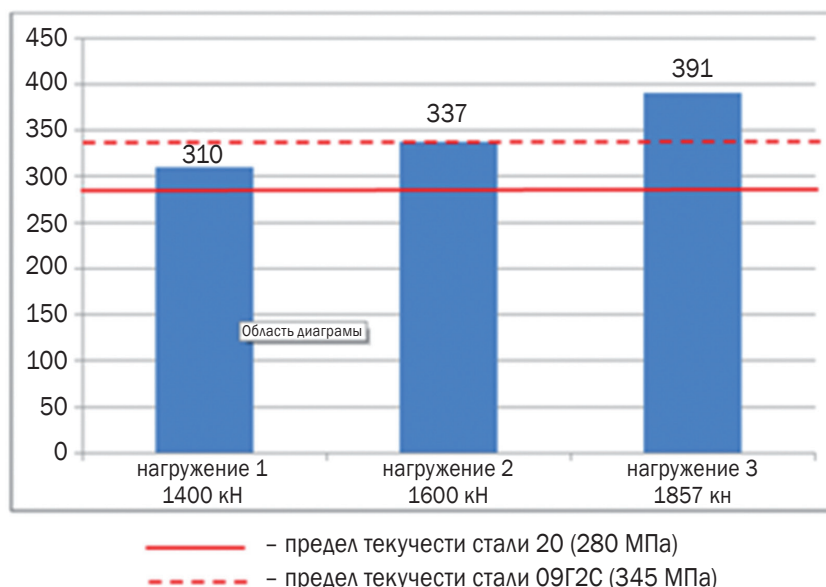


Рис. 14. Сравнение результатов расчетов

Fig. 14. Comparison of calculation results

ные характеристики данных материалов недостаточны для изготовления подобных конструкций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проведено исследование НДС конструкций рамы автомобиля и гидроножниц с целью установления причин их разрушения. В результате анализа результатов компьютерного моделирования данных конструкций установлено нижеследующее:

- в случае с разрушением рамы автомобиля наиболее вероятной причиной

появления в ней трещины является переезд перегруженного автомобиля через бордюр;

- в случае с разрушением верхней части гидроножниц наиболее вероятной причиной разрушения явился выбор материала с недостаточно высокими механическими характеристиками для изготовления данной конструкции.

Разработанные компьютерные модели и результаты проведенных исследований могут быть использованы при инженерно-технической экспертизе различных технических объектов.

Список источников

1. Щербаков А.П., Иванов Д.В. Особенности проведения судебных инженерно-технических экспертиз при исследовании сварных соединений рабочего органа ножа автогрейдера: монография. СПб.: СПбГАСУ, 2022. 292 с. EDN: HOSQMO.
2. Шавлюга А.А., Таратанов Н.А., Карасев Е.В., Калашников Д.В. Применение программных комплексов для установления обстоятельств пожара // Технологии техносферной безопасности. 2017. № 3. С. 78–85. EDN: YOCMWV.
3. Parmar R.S. Welding engineering and technology. Yayıncı: Khanna Publishers, 2010. 1374 p.
4. Polakowski N.H., Ripling F.J. Strength and structure of engineering materials. New Jersey: Prentice-Hall, 1966. 535 p.
5. Repetskiy O., Ryzhikov I., Lutaenko N., Latin A. Vibration of mistimed bladed discs // Futures in Mechanics of Structures and Materials: Proceedings of the 20th Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials (Toowoomba, 2–5 December 2008). Toowoomba: QLD, 2008. P. 719–722. EDN: MWCKFW.
6. Maksimow V., Petukhov E., Jankovic D. Determination of semitrailers supporting units loading with pliancy elastic suspension brackets elements calculations // XV Conference Science and motor vehicles (Belgrad, 15–18 May 1995). Belgrad, 1995. P. 141–143.
7. Барышников Ю.Н. Расчет нагрузок на несущую систему транспортных средств // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 12. С. 11. EDN: RSGRZL.
8. Пыхалов А.А., Милов А.Е. Контактная задача статистического и динамического анализа сборочных роторов турбомашин: монография. Иркутск: ИрГТУ, 2007. 190 с. EDN: OWXBOJ.

9. Антипин С.А., Пыхалов А.А., Пашков А.А. Определение параметров искажений форм геометрии маложестких крупногабаритных деталей с учетом влияния на них силы собственного веса и условий закрепления // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2024. Т. 20. № 3. С. 175–184. <https://doi.org/10.36622/1729-6501.2024.20.3.027>. EDN: ENKUER.
10. Барышников Ю.Н. Проблемы создания математических моделей для расчета несущих систем карьерных самосвалов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4-2. С. 54–56. EDN: QLILIF.
11. Бусел Б.У. Категории карьерных дорог // Автомобильная промышленность. 2003. № 2. С. 17–19.
12. Еременко С.Ю. Методы конечных элементов в механике деформируемых тел: монография. Харьков: Основа, 1991. 272 с.
13. Зенкевич О.С. Метод конечных элементов в технике / пер. с англ.; под ред. Б.Е. Победри. М.: Мир, 1975. 541 с.
14. Испеньков С.А., Ракицкий А.А. Моделирование динамического поведения карьерных самосвалов особо большой грузоподъемности в среде ANSYS // Теоретическая и прикладная механика: международный научно-технический сборник. Минск: БНТУ, 2010. Вып. 25. С. 295–300.
15. Мариев П.Л., Кулешов А.А., Егоров А.Н., Зырянов И.В. Карьерный автотранспорт стран СНГ в XXI веке. СПб.: Наука, 2006. 387 с.
16. Мазурин А. SCAN: от проектирования до компьютерного анализа и стендовых испытаний // САПР и графика. 2001. № 6. С. 23–24.
17. Repetskiy O., Ryzhikov I., Schmidt R. Investigations of impact of various types of mistuning on bladed disks vibration and fatigue life // 8th Iftomm International Conference on Rotor Dynamics 2010 (Seoul, 12 September – 15 October, 2010). Seoul: Curran Associates, 2012. Vol. 1. P. 603. EDN: XHWKXE.
18. Шермухамедов А.А., Усманов И.И., Салимджанов Р.Т., Тогаев А.А. Методы расчета и испытания автотракторных прицепов отечественного производства: монография. Ташкент: ТАДИ, 2012. 132 с.
19. Щербак О.В., Бойко С.И., Дибров Е.И., Гуменюк И.А. Оценка прочности несущих систем спецтехники, созданных на базе автомобильных шасси // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2014. Вып. 65-66. С. 135–138.
20. Яценко Н.Н. Форсированные полигонные испытания грузовых автомобилей. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1984. 328 с.
21. Лагерева И.А. Методика моделирования эксплуатационной нагруженности металлоконструкции мостового крана // Наука и производство 2009: матер. Междунар. науч.-практ. конф. (г. Брянск, 19–20 марта 2009 г.). Брянск: БГТУ, 2009. С. 312–314.
22. Щербаков А.П., Пушкарев А.Е., Манвелова Н.Е. Рабочие механизмы строительных машин и способы технологического обеспечения прочности сварных соединений из высокопрочных сталей // Недвижимость: экономика, управление. 2020. № 1. С. 63–68. EDN: ECRNJJ.
23. Щербаков А.П., Пушкарев А.Е., Манвелова Н.Е. Оценка напряженно-деформированного состояния в зоне сварного соединения для рамы автопогрузчика // Известия Московского государственного технического университета «МАМИ». 2020. № 2. С. 93–101. <https://doi.org/10.31992/2074-0530-2020-44-2-93-101>. EDN: LNNLPK.
24. Щербаков А.П., Пушкарев А.Е., Максимов С.Е. Замена материала рабочего органа как путь повышения надежности дорожно-строительных машин // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2021. Т. 18. № 6. С. 646–661. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-646-661>. EDN: JSBBJP.
25. Scherbakov A., Babanina A., Breskich V., Klyovan V. The impact of external influences on the characteristics of metals of welded structures of construction machines // Interagromash 2021: Proceedings 14th International Scientific Conference. Rostov-on-Don: Springer, 2022. Vol. 247. P. 973–982. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80946-1_88. EDN: NHTRFA.
26. Еловенко Д.А., Репецкий О.В. Анализ напряженного состояния упругой полуплоскости, нагруженной постоянным давлением на ограниченных промежуточных участках с заданным периодом, методом конечных элементов на базе программного комплекса MSC.MARC // Известия Иркутской государственной экономической академии. 2011. № 5. С. 171–175. EDN: OIGIKD.
27. Repetskiy O.V. Use of the FEM to solve the thermoelasticity problem of turbine blades // Strength of Materials. 1990. Vol. 22. No. 12. P. 1848–1854. <https://doi.org/10.1007/BF00769137>. EDN: XOJDLQ.

References

1. Shcherbakov A.P., Ivanov D.V. Features of conducting forensic engineering and technical examinations in the study of welded joints of the motor grader blade working body. Saint Petersburg: Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering; 2022, 292 p. (In Russ.). EDN: HOSQMO.
2. Shavlyuga A.A., Taratanov N.A., Karasev E.V., Kalashnikov D.V. Application software systems to establish the circumstances of the fire. Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti. 2017;3:78-85. (In Russ.). EDN: YOCMWV.
3. Parmar R.S. Welding engineering and technology. Yayımcı: Khanna Publishers; 2010, 1374 p.

4. Polakowski N.H., Rippling F.J. *Strength and structure of engineering materials*. New Jersey: Prentice-Hall; 1966, 535 p.
5. Repetskiy O., Ryzhikov I., Lutaenko N., Latin A. Vibration of mistimed bladed discs. In: *Futures in Mechanics of Structures and Materials: Proceedings of the 20th Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials*. 2–5 December 2008, Toowoomba. Toowoomba: QLD; 2008, p. 719-722. EDN: MWCKFW.
6. Maksimov V., Petukhov E., Jankovic D. Determination of semitrailers supporting units loading with pliancy elastic suspension brackets elements calculations. In: *XV Conference Science and motor vehicles*. 15–18 May 1995, Belgrad. Belgrad; 1995, p. 141-143.
7. Baryshnikov Yu.N. Calculation of loads on bearing system of vehicles. *Engineering Journal: Science and Innovation*. 2013;12:11. (In Russ.). EDN: RSGRZL.
8. Pykhalov A.A., Milov A.E. *Contact problem of statistical and dynamic analysis of turbomachine assembly rotors*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2007, 190 p. (In Russ.). EDN: OWXBOJ.
9. Antipin S.A., Pyhalov A.A., Pashkov A.A. Defining geometry shape distortion parameters of low-rigidity large-sized parts, taking into account the influence on them the force of their own weight and fastening conditions. *Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2024;20(3):175-184. (In Russ.). <https://doi.org/10.36622/1729-6501.2024.20.3.027>. EDN: EHKUER.
10. Baryshnikov Yu.N. The issues of developing mathematical models for calculation of bearing systems of large dump-body trucks. *Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod*. 2011;4-2:54-56. (In Russ.). EDN: QLILIF.
11. Busel B.U. Categories of quarry road. *Avtomobil'naya promyshlennost'*. 2003;2:17-19. (In Russ.).
12. Eremenko S.Yu. *Finite element methods in mechanics of deformable bodies*. Har'kov: Osnova; 1991, 272 p. (In Russ.).
13. Zienkiewicz O.C. The finite element method in engineering science. London, 1971 (Russ. ed.: *Metod konechnykh elementov v tekhnike*. Moscow: Mir; 1975, 541 p.)
14. Ispen'kov S.A., Rakickij A.A. Modeling the dynamic behavior of extra-heavy-duty quarry dump trucks in the ANSYS environment. In: *Teoreticheskaya i prikladnaya mekhanika: mezhdunarodnyj nauchno-tekhnicheskij sbornik = Theoretical and Applied Mechanics: International Scientific and Technical Collection*. Minsk: Belarusian National Technical University; 2010, Iss. 25, p. 295-300. (In Russ.).
15. Mariev P.L., Kuleshov A.A., Egorov A.N., Zyryanov I.V. *Open-pit motor transport of the CIS countries in the 21st century*. Saint Petersburg: Nauka; 2006, 387 p. (In Russ.).
16. Mazurin A. SCAN: from design to computer analysis and bench testing. *SAPR i grafika*. 2001;6:23-24. (In Russ.).
17. Repetskiy O., Ryzhikov I., Schmidt R. Investigations of impact of various types of mistuning on bladed disks vibration and fatigue life. In: *8th Iftomm International Conference on Rotor Dynamics 2010*. 12 September – 15 October 2010, Seoul. Seoul: Curran Associates; 2012, vol. 1, p. 603. EDN: XHWKXE.
18. Shermukhamedov A.A., Usmanov I.I., Salimdzhanov R.T., Togaev A.A. *Methods of calculation and testing of domestically produced autotractor trailers*. Tashkent: Tashkent Automobile and Road Construction Institute; 2012, 132 p. (In Russ.).
19. Shcherbak O., Boiko S., Dibrov Ye., Gumeniuk I. Assessing the durability of the undercarriage of heavy construction equipment created on the basis of automobile and tractor chassis. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*. 2014;65-66:135-138. (In Russ.).
20. Yatsenko N.N. *Forced field testing of trucks*. Moscow: Mashinostroenie; 1984, 328 p. (In Russ.).
21. Lagerev I.A. Modeling methodology for overhead crane metal structure operational load. In: *Nauka i proizvodstvo 2009: materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Science and Production 2009: Proceedings of International scientific and practical conference*. 19–20 March 2009, Bryansk. Bryansk: Bryansk State Technical University; 2009, p. 312-314. (In Russ.).
22. Scherbakov A.P., Pushkarev A.E., Manvelova N.E. Working mechanisms of construction machines and methods of technology-security of strength of welded joints from high-magnified steels. *Real estate: economics, management*. 2020;1:63-68. (In Russ.). EDN: ECRNJH.
23. Shcherbakov A.P., Pushkarev A.E., Manvelova N.E. Assessment of the stress-strain state in the weld zone for the forklift truck frame. *Scientific Journal "Izvestiya MGTU "MAMI"*. 2020;2:93-101. (In Russ.). <https://doi.org/10.31992/2074-0530-2020-44-2-93-101>. EDN: LNNLPK.
24. Scherbakov A.P., Pushkarev A.E., Maksimov S.E. Replacement working body material as a way to increase reliability of road construction machines. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021;18(6):646-661. (In Russ.). <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-646-661>. EDN: JSBBJP.
25. Scherbakov A., Babanina A., Breskich V., Klyovan V. The impact of external influences on the characteristics of metals of welded structures of construction machines. In: *Interagromash 2021: Proceedings of 14th International Scientific Conference*. Rostov-on-Don: Springer; 2022, vol. 247, p. 973-982. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80946-1_88. EDN: NHTRFA.
26. Elovenko D.A., Repetskiy O.V. Analysis of stress state of elastic half-plane loaded with constant pressure at limited intermediate sections with specified period by finite element method based on MSC.MARC software. *Izvestiya of Irkutsk State Economic Academy*. 2011;5:171-175. (In Russ.). EDN: OIGIKD.
27. Repetskii O.V. Use of the FEM to solve the thermoelasticity problem of turbine blades. *Strength of Materials*. 1990;22(12):1848-1854. <https://doi.org/10.1007/BF00769137>. EDN: XOJDLQ.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Рыжиков Игорь Николаевич,
к.т.н., доцент,
доцент кафедры материаловедения,
сварочных и аддитивных технологий,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
✉ rin111@list.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6105-0659>

Балановский Андрей Евгеньевич,
к.т.н., доцент,
заведующий кафедрой материаловедения,
сварочных и аддитивных технологий,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
fuco.64@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6466-6587>

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 15.01.2025 г.; одобрена после рецензирования 28.02.2025 г.; принята к публикации 02.04.2025 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Igor N. Ryzhikov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of
Materials Science, Welding and Additive Technologies,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
✉ rin111@list.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6105-0659>

Andrey E. Balanovsky,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Head of the Department of Materials Science,
Welding and Additive Technologies,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
fuco.64@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6466-6587>

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 15.01.2025; approved after reviewing 28.02.2025; accepted for publication 02.04.2025.



Разработка устройства составного тормозного диска дисково-колодочного тормоза транспортных средств с повышенными эксплуатационными характеристиками

Е.Ф. Складенко^{1✉}, Ю.Д. Шевцов²

^{1,2} Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия

Резюме. Цель – разработать устройство составного тормозного диска дисково-колодочного тормоза транспортных средств, обладающего повышенными эксплуатационными характеристиками. Объектом исследования явились конструкции дисково-колодочных тормозных устройств транспортного средства марки Ford, модели Explorer 5-го поколения, 2017 года выпуска. Для устранения недостатков данных дисков (повышенные градиенты температур и внутренних напряжений на поверхностях и в теле тормозных дисков; отсутствие свойства ремонтпригодности дисков; недостаточный отвод тепла от рабочих поверхностей пары трения диск-колодка) использовались методы теории решения изобретательских задач, с учетом положений которой был предложен метод расчленения основных конструктивных элементов тормозного диска на составляющие. Для разработки конструкции составного тормозного диска использовались методы трехмерного проектирования в учебной версии российского программного продукта КОМПАС-3D, v21. На основе поставленных задач разработано устройство составного тормозного диска, конструктивные элементы которого представлены на иллюстрациях 3D-моделей и изготовленных прототипов с пояснениями их осуществления. В результате построения конечно-элементных сеток с последующим выполнением статических расчетов на прочность по критериям Мизеса были выявлены области напряжено-деформируемого состояния разработанных деталей устройства составного тормозного диска. Сделаны выводы о необходимости оптимизации элементов конструкции и выбора материалов, обладающих оптимальными физическими свойствами (плотность, предел текучести, модуль упругости, теплопроводность и т.д.), что позволит снизить инерционные массы изделий и неподрессоренные массы транспортного средства, повысить гарантированный запас прочности и улучшить отведение тепла от пар трения дисково-колодочных тормозных устройств. Рассмотрены и применены методы и технологии 3D-печати воскоподобными филаментами, необходимые для сталелитейного производства по выплавляемым моделям. Таким образом, по результатам проведенных исследований показано, что выбор оптимальных материалов позволит повысить эффективность торможения при использовании разрабатываемой конструкции, снизить тормозной путь и время остановки транспортного средства. Представлены рекомендации по настройкам и режимам печати.

Ключевые слова: составной тормозной диск, составной тормозной ротор, конечно-элементный анализ, 3D-печать, выплавляемые модели

Для цитирования: Складенко Е.Ф., Шевцов Ю.Д. Разработка устройства составного тормозного диска дисково-колодочного тормоза транспортных средств с повышенными эксплуатационными характеристиками // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 2. С. 216–233. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-2-216-233>. EDN: NUIVAY.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Development of a modular brake disc assembly for spot-type disc brake systems with enhanced performance characteristics

Evgeniy F. Sklyarenko^{1✉}, Yuriy D. Shevtsov²

^{1,2}Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia

Abstract. This study presents a modular brake disc assembly designed to improve the performance characteristics of automotive spot-type disc brake systems. We examined disc brake system configurations in 2017 fifth-generation Ford Explorer vehicles. Three principal limitations of conventional brake discs were identified: excessive thermal gradients and internal stresses within disc components, non-repairable structural designs, and insufficient heat

transfer from friction surfaces during operation. To address these challenges, we employed the theory of inventive problem solving (TRIZ), which led to the development of a modular decomposition approach for principal structural elements of the brake disc. The design process involved 3D modelling techniques within the KOMPAS-3D v21 educational software package, which facilitates comprehensive virtual prototyping and analysis. Finite element meshing and subsequent static strength calculations, using the von Mises criteria, revealed stress-strain distribution zones in the developed components of the modular brake disc assembly. The findings underscore the importance of enhancing structural design and selecting materials with optimal physical properties, including density, yield strength, elastic modulus, and thermal conductivity. This approach would reduce the inertial masses of components and the unsprung masses of the vehicle, while increasing the guaranteed safety factor and improving heat dissipation from the friction pairs in spot-type disc brake systems. In addition, 3D printing methods with wax-like filaments, essential for investment casting in steel production, were reviewed and applied. The study demonstrates that the selection of optimal materials enhances braking efficiency and reduces the stopping distance and time of a vehicle when using the proposed design. Recommendations for print settings and modes are also provided.

Keywords: composite brake disc, composite brake rotor, finite element analysis, 3D printing, investment casting models

For citation: Sklyarenko E.F., Shevtsov Yu.D. Development of a modular brake disc assembly for spot-type disc brake systems with enhanced performance characteristics. *iPolytech Journal*. 2025;29(2):216-233. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-2-216-233>. EDN: NUIVAY.

ВВЕДЕНИЕ

Конструкции тормозных дисков, используемых во фрикционных тормозных узлах транспортных средств (ТС), широко известны³ [1–9]. Тормозные диски в целом используются в тормозных системах ТС для их замедления, остановки или удержания в неподвижном состоянии путем прижатия к фрикционным кольцевым дискам фрикционных накладок тормозных колодок при задействовании тормоза. Тормозные диски (при использовании вентилируемых тормозных дисков) включают в себя ступичную часть, соединенную с двумя взаимно параллельными боковыми фрикционными кольцами, которые, в свою очередь, чаще всего соединены между собой перегородками, например, в виде лопастей, ребер, перемычек, столбов, гребней, которые могут иметь различный профиль. Указанные перегородки вместе с внутренними поверхностями фрикционных колец образуют каналы (вентиляционный аппарат), по которым при вращении тормозного диска интенсифицируется процесс

прохождения потоков воздуха, омывающих стенки вентиляционного аппарата, что способствует конвективному охлаждению тормозного диска.

В результате патентного поиска [5–7] и анализа проблем известных конструкций вентилируемых тормозных дисков, освещенных в научных трудах [1–9, 13–15], был выделен ряд свойственных им недостатков, к которым относятся:

1) повышенный градиент температур между роторной и ступичной частями, вследствие чего роторная часть имеет большее тепловое расширение, чем ступичная часть. Перепад температур в теле диска при торможении приводит к повышенным термомеханическим напряжениям в его теле, что, в свою очередь, приводит к образованию трещин на границах перепада температур и возникающих напряжений;

2) известные устройства тормозных дисков не обладают таким свойством, как ремонтпригодность, предусмотренным производителем. Так, в случае износа рабочих



Рис. 1. Вид общей конструкции современных тормозных дисков транспортных средств
Fig. 1. General view of the design of modern vehicle brake discs

³Вольченко Н.А., Красин П.С. Дисково-колодочные тормозные устройства: учеб. пособ. Краснодар: КубГТУ, 2020. 66 с.

поверхностей ротора и/или повреждения тормозного диска требуется его полная замена на новый тормозной диск ввиду цельной (неразборной) конструкции. Значит, цельнолитая конструкция тормозных дисков (роторов) не позволяет использовать повторно его «каркас» или заменять/восстанавливать изношенные кольцевые поверхности трения;

3) что касается соединительных элементов, предназначенных для соединения между собой двух противолежащих фрикционных кольцевых дисков, в совокупности образующих вентиляционные каналы, то они изготавливаются совместно (единовременно) с кольцевыми фрикционными дисками, например, методами литья, из одного и того же материала, что и все тело тормозного диска (ротор, ступичная часть). Ввиду чего материал внутренних стенок вентиляционного аппарата, равно как и остальные конструктивные элементы ротора и ступичной части, имеет те же теплопроводность и теплоемкость, из-за чего не может быть достигнут более эффективный отвод теплоты от тормозного диска.

Целью работы является разработка устройства составного тормозного диска и определение необходимых расчетных методов исследования, которые позволят оптимизировать предложенные конструктивные решения и устранить известные недостатки тормозных устройств ТС.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ

Таким образом, для разработки устройства составного тормозного диска дисково-колодочного тормоза ТС, обладающего повышенными эксплуатационными характеристиками, необходимым является решение следующих технических задач:

1) устройство составного тормозного диска должно обладать свойством ремонтнопригодности, то есть его конструкция должна позволять производить замену/восстановление отдельной изношенной и/или поврежденной детали, например, с использованием комплекта запасных частей и принадлежностей или методами восстановления поверхностей;

2) устройство составного тормозного диска должно обеспечивать его эффектив-

ное охлаждение, в первую очередь набегающими потоками воздуха окружающей среды;

3) устройство и материалы деталей составного тормозного диска должны обеспечивать ему высокую стойкость к термомеханическим нагрузкам и напряжениям, возникающим при торможении;

4) устройство составного тормозного диска (и каждой из составляющих его деталей) должно допускать возможность применения технологических процессов при их изготовлении (производстве) и последующем обслуживании/ремонте при эксплуатации с использованием доступных и распространенных, а также рентабельных технологий и технических средств.

Решение поставленных задач выполнялось для ТС, в частности для ТС марки Ford, модели Explorer 5-го поколения, 2017 года выпуска, имеющего массу 2405 кг, мощность двигателя внутреннего сгорания 249 л.с. (лошадиных сил), максимальную скорость 183 км/ч, оснащенного на передней оси вентилируемыми тормозными дисками и 4-поршневыми тормозными суппортами. 3D-модель разработанной конструкции составного тормозного диска представлена на рис. 2, 3. При проектировании указанной конструкции составного тормозного диска соблюдались требования изготовителя Ford к габаритным и установочным размерам указанного ТС таким образом, чтобы была возможна его штатная установка. Так, толщина штатного тормозного диска равна 32 мм, внешний диаметр тормозного диска – 352 мм, количество крепежных отверстий к ступице составило 5 шт.

Для решения поставленных технических задач использовалась теория решения изобретательских задач (ТРИЗ) [16], с учетом которой был разработан метод расчленения основных конструктивных элементов вентилируемого тормозного диска на составляющие. Суть предлагаемого метода заключается в разбиении элементов конструкции на функциональные группы. Так, путем разделения конструкции вентилируемого тормозного диска на функциональные группы были выделены его следующие основные конструктивные элементы: 1) фрикционные кольцевые диски (слева и справа), воспринимающие воздействия от фрикционных накладок тормозных колодок; 2) функциональный каркас, выполняющий как функцию не-

сущей конструкции с элементами крепежа, так и функцию распределения течения потоков воздуха окружающей среды, необходимой для реализации интенсификации охлаждения тормозного диска; 3) функциональные корпуса теплоконденсаторов, выполняющие функции соединения деталей конструкции в единое целое устройство – тормозной диск, отведения теплоты от фрикционных кольцевых дисков в стенки вентиляционного аппарата и, соответственно, функцию вентиляционного аппарата; 4) ступичный фланец, выполняющий монтажную функцию устройства составного тормозного диска к ступице колеса. Таким образом, расчленение основных конструктивных элементов вентилируемого тормозного диска на составляющие позволило выделить его основные компоненты, представленные на рис. 2, которые могут быть изготовлены независимо друг от друга с применением доступных и распространенных, а также рентабельных технологий и технических средств, например, методов литейного производства, в том числе по выплавляемым моделям на основе воскоподобных материалов и композиционных оболочек. Для разработки конструкции составного тормозного диска использовались методы трехмерного проектирования в учебной версии

русского программного продукта КОМПАС-3D v21 (рис. 2–13).

Устройство разрабатываемого составного тормозного диска дисково-колодочного тормоза ТС с повышенными эксплуатационными характеристиками (см. рис. 2–13) представляет собой составную (сборно-разборную) конструкцию, включающую в себя: 1 – фрикционный кольцевой диск; 2 – функциональный каркас; 3 – функциональный корпус теплоконденсатора; 4 – ступичный фланец; 5 – наружную сторону фрикционного кольцевого диска; 6 – тыльную (внутреннюю) сторону фрикционного кольцевого диска; 7 – шип; 8 – малую упорную площадку; 9 – упорное ребро; 10 – внутреннюю упорную площадку; 11 – наружную упорную площадку; 12 – фланцевую часть; 13 – отверстие для фиксации ступичного фланца; 14 – отверстие для фиксации функционального корпуса теплоконденсатора; 15 – сквозные каналы (вентиляционный аппарат); 16 – боковую упорную площадку; 17 – малую проушину; 18 – отверстие для фиксации функционального корпуса теплоконденсатора на функциональном каркасе; 19 – внутреннюю перемычку; 20 – шип; 21 – проушину; 22 – отверстие; 23 – установочную поверхность; 24 – установочную поверхность; 25 – установочную по-

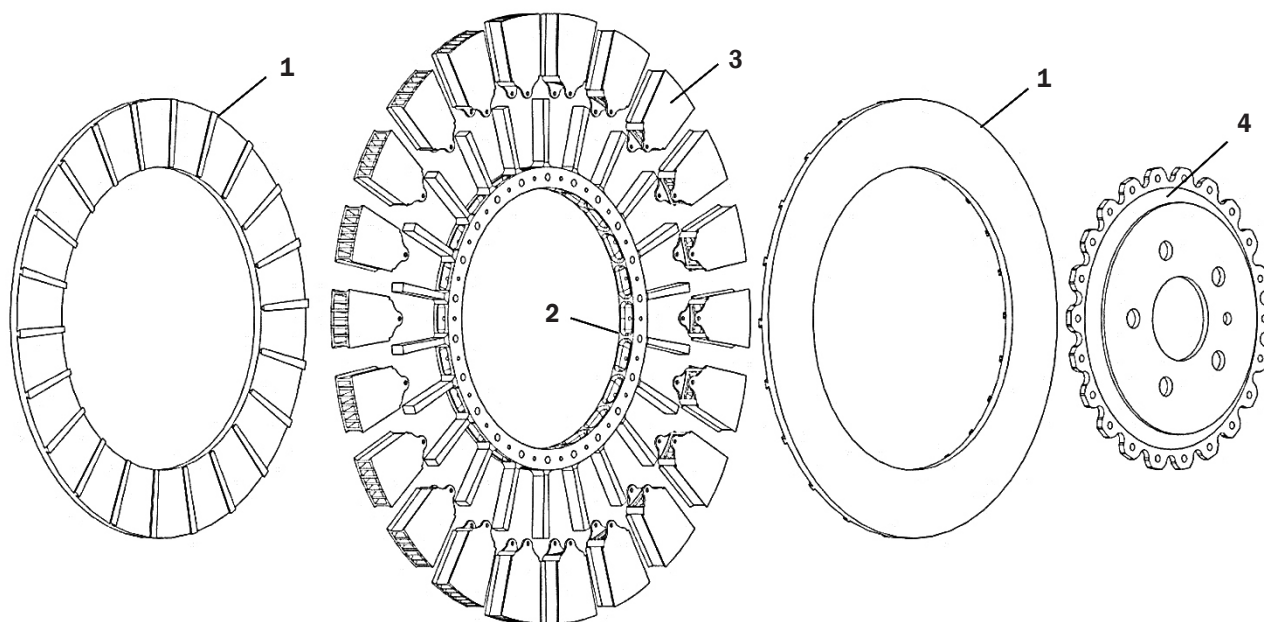


Рис. 2. Вид в перспективе на детали устройства составного тормозного диска в разрозненном (разобранном) состоянии: 1 – фрикционный кольцевой диск; 2 – функциональный каркас; 3 – функциональный корпус теплоконденсатора; 4 – ступичный фланец

Fig. 2. Perspective view of the components of the composite brake disc in a disassembled state: 1 – friction annular disc; 2 – functional frame; 3 – functional body of the heat condenser; 4 – hub flange

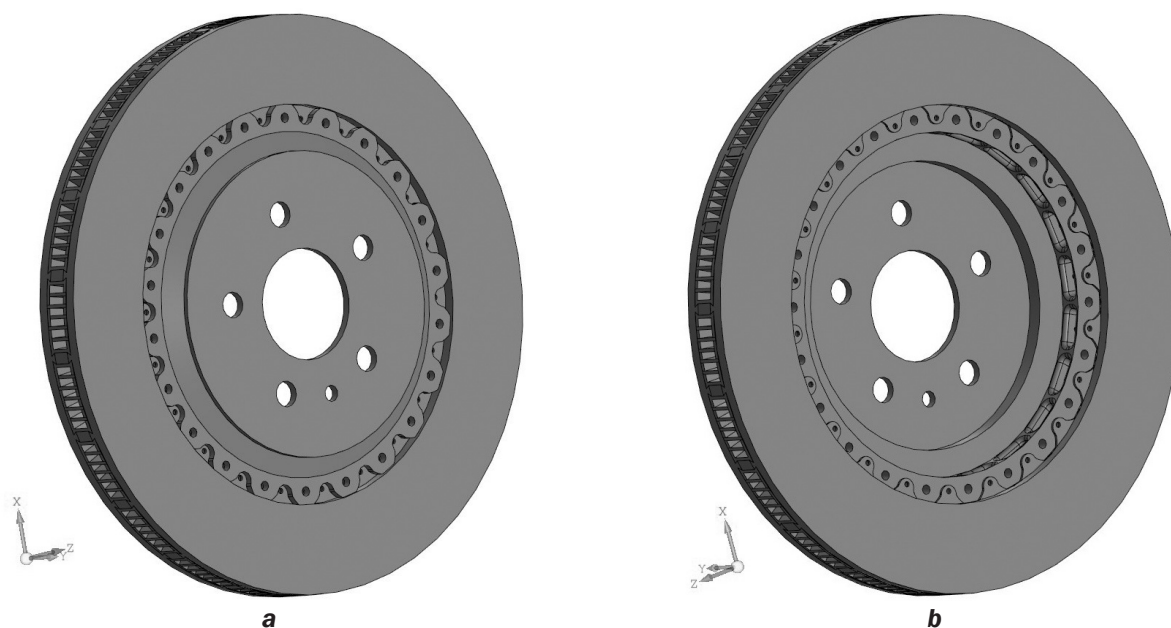


Рис. 3. Общий вид составного тормозного диска по рис. 2 в сборе, разработанного в учебной версии российского программного продукта КОМПАС-3D v21: а – вид спереди; б – вид сзади

Fig. 3. General view of the composite brake disc assembly according to Fig. 2 developed in the training version of the Russian software product COMPASS-3D v21: a – front view; b – rear view

верхность; 26 – центральное отверстие; 27 – отверстие; 28 – проем (карман); 29 – сквозной канал (вентиляционный аппарат).

Фрикционные кольцевые диски 1 (см. рис. 4–5), предпочтительно изготавливаемые из металлических сплавов или композиционного материала, например, карбида кремния, армированного углеродными волокнами, выполняются в виде цилиндрических колец. Наружная сторона фрикционных кольцевых дисков 5 предназначена для контактного взаимодействия с фрикционным материалом тормозной колодки при торможении, может изготавливаться ровной, а также иметь насечки (канавки, углубления, слотирование) или перфорацию. На тыльной (внутренней) стороне фрикционных кольцевых дисков 6 выполняются шипы 7, например, типа «ласточкин хвост», в количестве от двух до пятидесяти штук, а предпочтительнее в количестве от шестнадцати до двадцати шести штук, которые предназначены для соединения фрикционных кольцевых дисков 1 между собой с помощью функциональных корпусов теплоконденсаторов 3. При этом на шипах 7 выполняются малые упорные площадки 8, необходимые для упора фрикционных кольцевых дисков 1 в упорные ребра 9, выполненные в функциональном каркасе 2. Внутренние упорные площадки 10,

выполненные между шипами 7 на тыльной (внутренней) стороне фрикционных кольцевых дисков 6, предпочтительно выполняются ровными с целью обеспечения надлежащего контактного взаимодействия и теплообмена с наружными упорными площадками 11, которые выполняются на корпусах теплоконденсаторов 3.

Функциональный каркас 2 (см. рис. 6), предпочтительно изготавливаемый из металлических сплавов или композиционных материалов, имеет фланцевую часть 12, в которой выполнены отверстия для фиксации ступичного фланца 13 и отверстия для фиксации функциональных корпусов теплоконденсаторов 14 соответственно. Во фланцевой части 12 функционального каркаса 2 выполнены сквозные каналы (вентиляционный аппарат) 15, через которые при вращении составного тормозного диска проходят потоки воздуха, охлаждающие его. При этом от фланцевой части 12 функционального каркаса 2, предпочтительно в радиальном направлении, исходят упорные ребра 9 в количестве от двух до пятидесяти штук, оптимально в количестве от шестнадцати до двадцати шести штук, форма которых может быть профилированной, но предпочтительно имеющая прямоугольные сечения. Предпочтительно, чтобы грани упорных ребер 9 вы-

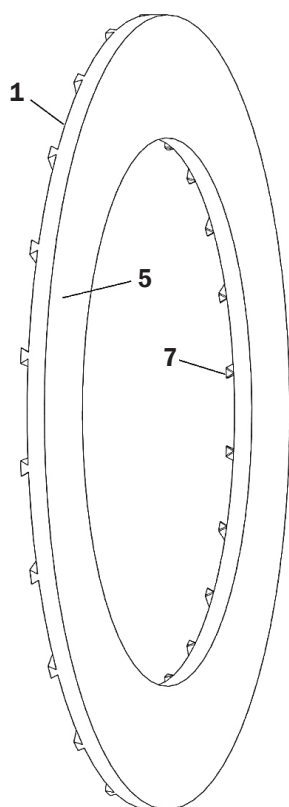


Рис. 4. Вид в перспективе на фрикционный кольцевой диск спереди
Fig. 4. Perspective view of the friction annular disk from the front

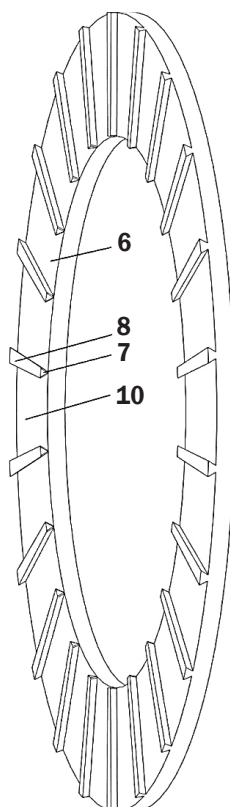


Рис. 5. Вид в перспективе на фрикционный кольцевой диск сзади
Fig. 5. Perspective view of the friction annular disk from behind

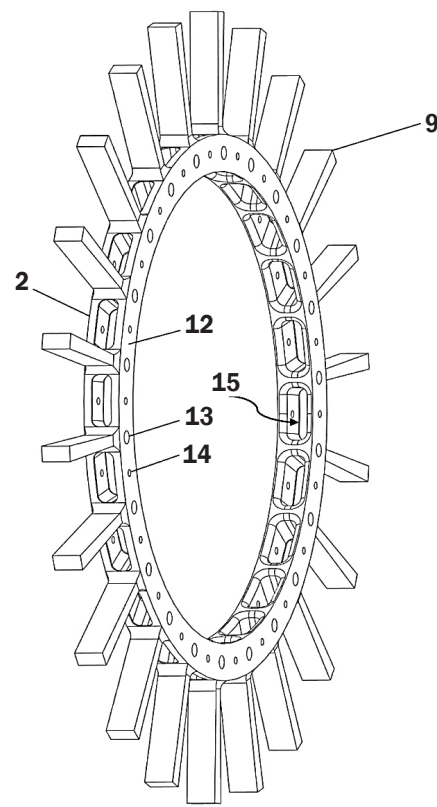


Рис. 6. Вид в перспективе на функциональный каркас, выполненный симметрично
Fig. 6. Perspective view of a functional frame made symmetrically

полнялись взаимно перпендикулярными и имели ровные поверхности, с целью обеспечения надлежащего контактного взаимодействия и теплообмена с функциональными корпусами теплоконденсаторов 3.

Функциональные корпуса теплоконденсаторов 3 (см. рис. 7, 8), предпочтительно изготавливаемые из металлических сплавов или композиционных материалов, имеют следующие конструктивные элементы: наружные упорные площадки 11, по средствам которых функциональные корпуса теплоконденсаторов 3 контактируют с фрикционными кольцевыми дисками 1; боковые упорные площадки 16, по средствам которых корпуса теплоконденсаторов 3 контактируют с упорными ребрами 9 функционального каркаса 2; малые проушины 17, в которых выполнены отверстия для фиксации функциональных корпусов теплоконденсаторов на функциональном каркасе 18 с помощью клепок или резьбового соединения (например, болтов, винтов, гаек, крепежных втулок); внутренние перемычки 19, соединяющие стенки

корпуса теплоконденсатора, которые в совокупности образуют сквозные каналы, через них при вращении составного тормозного диска проходят потоки воздуха, охлаждающие его, при этом внутренние перемычки 19 могут быть выполнены, например, в виде лопастей, ребер, перемычек, столбов, гребней, могут иметь различный профиль и пространственное расположение, например, продольно, поперек или под углом по отношению к стенкам функционального корпуса теплоконденсатора; шипы 20, выполняемые на ребрах боковых граней функциональных корпусов теплоконденсаторов 3 для соединения с фрикционными кольцами 1, и предпочтительно имеющие треугольное сечение.

Ступичный фланец 4 (см. рис. 9, 10) изготавливается в виде чаши (миски, тарелки), имеющей радиально расположенные проушины 21 в количестве от двух до пятидесяти штук, а предпочтительнее в количестве от шестнадцати до двадцати шести штук, в которых выполняются отверстия 22. При этом установочные поверхности 23, 24 и 25 вы-

полняются ровными и взаимно параллельными. Ступичный фланец 4 может иметь центральное отверстие 26, а также отверстия 27 для установки на ступицу, которые могут располагаться по окружности на некотором расстоянии от центрального отверстия 26.

Сборка элементов (деталей) конструкции составного тормозного диска, изготовленных с применением доступных и распространенных, а также рентабельных технологий и технических средств, осуществляется методом стыковки между собой фрикционных кольцевых дисков 1 и функционального каркаса 2, устанавливаемого между фрикционными кольцевыми дисками 1 таким образом, чтобы малые упорные площадки 8 шипов 7, выполненных, например, по типу «ласточкин хвост» на тыльных (внутренних) сторонах фрикционных кольцевых дисков 6 совпадали с упорными ребрами 9, выполненными в функциональном каркасе 2, как это показано на рис. 11–13, после чего в образовавшиеся проемы (карманы) 28 устанавливаются функциональные корпуса теплоконденсаторов 3, которые по средствам шипов 20 входят в зацепление с шипами 7, выполненными на тыльных (внутренних) сторонах фрикционных кольцевых дисков 6, образуя с ними механическую связь. После выполнения указанных

операций выполняется фиксация функциональных корпусов теплоконденсаторов 3 на функциональном каркасе 2 по средствам клепок или резьбового соединения через соответствующие отверстия для фиксации функциональных корпусов теплоконденсаторов на функциональном каркасе 18 и отверстий для фиксации функциональных корпусов теплоконденсаторов 14. Ступичный фланец 4 составного тормозного диска устанавливается и фиксируется на металлическом функциональном каркасе 2 по средствам клепок или резьбового соединения через соответствующие отверстия 22 и отверстия для фиксации ступичного фланца 13.

Ремонтопригодность разрабатываемого составного тормозного диска достигается за счет устройства его конструкции, которая является составной (сборно-разборной), что в свою очередь позволяет в случае необходимости, например, износа и/или повреждения, производить замену любой из требующих того составляющих его деталей на новую запасную часть или имеющую иные необходимые параметры и свойства. Так, например, в процессе эксплуатации возможна замена фрикционных кольцевых дисков, изготовленных, например, из чугуна, на фрикционные кольцевые диски, имею-

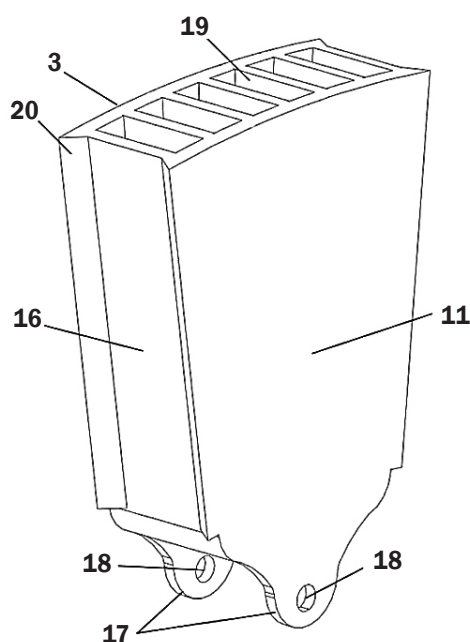


Рис. 7. Вид в перспективе на функциональный корпус теплоконденсатора

Fig. 7. Perspective view of the heat condenser functional body

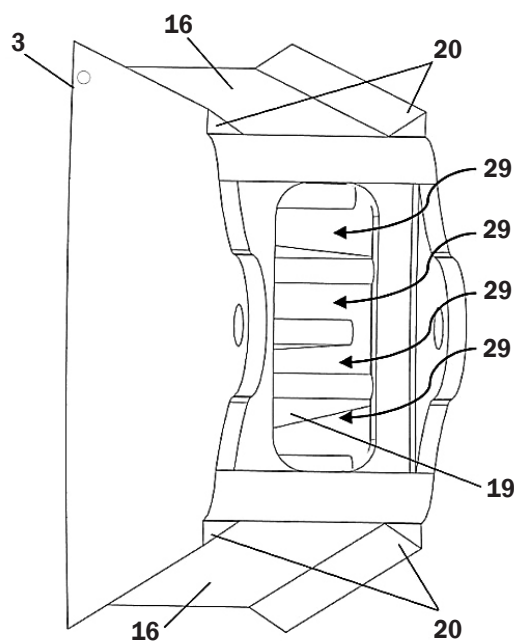


Рис. 8. Вид в перспективе на элементы вентиляционного аппарата функционального корпуса теплоконденсатора

Fig. 8. Perspective view of the elements of the ventilation unit of the heat condenser functional body

щие соответствующую конструкцию, но изготовленные из другого предпочтительного материала, например, из стали или керамического композиционного материала, армированного углеродными волокнами. Таким образом, предлагаемое техническое решение позволяет не только придать свойство ремонтпригодности тормозному диску, но и также в случае необходимости позволяет адаптировать эффективность составного тормозного диска в соответствии с условиями эксплуатации и режимами его нагружения путем установки тех или иных составляющих его деталей (запасных частей), изготовленных из материалов, имеющих требуемые (предпочтительные) параметры и свойства.

Повышение эффективности охлаждения разрабатываемого составного тормозного диска достигается, во-первых: за счет развитого вентиляционного аппарата с повышенной эффективной площадью внутренних поверхностей вентиляционного аппарата, входные отверстия которого выполнены в функциональном каркасе и имеющие свое продолжение в каждом отдельном функциональном корпусе теплоконденсаторов, которые выполнены в них с множеством внутренних перемычек, что в совокупности способствует улучшению конвективного теплообмена тормозного диска с воздухом окружающей среды; во-вторых, за счет использования в конструкции функционально-

го каркаса и в конструкции функциональных корпусов теплоконденсаторов материалов, которые обладают необходимой прочностью наряду с повышенной теплопроводностью и/или теплоемкостью, к ним могут относиться, например, алюминиевые сплавы, углеродистые стали, что способствует интенсификации охлаждения рабочих поверхностей диска, поскольку теплота быстрее отводится от них в стенки вентиляционного аппарата, то есть к внутренним перемычкам, а затем и в воздух окружающей среды.

Стойкость к термомеханическим нагрузкам и напряжениям, возникающим в тормозном диске при торможении, достигается за счет следующих технических решений:

– во-первых, за счет составной (сборно-разборной) конструкции, благодаря которой величина теплового расширения каждого конструктивного элемента может быть компенсирована с целью снижения напряженно-деформируемого состояния элементов конструкции при их нагреве и снижения тем самым вероятности возникновения трещин по средствам компенсаторного теплового зазора, выполняемого в таких частях элементов составной конструкции, например, как в тех, которые образуют соединение типа «ласточкин хвост» между фрикционными кольцевыми дисками, функциональным каркасом и функциональными корпусами теплоконденсаторов;

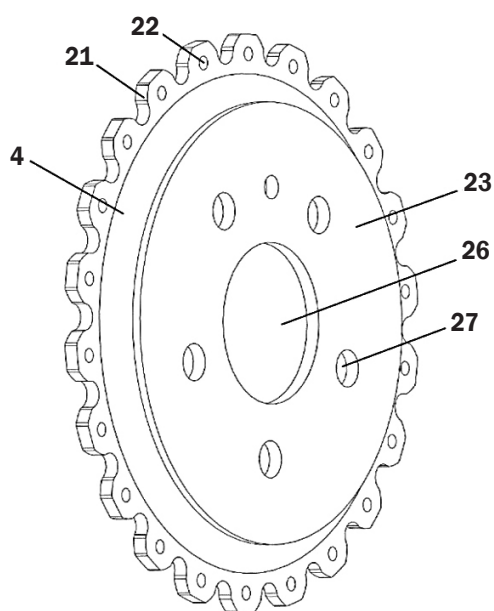


Рис. 9. Вид в перспективе на ступичный фланец спереди
Fig. 9. Perspective view of the hub flange from the front

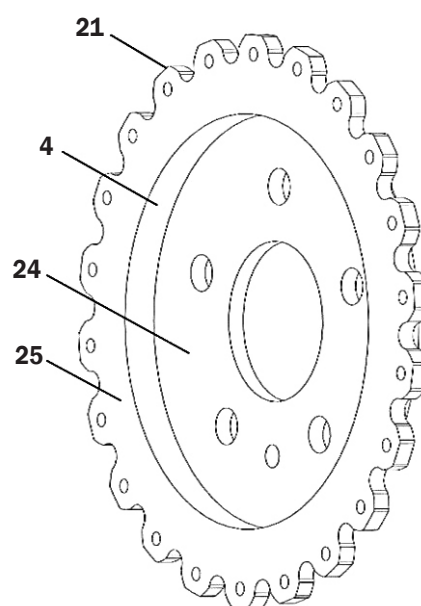


Рис. 10. Вид в перспективе на ступичный фланец сзади
Fig. 10. Perspective view of the hub flange from the rear

– во-вторых, за счет повышенной эффективности охлаждения составного тормозного диска, и, как следствие, снижения его рабочей температуры, достигаемой за счет развитого вентиляционного аппарата, имеющего повышенную эффективную площадь внутренних поверхностей вентиляционного аппарата, то есть внутренних перемычек, которые выполнены одним целым с функциональными корпусами теплоконденсаторов из материалов с повышенной теплопроводностью и/или теплоемкостью.

Возможность применения технологических процессов при изготовлении (производстве) и последующем обслуживании/ремонте составного тормозного диска при эксплуатации с использованием доступных и распространенных, а также рентабельных технологий и технических средств, достигается благодаря разработанной конструкции предлагаемого устройства составного тормозного диска и составляющих его деталей, которая позволяет применять для изготовления составляющих деталей, например, литье, формование, штамповку, ковку, SLM-печать (селективное лазерное плавление от англ. Selective Laser Melting) металлами, последующую механическую обработку и сборочные операции, такие как стыковка, клепка, завинчивание, которые необходимо выполнить для соединения составных частей

(деталей) в единое целое устройство. При этом за счет составной (сборно-разборной) конструкции составного тормозного диска для его последующего обслуживания/ремонта или, например, в случае необходимости установки фрикционных кольцевых дисков с другими предпочтительными параметрами и свойствами выполнение работ по разборке-сборке предлагаемого составного тормозного диска может быть выполнено с использованием доступного и распространенного слесарного, в том числе ручного инструмента и оснастки.

При выполнении подготовки геометрических 3D-моделей разработанной конструкции составного тормозного диска к прочностным расчетам производилось задание материалов деталей, прилагались различные типы нагрузок и закрепления, создавались конечно-элементные сетки с последующим выполнением статических расчетов в российском программном продукте APM FEM для КОМПАС-3D v20.0.3.7. Варианты задания материалов, закреплений и нагрузок сведены в таблицу.

Конечно-элементная сетка деталей создавалась в виде 4-узловых тетраэдров, коэффициент сгущения поверхности 1,2, коэффициент разрежения в объеме 1,5, максимальная длина стороны элемента 5 мм. Так, для фрикционного кольцевого диска количество

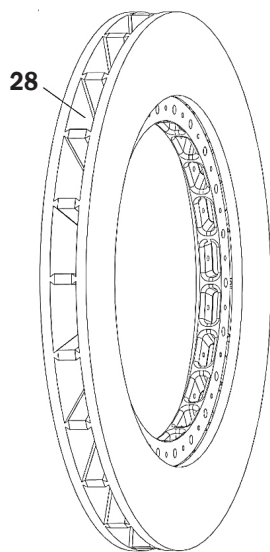


Рис. 11. Стыковка функционального каркаса с фрикционными кольцевыми дисками

Fig. 11. Coupling of the functional frame with the friction annular discs

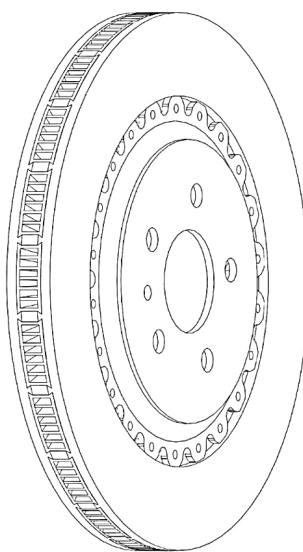


Рис. 12. Вид спереди на составной тормозной диск в сборе

Fig. 12. Front view of the composite brake disc assembly

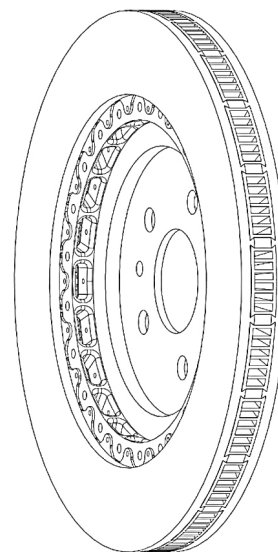


Рис. 13. Вид сзади на составной тормозной диск в сборе

Fig. 13. Rear view of the composite brake disc assembly

конечных элементов составило 74469, количество узлов – 21470 (рис. 14), для функционального каркаса количество конечных элементов составило 197519, количество узлов – 56940 (рис. 15), для функционального корпуса теплоконденсатора количество конечных элементов составило 34455, количество узлов – 10099 (рис. 16).

Известно [17, 18], что критерии прочности деталей машин основаны на общих положениях, которые имеют зависимость от условий деформирования материала. Так, материал изделия может находиться в одном из механических состояний: упругом, пластическом или в состоянии разрушения. Каждое из состояний тела (изделия) характеризуется

критерием прочности, которое устанавливает момент ее исчерпания, сопровождающийся разрушением тела с его разделением на части. Современные методы проектирования и анализа деталей машин позволяют смоделировать их поведение в реальной эксплуатации. Для оценки прочности разработанных конструкций применяются различные математические модели с проведением расчетов, например, методом конечных элементов, конечных разностей, конечных объемов. В таком российском программном продукте, как АРМ FEM для КОМПАС-3D v20.0.3.7 критерий текучести (момент наступления пластических деформаций) может быть определен по критериям Мезиса.

Варианты задания материалов, креплений и нагрузок
Options for setting materials, fastenings, and loads

Наименование детали	Материал	Закрепление	Вид нагрузки	Величина нагрузки
Фрикционный кольцевой диск	СЧ20	С учетом конструкции по средствам шипов	Давление со стороны воздействия тормозных колодок, МПа	10
			Крутящий момент в направлении действия тормозного момента, Нм	250
Функциональный каркас	Сталь 65Г	С учетом конструкции по средствам крепежных отверстий и упорных ребер	Давление со стороны воздействия тормозных колодок, МПа	10
			Крутящий момент в направлении действия тормозного момента, Нм	250
Функциональный корпус теплоконденсатора	Сталь 65Г	С учетом конструкции по средствам проушин и упорных площадок	Давление со стороны воздействия тормозных колодок, МПа	10
			Крутящий момент в направлении действия тормозного момента, Нм	250

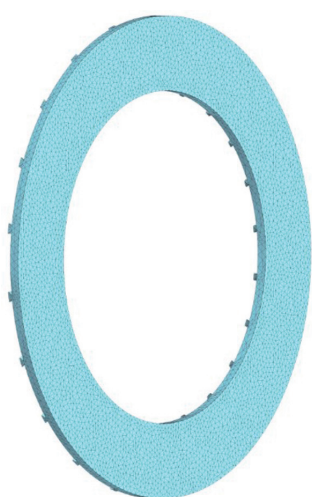


Рис. 14. Сгенерированная конечно-элементная сетка фрикционного кольцевого диска

Fig. 14. Generated finite element mesh of a frictional annular disk

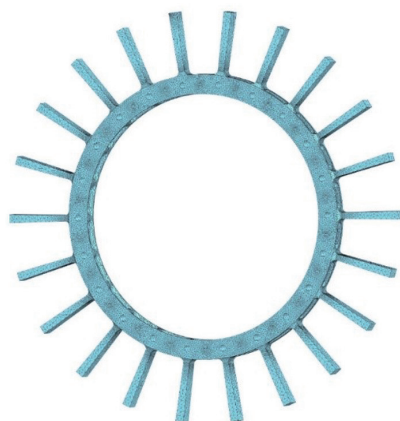


Рис. 15. Сгенерированная конечно-элементная сетка функционального каркаса

Fig. 15. Generated finite element mesh of the functional frame

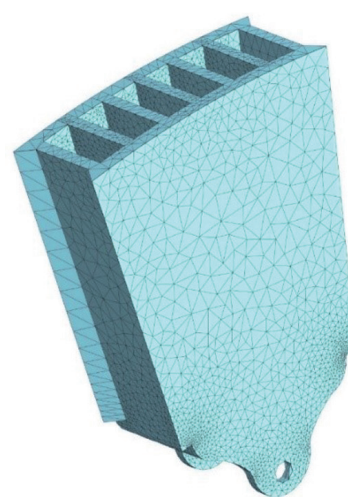


Рис. 16. Сгенерированная конечно-элементная сетка функционального корпуса теплоконденсатора

Fig. 16. Generated finite element mesh of the functional body of the heat condenser

Таким образом, при помощи указанного программного продукта было выполнено моделирование напряженно-деформированного состояния деталей разработанной конструкции составного тормозного диска ме-

тодом конечных элементов. По результатам наложения действия статических нагрузок были получены численные значения и карты эквивалентных напряжений, перемещений и прочности (рис. 17–20).

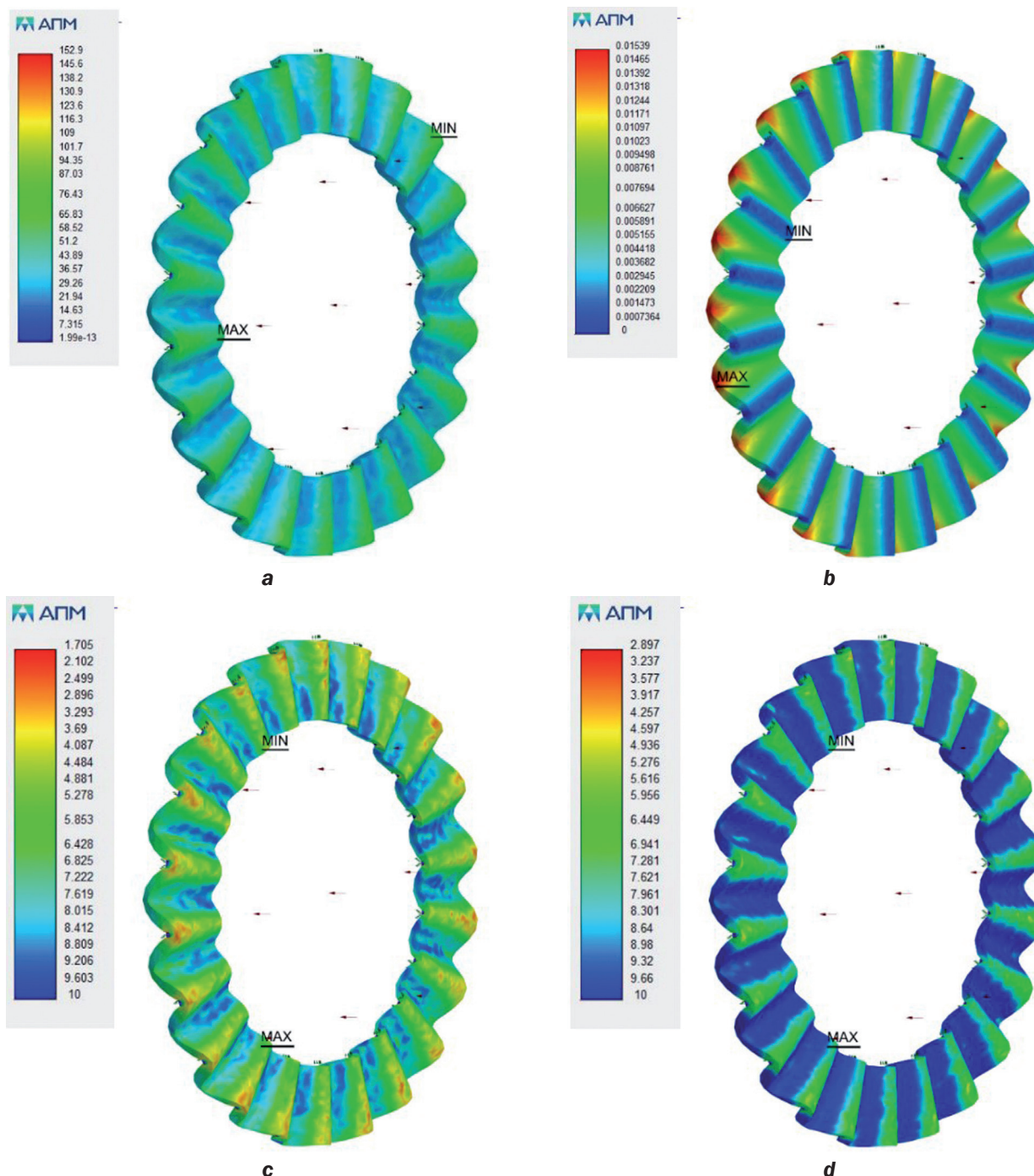


Рис. 17. Результаты статического расчета фрикционного кольцевого диска: а – эквивалентные напряжения по Мизесу не превышают 153 Н/мм²; б – суммарные линейные перемещения не превышают 0,016 мм; в – коэффициент запаса по усталостной прочности составляет 1,7 при двухмиллионных циклах нагружения; д – коэффициент запаса по пределу прочности составляет 2,89

Fig. 17. Results of static calculation of the frictional annular disk: а – equivalent Mises stresses do not exceed 153 N/mm²; б – total linear displacements do not exceed 0.016 mm; в – safety factor for fatigue strength is 1.7 at two million loading cycles; д – safety factor for ultimate strength is 2.89

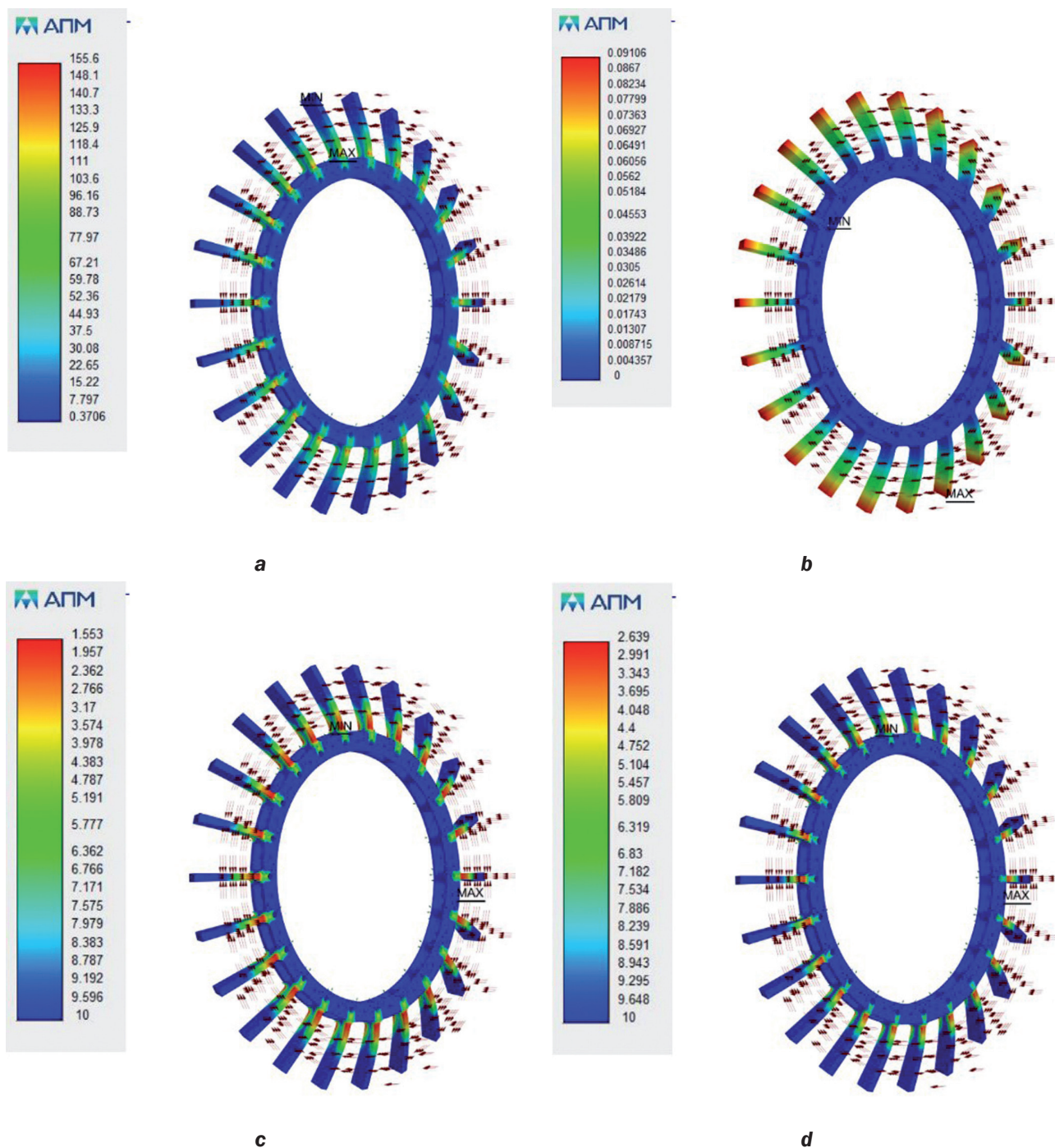


Рис. 18. Результаты статического расчета функционального каркаса: а – эквивалентные напряжения по Мизесу не превышают 156 Н/мм²; б – суммарные линейные перемещения не превышают 0,092 мм; в – коэффициент запаса по усталостной прочности составляет 1,55 при двухмиллионных циклах нагружения; д – коэффициент запаса по пределу прочности составляет 2,63

Fig. 18. Results of static calculation of the functional frame: а – equivalent stresses according to Mises do not exceed 156 N/mm²; б – total linear displacements do not exceed 0.092 mm; в – safety factor for fatigue strength is 1.55 at two million loading cycles; д – safety factor for ultimate strength is 2.63

Наиболее нагруженными элементами в деталях устройства составного тормозного диска оказались:

1) для фрикционного кольцевого диска – внутренние упорные площадки. Сжимаю-

щие напряжения, от воздействий прижатия колодками не превышают 153 Н/мм²;

2) функционального каркаса – упорные ребра. Напряжения в направлении действия тормозного момента не превышают 156 Н/мм²;

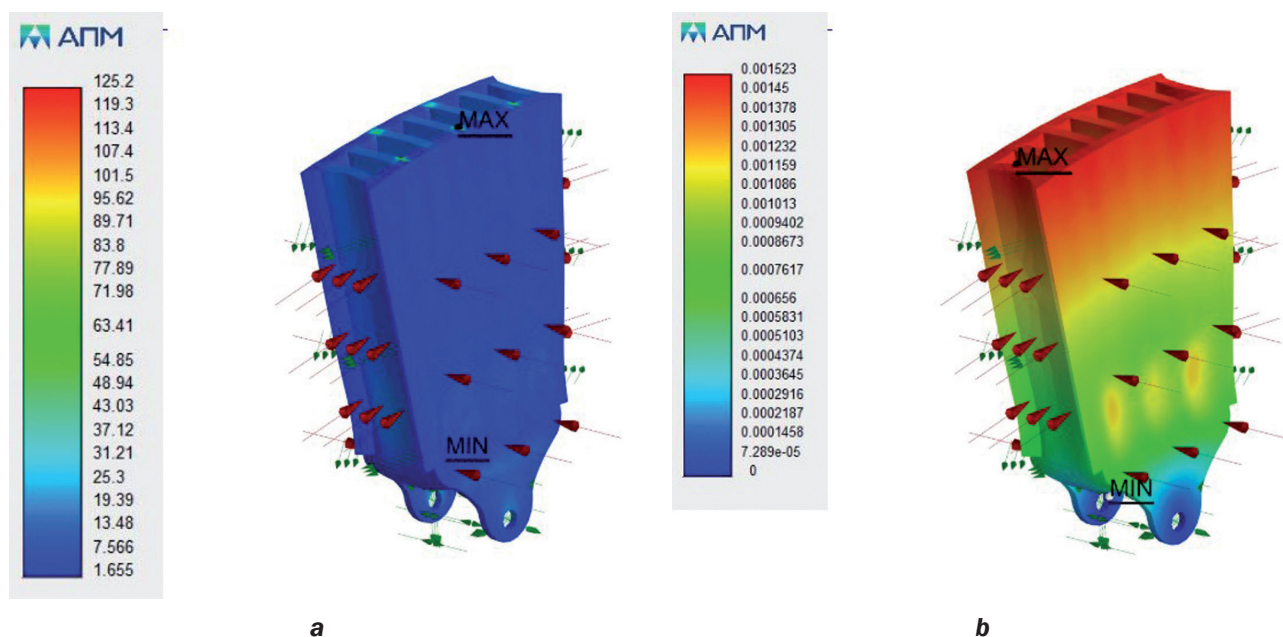


Рис. 19. Результаты статического расчета функционального корпуса теплоконденсатора: а – эквивалентные напряжения по Мизесу не превышают 126 Н/мм²; б – суммарные линейные перемещения не превышают 0,0016 мм

Fig. 19. Results of static calculation of the heat capacitor functional body: а – equivalent stresses according to Mises do not exceed 126 N/mm²; б – total linear displacements do not exceed 0.0016 mm

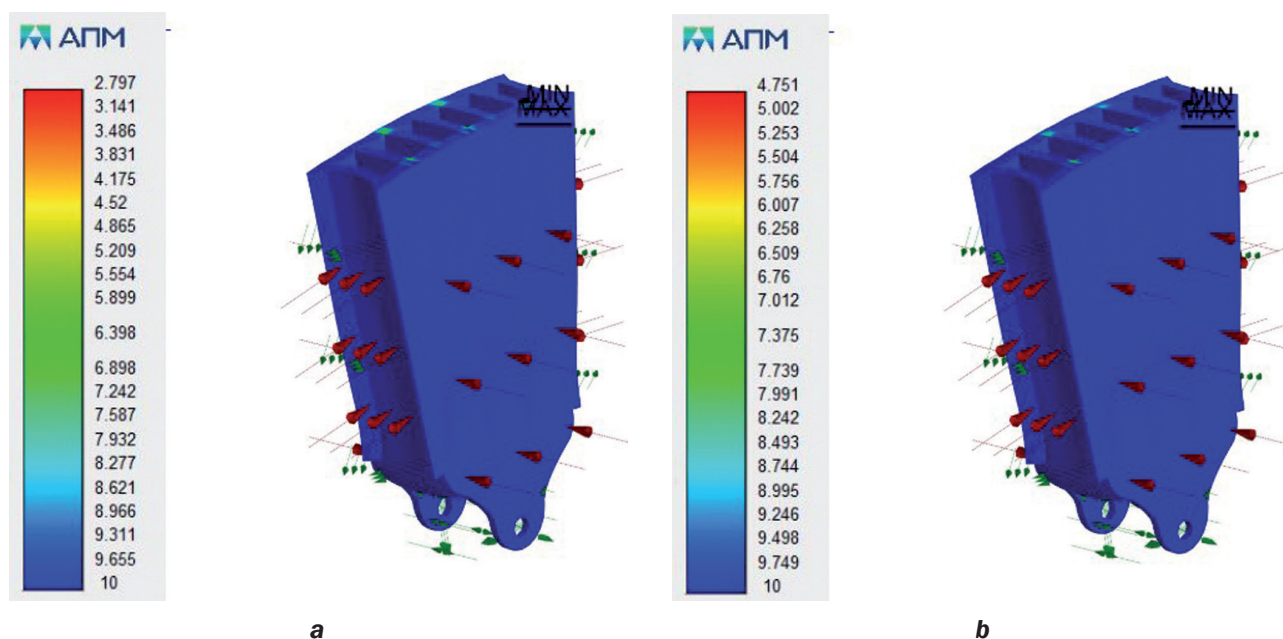


Рис. 20. Результаты статического расчета функционального корпуса теплоконденсатора: а – коэффициент запаса по усталостной прочности составляет 2,79 при двухмиллионных циклах нагружения; б – коэффициент запаса по пределу прочности составляет 4,75

Fig. 20. Results of static calculation of the heat condenser functional housing: а – safety factor for fatigue strength is 2.79 at two million loading cycles; б – safety factor for ultimate strength is 4.75

3) корпуса теплоконденсатора – малые проушины и внутренние перемычки. Напряжения в направлениях действия тормозного момента и сил прижатия колодками не превышают 46 и 126 Н/мм² соответственно.

Исходя из того, что целесообразность выполнения тех или иных технических разработок находится в зависимости с возможностью их последующей реализации (изготовления), в работе приводятся краткие сведения о воз-

можных технологиях изготовления деталей разработанной конструкции, а именно о технологиях литья металлов по выплавляемым моделям [19–22]. Так, в процессе исследований были изготовлены выплавляемые модели деталей, представленные на рис. 21, 22.

Для печати использовались филаменты PET-G, ABS, WAX-3D. В результате рассмотрения указанной технологии литья на этапе создания прототипов было установлено, что в качестве литейных заготовок (выплавляемых моделей) целесообразно использовать

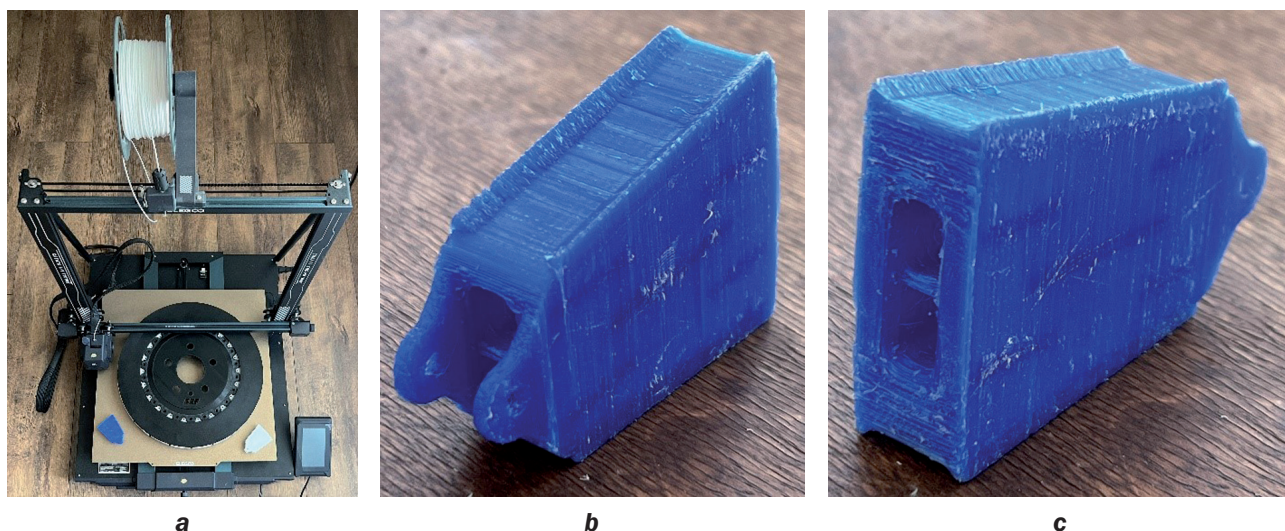


Рис. 21. Общий вид 3D-принтера Elegoo Neptune 3 Max, имеющего область печати 420x420x500 мм и температуру работы экструдера до 260°C. С помощью указанного 3D-принтера были изготовлены выплавляемые модели разработанной конструкции составного тормозного диска, в том числе из воскоподобного филамента: а – 3D-принтер Elegoo Neptune 3 Max; б – вид в перспективе снизу на выплавляемую модель функционального корпуса теплоконденсатора, изготовленную с помощью 3D-принтера из воскоподобного филамента; с – вид в перспективе сверху на выплавляемую модель функционального корпуса теплоконденсатора, изготовленную с помощью 3D-принтера из воскоподобного филамента
Fig. 21. General view of the Elegoo Neptune 3 Max 3D printer with a print area of 420x420x500 mm and extruder operating temperature of up to 260°C. Using the specified 3D printer investment models of the developed design of a composite brake disc were made including those made of wax-like filament: а – Elegoo Neptune 3 Max 3D printer; б – bottom perspective view of the investment casting model of the heat condenser functional body made of wax-like filament using a 3D printer; с – top perspective view of the investment casting model of the heat condenser functional body made of wax-like filament using a 3D printer

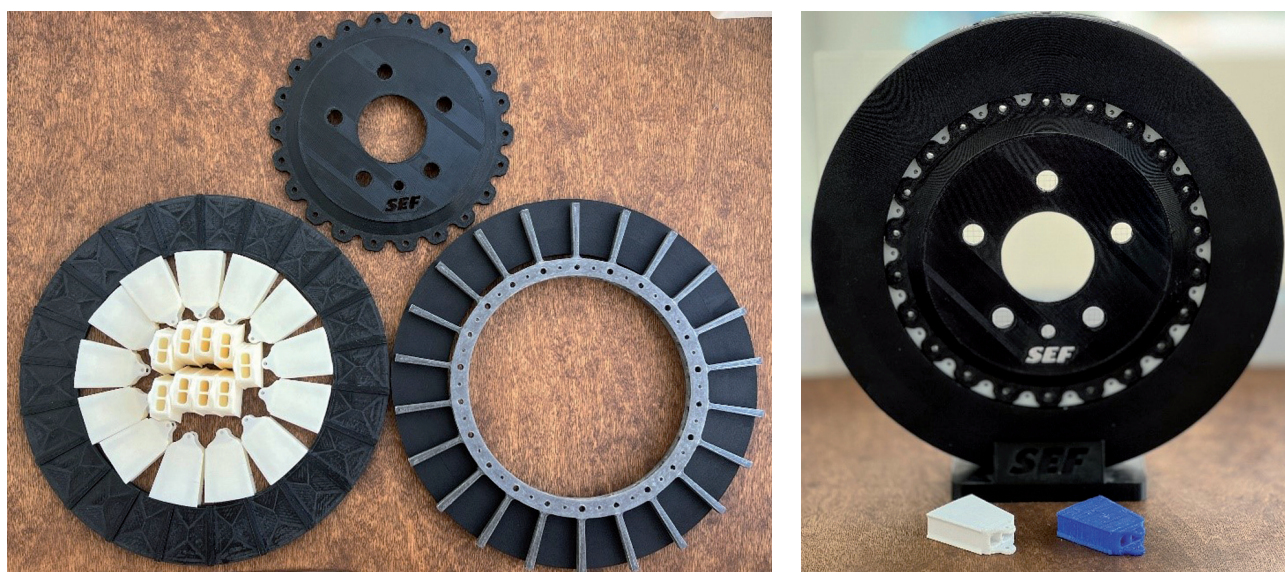


Рис. 22. Общий вид 3D-моделей разработанной конструкции составного тормозного диска: а – в разобранном состоянии; б – в собранном состоянии
Fig. 22. General view of 3D models of the developed design of composite brake disc: а – disassembled; б – assembled

воскоподобные материалы. Воскоподобный филамент поставляется в виде прутка толщиной 1,75 мм и используется для печати на 3D-принтерах по технологии FDM (моделирование методом послойного наплавления от англ. Fused Deposition Modeling). Модели, напечатанные воском, могут быть подвержены постобработке как механически (абразивным инструментом и оснасткой), термически (в пламени горелки), так и химически («полировка» растворителем для сглаживания слоев и придания глянца). Значимым отличием воскоподобных филаментов является их крайне низкая зольность (менее 0,01%), низкое газовыделение при выжигании, усадка не более 0,8% и ценовая доступность, что в совокупности является важным фактором для мелкосерийного прототипирования. Важной особенностью использования воскоподобных филаментов является их повышенная пластичность, вследствие чего рекомендуется использовать 3D-принтеры с системой «Директ» с «цепкими» подающими шестернями, во избежание замятия филамента в системе подачи к соплу.

По результатам опытной печати, выполненной на 3D-принтере Elegoo Neptune 3 Max, можно дать следующие рекомендации по настройкам и режимам печати: в настройках слайсера необходимо задать команду G-Code: «M302 S80». Температура сопла при печати 120 °С. Для повышения адгезии модели к печатному столу на первом слое печати температура печатного стола 105 °С, далее не более 20 °С. Скорость печати 25–35 мм/с, обдув выключен, исключить перепады температур и сквозняки в помещении (желательно использовать термокамеру для 3D-принтера), высота печатаемого слоя 0,2 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Синтезируя и обобщая результаты выполненной работы, представляется возможным указать следующие выводы:

1) современные методы проектирования и прочностного анализа, несмотря на их достаточно высокую ресурсоемкость (необходимость мощной вычислительной техники и временные затраты), доказали не только целесообразность их применения, но и необходимость в них, поскольку становится возможным произвести моделирование

различных конфигураций устройств, выбрать оптимальные конструктивные решения (в том числе выбор материалов для изготовления) и произвести прочностной анализ;

2) технологии 3D-печати позволяют в достаточно короткие сроки изготовить модель прототипа с минимальными материальными и трудовыми затратами, что в свою очередь позволяет произвести оптимизацию конструкции путем установки ее элементов на предполагаемые штатные места установки в ТС. При этом становится возможным выполнить функциональную проверку предполагаемой технологии монтажа/демонтажа изделия и произвести их анализ, например, на предмет трудозатрат времени и необходимого оборудования для их последующей реальной эксплуатации;

3) предложенное устройство составного тормозного диска демонстрирует состоятельность предложенного метода расчленения объекта на составляющие, используя критерии функционального назначения элементов конструкции устройства, модернизацию которого требуется выполнить;

4) по результатам статического прочностного анализа деталей установлено, что для повышения гарантированного запаса прочности элементов разрабатываемой конструкции необходимо увеличить сечение упорных ребер функционального каркаса, модернизировать конструкцию функциональных корпусов теплоконденсаторов и шипов на фрикционных кольцевых дисках. Подбор дополнительных (альтернативных) материалов, одновременно обладающих повышенными прочностными характеристиками, пониженной массой и высокой теплопроводностью, позволит снизить инерционные массы изделий и неподрессоренные массы ТС, повысить гарантированный запас прочности и улучшить отведение тепла от пар трения дисково-колодочных тормозных устройств, что в совокупности будет способствовать повышению эффективности торможения, снижая тормозной путь и время остановки ТС;

5) после указанных выше модернизаций конструкции необходимо выполнить моделирование физико-механических процессов трения, нагрева и охлаждения, возникающих в составном тормозном диске (в сборе) при торможении ТС, и дать им оценку. Так, в качестве методики теплового испытания тор-

мозного диска методом конечных элементов могут быть приняты правила ЕЭК ООН N 13 (испытания «Типа О» и испытания «Типа I»), которые устанавливают требования к режимам испытаний тормозных устройств ТС;

б) предложенные рекомендации по изготовлению выплавляемых моделей из

воскоподобных филаментов по технологии FDM 3D-печати, необходимые для создания литейных форм, показали свою состоятельность и могут применяться в рамках настоящего исследования для изготовления деталей с формами сложной конфигурации.

Список источников

1. Петрик А.А., Вольченко Н.А., Пургал П.Ю., Вольченко Д.А. Фрикционные узлы: монография. Краснодар: КубГТУ, 2003. Т. 2. 220 с. EDN: QNANGL.
2. Вольченко Н.А., Поляков П.А., Скрыпник В.С., Витвицкий В.С. Энергонагруженность трибосопряжений дисково-колодочных тормозов транспортных средств // Евразийский Союз Ученых. 2018. № 3-2. С. 51–59. EDN: XNFTED.
3. Скляренко Е.Ф. Повышение энергоемкости и эффективности дисково-колодочных тормозных устройств транспортных средств // Инновационный потенциал развития науки в современном мире: достижения и инновации: сб. науч. статей по матер. XII Междунар. науч.-практ. конф. (г. Уфа, 28 февраля 2023 г.). Уфа, 2023. С. 91–111.
4. Sainath A., Dehadray P.M., Bharath P., Rao L.B. The thermal and stress analysis of disc brake // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2021. Vol. 1128. Iss. 1. P. 012015. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1128/1/012015>.
5. Mrausi S., Trimble J., Olabanji O., Tlhabadira I., Daniyan I.A. Investigating the mechanical properties of automotive brake disc and pad developed from locally sourced materials // 14th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies. 2023. P. 197–203. <https://doi.org/10.1109/ICMIMT59138.2023.10200088>.
6. Barik N., Khadari S.A.R. Analysis of disc brake // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2021. Vol. 1123. P. 012004. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1123/1/012004>.
7. Sau S.K., Pulinat K.G., Moss P.N., Ranjeet P., Prabu S.S. A comparative study on the thermal and dynamic analysis of a disc brake using Ansys // Materials Today: Proceedings. 2022. Vol. 65. Part 8. P. 3714–3723. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.318>.
8. López-Flores, Jennifer-Guadalupe, Cordero-Guridi, De Jesús J., Ovando-Cuevas, Romeo E., et al. Thermal-structural numerical analysis of the brake and disc system of a Formula SAE 2024 type vehicle // Journal Mathematical and Quantitative Methods. 2024. Vol. 8. Iss. 1-13. P. e30814113. <https://doi.org/10.35429/JMQM.2024.8.14.3.13>.
9. Пат. № 2668785, Российская Федерация, С1, F16D 65/12. Вентилируемый тормозной диск / Д. Маронати, Л. Оберти, Н. Ронки; заявитель и патентообладатель С.П.А. Френи Брембо. Заявл. 16.12.2014; опубл. 02.10.2018. Бюл. № 28.
10. Пат. № 2556269, Российская Федерация, С2, F16D 65/12, F16D 65/847. Ротор тормозного диска с внутренней вентиляцией / Я. Виллемин, К. Виттке, А. Клингелхедер, А. Пипилис; заявитель, патентообладатель Брембо СГЛ Карбон Керамик Брэйкс ГМБХ. Заявл. 23.12.2011; опубл. 10.07.2015. Бюл. № 19.
11. Пат. № 2628419, Российская Федерация, С2, F16D65/12. Сборный тормозной диск вала / С. Вурс, А. Мелан; заявитель, патентообладатель Фэйвели Транспорт Виттен ГМБХ. Заявл. 13.11.2012; опубл. 16.08.2017. Бюл. № 23.
12. Федотов Е.С., Литвинов А.Е., Стародуб М.В. Причины возникновения повреждений тормозных дисков (Часть 1) // Мехатроника, автоматика и робототехника. 2020. № 6. С. 56–61. <https://doi.org/10.26160/2541-8637-2020-6-56-61>. EDN: UXEEON.
13. Федотов Е.С., Стародуб М.В., Кузнецов В.А. Причины возникновения повреждений тормозных дисков (Часть 2) // Фундаментальные основы механики. 2021. № 7. С. 39–44. <https://doi.org/10.26160/2542-0127-2021-7-39-44>. EDN: OGBFYR.
14. Федотов Е.С., Литвинов А.Е., Стародуб М.В. Причины возникновения повреждений тормозных колодок дисково-колодочных тормозных механизмов // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2020. № 9. С. 18–23. <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2020-9-18-23>. EDN: FDKDVA.
15. Кошевой О.С., Мамулян Н.С., Радченко А.С. Триз – технология инноваций // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2013. № 1. С. 65–67. EDN: RPZDBN.
16. Колоско Д.Н., Хаустович И.С., Щербаченя В.А. Применение критерия Мизеса в прочностных расчетах систем инженерного анализа // Актуальные проблемы и перспективы развития сельских территорий и кадрового обеспечения АПК: сб. науч. статей III Междунар. науч.-практ. конф. (г. Минск, 7–8 июня 2023 г.). Минск: БГАТУ, 2023. С. 324–328.
17. Губенко А.С., Темпель Ю.А., Стариков А.И., Теплоухов О.Ю. Оптимизация прочностных и массовых характеристик детали с использованием алгоритмов порождающего проектирования // Известия ТулГУ. Технические науки. 2023. № 7. С. 358–362. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2023-7-358-359>.

18. Красикова Е.С. Проектирование 3D-моделей для изготовления изделий методом литья по выплавляемым моделям // Высокие технологии в машиностроении: матер. XX Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием (г. Самара, 9–10 ноября 2023 г.). Самара: СамГТУ, 2023. С. 31–34. EDN: ISRYKI.
19. Пат. № 2772531, Российская Федерация, С1, В22С 9/04, В22С 7/02. Способ удаления выжигаемой полимерной модели из керамической формы в литье по выплавляемым моделям / А.В. Шилов; заявитель Акционерное общество «ОДК-Авиадвигатель». № 2021138594. Заявл. 24.12.2021; опубл. 23.05.2022. EDN: MOSJRS.
20. Евстигнеев А.И., Дмитриев Э.А., Одинокое В.И., Чернышова Д.В., Евстигнеева А.А., Иванкова Е.П. О трещиностойкости керамической оболочковой формы по выплавляемым моделям при затвердевании в ней шарообразной стальной отливки // Литейное производство. 2022. № 9. С. 17–21. EDN: BSLLOC.
21. Ткаченко С.С., Емельянов В.О., Мартынов К.В. Современная технология литья по выплавляемым моделям для производства художественных отливок // Литье и металлургия. 2021. № 1. С. 49–52. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-49-52>. EDN: KETJWM.
22. Сакович Н.Е., Никитин А.М., Шилин А.С., Рожнова В.С., Прудников С.А. Дисково-колодочные тормоза автотранспортных средств // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. 2021. № 6. С. 55–60. <https://doi.org/10.52691/2500-2651-2021-88-6-55-60>. EDN: FZPNKF.

References

1. Petrik A.A., Vol'chenko N.A., Purgal P.Yu., Vol'chenko D.A. *Friction units*. Krasnodar: Kuban State Technological University; 2003, vol. 2, 220 p. (In Russ.). EDN: QNANGL.
2. Volchenko N.A., Polyakov P.A., Skrypnik V.S., Vitvickiy V.S. Energy loading of tribounits of vehicle disc-pad brakes. *Eurasian Union of Scientists*. 2018;3-2:51-59. (In Russ.). EDN: XNFTED.
3. Sklyarenko E.F. *Increasing energy intensity and efficiency of vehicle disc-pad brake devices*. In: *Innovacionnyy potencial razvitiya nauki v sovremennom mire: dostizheniya i innovacii: sbornik nauchnykh statej po materialam XII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Innovative potential for science development in the modern world: achievements and innovations: collection of scientific articles on the materials of the 12th International scientific and practical conference*. 28 February 2023, Ufa. Ufa; 2023, p. 91-111. (In Russ.).
4. Sainath A., Dehadray P.M., Bharath P., Rao L.B. The thermal and stress analysis of disc brake. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2021;1128(1):012015. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1128/1/012015>.
5. Mrausi S., Trimble J., Olabanji O., Tlhabadira I., Daniyan I.A. Investigating the mechanical properties of automotive brake disc and pad developed from locally sourced materials. In: *14th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies*. 2023;197-203. <https://doi.org/10.1109/ICMIMT59138.2023.10200088>.
6. Barik N., Khadari S.A.R. Analysis of disc brake. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2021;1123:012004. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1123/1/012004>.
7. Sau S.K., Pulinat K.G., Moss P.N., Ranjeet P., Prabu S.S. A comparative study on the thermal and dynamic analysis of a disc brake using Ansys. *Materials Today: Proceedings*. 2022;65(8):3714-3723. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.318>.
8. López-Flores, Jennifer-Guadalupe, Cordero-Guridi, De Jesús J., Ovando-Cuevas, Romeo E., et al. Thermal-structural numerical analysis of the brake and disc system of a Formula SAE 2024 type vehicle. *Journal Mathematical and Quantitative Methods*. 2024;8(1-13):e30814113. <https://doi.org/10.35429/JMQM.2024.8.14.3.13>.
9. Maronati D., Oberti L., Ronki N. *Ventilated brake disc*. Patent RF, no. 2668785; 2018. (In Russ.).
10. Villemín Ya., Vittke K., Klingel'hefer A., Pipilis A. *Brake disc rotor with internal ventilation*. Patent RF, no. 2556269; 2015. (In Russ.).
11. Vurs S., Melan A. *Assembled shaft brake disc*. Patent RF, no. 2628419; 2017. (In Russ.).
12. Fedotov E.S., Litvinov A.E., Starodub M.V. Causes of damage to brake discs (Part 1). *Mekhatronika, avtomatika i robototekhnika*. 2020;6:56-61. (In Russ.). <https://doi.org/10.26160/2541-8637-2020-6-56-61>. EDN: UXEEON.
13. Fedotov E.S., Starodub M.V., Kuznetsov V.A. Causes of damage to the brake discs (Part 2). *Fundamental'nye osnovy mekhaniki*. 2021;7:39-44. (In Russ.). <https://doi.org/10.26160/2542-0127-2021-7-39-44>. EDN: OGBFYP.
14. Fedotov E.S., Litvinov A.E., Starodub M.V. Causes of damage to brake pads of disc-shoe brakes. *Transport, mining and construction engineering: science and production*. 2020;9:18-23. (In Russ.). <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2020-9-18-23>. EDN: FDKDVA.
15. Koshevoy O.S., Mamulyan N.S., Radchenko A.S. Triz – technology innovation. *Models, systems, networks in economics, technology, nature, and society*. 2013;1:65-67. (In Russ.). EDN: RPZDBN.
16. Kolosko D.N., Khaustovich I.S., Shcherbachyeva V.A. Application of the Mises criterion in strength calculations of engineering analysis systems. In: *Aktual'nye problemy i perspektivy razvitiya sel'skih terri-torij i kadrovogo obespecheniya APK: sbornik nauchnykh statej III Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Actual problems and development prospects of rural areas and personnel provision of agro-industrial complex: collected scientific articles of the 3d International scientific and practical conference*. 7–8 June 2023, Minsk. Minsk: Belarussian State Agrarian Technical University; 2023, p. 324-328. (In Russ.).
17. Gubenko A.S., Tempel Yu.A., Starikov A.I., Teploukhov O.Yu. Optimization of strength and mass characteristics of a part using generic design algorithms. In: *Proceedings of Tula State University. Technical Science*. 2023;7:358-362. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2023-7-358-359>.

18. Krasikova E.S. 3D model designing for product manufacturing using investment casting. In: *Vysokie tekhnologii v mashinostroenii: materialy XX Vserossijskoj nauch-no-tekhnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem = High technologies in mechanical engineering: Proceedings of 20th All-Russian scientific and technical conference with international participation*. 9–10 November 2023, Samara. Samara: Samara State Technical University; 2023, p. 31-34. (In Russ.). EDN: ISRYKI.
19. Shilov A.V. *Method for removing a burnt-out polymer model from a ceramic mold in investment casting*. Patent RF, no. 2772531; 2022. (In Russ.). EDN: MOSJRS.
20. Evstigneev A.I., Dmitriev E.A., Odinov V.I., Chernyshova D.V., Evstigneeva A.A., Ivankova E.P. On the crack resistance of a ceramic shell mold according to the smelted models when a spherical steel casting solidifies in IT. *Foundry. Technologies and Equipment*. 2022;9:17-21. (In Russ.). EDN: BSLLOC.
21. Tkachenko S.S., Emelyanov V.O., Martynov K.V. Modern technology of investment casting for the production of artistic castings. *Foundry Production and Metallurgy*. 2021;1:49-52. (In Russ.). <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-49-52>. EDN: KETJWM.
22. Sakovich N.Ye., Nikitin A.M., Shilin A.S., Rozhnova V.S., Prudnikov S.A. Disc-pad brakes of motor vehicles. *Bulletin of the Bryansk State Agrarian University*. 2021;6:55-60. (In Russ.). <https://doi.org/10.52691/2500-2651-2021-88-6-55-60>. EDN: FZPNKF.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Скляренко Евгений Федорович,
аспирант,
Кубанский государственный
технологический университет,
350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2, Россия
✉ sklyarfedorovich97@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0003-0119-9875>

Шевцов Юрий Дмитриевич,
д.т.н., профессор,
профессор кафедры транспортных процессов
и технологических комплексов,
Кубанский государственный
технологический университет,
350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2, Россия
✉ shud48@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0003-1742-1135>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Evgeniy F. Sklyarenko,
Postgraduate Student,
Kuban State Technological University,
2, Moskovskaya St., Krasnodar 350072, Russia
✉ sklyarfedorovich97@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0003-0119-9875>

Yuriy D. Shevtsov,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Transport
Processes and Technological Complexes,
Kuban State Technological University,
2, Moskovskaya St., Krasnodar 350072, Russia
✉ shud48@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0003-1742-1135>

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 13.03.2025 г.; одобрена после рецензирования 30.04.2025 г.; принята к публикации 02.06.2025 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 13.03.2025; approved after reviewing 30.04.2025; accepted for publication 02.06.2025.



Review of methods for researching energy security. Modeling

Dmitry S. Krupenev¹, Viktoria M. Shchukina²✉

¹Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

^{1,2}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The paper aims to review literature sources that provide an assessment of energy security and energy supply reliability. Various methods for modeling energy systems presented in the sources are compared and evaluated. About 50 scientific articles and reviews selected from scientific indexes (including IEEE, Web of Science, and Scopus) were studied using the keywords “energy security”, “energy supply reliability”, “large-scale systems”, and “bottleneck analysis”. A systematic review method for reviewing specialized sources according to article categories was applied to provide a well-defined structure for the given research area. A comprehensive review of literature sources and analysis of the methods of modeling power systems presented in the papers was carried out. Emphasis was placed on the sources in which analysis of energy security and reliability of energy supply was selected as the primary function of the presented model. Works having other target functions (cost minimization, profit maximization, etc.) were also considered to provide a comparison of the applied modeling methods for different target functions. Most studies were found to focus on modeling energy systems of different scales, from individual buildings to national or regional power grids, and to be mainly aimed at minimizing energy costs or maximizing profits. Conversely, less research has focused on energy scarcity minimization and reliability assessment, indicating a significant research gap and highlighting the need for further research in this critical area. The results of the presented literature review clarify the application of various methods of modeling energy systems in the analysis of energy security and reliability of fuel and energy supply, as well as in other target functions. It is concluded that similar modeling methods are used for diverse target functions. Static nonlinear models, representing the most widely used approach, will be used as a basis for further research.

Keywords: energy security, energy supply reliability, energy sector, multi-energy systems, modeling

Funding. The research was carried out under the state assignment (No. FWEU-2021-0003) of the Fundamental Research Program of the Russian Federation for the period from 2021 to 2030.

For citation: Krupenev D.S., Shchukina V.M. Review of methods for researching energy security. Modeling. *iPolytech Journal*. 2025;29(2):234-251. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-2-234-251>. EDN: SXHDC.

ЭНЕРГЕТИКА

Обзорная статья

УДК 621.311.22

Обзор методов исследования энергетической безопасности. Моделирование

Д.С. Крупенёв¹, В.М. Щукина²✉

¹Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск, Россия

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

Резюме. Цель – провести обзор литературных источников, посвященных оценке энергетической безопасности и надежности топливо- и энергоснабжения. В работе анализируются источники, в которых применяются различные методы моделирования оцениваемых энергетических систем. Изучено около 50 научных статей и обзоров, подобранных в различных научных источниках (в том числе IEEE, Web of Science и Scopus) по следующим ключевым словам: «энергетическая безопасность», «надежность энергоснабжения», «крупномасштабные системы», «анализ узких мест». Применен метод систематизированного обзора специализированных источников, который дает возможность обеспечить четко определенную структуру для данной области исследований путем категоризации статей. Проведен комплексный обзор литературных источников и проанализированы представленные в работах методы моделирования энергетических систем. Акцент поставлен на источники, в которых в качестве целевой функции модели выбран анализ энергетической безопасности и надежности топливо- и энергоснабжения. Были также рассмотрены работы и с иными целевыми функциями (минимизация

затрат, максимизация прибыли и др.) для сравнения применяемых методов моделирования при различных целевых функциях. Анализ показал, что большинство исследований сосредоточено на моделировании энергетических систем различного масштаба, от отдельных зданий до национальных или региональных сетей, и направлено в основном на минимизацию затрат на энергоносители или максимизацию прибыли. И, наоборот, меньше исследований посвящено минимизации дефицита энергоресурсов и оценке надежности, что свидетельствует о значительном пробеле в исследованиях, подчеркивающим необходимость дальнейших исследований в этой важнейшей области. В статье выполнен обзор литературных источников, результаты исследований в которых направлены на применение различных методов моделирования энергетических систем при анализе энергетической безопасности и надежности топливо- и энергоснабжения, а также при иных целевых функциях. Сделан вывод о том, что при различных целевых функциях используются аналогичные методы моделирования. Наиболее часто встречаются статические нелинейные модели, именно такой тип моделей будет использован для дальнейших исследований.

Ключевые слова: энергетическая безопасность, надежность энергоснабжения, энергетический сектор, мультисистемные энергетические системы, моделирование

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного задания (№ FWEU-2021-0003) Программы фундаментальных исследований Российской Федерации на 2021–2030 гг.

Для цитирования: Крупенёв Д.С., Щукина В.М. Обзор методов исследования энергетической безопасности. Моделирование // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 2. С. 234–251. (In Eng.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-2-234-251>. EDN: SXHDCR.

INTRODUCTION

Energy security (ES) covers a wide range of issues related to the sustainability and independence of the energy system from external and internal threats. It includes protection against terrorist acts, sabotage, cyber-attacks, as well as ensuring sufficient energy resources to meet the needs of the population and the economy.

Ensuring a reliable supply of fuel and energy, as well as achieving an acceptable level of energy security is the main objective of the energy policy of any state. This is necessary for sustainable economic growth, improving the quality of life of the population and strengthening the national security of the country. To achieve these goals, it is important to systematically assess the level of energy security and reliability of fuel and energy supplies, monitor the technical condition of energy facilities, carry out timely technical re-equipment and modernization, ensure import substitution in the energy sector, support the reproduction of the mineral resource base, improve environmental safety of the region and develop international cooperation with other countries, borrowing best practices.

The study considers the task of assessing the level of energy security and reliability of fuel and energy supply. Various approaches can be used to assess the level of ES, among which two main approaches were identified:

the indicative method and modeling of energy systems in order to determine the volume of under-delivery of energy resources. In order to select the approach and evaluation methods, it is necessary to evaluate the degree of research on the topic. This article analyzes the studies in which the modeling of energy systems to determine the amount of under-delivery of energy resources to consumers is performed to assess the level of ES.

REVIEW OF ENERGY SYSTEM MODELING METHODS TO ANALYZE FUEL AND ENERGY SUPPLY RELIABILITY AND ENERGY SECURITY

The most profound analysis of the level of energy security, as well as the reliability of fuel and energy supply can be made using the apparatus of simulation modeling. This apparatus is based on correct mathematical models of power system elements, power systems themselves and the energy sector as a whole. In this connection, the existing methods of modeling the energy sector and mathematical models of elements and power systems in assessing the level of energy security, as well as mathematical models of elements and power systems used in solving not only the problems of determining the deficit of energy resources, but also the problems of other criteria will be considered and analyzed.

³Rudenko Yu.N. Handbook of general models for energy system reliability analysis and synthesis. Reliability of energy systems and their equipment: in 4 volumes, V. 1. Moscow: Energoatomizdat; 1994. 472 p. / Руденко Ю.Н. Справочник по общим моделям анализа и синтеза надежности систем энергетики. Надежность систем энергетики и их оборудования: в 4 т., т. 1. М.: Энергоатомиздат, 1994. 472 с.

The works³ [1–55] present studies aimed at analyzing the reliability of energy supply and assessing the level of energy security. They are based on modeling of power systems of different territorial extent, the calculation scheme of which is presented from a single node (zone, cluster) to a multi-node model. All works consider from three energy resources, and the following regularity is traced: the more territorial clusters are represented in the model, the less energy resources are considered. The exception in this case is the study presented in [22, 23].

In [2–11, 12–16, 29–33], studies are presented in which energy systems are modeled with objective functions other than energy supply reliability analysis and energy security level assessment. Most often these are economic or environmental objective functions. These works are interesting from the point of view of mathematical description of power systems and consideration of its various features. Further in the article all the considered works will be divided into groups depending on the scale and volume of the modeled power system, as well as the number of considered power flows.

1. Representation of power systems by a single-zone model

In single-area models of power systems, no consideration is given to energy interconnections, only the possibility of meeting consumer demand with specific energy sources is ana-

lyzed. One of the concepts of such analysis is the concept of energy hub.

In [2–11], a single-area energy system described by the energy hub concept is considered (Fig. 1). The energy hub acts as an intermediate link between energy producers, transportation infrastructure and consumers. The main functions of the hub include transmission, transformation and storage of energy resources. The energy carrier can be transferred from input to output either in an unchanged form (e.g., electricity) or converted into another form (e.g., gas is converted into heat energy) [7].

The hub consists of elements - converters, each of which is characterized by a value of efficiency. According to this concept, the balance equations can be written in the vector form $A \cdot B = C$, where B is a vector of incoming energy flows, C is a vector of outgoing energy flows, A is a matrix of conversion coefficients (efficiency). To form the matrix, all values of energy flows are converted to unified units of measurement: ue, MW, Gcal/h, etc. The possibility of converting one type of energy into another is modeled by the presence or absence of efficiency in the coefficient matrix. Fuel systems are mainly represented by gas [3–5, 9, 10], less frequently by biofuels [7, 8]; coal and petroleum products are usually absent. Gas boilers [8, 9], GTUs [2, 3, 7–9] and utilization boilers [10] are most often modeled as fuel converters into electric and thermal energy.

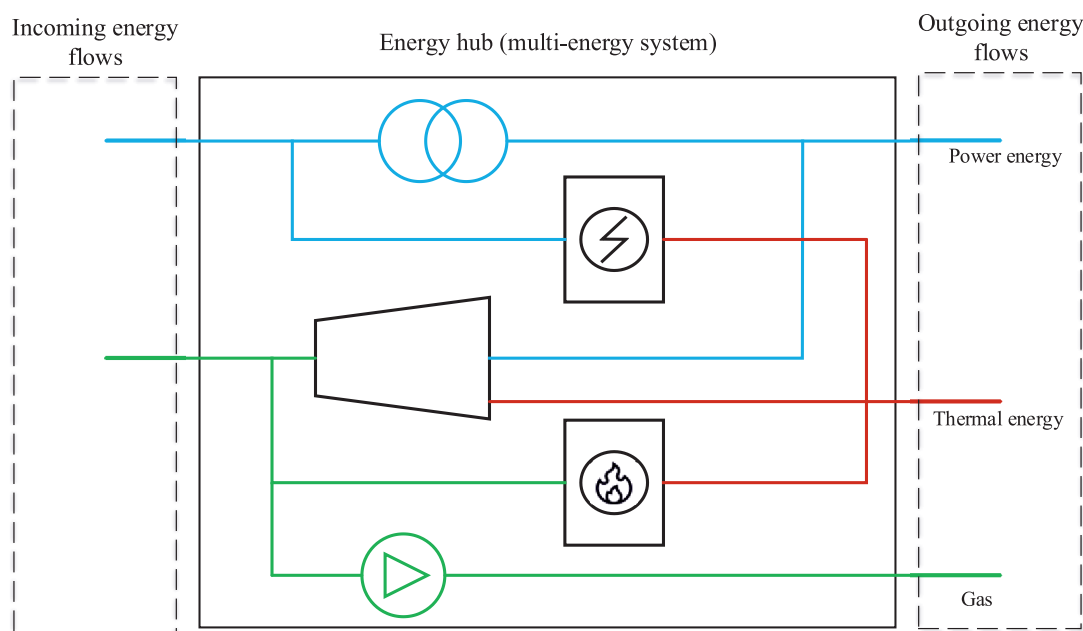


Fig. 1. Energy hub concept-based representation of a single-area energy system

Рис. 1. Представление энергосистемы одной зоны с использованием концепции энергетического узла

In this concept there is no territorial reference. This means that the model of such a system does not take into account the territorial location of both the source of the primary energy resource (mainly fossil fuels: coal, gas, etc.) and final consumers, aggregating their load. The main emphasis is on the system of equations describing the transformation of one energy resource into another. Accordingly, the optimization objective function is mainly either reliable energy supply to consumers or the most economical energy consumption, by using available energy resources.

The paper [1] presents such a concept, named by the authors as “energy hub security area (SA)”, which evaluates the power generation and transmission capability of a district multi-energy system (MES). For the study, the MES is modeled based on the energy hub concept for three energy carriers: electricity, thermal energy and cold energy. The carrying capacity of the hub is described by a vector of input energy flows, a vector of hub state variables and a set of operational (energy conversion equations, energy flow capacity limits) and safety (operational limits of hub elements) constraints. To account for contingencies, the safety domain is narrowed by including appropriate constraints. The authors also specify a set of values at which the above constraints are satisfied under the contingency. The region of safety in this case is expressed as the intersection of a number of such sets.

To define the safety region, a polyhedron in the hyperspace formed on the basis of input and output flow vectors is formed. The authors develop a vertex-based algorithm to compute the OB. The key point is to construct an initial polyhedron, which is a subset of the security domain, and its iterative expansion, to approximate the OB. The first step is to obtain the set of vertices lying on the axes of the hyper-space and construct the original polyhedron. Then the new vertices of the OB are searched along with the normal directions of the IM surfaces. After the search iteration, the IM is updated using the newly obtained vertices. With the search and update process, the IM grows closer to the OB.

To express the ability of an energy hub to withstand multiple energy loads, the concept of Volume of the security region (VSR) is introduced. It is defined as the volume of the corresponding protected area.

To assess the ratio of scenarios in which the demand for all types of energy resources can be covered, the authors introduce the Load-Weighted Volume (LWV), which differs from the VSR by taking into account the load distribution. A higher LWV indicates a higher probability of non-deficiency in all load types.

To identify critical elements of the energy hub and to determine their level of influence on the reliability of the entire hub, the authors define two indices. The first index is the Important degree of volume, which reflects what percentage of the VSR of the element in question is from the VSR of the hub. The second index is the Important degree of load, which measures the impact of the element on the ability of the hub to cover the load:

$$IDV_i = \left(1 - \frac{VSR_i}{VSR_0}\right) \cdot 100\%; \quad (1)$$

$$IDL_i = \left(1 - \frac{LWV_i}{LWV_0}\right) \cdot 100\%. \quad (2)$$

The presented approach allows defining the security area and identifying critical elements for an energy hub involving two or three energy carriers. This concept allows visualizing the level of energy security and reliability of fuel and energy supply. In addition, the vertex-based algorithm proposed by the authors can be applied not only to assess the security area, but also to describe the operating modes of power plants (mainly interesting for thermal power plants) and other elements of energy systems. This concept with some adaptation can be applied to assess the reliability and ES of large-scale systems including many converters and having a greater variety of power flows than presented in the paper.

Modeling of single-zone energy systems at the neighborhood and building scale

Papers [12–16] present studies on district and building scale optimization of energy systems.

In [12], an energy system consisting of an internal combustion engine, waste heat recovery equipment, a gas boiler, air and absorption heat pumps, and a heat exchanger is modeled. The paper describes in some detail the models of each of the above elements, all of which are nonlinear. Of the energy supply system models, only thermal energy trans-

fer is presented. Balance equations are not presented explicitly, but by analyzing all the presented equations and the scheme of the modeled power system it can be assumed that the authors used the concept of an energy hub with some modifications for modeling. The objective function is to minimize the annual total cost of the IES, which includes annual operating costs, natural gas and electricity costs. An exhaustive search method is applied to optimize the model.

In [13], a power system consisting of solar panels, wind turbine, heat exchanger, micro gas turbine, air conditioner, absorption chiller, storage, pipelines and transmission lines is modeled. Although the paper does not mention it, when analyzing the equations and the scheme, it is obvious that the concept of energy hub has been used to describe the integrated power system. The paper describes in great detail a two-level optimization model based on the principles of the master-slave game.

In [14] a system of interconnected energy hubs is modeled. They are described by standard balance equations and constraint systems. Minimization of operating costs is considered as the objective function. The alternating direction multiplier method is applied for optimization. Also in this paper, robust optimization is used to model the uncertainty associated with wholesale market prices.

In [15], the power system is modeled in GAMS software by a traditional method based on a system of balance equations and constraints. In the model, some elements (fuel-to-electricity conversion formulas and power plant production constraints) are described using nonlinear equations, so a mixed nonlinear programming method was applied for optimization using the solver built into GAMS. In this paper, two objective functions are presented: the first one is to minimize the total system cost and the second one is to maximize the total system efficiency.

In [16], energy transformations are modeled using the energy hub concept described earlier. Balance equations and constraints are presented for the remaining subsystems of the modeled system. Such subsystems as electric power, energy storage and consumers are modeled in a standard way and are not of great interest in contrast to gas and heat supply models. The gas supply model

takes into account a large number of constants describing the modeled object and technological process (pipe length and diameter, temperature, gas density, compression ratio, etc.), the general type of balance equations and constraints is standard. The heat supply model also presents a large number of constants (specific heat capacity of water, heat resistance per unit of pipe cross-section, etc.), almost all the equations presented are nonlinear. The aim of the paper under consideration is to develop a decentralized multi-energy resource aggregation method based on two-level interactive transactions in a virtual power plant under integrated energy market conditions. The objective function of the model is the maximization of revenues from two-level interactive transactions. The authors used two methods to solve the nonlinear programming problem: The Gomori Algorithm and the method of internal points.

According to the results of the analysis of the above mentioned papers, it can be concluded that all models of single-area energy systems described by the energy hub concept are similar. The models of power systems in the reviewed papers are not of special interest due to the absence of fundamentally new concepts. It makes sense to analyze these papers rather from the point of view of optimization problem formulation and applied methods. In [13], a two-level optimization is described in a rather interesting and detailed way, which can be adapted to solve the problems of improving energy security and reliability of power supply. And in [16] the gas and heat supply subsystems are modeled in an original way, but, for example, this model is too detailed for scaling up to the energy system of a country.

The very concept of an energy hub can be fully transferred to larger systems up to the energy sector of the country. If we consider it more generally, we can see that the matrix used to describe the relationship between energy resources is a set of balance equations of the system, each variable has constraints, and the conversion factor is a combination of efficiency and conversion factor of one unit of measurement into another. Thus, by decomposing the hub into its components, a system of absolutely any magnitude can be modeled, as long as it is aggregated across energy districts.

MODELING OF MULTI-NODE TWO-PRODUCT POWER SYSTEMS

Often several energy systems, for example, electric power and gas supply systems, dominate in the structure of the energy sector. In practice, the tasks of considering the interconnected operation of such energy systems become interesting.

The paper [17] presents a systematic framework for analyzing the reliability of power supply of integrated energy systems (IES), for which a model of bidirectional energy conversion system is developed to consider the impact of "Power to Gas" on the reliability of IES. The structure of the mathematical model developed by the authors is presented in Fig. 2.

The output data of the mathematical model calculated by means of systems of nonlinear equations are used to describe the state of the IES. All dependencies in the work reflect the technological process of the described object in quite detail. It can be emphasized that unlike similar works, this work describes in detail the method of methane production from carbon dioxide and water in the "Power to gas" block. For this block the equations of chemical reactions are presented, the amount of heat released (or required) during the reaction is taken into account. The model of the gas turbine in the paper is as follows. The gas flow rate in the turbine is directly proportional to the generation of electrical energy and inversely proportional to the efficiency of the turbine and the calorific value of gas. The efficiency of the turbine, in turn, has an inversely proportional

dependence on the square of the electrical energy produced by the plant. This dependence does not seem quite usual, as most often the efficiency of the unit has a direct dependence on the generation. In the paper, when describing this dependence, reference is given to the article [18], which, however, does not contain data on the formation of this dependence.

The gas supply pressure is used as a failure criterion of the system to account for compressibility. The minimum value of the system pressure at which the system is able to function is set as constraints. The probability of failure in the system is analyzed on the basis of a tree of dynamic events. It can describe the evolution of the state of a physical system governed by discrete random events and continuous system behavior [19]. System failure is defined as an event in which the power supply cannot meet the demand.

Based on the analysis of this paper, it can be concluded that the model presented in the paper is of interest for further analysis and experience in modeling gas-fired power plants. There are also critical points, so in the block "Power to gas" and in the modeling of wind turbines cubic dependencies and a large number of conditions significantly complicate the application of the above models in large-scale systems. Despite the fact that the authors have modeled the IES of a rather large area, further scaling of the models is questionable due to a rather high level of detail and complexity of dependencies of some elements of the mathematical model. This remark applies

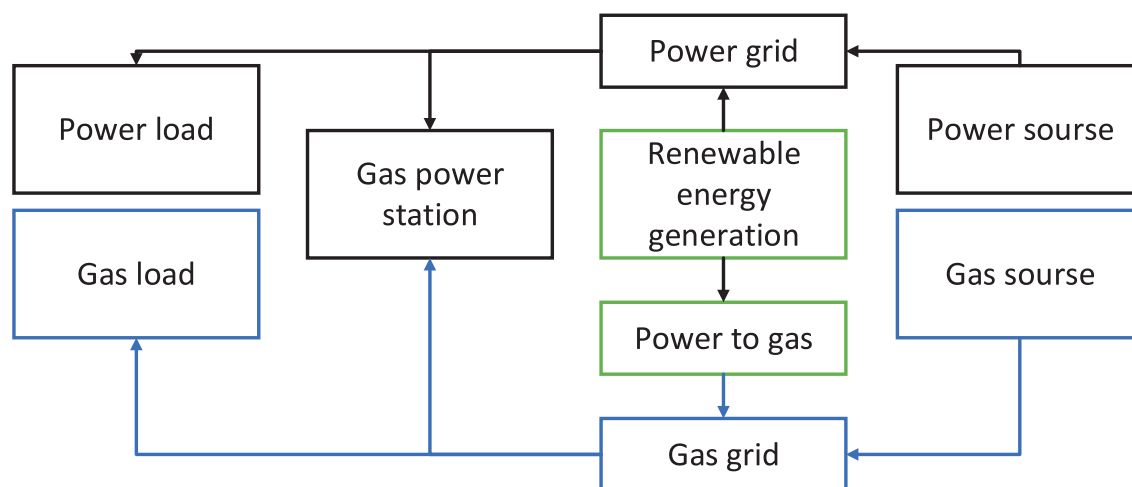


Fig. 2. Mathematical model structure

Рис. 2. Структура математической модели

to the model of the pipeline, gas compressor and electrical networks. Within the framework of the work presented by the authors, the level of detail is more than sufficient and competently developed.

The paper [20] analyzes the safety of interconnected operation of gas and electric systems. The authors determine the predicted values of electricity generation by gas power plants based on the values of variables describing the current state of the gas pipeline. Gas pipelines are described using Renoir's formula [21], which shows the dependence of the absolute pressure at the pipe outlet on the inlet flow rate at constant pressure. To simplify the calculations, the authors perform a step-wise linear approximation for each section of the gas pipeline. Depending on the length and diameter of the pipe, certain restrictions are imposed on the gas flow velocity. The calculations are then performed using the Shirmohammadi method, which is similar to that for electrical networks: pressure is treated as voltage, and flow is treated as electricity. This approach allows gas and electricity networks to be considered as a single system. Energy security is defined as the ability of the system to meet the demand for electricity and gas in the event of an outage of one of the network elements without external redundancy. The authors calculate two scenarios for the Serbian energy system, which represent the worst cases of operation. Based on these calculations, a predictive control model is created.

It is also worth noting that within the framework of this work the authors have considered the possibility of realizing the Smart Grid concept at gas-fired power plants. For specific emergency situations, the necessary alarm signals were determined, for example, "the minimum allowable pressure at the gas turbine inlet has been reached" or "the shut-off valve on the gas pipeline installation at the plant is closed". The aggregate of input parameters and these signals allowed the authors to develop a model of predictive control, on the basis of the data of monitoring of the state of the gas pipeline equipment and indicators of the gas process possible situations are modeled in order to determine the scenarios important for predicting the operation of CCPP, as well as measures to prevent negative and unplanned impact on the EES.

The paper presents a non-standard approach to modeling the interconnected operation of the electric power and gas subsystems. The gas pipeline model in the paper is piecewise linear, which greatly facilitates further calculations and does not significantly reduce their computational accuracy. According to preliminary estimates, the model presented in the paper scales very well and could serve as a basis for modeling larger integrated power systems.

Summarizing the works on modeling multi-node two-product power systems we can conclude that gas supply and electric power systems are mainly considered. Mathematical models of the elements of these systems are presented in sufficient detail, these models with some modification can be used in modeling of the fuel and energy sector.

MODELING OF MULTI-NODE MULTIPRODUCT POWER SYSTEMS

This type of model is the most complex in terms of the number of variables considered and their coupling equations. These systems are analyzed to a much lesser extent than the first two types, since a comprehensive analysis of the interaction of all power flows has a number of serious difficulties and is a very complex task. The obtained models can be used to estimate the deficits in critical and emergency situations and to determine the "bottlenecks" of the power system both in the tasks of development planning and for evaluating the operation modes of the power system.

In [22], a multi-parameter transmission model (MEP-model) is presented that depicts the operation of a unified fuel and energy system in different modes of operation. The model includes four types of elements connected by transportation highways: consumers, energy and fuel sources, reserves, and processing points. The operation of each element is described by the corresponding micro-model.

The MEP model studies dynamic processes. Dynamics is accounted for by fictitious arcs (marked in red in Fig. 3), which connect the nodes-stocks of several stationary models (each of which refers to a certain time interval). For their mathematical description, standard balance equations are used: the energy resource stock in the next time period is equal to the sum of the current stock and the energy

resource inflow to the considered node-stock minus the part of the stock withdrawn from the node. In addition, a system of constraints is introduced, according to which all variables are non-negative and the amount of reserves does not exceed a given maximum permissible value.

This study analyzes the delivery of energy resources such as electricity, gas, oil and coal. Two types of elements performing transportation functions are considered: interchange nodes and trunk arches. The latter are indicated in Figure 3 by black lines (arrows) and are divided into the following types: transmission line arches, gas arches, oil arches and railroad arches.

Since the authors emphasize the supply of energy resources to all consumers as the main function of the MEP model, the paper under consideration also takes into account the damage from under-supply of resources. The damage is expressed through the penalty function, which has a piecewise linear form. The authors define the objective function of the model as the problem of minimizing the cost of energy resource flows. In addition, in the article [23] the authors propose mathematical formulations of the problems of optimization of energy flows under various damages in the network on the basis of the considered model.

The considered model allows to simulate the operation of the energy sector under various disturbing influences, as well as to conduct forecasting studies. The dynamic component of the system is realized quite simply, but at the same time fully reflects the essence of changes in the

system state over time. Taking into account the level of failure of converters and power sources increases the accuracy of the MEP model.

It should be noted that the electric power component is not sufficiently developed in the article. Representation of electric power flow in conventional units does not fully convey all electric power processes. In addition, the article lacks a description of how the dependence of fuel consumption on the final load of the consumer is taken into account (through the efficiency of turbine units).

REVIEW OF ENERGY SECTOR MODELS FOR ANALYZING THE RELIABILITY OF ENERGY SUPPLY AND ENERGY SECURITY DEVELOPED AT ESI SB RAS

ESI SB RAS has long been engaged in research in the field of energy security and development of mathematical models of energy systems and energy sector [24–27]. The models created since 1980 are divided into three main modifications: “Energy sector Reliability”, “Reserve” and “REKS”. All of them are based on the system of linear balance equations with a given matrix of constraints and are aimed at analyzing large energy facilities.

Model “Reliability of Energy sector”. The main purpose of the “Reliability of Energy sector” model is to analyze the consequences of major disturbances in the energy sector of the country. The model calculates optimal ways to compensate for disturbances through the use of interchangeable fuels and redistribution of

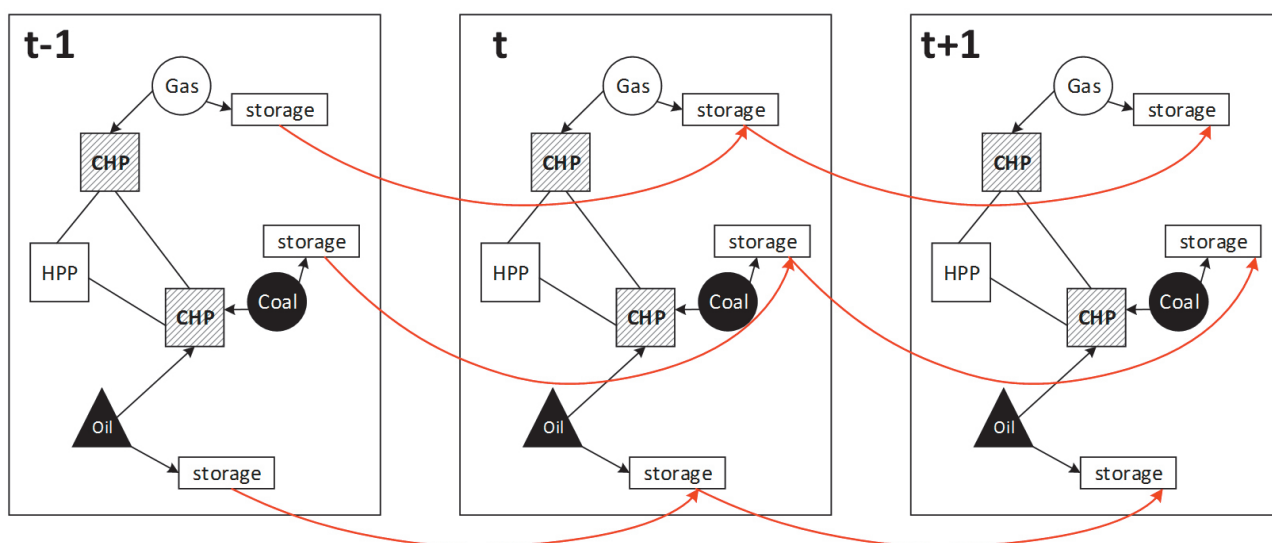


Fig. 3. MEP model dynamic component

Рис. 3. Динамическая составляющая модели МЕР

energy flows. To simplify the calculations, the model takes into account two key factors: interchangeability and transportation links. All elements of the system are divided into four subsystems: gas, oil, coal and electricity, and consumers are classified into three categories.

The “Reserve” model. The Reserve model is an improved version of the model “Reliability of Energy sector”. It includes a new thermal energy subsystem and a two-component approach to modeling thermal plants. The model also takes into account the end-of-period energy reserve, which affects current decisions.

The “Reserve 2” model. In the “Reserve 2” model the structure is changed, autonomous regions are selected and the modeling period is shortened.

The REX model. In parallel with the “Reserve 2” model, the REX model, which takes into account energy security, was developed. The model includes eight economic regions and a modified CHP modeling method reflecting the relationship between heat and electricity. It also includes a financial block describing investment costs for modernization and reconstruction of energy facilities, which allows tracking the dynamics of the sector’s development [28].

Models of multi-node multiproduct power systems with economic objective functions. In a number of papers [29–33], integrated energy systems are modeled to minimize total cost or maximize profit.

For example, in [29], Sh. Yang et al. introduce the concepts of time-of-use (TOU) price [34–44] and Shepley’s benefit sharing method [45–50] to consider the rational energy utilization in IES. The paper consists of three phases: the first phase involves modeling an IES and creating an energy pricing model using TOU tariffs; the second phase involves developing an operation optimization model for revenue maximization; and the third phase involves creating a benefit sharing optimization model based on the Shapley method. The mathematical model of IES is represented by the classical system of equations and constraints, all energy converters are described as in the concept of energy hub - through conversion ratio, in some cases efficiency. The main emphasis in the work is on modeling of pricing and other economic aspects.

In [30], a matrix modeling method based on graph theory is proposed, in which all el-

ements of the IES are represented as nodes and branches. It is difficult to say that this idea is relevant; as a result, systems of equations similar to the concept of an energy hub are formed. However, this method is very illustrative and quite convenient for building calculation programs in object-oriented programming languages.

In [31], a two-level robust IES optimization model is presented, which aims at minimizing the annual total system cost, protecting the environment and satisfying consumer needs. Topsis method and genetic algorithm for non-dominated sorting were used for optimization, which was applied to find the Pareto front. The mathematical model of IES is similar to [24], more emphasis is placed on the experimental part.

In [32], a hierarchical mathematical model of the IES and a local marginal price model, which aims to analyze the energy market dynamics in the implementation of carbon emission constraints and carbon dioxide trading. The presented models are nonlinear and describe the energy system in sufficient detail. The proposed optimization model is a two-level model: the upper level is minimization of operating costs on the power supply side, and the lower level is maximization of regional consumer surplus. The extended particle swarm method, a combination of the particle swarm method and the interior point method, is used as the optimization algorithm.

In [33], a three-level model of planning-catastrophe-prevention-replanning, oriented to the evaluation of IES sustainability for the purpose of investment planning, is proposed. The task of the first level is to plan the composition of IES equipment and make an investment plan, the optimization objective is to minimize the operating and investment costs. The task of the second level is to maximize the possible total deficit in case of various catastrophic events. The task of the third level is the re-planning of the investment plan taking into account the data obtained from the second task, the objective function of the level is the minimization of total deficits under various catastrophic events. This paper describes the elements of the IES in quite detail, the model of the electric power subsystem includes active and reactive power, voltages and power coefficients, the gas model takes into account

pressure, volume and a large number of coefficients.

The works considered in this section mostly have similar mathematical models and economic objective functions. The works [30] due to the application of graph theory and visualization and [32] due to a very detailed mathematical model of the power system stand out. To simplify the mathematical modeling of large-scale systems and to solve energy security problems, the most interesting work is [30], whose methodology can greatly simplify the visualization of a large power system and its software adaptation. In addition, we can highlight the work of [28], since despite the stated economic objective function, the work presents the analysis of system bottlenecks by modeling various emergency situations. It would be interesting to consider this approach within the framework of energy security analysis.

COMBINED ENERGY SECURITY ASSESSMENT

In [51] the authors consider the issues of energy security and propose a methodolo-

gy for its assessment. The main objective of this approach is to quantify the level of energy security for different energy development scenarios. The proposed framework is based on indicative and modeling studies, including differential equations and Bayesian methods to estimate this level.

Earlier in [52], the authors presented a methodology for assessing energy security based on historical statistical data using empirical calculation of an integral indicator. Two methodologies are described in [53–55]: one uses a dynamic indicator model and a Bayesian method to predict the level of energy security, and the other is based on modeling, which are then combined and complemented in [51]. Thus, the methodology developed by the authors allows combining modeling and indicative approaches to forecast the level of energy security in the future in the context of different directions of energy system development.

The algorithm of the energy security assessment methodology is realized step by step. It is presented further in the form of a scheme (Fig. 4).

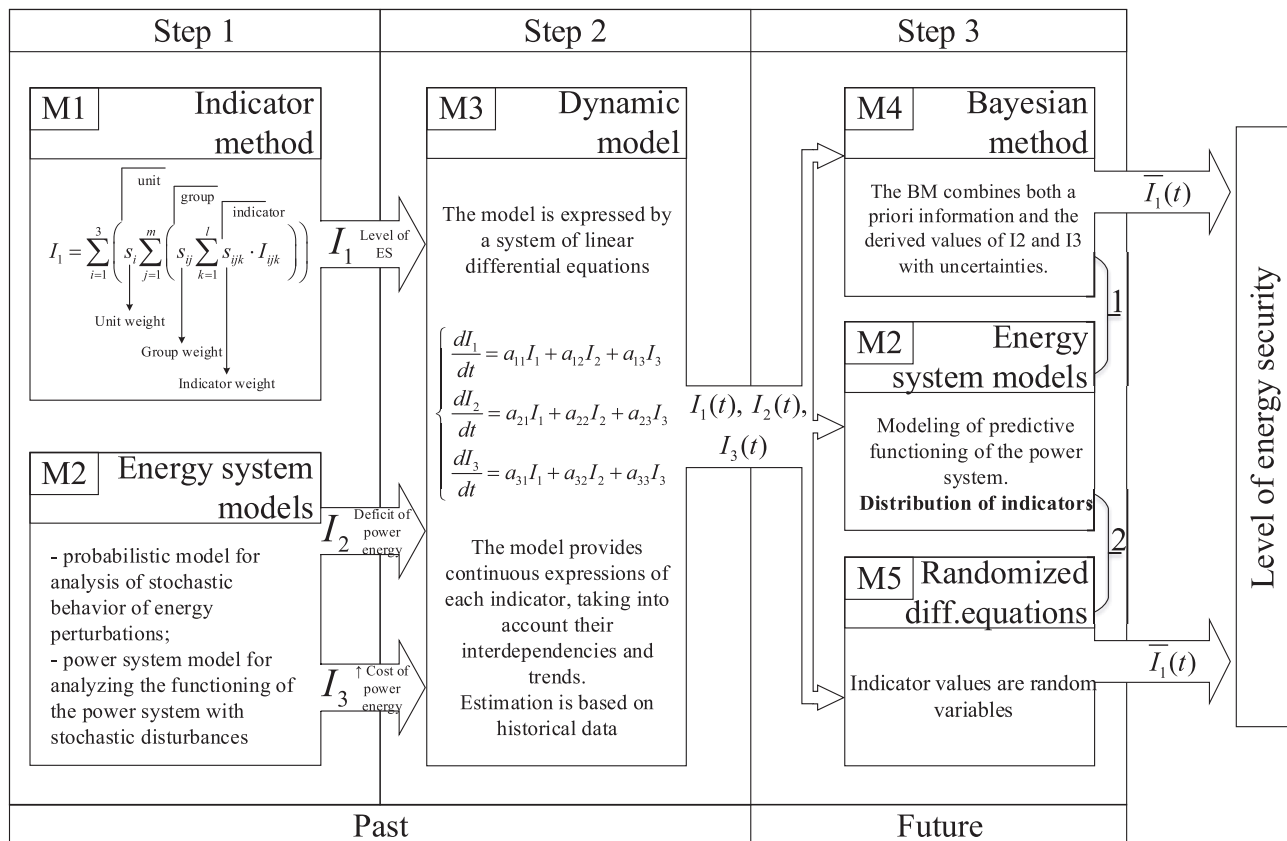


Fig. 4. Energy security level detection algorithm

Рис. 4. Алгоритм определения уровня энергетической безопасности

Summary table of the research review results

Сводная таблица результатов обзора исследований

No. of references	Objective function	Equation type	Type of model	Method of optimization / standardization	Territorial cluster
[1]	Determining the load-bearing capacity of the hub	Linear	Static	Vertex-based algorithm	MES, district MES
[2–11]	Optimizing equipment performance / maximizing profits	Linear	Static	–	MES, district MES
[12]	Minimizing the annual total cost of the IES	Non-linear	Static	Exhaustive search method	District IES
[13]	Optimization of equipment operation	Non-linear	Static	The master-slave game	District IES
[14]	Minimization of operating costs	Non-linear	Static, probabilistic	Method of alternating direction multipliers, robust optimization	A system of interconnected energy hubs
[15]	Minimize total system cost and maximize total system operational efficiency	Non-linear	Static	Mixed-valued nonlinear programming method	Decentralized IES
[16]	Maximizing revenue from two-tier interactive transactions	Non-linear	Static	Gomori algorithm and primal-dual interior point method	Decentralized IES
[17]	Determination of the reliability level of the energy system	Non-linear	Probabilistic	DET, probabilistic safety margin method	IES of the district
[20]	Level of energy security	Linear, Non-linear, Renoir's formula.	Static, probabilistic	Piecewise linear approximation, Shirmohammadi method	Energy system of the country, an example for Serbia
[22–23]	Minimization of damages from under-energy supply	Linear	Dynamic	Simplex	Russia
[24]	Minimizing deficits and operating costs	Linear	Statistical	Simplex	19 economic regions of the USSR
[25]	Minimizing shortages, operating costs and inventory holding costs	Linear	Statistical	Simplex	27 economic regions of Russia
[26]	Minimizing shortages, operating costs and inventory holding costs	Linear	Statistical	Simplex	35 E.D. and autonomous subjects of the Russian Federation
[27]	Minimizing deficits, costs of operation and the cost of new and retired capacities	Linear	Statistical	Simplex	8 federal districts
[29]	Income maximization, benefit sharing	Non-linear	Static	The Shapley method	Park IES
[30]	–	Non-linear	Graphs	Graph theory	District IES
[31]	Minimize annual total system cost, protect the environment and meet customer needs	Non-linear	Static	Topsis method and genetic algorithm for non-dominated sorting	District IES
[32]	Minimize operating costs on the electricity supply side, maximize regional consumer surplus	Non-linear	Static	Particle swarm method and interior point method	District IES
[33]	Minimizing operating and investment costs in a risk-adjusted manner	Non-linear	Probabilistic	–	District IES
[51–55]	Level of energy security	Linear differential	Dynamic, probabilistic	Weight setting	Energy system of the country, an example for Lithuania

Step 1 consists of two parts: the indicative method M1, developed on the basis of a system of 68 security indicators; and two mathematical models M2 - a probabilistic model and a power system model. The probabilistic model is based on the analysis of different external and internal disturbances, which are characterized by different parameters (e.g. initial moment and duration of the disturbance, type of energy source, technology availability constraint, etc.). The perturbation parameters are described by probability distributions (uniform, normal, lognormal, and others). This feature allows generating a complete set of disturbance scenarios, which is used for modeling the prospective development of the power system.

The power system model in the proposed approach is based on the linear optimization method and implemented in the Open Source Energy Modeling System tool, whose objective function is minimization of the total discounted cost.

Step 2 is a dynamic M3 model that utilizes energy security indicator data from the indicator system (part M1) and under-recovered energy and cost growth indicators from the energy system model (part M2). The M3 model allows for continuous expressions for each indicator (taking into account their interdependencies and trends), expressed as a homogeneous system of linear differential equations.

Step 3 has two possible calculation methods: alternative 1 - Bayesian method (blocks M2, M4) and alternative 2 - system of random differential equations (block M5). Both alternatives require the output of step 2, the general solution of the differential equation system, as input. This dynamic model allows for the inclusion of interdependencies among indicators and provides expressions of the indicators as continuous time-dependent functions.

The advantages of alternative 1 are the disadvantages of alternative 2 (and vice versa), so we can summarize 2 main differences:

1. For the Bayesian method, information on only one indicator is sufficient: the probable value (for different scenarios) and the known probability distribution of I_2 and / or I_3 . Alternative 2 requires information on all indicators.

2. Alternative 2 does not require new methods (only M3 block output and input data), and the calculation does not depend on the

probability distributions of the indicators. In alternative 1, the complexity of the calculation depends on the probability distributions of the indicators.

This study is interesting in terms of the methodological framework presented. The streamlined interaction of different models and methods allows for a more comprehensive analysis and comparison of the values of all indicators to further combine them into a common energy security index (Table).

CONCLUSION

Ensuring deficit-free energy supply to consumers is the most important task of the energy sector. In this regard, determining the level of energy security and calculating reliability indicators plays a determining role in planning the functioning and development of the energy system as a whole.

In this paper, an analysis of scientific studies aimed at analyzing the reliability of energy supply and energy security using modeling of energy systems was carried out.

When analyzing the works, it was found that most of the studies are aimed at forming models of energy systems of different territorial extent (from a single building to a country or interstate associations), having as an objective function minimization of costs for primary energy carrier or maximization of profit. The works aimed at minimizing the deficit of energy resources and assessing reliability were presented much less, in this regard, we can conclude that research in this direction is relevant. This method allows modeling the most severe modes of power system operation and identifying "bottlenecks" that need to be strengthened to increase the level of energy security.

A combined method, which combines elements of modeling and indicative assessment, was also considered. In this group, only one paper was presented, combining indicative assessment and probabilistic models to account for the stochastic nature of external disturbances. This direction is the most promising for further research, as it allows to analyze both the current and forecasted state of the energy sector in the most complete and accurate way, to assess the level of energy security and to outline further ways of development of the energy sector.

References

1. Yong Pei, Wang Yi, Capuder T., Tan Zhenfei, Zhang Ning, Kang Chongqing. Steady-state security region of energy hub: Modeling, calculation, and applications. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2021;125:106551. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106551>.
2. Mohammadi M., Noorollahi Yo., Mohammadi-ivatloo B., Hosseinzadeh M., Yousefi H., Khorasani S.T. Optimal management of energy hubs and smart energy hubs – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018;89:33-50. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.02.035>.
3. Chen Yue, Wei Wei, Liu Feng, Wu Qiuwei, Mei Shengwei. Analyzing and validating the economic efficiency of managing a cluster of energy hubs in multi-carrier energy systems. *Applied Energy*. 2018;230:403-416. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.112>.
4. Voropai N.I., Ukolova E.V., Gerasimov D.O., Suslov K.V., Lombardi P., Komarnicki P. Study of a multi-power facility by simulation modeling methods. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(12):157-168. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-12-157-168>.
5. Sadeghi H., Rashidinejad M., Moeini-Aghtaie M., Abdollahi A. The energy hub: an extensive survey on the state-of-the-art. *Applied Thermal Engineering*. 2019;161:114071. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114071>.
6. Papadimitriou C.N., Anastasiadis A.G., Psomopoulos C.S., Vokas G.A. Demand response schemes in energy hubs: a comparison study. *Energy Procedia*. 2019;157:939-944. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.260>.
7. Suslov K., Piskunova V., Gerasimov D., Ukolova E., Akhmetshin A., Lombardi P., et al. Development of the methodological basis of the simulation modelling of the multi-energy systems. In: *E3S Web of Conferences*. 2019;124:01049. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912401049>.
8. Wan Yi, Kober T., Schildhauer T., Schmidt T.J., McKenna R., Densing M., et al. Conditions for profitable operation of P2X energy hubs to meet local demand under to with energy market access. *Advances in Applied Energy*. 2023;10:100127. <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2023.100127>.
9. Maroufmashat A., Elkamel A., Fowler M., Sattari S., Roshandel R., Hajimiragha A., et al. Modeling and optimization of a network of energy hubs to improve economic and emission considerations. *Energy*. 2015; 93(2):2546-2558. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.10.079>.
10. Mobarakeh A. I., Sadeghi R., Esfahani H.S., Delshad M. Optimal planning and operation of energy hub by considering demand response algorithms and uncertainties based on problem-solving approach in discrete and continuous space. *Electric Power Systems Research*. 2023;214(A):108859. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108859>.
11. Ahmadisedigh H., Gosselin L. Combined heating and cooling networks with waste heat recovery based on energy hub concept. *Applied Energy*. 2019;253:113495. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113495>.
12. Wu Di, Han Zhonghe, Liu Zhijian, Li Peng, Ma Fanfan, Zhang Han, et al. Comparative study of optimization method and optimal operation strategy for multiscenario integrated energy system. *Energy*. 2020;217:119311. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119311>.
13. Li Peng, Wang Zixuan, Yang Weihong, Liu Haitao, Yin Yunxing, Wang Jiahao, et al. Hierarchically partitioned coordinated operation of distributed integrated energy system based on a master-slave game. *Energy*. 2021;214:119006. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119006>.
14. Nikmehr N. Distributed robust operational optimization of networked microgrids embedded interconnected energy hubs. *Energy*. 2020;199:117440. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117440>.
15. Liu Wen Hui, Ho Wai Shin, Lee Ming Yang, Hashim H., Lim Jeng Shiun, Klemeš J.J., et al. Development and optimization of an integrated energy network with centralized and decentralized energy systems using mathematical modelling approach. *Energy*. 2019;183:617-629. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.158>.
16. Dou Xun, Wang Jun, Wang Zhen, Ding Tao, Wang Shizhen. A decentralized multi-energy resources aggregation strategy based on bi-level interactive transactions of virtual energy plant. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2021;124:106356. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106356>.
17. Chi Lixun, Su Huai, Zio Enrico, Zhang Jinjun, Li Xueyi, Li Zhang, et al. Integrated deterministic and probabilistic safety analysis of integrated energy systems with bi-directional conversion. *Energy*. 2020;212:118685. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118685>.
18. Beér J.M. High efficiency electric power generation: the environmental role. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2007;33(2):107-134. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2006.08.002>.
19. Acosta C., Siu N. Dynamic event trees in accident sequence analysis: application to steam generator tube rupture. *Reliability Engineering & System Safety*. 1993;41(2):135-154. [https://doi.org/10.1016/0951-8320\(93\)90027-V](https://doi.org/10.1016/0951-8320(93)90027-V).
20. Dokic S.B., Rajakovic N.L. Security modelling of integrated gas and electrical power systems by analyzing critical situations and potentials for performance optimization. *Energy*. 2019;184:141-150. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.165>.
21. Dobrynina Y.E., Krupenev D.S. Consideration of system security criteria in the models of power system unit commitment. *iPolytech Journal*. 2024;28(2):273-289. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-273-289>. EDN: QFANFX.
22. Kozlov M.V., Malashenko Y.E., Nazarova I.A., Novikova N.M. Fuel and energy system control at large-scale damages. 1. Network model and software implementation. *Journal of Computer and System Sciences International*. 2017;6:50-73. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0002338817060051>. EDN: ZVGFGV.

23. Malashenko Y.E., Nazarova I.A., Novikova N.M. Fuel and energy system control at large-scale damages. II. Optimization problems. *Journal of Computer and System Sciences International*. 2018;2:39-51. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S000233881802004X>. EDN: YWSLYO.
24. Zorkaltsev V.I. *Forecasting and analysis methods of operation efficiency of fuel supply systems*. Moscow: Nauka; 1988, 144. (In Russ.).
25. Seleznev A.V. Software package for solving the selection problem of the composition of switched-on generating equipment in the conditions of a competitive electricity market in Russia. In: *Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnykh sistem MLSD`2015 = Management of MLSD`2015 large-scale system development*. 29 September – 1 October 2015, Moscow. Moscow: V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences; 2015, vol. 1, p. 281-290. EDN: WECDVH. (In Russ.).
26. Antonov G.N., Cherkesov G.P., Krivorukiy L.D. *Methods and models for studying energy systems survivability*. Novosibirsk: Nauka; 1990, 285 p. (In Russ.).
27. Alekseev A.V., Barakhtenko E.A., Voitov O.N. *Hierarchical modeling of energy systems* / eds. N.I. Voropai, V.A. Stennikov. Novosibirsk: Geo; 2020, 314 p. (In Russ.). <https://doi.org/10.21782/V978-5-6043021-9-4>.
28. Senderov S.M., Rabchuk V.I., Pyatkova N.I. Methodological approach to the creation of a device for analyzing consumers' fuel and energy supply reliability under negative impacts on fuel and energy complex facility operation. *Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shih sistem energetiki: materialy XCIII zasedaniya seminara = Methodological issues in studying large energy system reliability: Proceedings of the 93^d seminar session*. 13–17 September 2021, Volzhskij. Irkutsk: Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; 2021, vol. 1, iss. 72, p. 52-61. (In Russ.). EDN: JCKRBD.
29. Qin Chun, Wang Linqing, Han Zhongyang, Zhao Jun, Liu Quanli. Weighted directed graph based matrix modeling of integrated energy systems. *Energy*. 2021;214:118886. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118886>.
30. Yang Xiaohui, Chen Zaixing, Huang Xin, Li Ruixin, Xu Shaoping, Yang Chunsheng. Robust capacity optimization methods for integrated energy systems considering demand response and thermal comfort. *Energy*. 2021;221:119727. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119727>.
31. Cheng Xin, Zheng Yun, Lin Yong, Chen Lei, Wang Yunqi, Qiu Jing. Hierarchical operation planning based on carbon-constrained locational marginal price for integrated energy system. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2021;128:106714. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106714>.
32. Zhou Kaile, Wei Shuyu, Yang Shanlin. Time-of-use pricing model based on power supply chain for user-side microgrid. *Applied Energy*. 2019;248(1):35-43.
33. Wang Yongli, Ma Yuze, Song Fuhao, Ma Yang, Qi Chengyuan, Huang Feifei. Economic and efficient multi-objective operation optimization of integrated energy system considering electro-thermal demand response. *Energy*. 2020;205:118022. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118022>.
34. Liu Mingxi, Shi Yang, Fang Fang. Optimal power flow and PGU capacity of CCHP systems using a matrix modeling approach. *Applied Energy*. 2013;102:794-802. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.08.041>.
35. Aldarajee A.H.M., Hosseini S.H., Vahidi B. A secure tri-level planner-disaster-risk-averse replanner model for enhancing the resilience of energy systems. *Energy*. 2020;204:117916. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117916>.
36. Cornell C., Dinh Nam Trong, Pourmousavi S.A. A probabilistic forecast methodology for volatile electricity prices in the Australian national electricity market. *International Journal of Forecasting*. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2023.12.003>.
37. Sawas A.M., Khani H., El-Taweel N.A., Farag H.E.Z. Comparative Time-of-Use and wholesale electricity price-based scheduling in embedded power and natural gas distribution grids penetrated with large renewable generation. *Electric Power Systems Research*. 2019;177(8):105975. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.105975>.
38. Zhang Zhihan, Yu Wenhao, Yu Mengxia, Guo Zhichun, Jiang Meng. A survey of multi-task learning in natural language processing: regarding task relatedness and training methods. In: *Proceedings of the 17th Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics*. 2023;39:943-956. <https://doi.org/10.18653/v1/2023.eacl-main.66>.
39. Nikmehr N., Najafi-Ravadanegh S., Khodaei A. Probabilistic optimal scheduling of networked microgrids considering time-based demand response programs under uncertainty. *Applied Energy*. 2017;198:267-279. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.04.071>.
40. Sun Yujun, Wang Yan, Wang Beibei, Li Yang, Xiao Yong, Li Qiushuo. Multi-time scale decision method for source-load interaction considering demand response uncertainty. *Automation of Electric Power Systems*. 2018;42(2):106-113. <https://doi.org/10.7500/AEPS20170416004>.
41. Flottmann J. Australian energy policy decisions in the wake of the 2022 energy crisis. *Economic Analysis and Policy*. 2024;81:238-248. <https://doi.org/10.1016/j.eap.2023.11.025>.
42. Xiang Yue, Cai Hanhi, Gu Chenghong, Shen Xiaodong. Cost-benefit analysis of integrated energy system planning considering demand response. *Energy*. 2019;192(1):116632. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116632>.
43. Christensen T.H., Friis F., Bettin S., Thronsdén W., Ornetzeder M., Skjølvold T.M., et al. The role of competences, engagement, and devices in configuring the impact of prices in energy demand response: findings from three smart energy pilots with households. *Energy Policy*. 2020;137(11):111142. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111142>.

44. Shen Jianjian Shen, Cheng Chuntian, Zhang Xiufei, Zhou Binbin. Coordinated operations of multipiereservoir cascaded hydropower plants with cooperation benefit allocation. *Energy*. 2018;153:509-518. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.056>.
45. Hasan K.N., Saha T.K., Chattopadhyay D., Eghbal M. Benefit-based expansion cost allocation for large scale remote renewable power integration into the Australian grid. *Applied Energy*. 2014;113:836-847. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.031>.
46. Rai U., Oluleye G., Hawkes A. Stochastic optimisation model to determine the optimal contractual capacity of a distributed energy resource offered in a balancing services contract to maximise profit. *Energy Reports*. 2024;11:5800-5818. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.05.049>.
47. Xu Zhongwen, Peng Zixuan, Yang Ling, Chen Xudong, Chen Xudong. An improved Shapley value method for a green supply chain income distribution mechanism. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018;15(9):1976. <https://doi.org/10.3390/ijerph15091976>.
48. Ragosa G., Watson J., Grubb M. The political economy of electricity system resource adequacy and renewable energy integration: a comparative study of Britain, Italy and California. *Energy Research & Social Science*. 2024;107:103335. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103335>.
49. Westgaard S., Fleten S.-E., Negash A., Botterud A., Bogaard K., Verling T.H. Performing price scenario analysis and stress testing using quantile regression: a case study of the Californian electricity market. *Energy*. 2021;214:118796. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118796>.
50. Hirth L., Mühlenpfordt J., Bulkeley M. The ENTSO-E Transparency Platform – a review of Europe’s most ambitious electricity data platform. *Applied Energy*. 2018;225:1054-1067. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.048>.
51. Augutis J., Krikstolaitis R., Martisauskas L., Pečiulytė S., Žutautaitė I. Integrated energy security assessment. *Energy*. 2017;138:890-901. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.113>.
52. Augutis J., Krikstolaitis R., Martisauskas L., Urbonienė S. Energy security level assessment technology. *Applied Energy*. 2012;97:143-149. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.11.032>.
53. Augutis J., Krikstolaitis R., Pečiulytė S., Žutautaitė I. Dynamic model based on Bayesian method for energy security assessment. *Energy Conversion and Management*. 2015;101:66-72. <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.05.002>.
54. Augutis J., Krikstolaitis R., Pečiulytė S., Konstantinavičiūtė I. Sustainable development and energy security level after Ignalina NPP shutdown. *Technological and Economic Development of Economy*. 2011;17(1):5-21. <http://doi.org/10.3846/13928619.2011.553930>.
55. Augutis J., Martisauskas L., Krikstolaitis R. Energy mix optimization from an energy security perspective. *Energy Conversion and Management*. 2015;90:300-314. <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.11.033>.

Список источников

1. Yong Pei, Wang Yi, Capuder T., Tan Zhenfei, Zhang Ning, Kang Chongqing. Steady-state security region of energy hub: Modeling, calculation, and applications // *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2021. Vol. 125. P. 106551. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106551>.
2. Mohammadi M., Noorollahi Yo., Mohammadi-ivatloo B., Hosseinzadeh M., Yousefi H., Khorasani S.T. Optimal management of energy hubs and smart energy hubs – A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 89. P. 33–50. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.02.035>.
3. Chen Yue, Wei Wei, Liu Feng, Wu Qiuwei, Mei Shengwei. Analyzing and validating the economic efficiency of managing a cluster of energy hubs in multi-carrier energy systems // *Applied Energy*. 2018. Vol. 230. P. 403–416. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.112>.
4. Voropai N.I., Ukolova E.V., Gerasimov D.O., Suslov K.V., Lombardi P., Komarnicki P. Study of a multi-power facility by simulation modeling methods // *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018. Vol. 22. Iss. 12. P. 157–168. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-12-157-168>.
5. Sadeghi H., Rashidinejad M., Moeini-Aghaie M., Abdollahi A. The energy hub: an extensive survey on the state-of-the-art // *Applied Thermal Engineering*. 2019. Vol. 161. P. 114071. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114071>.
6. Papadimitriou C.N., Anastasiadis A.G., Psomopoulos C.S., Vokas G.A. Demand response schemes in energy hubs: a comparison study // *Energy Procedia*. 2019. Vol. 157. P. 939–944. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.260>.
7. Suslov K., Piskunova V., Gerasimov D., Ukolova E., Akhmetshin A., Lombardi P., et al. Development of the methodological basis of the simulation modelling of the multi-energy systems // *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 124. P. 01049. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912401049>.
8. Wan Yi, Kober T., Schildhauer T., Schmidt T.J., McKenna R., Densing M., et al. Conditions for profitable operation of P2X energy hubs to meet local demand under to with energy market access // *Advances in Applied Energy*. 2023. Iss. 10. P. 100127. <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2023.100127>.
9. Maroufmashat A., Elkamel A., Fowler M., Sattari S., Roshandel R., Hajimiragha A., et al. Modeling and optimization of a network of energy hubs to improve economic and emission considerations // *Energy*. 2015. Vol. 93. Iss. 2. P. 2546–2558. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.10.079>.
10. Mobarakeh A. I., Sadeghi R., Esfahani H.S., Delshad M. Optimal planning and operation of energy hub by considering demand response algorithms and uncertainties based on problem-solving approach in discrete and con-

- tinuous space // Electric Power Systems Research. 2023. Vol. 214. Part. A. P. 108859. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108859>.
11. Ahmadisedigh H., Gosselin L. Combined heating and cooling networks with waste heat recovery based on energy hub concept // Applied Energy. 2019. Vol. 253. P. 113495. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113495>.
 12. Wu Di, Han Zhonghe, Liu Zhijian, Li Peng, Ma Fanfan, Zhang Han, et al. Comparative study of optimization method and optimal operation strategy for multiscenario integrated energy system // Energy. 2020. Vol. 217. P. 119311. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119311>.
 13. Li Peng, Wang Zixuan, Yang Weihong, Liu Haitao, Yin Yunxing, Wang Jiahao, et al. Hierarchically partitioned coordinated operation of distributed integrated energy system based on a master-slave game // Energy. 2021. Vol. 214. P. 119006. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119006>.
 14. Nikmehr N. Distributed robust operational optimization of networked microgrids embedded interconnected energy hubs // Energy. 2020. Vol. 199. P. 117440. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117440>.
 15. Liu Wen Hui, Ho Wai Shin, Lee Ming Yang, Hashim H., Lim Jeng Shiun, Klemenš J.J., et al. Development and optimization of an integrated energy network with centralized and decentralized energy systems using mathematical modelling approach // Energy. 2019. Vol. 183. P. 617–129. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.158>.
 16. Dou Xun, Wang Jun, Wang Zhen, Ding Tao, Wang Shizhen. A decentralized multi-energy resources aggregation strategy based on bi-level interactive transactions of virtual energy plant // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2021. Vol. 124. P. 106356. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106356>.
 17. Chi Lixun, Su Huai, Zio Enrico, Zhang Jinjun, Li Xueyi, Li Zhang, et al. Integrated deterministic and probabilistic safety analysis of integrated energy systems with bi-directional conversion // Energy. 2020. Vol. 212. P. 118685. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118685>.
 18. Beér J.M. High efficiency electric power generation: the environmental role // Progress in Energy and Combustion Science. 2007. Vol. 33. Iss. 2. P. 107–134. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2006.08.002>.
 19. Acosta C., Siu N. Dynamic event trees in accident sequence analysis: application to steam generator tube rupture // Reliability Engineering & System Safety. 1993. Vol. 41. Iss. 2. P. 135–154. [https://doi.org/10.1016/0951-8320\(93\)90027-V](https://doi.org/10.1016/0951-8320(93)90027-V).
 20. Dokic S.B., Rajakovic N.L. Security modelling of integrated gas and electrical power systems by analyzing critical situations and potentials for performance optimization // Energy. 2019. Vol. 184. P. 141–150. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.165>.
 21. Добрынина Ю.Э., Крупенёв Д.С. Анализ учёта критериев системной надёжности в моделях выбора состава включенного генерирующего оборудования в электроэнергетических системах // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 2. С. 273–289. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-273-289>. EDN: QFANFX.
 22. Козлов М.В., Малашенко Ю.Е., Назарова И.А., Новикова Н.М. Управление топливно-энергетической системой при крупномасштабных повреждениях. I. Сетевая модель и программная реализация // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2017. № 6. С. 50–73. <https://doi.org/10.7868/S0002338817060051>. EDN: ZVGFGV.
 23. Malashenko Yu.E., Nazarova I.A., Novikova N.M. Управление топливно-энергетической системой при крупномасштабных повреждениях II. Постановки задач оптимизации // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2018. № 2. С. 39–51. <https://doi.org/10.7868/S000233881802004X>. EDN: YWSLYO.
 24. Зоркальцев В.И. Методы прогнозирования и анализа эффективности функционирования системы топливоснабжения: монография. М.: Наука, 1988. 144 с.
 25. Селезнев А.В. Программный комплекс для решения задачи выбора состава включенного генерирующего оборудования в условиях конкурентного рынка электроэнергии в России // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2015 (г. Москва, 29 сентября – 1 октября 2015 г.). Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2015. Т. 1. С. 281–290. EDN: WECDVH.
 26. Антонов Г.Н., Черкесов Г.П., Криворучий А.Д. Методы и модели исследования живучести систем энергетики: монография. Новосибирск: Наука, 1990. 285 с.
 27. Алексеев А.В., Барахтенко Е.А., Войтов О.Н. Иерархическое моделирование систем энергетики / под ред. Н.И. Воропая, В.А. Стенникова. Новосибирск: Гео, 2020. 314 с. <https://doi.org/10.21782/B978-5-6043021-9-4>.
 28. Сендеров С.М., Рабчук В.И., Пяткова Н.И. Методический подход к созданию аппарата анализа надежности топливо- и энергоснабжения потребителей в условиях негативных воздействий на работу объектов ТЭК // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: материалы XIII заседания семинара (г. Волжский, 13–17 сентября 2021 г.). Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2021. Т. 1. Вып. 72. С. 52–61. EDN: JCKRBD.
 29. Qin Chun, Wang Linqing, Han Zhongyang, Zhao Jun, Liu Quanli. Weighted directed graph based matrix modeling of integrated energy systems // Energy. 2021. Vol. 214. P. 118886. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118886>.
 30. Yang Xiaohui, Chen Zaixing, Huang Xin, Li Ruixin, Xu Shaoping, Yang Chunsheng. Robust capacity optimization methods for integrated energy systems considering demand response and thermal comfort // Energy. 2021. Vol. 221. P. 119727. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119727>.
 31. Cheng Xin, Zheng Yun, Lin Yong, Chen Lei, Wang Yunqi, Qiu Jing. Hierarchical operation planning based on carbon-constrained locational marginal price for integrated energy system // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2021. Vol. 128. P. 106714. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106714>.

32. Zhou Kaile, Wei Shuyu, Yang Shanlin. Time-of-use pricing model based on power supply chain for user-side microgrid // *Applied Energy*. 2019. Vol. 248. Iss. 1. P. 35–43.
33. Wang Yongli, Ma Yuze, Song Fuhao, Ma Yang, Qi Chengyuan, Huang Feifei. Economic and efficient multi-objective operation optimization of integrated energy system considering electro-thermal demand response // *Energy*. 2020. Vol. 205. P. 118022. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118022>.
34. Liu Mingxi, Shi Yang, Fang Fang. Optimal power flow and PGU capacity of CCHP systems using a matrix modeling approach // *Applied Energy*. 2013. Vol. 102. P. 794–802. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.08.041>.
35. Aldarajee A.H.M., Hosseinian S.H., Vahidi B. A secure tri-level planner-disaster-risk-averse replanner model for enhancing the resilience of energy systems // *Energy*. 2020. Vol. 204. P. 117916. <https://doi.org/10.1016/j.enenergy.2020.117916>.
36. Cornell C., Dinh Nam Trong, Pourmousavi S.A. A probabilistic forecast methodology for volatile electricity prices in the Australian national electricity market // *International Journal of Forecasting*. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2023.12.003>.
37. Sawas A.M., Khani H., El-Taweel N.A., Farag H.E.Z. Comparative Time-of-Use and wholesale electricity price-based scheduling in embedded power and natural gas distribution grids penetrated with large renewable generation // *Electric Power Systems Research*. 2019. Vol. 177. Iss. 8. P. 105975. <https://doi.org/10.1016/J.EPSR.2019.105975>.
38. Zhang Zhihan, Yu Wenhao, Yu Mengxia, Guo Zhichun, Jiang Meng. A survey of multi-task learning in natural language processing: regarding task relatedness and training methods // *Proceedings of the 17th Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics*. 2023. Vol. 39. P. 943–956. <https://doi.org/10.18653/v1/2023.eacl-main.66>.
39. Nikmehr N., Najafi-Ravadanegh S., Khodaei A. Probabilistic optimal scheduling of networked microgrids considering time-based demand response programs under uncertainty // *Applied Energy*. 2017. Vol. 198. P. 267–279. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.04.071>.
40. Sun Yujun, Wang Yan, Wang Beibei, Li Yang, Xiao Yong, Li Qiushuo. Multi-time scale decision method for source-load interaction considering demand response uncertainty // *Automation of Electric Power Systems*. 2018. Vol. 42. Iss. 2. P. 106–113. <https://doi.org/10.7500/AEPS20170416004>.
41. Flottmann J. Australian energy policy decisions in the wake of the 2022 energy crisis // *Economic Analysis and Policy*. 2024. Vol. 81. P. 238–248. <https://doi.org/10.1016/j.eap.2023.11.025>.
42. Xiang Yue, Cai Hanhi, Gu Chenghong, Shen Xiaodong. Cost-benefit analysis of integrated energy system planning considering demand response // *Energy*. 2019. Vol. 192. Iss. 1. P. 116632. <https://doi.org/10.1016/j.enersgy.2019.116632>.
43. Christensen T.H., Friis F., Bettin S., Throndsen W., Ornetzeder M., Skjølsvold T.M., et al. The role of competences, engagement, and devices in configuring the impact of prices in energy demand response: findings from three smart energy pilots with households // *Energy Policy*. 2020. Vol. 137. Iss. 11. P. 111142. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111142>.
44. Shen Jianjian, Shen Cheng Chuntian, Zhang Xiufei, Zhou Binbin. Coordinated operations of multiplereservoir cascaded hydropower plants with cooperation benefit allocation // *Energy*. 2018. Vol. 153. P. 509–518. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.056>.
45. Hasan K.N., Saha T.K., Chattopadhyay D., Eghbal M. Benefit-based expansion cost allocation for large scale remote renewable power integration into the Australian grid // *Applied Energy*. 2014. Vol. 113. P. 836–847. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.031>.
46. Rai U., Oluleye G., Hawkes A. Stochastic optimisation model to determine the optimal contractual capacity of a distributed energy resource offered in a balancing services contract to maximise profit // *Energy Reports*. 2024. Vol. 11. P. 5800–5818. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.05.049>.
47. Xu Zhongwen, Peng Zixuan, Yang Ling, Chen Xudong, Chen Xudong. An improved Shapley value method for a green supply chain income distribution mechanism // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018. Vol. 15. 9. P. 1976. <https://doi.org/10.3390/ijerph15091976>.
48. Ragosa G., Watson J., Grubb M. The political economy of electricity system resource adequacy and renewable energy integration: a comparative study of Britain, Italy and California // *Energy Research & Social Science*. 2024. Vol. 107. P. 103335. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103335>.
49. Westgaard S., Fleten S.-E., Negash A., Botterud A., Bogaard K., Verling T.H. Performing price scenario analysis and stress testing using quantile regression: a case study of the Californian electricity market // *Energy*. 2021. Vol. 214. P. 118796. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118796>.
50. Hirth L., Mühlenpfordt J., Bulkeley M. The ENTSO-E Transparency Platform – a review of Europe’s most ambitious electricity data platform // *Applied Energy*. 2018. Vol. 225. P. 1054–1067. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.048>.
51. Augutis J., Krikstolaitis R., Martisauskas L., Pečiulytė S., Žutautaitė I. Integrated energy security assessment // *Energy*. 2017. Vol. 138. P. 890–901. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.113>.
52. Augutis J., Krikstolaitis R., Martisauskas L., Urbonienė S. Energy security level assessment technology // *Applied Energy*. 2012. Vol. 97. P. 143–149. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.11.032>.
53. Augutis J., Krikstolaitis R., Pečiulytė S., Žutautaitė I. Dynamic model based on Bayesian method for energy security assessment // *Energy Conversion and Management*. 2015. Vol. 101. P. 66–72. <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.05.002>.

54. Augutis J., Krikstolaitis R., Peciulyte S., Konstantinavičiūtė I. Sustainable development and energy security level after Ignalina NPP shutdown // Technological and Economic Development of Economy. 2011. Vol. 17. Iss. 1. P. 5–21. <http://doi.org/10.3846/13928619.2011.553930>.
55. Augutis J., Martisauskas L., Krikstolaitis R. Energy mix optimization from an energy security perspective // Energy Conversion and Management. 2015. Vol. 90. P. 300–314. <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.11.033>.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitry S. Krupenev,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Head of the Laboratory of Fuel
and Energy Supply Reliability,
Melentiev Energy Systems Institute of Siberian
Branch of Russian Academy of Sciences,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia;
Associate Professor of the Department of
Power Supply and Electrical Engineering,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
krupenev@isem.irk.ru
orcid.org/0000-0002-3093-4483

Viktoria M. Shchukina,

Postgraduate Student,
Assistant Professor of the Thermal
Power Engineering Department,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
✉ vitapiskunova98@gmail.com
orcid.org/0000-0003-4019-8472

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 12.02.2025; approved after reviewing 28.03.2025; accepted for publication 12.05.2025.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Крупенёв Дмитрий Сергеевич,

к.т.н., доцент,
заведующий лабораторией надежности
топливо- и энергоснабжения,
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева
СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия;
доцент кафедры «Электроснабжение и
электротехника»,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
krupenev@isem.irk.ru
orcid.org/0000-0002-3093-4483

Щукина Виктория Михайловна,

аспирант,
ассистент кафедры теплоэнергетики,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
✉ vitapiskunova98@gmail.com
orcid.org/0000-0003-4019-8472

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 12.02.2025 г.; одобрена после рецензирования 28.03.2025 г.; принята к публикации 12.05.2025 г.

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 621.314

EDN: BQPAMI

DOI: 10.21285/1814-3520-2025-2-252-269



Принципы построения трансформаторной подстанции на основе управляемого реакторно-тиристорного устройства

Б.Д. Табаров¹✉¹Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Комсомольск-на-Амуре, Россия

Резюме. Цель – поддержание напряжения в системах электроснабжения на номинальном уровне с высокой эффективностью при нестабильности напряжения в питающей сети или тока на нагрузке. Объектом исследований явилась трансформаторная подстанция с применением предлагаемого управляемого реакторно-тиристорного устройства. Для разработки имитационной модели анализируемой трансформаторной подстанции, проведения исследования и оценки непрерывного регулирования напряжения был использован программный комплекс Matlab. Для достижения поставленной цели в работе разработаны новые принципы построения трансформаторной подстанции, алгоритмы и способы ее управления на основе предлагаемого управляемого реакторно-тиристорного устройства. Показано, что предлагаемое устройство на высокой стороне трансформаторной подстанции необходимо подключать последовательно между сетевым высоковольтным выключателем и первичной обмоткой силового трансформатора. Полученные результаты численных экспериментов подтверждают целесообразность применения предлагаемого устройства и его алгоритмов работы и способы управления в составе трансформаторной подстанции, где существуют проблемы в системах электроснабжения, связанные с поддержанием напряжения на заданном уровне с высокой эффективностью. Приводятся внешние, регулировочные и стабилизационные характеристики, которые иллюстрируют работу существующих систем электроснабжения до и после модернизации при возникновении положительного отклонения напряжения и перенапряжения из-за внешних и внутренних изменений электрических параметров. Показано, что областью применения предлагаемого устройства являются трансформаторные подстанции систем электроснабжения напряжениями 35/(10-6) кВ и (10-6)/0,4 кВ, где в системах электроснабжения в основном возникает положительное отклонение и колебание напряжения, а также перенапряжения. Таким образом, наиболее целесообразной областью применения устройства являются системы электроснабжения, где возникает необходимость обеспечения многоступенчатого узкодиапазонного регулирования напряжения с высокой эффективностью.

Ключевые слова: питающая сеть, принцип построения трансформаторной подстанции, управляемое реакторно-тиристорное устройство, сетевой высоковольтный выключатель, активно-индуктивная нагрузка, система импульсно-фазового управления, имитационная модель

Для цитирования: Табаров Б.Д. Принципы построения трансформаторной подстанции на основе управляемого реакторно-тиристорного устройства // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 2. С. 252–269. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-2-252-269>. EDN: BQPAMI.

POWER ENGINEERING

Original article

Design principles of a transformer substation using a thyristor-controlled reactor

Bekhruz D. Tabarov¹✉¹Komsomolsk-na-Amure State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia

Abstract. The study aims to ensure the maintenance of nominal voltage levels in power supply systems with high efficiency under conditions of input voltage instability or load current fluctuations. The research focuses on a transformer substation that incorporates a proposed thyristor-controlled reactor. The MATLAB software was employed to develop a simulation model of the analysed transformer substation, to investigate its performance, and to evaluate continuous voltage regulation. Advanced design principles, control algorithms, and operational methods for the transformer substation were developed based on the proposed thyristor-controlled reactor. The study demonstrates that the device should be connected in series on the high-voltage side of the substation, between the circuit breaker and the primary winding of the power transformer. Numerical experiments confirm the feasibility of implementing the proposed device,

along with its control algorithms and operational methods, in transformer substations where power supply systems encounter difficulties in maintaining stable voltage levels with high efficiency. The external, regulating and stabilising characteristics illustrate the performance of existing power supply systems prior to and following modernisation, particularly under overdeviations and overvoltages resulting from external or internal electrical parameter variations. The proposed device can be used in transformer substations for power supply systems with voltages of 35/(10–6) kV and (10–6)/0.4 kV, characterised by overdeviations, fluctuations and overvoltages. Consequently, the optimal application domain for the device is power supply systems requiring multistage, narrow-range voltage regulation with high efficiency.

Keywords: power supply network, build-up principle of a transformer substation, controlled reactor-thyristor device, network high-voltage switch, active-inductive load, pulse-phase control system, simulation model

For citation: Tabarov B.D. Design principles of a transformer substation using a thyristor-controlled reactor. *iPolytech Journal*. 2025;29(2):252-269. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-2-252-269>. EDN: BQPAMI.

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение нормальной работы, сохранение срока службы и улучшение эффективности работы электрооборудования при возникновении положительного отклонения напряжения и перенапряжения являются одним из актуальных вопросов в системах электроснабжения² [1]. Как показывает опыт эксплуатации существующих систем электроснабжения, одной из причин возникновения положительного отклонения напряжения и перенапряжения в системах электроснабжения является повышение напряжения в питающей сети или снижение тока нагрузки на шинах распределительного устройства трансформаторных подстанций³ [2]. В настоящее время для возможности решения данных вопросов с целью увеличения объема выпускаемой продукции, снижения потерь электроэнергии и затрат на приобретение электрооборудования предлагают разные технические решения на основе неуправляемых⁴ [3–8] и управляемых^{5,6} [9–16] традиционных устройств.

Анализ исследования и опыт эксплуатации неуправляемых [3–8] и управляемых [9–16] традиционных устройств подтверждают, что известные устройства позволяют обеспечить нормальную работу и улучшить эффективность работы систем электроснабжения только при повышении напряжения в питающей сети до максимального значения или снижении нагрузки [4, 5, 10, 14] до минимального значения. А в остальных случаях они в целом не только ухудшают эффективность работы систем электроснабжения, но и усугубляют их

работу и сокращают срок службы электрооборудования³ [17, 18]. Учитывая последнее, по мере снижения напряжения в питающей сети или повышения тока нагрузки выводят их из работы, в результате чего в системах электроснабжения возникает необходимость применения дополнительного устройства для поддержания напряжения на заданном уровне. Для устранения вышеуказанных недостатков в работе предлагается рассматривать возможность замены известных традиционных устройств на новое управляемое реакторно-тиристорное устройство (УРТУ) [19]. Предложенное устройство при возникновении положительного отклонения и перенапряжения в системах электроснабжения не только обеспечивает нормальную работу потребителей электроэнергии (предприятия, организации, цеха и др.), но и сохраняет срок службы и повышает их эффективность.

Наиболее целесообразной и эффективной областью применения УРТУ являются трансформаторные подстанции систем электроснабжения, где существует проблемы по обеспечению нормальной работы, сохранению продолжительности работы технологических процессов и срока службы электрооборудования систем электроснабжения с высокой эффективностью.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью данной работы является поддержание напряжения в системах электроснабжения на номинальном уровне с высокой эффективностью при нестабильности напряжения в питающей сети или тока на нагрузке.

²Радкевич В.Н., Козловская В.Б., Колосова И.В. Электроснабжение промышленных предприятий: учеб. пособ. Минск: ИВЦ Минфина, 2015. 589 с.

³Волков Н.Г. Качество электроэнергии в системах электроснабжения: учеб. пособ. Томск: Томский политех. ун-т, 2010. 152 с.

⁴Ананicheva С.С., Алексеев А.А., Мызин А.Л. Качество электроэнергии. Регулирование напряжения и частоты в энергосистемах: учеб. пособ. 3-е изд., испр. Екатеринбург: УрФУ, 2012. 93 с.

Для достижения поставленной цели в работе ставились и решались следующие задачи:

1) аналитическое исследование информационных источников по проблеме обеспечения нормальной работы, сохранения срока службы электрооборудования и устранения нарушения технологических процессов при возникновении положительного отклонения напряжения и перенапряжения в системах электроснабжения;

2) разработка принципов построения трансформаторных подстанций (ТП) на основе нового УРТУ для улучшения эффективности работы систем электроснабжения;

3) разработка алгоритмов и способов управления трансформаторной подстанцией с предлагаемым устройством для стабилизации напряжения с высокой эффективностью при возникновении ступенчатого повышения напряжения в сети до +16% или снижения тока на нагрузке до -70% от номинального значения;

4) разработка имитационной модели существующей и модернизируемой трансформаторной подстанции для проведения исследования, а также оценки непрерывного и точного регулирования напряжения на высокой стороне трансформаторов при ступенчатом повышении напряжения в питающей сети или снижении тока на нагрузке в пределах вышеуказанных значений тока и напряжения;

5) моделирование системы электроснабжения с существующей и модернизируемой трансформаторной подстанцией для оценки непрерывного и точного регулирования напряжения на высокой стороне ТП при ступенчатом повышении напряжения в питающей сети или снижении тока на нагрузке в пределах вышеуказанных значений тока и напряжения;

6) построение внешних, регулировочных и стабилизационных характеристик системы электроснабжения до и после модернизации трансформаторной подстанции для оценки функциональных возможностей традиционных и предлагаемого УРТУ при ступенчатом

повышении напряжения в питающей сети или снижении тока на нагрузке в пределах вышеуказанных значений тока и напряжения.

РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ НА ОСНОВЕ НОВОГО УПРАВЛЯЕМОГО РЕАКТОРНО-ТИРИСТОРНОГО УСТРОЙСТВА

На рис. 1 в однолинейном исполнении приводится функциональная схема модернизируемой трансформаторной подстанции, которая состоит из питающей сети (G), линии электропередачи (W), разъединителя (QS), блока УРТУ, силового трансформатора (СТ), автоматического выключателя (QF) и блоков датчика отклонения напряжения (ДОН), авторегулирования (БАР) и активно-индуктивной нагрузки (Z). Блок управляемого реакторно-тиристорного устройства состоит из сетевого высоковольтного выключателя (Qc), модулей основных (VS1) и дополнительных (VS2) тиристорных ключей, трехфазного контактора (AC), основного (L1), промежуточного (L2) и дополнительного (L3) реакторов, блока системы импульсно-фазового управления (СИФУ) и блока синхронизации (БС).

Как видно из рис. 1, блок УРТУ подключен между разъединителем (QS) и первичной обмоткой СТ. Предлагаемое УРТУ последовательно подключено к питающей сети (G) через разъединитель (QS) и непосредственно к СТ. Элементы предлагаемого устройства присоединены к питающей сети (G) и СТ последовательно, а между собой они подключены последовательно-параллельно [19, 20]. Ниже приведено описание подключения элементов заявляемого устройства.

Между разъединителем QS и первичной обмоткой СТ последовательно подключены контактор AC, основной L1, промежуточный L2 и дополнительный L3 реакторы, а последовательно-параллельно к ним подключены модули основных VS1 и дополнительных VS2 тиристорных ключей, где модуль основных тиристорных ключей VS1 параллельно подключен к контактору AC, основному реактору L1

⁵Веников В.А., Идельчик В.И., Лисеев М.С. Регулирование напряжения в электроэнергетических системах: учебник. М.: Энергоатомиздат, 1985. 214 с.

⁶Климаш В.С. Регулировочные свойства и энергетические коэффициенты тиристорных выпрямителей и регуляторов переменного напряжения: учеб. пособ. Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, 1998. 88 с.

и модулю дополнительных тиристорных ключей VS2 и последовательно к промежуточному L2 и дополнительному L3 реакторам, а модуль дополнительных тиристорных ключей VS2 параллельно подключен к контактору AC, основному L1 и промежуточному L2 реакторам и последовательно к дополнительному реактору L3. Кроме этого, сетевой высоковольтный выключатель Qc параллельно подключен к контактору AC, основному L1, промежуточному L2 и дополнительному L3 реакторам, а также к модулям основных VS1 и дополнительных VS2 тиристорных ключей. Алгоритмы работы УРТУ определяются изменением величины тока и напряжения, а также характера нагрузки, то есть УРТУ функционирует на основе выходных сигналов блока ДОН.

Стоит также подчеркнуть, что сигналы для изменений проводящих состояний элементов предлагаемого устройства поступают на управляющие входы модулей тиристорных ключей и катушки включения и отключения сетевого высоковольтного выключателя с блока СИФУ, который через блок синхронизации БС синхронизирован к питающей сети G, а на входе блока СИФУ сигналы подаются из блока ДОН через блок авторегулирования БАР.

Предлагаемое УРТУ приступает к работе и вводит силовой трансформатор СТ в работу после замыкания разъединителя QS. Включение и выключение СТ на холостом ходу или под нагрузкой выполняются специальными алгоритмами и способами в зависимости от уровня напряжения питающей сети G или тока активно-индуктивной нагрузки Z_H [21]. Таким образом, УРТУ на высокой стороне трансформаторной подстанции в зависимости от величины (уровня) напряжения питающей сети G или тока активно-индуктивной нагрузки Z_H работает по алгоритму, который иллюстрируется нижеприведенными описаниями [21].

Так, УРТУ регулирует напряжения на высокой стороне СТ при трех уровнях напряжения питающей сети или тока нагрузки: номинальный, промежуточный и максимальный.

Номинальный уровень регулирования напряжения на высокой стороне СТ задается коэффициентом трансформации СТ при включенном сетевом высоковольтном выключателе Qc и полностью выключенных как основных VS1, так и дополнительных VS2 тиристорных ключах, а также при выключенном трехфазном контакторе AC, который отключает основной L1, промежуточный L2

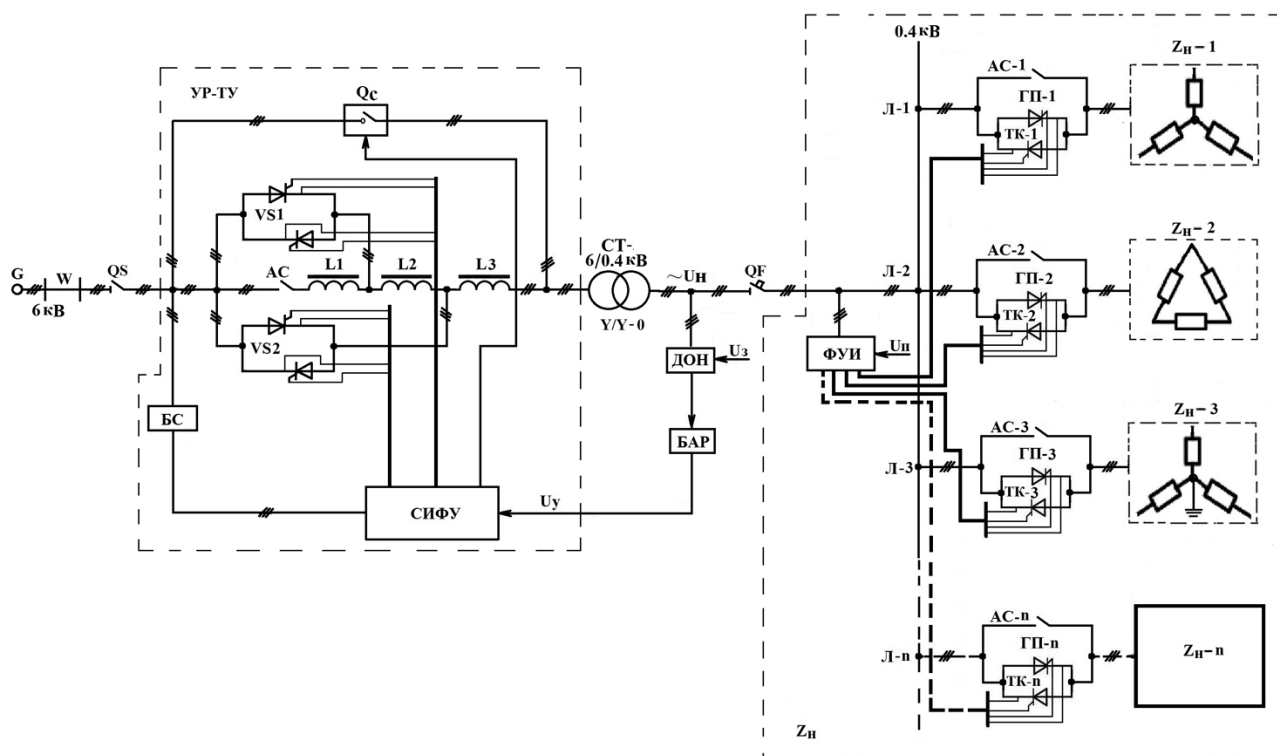


Рис. 1. Функциональная схема модернизируемой системы электроснабжения
Fig. 1. Functional diagram of the upgraded power supply system

и дополнительный L3 реакторы при номинальном уровне напряжения сети G ($U_H = 6$ кВ) и тока нагрузки Z_H ($I_H = 2500$ А). Падение напряжения в УРТУ на этом уровне регулирования напряжения равно нулю.

Промежуточный уровень регулирования напряжения на высокой стороне СТ задается сопротивлением промежуточного L2 и дополнительного L3 реакторов при совместной работе основных VS1 и дополнительных VS2 тиристорных ключей при промежуточном уровне напряжения сети G или тока нагрузки Z_H . Трехфазный контактор AC, основной реактор L1 и сетевой высоковольтный выключатель Q_c на этом уровне напряжения сети G или тока нагрузки Z_H шунтированы основными VS1 и дополнительными VS2 тиристорными ключами. Под промежуточным уровнем регулирования напряжения понимается повышение напряжения в питающей сети G на +7,5% или снижение тока на нагрузке Z_H на -31,7% от номинального значения. Падение напряжения в УРТУ при стабилизации напряжения в системах электроснабжения на этом уровне регулирования напряжения можно определить по формуле (1):

$$\Delta U_{\text{пром.}} = \sum \Delta U_{L2,3} = \frac{2}{5} \Delta U_{L2} + \Delta U_{L3}, \text{ В} \quad (1)$$

где ΔU_{L2} – падение напряжения в промежуточном реакторе, В; ΔU_{L3} – падение напряжения в дополнительном реакторе, В.

Как видно из выражения (1), дополнительный реактор L3 на этом уровне регулирования напряжения полностью находится в работе, а промежуточный реактор L2 шунтирован дополнительными тиристорными ключами VS2 на $\frac{2}{5} \Delta U_{L2}$, что позволяет поддерживать номинальное значение напряжения в системах электроснабжения (СЭС) на заданном уровне.

Максимальный уровень регулирования напряжения на высокой стороне СТ задается суммарным сопротивлением основного L1, промежуточного L2 и дополнительного L3 реакторов при включенном трехфазном контакторе AC и выключенном сетевом высоковольтном выключателе Q_c , а также полностью закрытых как основных VS1, так и дополнительных VS2 тиристорных ключах при максимальном уровне напряжения сети G и номинальном токе нагрузки Z_H или снижением тока нагрузки Z_H до максималь-

ного значения. Под максимальным уровнем регулирования напряжения понимается повышение напряжения в питающей сети G на +16% и номинальной нагрузки Z_H или снижение тока на нагрузке Z_H на -71,2% от номинального значения. Падение напряжения в УРТУ при максимальном уровне регулирования напряжения можно определить по выражению (2):

$$\Delta U_{\text{макс.}} = \sum \Delta U_{L1,2,3} = \Delta U_{L1} + \Delta U_{L2} + \Delta U_{L3}, \text{ В} \quad (2)$$

где $\sum \Delta U_{L1,2,3}$ – сумма падения напряжения в основном ΔU_{L1} , промежуточном ΔU_{L2} и дополнительном ΔU_{L3} реакторах, соответственно, В.

Ввиду этого УРТУ также позволяет регулировать напряжения на высокой стороне СТ между номинальным и максимальным уровнями регулирования напряжения относительно промежуточного уровня, который можно разделить на минимально-промежуточный и максимально-промежуточный уровни регулирования напряжения.

Минимально-промежуточный уровень регулирования напряжения на высокой стороне силового трансформатора СТ задается сопротивлением промежуточного L2 и дополнительного L3 реакторов при совместной работе основных VS1 и дополнительных VS2 тиристорных ключей при минимально-промежуточном уровне напряжения сети G или тока нагрузки Z_H . Трехфазный контактор AC, основной реактор L1 и сетевой высоковольтный выключатель Q_c на этом уровне напряжения питающей сети G или тока нагрузки Z_H шунтированы основными VS1 и дополнительными VS2 тиристорными ключами. Под минимально-промежуточным уровнем регулирования напряжения понимается повышение напряжения питающей сети G в пределах 0–7,5% или снижение тока нагрузки Z_H в пределах 0–31,7% от номинального уровня (значения). Здесь падение напряжения в УРТУ можно определить по формулам (5) и (6). Стоит подчеркнуть, что на этом уровне регулирования напряжения индуктивное сопротивление промежуточного реактора L2 регулируется дополнительными тиристорными ключами VS2 (см. рис. 5 б) от нуля до $\frac{2}{5} \Delta U_{L2}$, что позволяет поддерживать номинальное значение напряжения в СЭС на заданном уровне.

Максимально-промежуточный уровень регулирования напряжения на высокой стороне силового трансформатора СТ задается сопротивлением основного L1, промежуточного L2 и дополнительного L3 реакторов основными VS1 и дополнительными VS2 тиристорными ключами при включенном трехфазном контакторе АС при максимально-промежуточном уровне напряжения сети G или тока нагрузки Z_H , а сетевой высоковольтный выключатель Q_c на этом уровне регулирования напряжения выключен. Под максимально-промежуточным уровнем регулирования напряжения понимается повышение напряжения в питающей сети G в пределах 7,5–16% или снижение тока на нагрузке Z_H в пределах от 31,7 до 71,2% относительно номинального уровня. Выражениями (7) и (8) можно определить падение напряжения в УРТУ при максимально-промежуточном уровне регулирования напряжения. На этом уровне регулирования напряжения индуктивное сопротивление основного реактора L1 регулируется основными тиристорными ключами VS1 в пределах от нуля до $\frac{2}{5}\Delta U_{L1}$, а индуктивное сопротивление промежуточного реактора L2 регулируется дополнительными тиристорными ключами VS2 в пределах 0,4...0,8 ΔU_{L2} , которые позволяют поддерживать номинальное значение напряжения в СЭС на заданном уровне.

Кроме этого, предлагаемое УРТУ предусматривает также разделение минимально-промежуточного и максимально-промежуточного уровней регулирования напряжения на два диапазона: нижний и верхний.

Под нижним диапазоном минимально-промежуточного уровня регулирования напряжения понимается повышение напряжения в питающей сети G от номинального значения до +2,5% или снижение тока на нагрузке Z_H от номинального значения до 11,4%. А под верхним диапазоном регулирования напряжения понимается повышение напряжения в питающей сети G в пределах от +2,5 до +7,5% (промежуточного уровня напряжения сети) или снижение тока на нагрузке Z_H в пределах от -11,4 до -31,7% (промежуточного уровня тока нагрузки) относительно номинального уровня.

Стабилизация напряжения в системах электроснабжения при нижнем диапазоне минимально-промежуточного уровня регули-

рования напряжения достигается при помощи дополнительного реактора L3 и дополнительных тиристорных ключей VS2 при полностью выключенных трехфазном контакторе АС, сетевом высоковольтном выключателе Q_c , основном L1 и промежуточном L2 реакторах, а также полностью закрытых основных тиристорных ключей VS1, а поддержание напряжения в системах электроснабжения на номинальном уровне при верхнем диапазоне минимально-промежуточного уровня регулирования напряжения осуществляется при помощи промежуточного L2 и дополнительного L3 реакторов, основных VS1 и дополнительных VS2 тиристорных ключей при выключенных трехфазном контакторе АС, и сетевом высоковольтном выключателе Q_c .

Падение напряжения в предложенном устройстве при нижнем (3) и верхнем (4) диапазонах минимально-промежуточного уровня регулирования напряжения можно определить на основании выражений (1) и (2).

Формулой (3) можно определить падение напряжения при нижнем диапазоне минимально-промежуточного уровня регулирования напряжения:

$$\Delta U_{\text{ниж.д.мин-пр.}} = \Delta U_{L3}, \text{ В.} \quad (3)$$

Падение напряжения при верхнем диапазоне минимально-промежуточного уровня регулирования напряжения можно описать формулой (4):

$$\Delta U_{\text{верх.д.мин-пр.}} = (0 \dots \frac{2}{5})\Delta U_{L2} + \Delta U_{L3}, \text{ В.} \quad (4)$$

Как отмечалось выше, индуктивное сопротивление промежуточного реактора L2 в этом диапазоне регулирования напряжения регулируется дополнительными тиристорными ключами VS2 (см. рис. 5 б) от $(0 \dots 0,4)\Delta U_{L2}$.

Предлагаемое устройство при нижнем и верхнем диапазонах максимально-промежуточного уровня регулирования напряжения поддерживает напряжения в системах электроснабжения на заданном уровне по ниже представленным алгоритмам.

Под нижним диапазоном максимально-промежуточного уровня регулирования напряжения понимается повышение напряжения в питающей сети G от +7,5 до +12,5% или снижение тока на нагрузке Z_H от -31,7 до -51,6%. А под верхним диапазоном регулиро-

вания напряжения понимается повышение напряжения в питающей сети G в пределах от 12,5 до +16% (максимального уровня напряжения сети) или снижение тока на нагрузке Z_n в пределах от -51,6 до -71,2% (снижение тока нагрузки до максимального значения) относительно номинального уровня.

Обеспечение номинального напряжения в системах электроснабжения при нижнем диапазоне максимально-промежуточного уровня регулирования напряжения выполняется за счет расшунтирования промежуточного $L2$ и дополнительного $L3$ реакторов основными $VS1$ и дополнительными $VS2$ тиристорными ключами при выключенных трехфазном контакторе AC и сетевом высоковольтном выключателе Q_c . А стабилизация напряжения в системах электроснабжения на заданном уровне при верхнем диапазоне максимально-промежуточного уровня регулирования напряжения достигается при помощи трехфазного контактора AC и основных тиристорных ключей $VS1$, а также основного $L1$, промежуточного $L2$ и дополнительного $L3$ реакторов при полностью закрытых дополнительных тиристорных ключей $VS2$ и выключенном сетевом высоковольтном выключателе Q_c .

Падение напряжения в предложенном устройстве при нижнем (5) и верхнем (6) диапазонах максимально-промежуточного уровня регулирования напряжения можно определить на основании выражений (1)–(4) следующим образом:

– нижний диапазон максимально-промежуточного уровня регулирования напряжения

$$\Delta U_{\text{ниж.д. макс-пр.}} = (0,4 \dots 0,8) \Delta U_{L2} + \Delta U_{L3}, \text{ В. (5)}$$

Из выражения (5) видно, что индуктивное сопротивление промежуточного реактора $L2$ в этом диапазоне регулирования напряжения регулируется дополнительными тиристорными ключами $VS2$ (см. рис. 5 б) в пределах $(0,4 \dots 0,8) \Delta U_{L2}$.

– верхний диапазон максимально-промежуточного уровня регулирования напряжения

$$\Delta U_{\text{верх.д. макс-пр.}} = \frac{1}{2} \Delta U_{L1} + \Delta U_{L2} + \Delta U_{L3}, \text{ В. (6)}$$

В этом диапазоне регулирования напряжения индуктивное сопротивление основно-

го реактора $L1$ регулируется основными тиристорными ключами $VS1$ от нуля до $\frac{1}{2} \Delta U_{L1}$, которое позволяет поддерживать номинальное значение напряжения в СЭС на заданном уровне.

Учитывая выражения (1)–(6) ниже приведены математические описания, которые иллюстрируют создание падения напряжения в подстанции при пяти уровнях напряжения питающей сети или тока нагрузки и двух разделенных диапазонах между этими уровнями.

– падение напряжения в подстанции при номинальном уровне напряжения

$$\Delta U_{\text{ном.п}} = \Delta U_{\text{ЛЭП}} + \Delta U_{\text{СТ}}, \text{ В} \quad (7)$$

где $\Delta U_{\text{ЛЭП}}$ – потери напряжения в линии электропередачи (ЛЭП), В; $\Delta U_{\text{СТ}}$ – потерь напряжения в трансформаторе, В.

$$\text{Отсюда } \Delta U_{\text{ЛЭП}} = \frac{(P \cdot r_0 + Q \cdot x_0) \cdot L}{U_{\text{ном}}}, \text{ В} \quad (8)$$

$$\Delta U_{\text{СТ}} = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U_{\text{ном}}}, \text{ В} \quad (9)$$

где P и Q – активная и реактивная мощности линии электропередачи и трансформатора соответственно, кВт·А и кВар; r_0 и x_0 – удельное активное и реактивное сопротивление линии электропередачи, Ом/км; L – длина линии электропередачи, км; $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжения линии электропередачи и трансформатора соответственно, кВ; R и X – активное и реактивное сопротивление трансформатора, Ом.

Активное и реактивное сопротивление трансформатора определяют по выражению (10) и (11) соответственно:

$$R = \left(\frac{U_{\text{н.СТ}}}{S_n} \right)^2 \cdot \Delta P_{\text{КЗ}}, \text{ Ом} \quad (10)$$

$$X = \frac{U_{\text{н.СТ}}^2}{S_n} \cdot \frac{U_{\text{КЗ}}}{100}, \text{ Ом} \quad (11)$$

где $\Delta P_{\text{КЗ}}$ – активная мощность КЗ трансформатора, кВт; $U_{\text{КЗ}}$ – напряжение КЗ трансформатора, %; S_n – полная номинальная мощность трансформатора, кВт·А;

– падение напряжения в подстанции при промежуточном уровне регулирования напряжения

$$\Delta U_{\text{пром.п}} = \Delta U_{\text{ЛЭП}} + \Delta U_{\text{пром.}} + \Delta U_{\text{СТ}}, \text{ В} \quad (12)$$

– падение напряжения в подстанции при максимальном уровне регулирования напряжения

$$\Delta U_{\text{макс.п}} = \Delta U_{\text{ЛЭП}} + \Delta U_{\text{макс.}} + \Delta U_{\text{СТ}}, \text{ В.} \quad (13)$$

Определяем математическое описание падения напряжения в подстанции при нижних (14, 16) и верхних (15, 17) диапазонах минимально-промежуточного и максимально-промежуточного уровней регулирования напряжения:

– падение напряжения в подстанции при нижнем диапазоне минимально-промежуточного уровня регулирования напряжения

$$\Delta U_{\text{ниж.д.мин-пр.п}} = \Delta U_{\text{ЛЭП}} + \Delta U_{\text{ниж.д.мин-пр.}} + \Delta U_{\text{СТ}}, \text{ В} \quad (14)$$

– падение напряжения в подстанции при верхнем диапазоне минимально-промежуточного уровня регулирования напряжения

$$\Delta U_{\text{верх.д.мин-пр.п}} = \Delta U_{\text{ЛЭП}} + \Delta U_{\text{верх.д.мин-пр.}} + \Delta U_{\text{СТ}}, \text{ В} \quad (15)$$

– падение напряжения в подстанции при нижнем диапазоне максимально-промежуточного уровня регулирования напряжения

$$\Delta U_{\text{ниж.д.макс-пр.п}} = \Delta U_{\text{ЛЭП}} + \Delta U_{\text{ниж.д.макс-пр.}} + \Delta U_{\text{СТ}}, \text{ В} \quad (16)$$

– падение напряжения в подстанции при верхнем диапазоне максимально-промежуточного уровня регулирования напряжения

$$\Delta U_{\text{верх.д.макс-пр.п}} = \Delta U_{\text{ЛЭП}} + \Delta U_{\text{верх.д.макс-пр.}} + \Delta U_{\text{СТ}}, \text{ В.} \quad (17)$$

Стоит особо подчеркнуть, что формулы (1)–(17) задействованы при регулировании напряжения в СЭС по заданному значению действующего напряжения объекта по низкой стороне силового трансформатора, где его значение равно $U_3 = 220 \text{ В}$.

Регулирование напряжения с помощью УРТУ выполняется непрерывно во всех уровнях и диапазонах регулирования с хорошими энергетическими показателями.

При стабилизации напряжения между уровнями и диапазонами регулирования напряжения введена зона нечувствительности на изменение проводящего состояния как основных VS1, так и дополнительных VS2 тиристорных ключей, при которой отклонение напряжения в системах электроснабжения не превышает 1 вольт (В) как вверх, так и вниз от степени регулирования напряжения того или иного уровня и диапазона.

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ МОДЕРНИЗИРУЕМОЙ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ

Для проведения исследования и оценки непрерывного и точного регулирования напряжения на высокой стороне трансформаторной подстанции при ступенчатом повышении напряжения в питающей сети и снижении тока на нагрузке в среде Matlab⁷ была разработана имитационная модель модернизируемой трансформаторной подстанции, которая представлена на рис. 2. Она состоит из блока питающей сети (ПС), ЛЭП, блоков разъединителя (QS), контактора AC и сетевого высоковольтного выключателя (Q1), модулей основных (VS1) и дополнительных (VS2) тиристорных ключей, блоков системы импульсно-фазового управления (СИФУ-1 и СИФУ-2), основного (L1), промежуточного (L2) и дополнительного (L3) реакторов, СТ, активно-индуктивных нагрузок ($Z_{н-1} - Z_{н-8}$), блоков ДОН, авторегулирования БАР, выключателя нагрузки ($Q_{н-1}$), гибридных пускателей (ГП-1 – ГП-8) активно-индуктивных нагрузок и формирователя управляющих импульсов (ФУИ) тиристорных пускателей блоков ГП-1 – ГП-8.

Стоит подчеркнуть, что функционирование предлагаемого УРТУ зависит от величин входящего и выходящего напряжения блока ДОН, где с правой стороны блока в качестве задающего сигнала выступает действующее значение напряжения (U_3), которое равно 220 В. При изменении электрических пара-

⁷Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2023685892, Российская Федерация. Программный комплекс имитационной модели двухтрансформаторной подстанции с одним общим двухподдиапазонным реакторно-тиристорным управляемым регулятором напряжения / Б.Д. Табаров; правообладатель ФГБОУ ВО «КНАГУ». Дата поступления 22.11.2023; дата гос. регистрации в реестре 30.11.2023. Бюл. № 12.

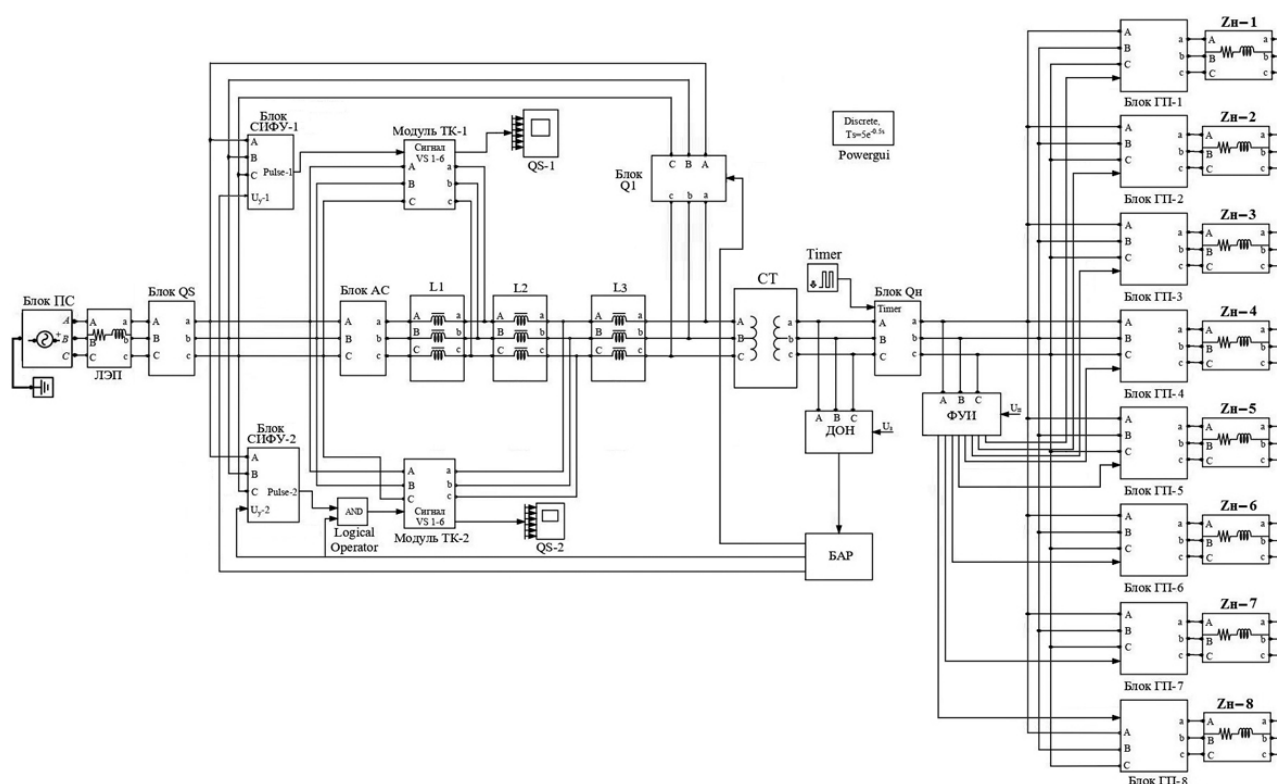


Рис. 2. Блочно-модульная модель модернизируемой трансформаторной подстанции
Fig. 2. Block-modular model of an upgraded transformer substation

метров (напряжение питающей сети и ток нагрузки) с блока ДОН поступают сигналы на вход блока БАР, в результате чего блок БАР (учитывая величины отклонения и колебания напряжения) подает сигналы на соответствующие блоки СИФУ-1 и СИФУ-2 модулей основных и дополнительных тиристорных ключей. Блоки СИФУ-1 и СИФУ-2 формируют импульсы и подают их на соответствующие управляющие входы модулей тиристорных ключей для изменения проводящего состояния тиристорных ключей. Блок ФУИ в целом предназначен для облегчения включения и выключения нагрузки с высокими энергетическими показателями.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ МОДЕРНИЗИРУЕМОЙ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ ПРИ НЕСТАБИЛЬНОСТИ НАПЯЖЕНИЯ И ТОКА

Исследование поддержания напряжения в системах электроснабжения на заданном уровне при возникновении положительного отклонения напряжения и перенапряжения проводилось на модели модернизируемой трансформаторной подстанции мощностью 1000 кВ·А и напряжением 6/0,4 кВ при угле

сдвига фаз тока активно-индуктивной нагрузки равно $\varphi = 45^\circ$. Полученные результаты исследования приводятся на осциллограммах рис. 3 и 4 для фазы «А». На осциллограммах рис. 3 приводятся мгновенные значения токов и напряжений питающей сети (i_c и u_c) и нагрузки (i_n и u_n), а также мгновенное значение напряжения первичной обмотки силового трансформатора (u_{CT}) и действующие значения напряжения на нагрузке (U_n). А на рис. 4 приводятся действующие значения токов и напряжений питающей сети (I_c и U_c) и нагрузки (I_n и U_n), а также напряжения первичной обмотки силового трансформатора (U_{CT}) при ступенчатом повышении напряжения в питающей сети до +16% или снижении тока на нагрузке до -71,2% от номинального уровня. Работу силового трансформатора и потребителей электроэнергии при номинальном напряжении питающей сети и токе нагрузки на нижеприведенных рис. 3 и 4 иллюстрирует интервал времени T-1, а интервалами времени T-2, T-3, T-4, T-5, T-6, T-7, T-8 иллюстрируются ступенчатые повышения напряжения в питающей сети или снижения тока на нагрузке.

Ниже рассматриваем полученные результаты исследования стабилизации напря-

жения в системах электроснабжения на заданном уровне при помощи предлагаемого УРТУ при ступенчатом повышении напряжения в питающей сети или снижении тока на нагрузке.

Осциллограммы, представленные на рис. 3, иллюстрируют работу модернизируемой трансформаторной подстанции при номинальном напряжении питающей сети и нагрузке (рис. 3 а, интервал времени Т-1) и при ступенчатом повышении напряжения в питающей сети до +16% и номинальной нагрузке (рис. 3 а), а также при номинальном напряжении питающей сети и ступенчатом снижении тока на нагрузке до -71,2% (рис. 3 б).

Стоит подчеркнуть, что напряжение в питающей сети на каждом интервале времени (Т-2, Т-3, Т-4, Т-5, Т-6, Т-7) повышается на +2,5% (рис. 3 а), а нагрузка на этих интервалах времени снижается примерно на -10,1% (рис. 3 б) от номинального значения. Как отмечалось выше, силовой трансформатор СТ на интервале времени Т-1 работает, соответственно, с номинальными параметрами и обеспечивает потребителями электроэнергии номинальное напряжение с высокими энергетическими показателями (номинальный уровень регулирования). На этом интервале времени напряжение прикладывается на входе СТ через сетевой высоковольтный выключатель Q_c и задается коэффициентом трансформации силового трансформатора СТ при полностью выключенных как основных VS1, так и дополнительных VS2 тиристорных ключах, а также контактора АС, основного L1, промежуточного L2 и дополнительного L3 реакторов.

Падение напряжения в СЭС на этом уровне напряжения питающей сети и тока нагрузки определяется по формуле (7). В конце интервала времени Т-1 и начале интервала времени Т-2 в системах электроснабжения возникает внезапное повышение напряжения в питающей сети на +2,5% (рис. 3 а) или снижение тока на нагрузке на -11,4% (рис. 3 б) от номинального значения (нижний диапазон минимально-промежуточного уровня регулирования).

На этом интервале времени (Т-2) из блока СИФУ-2 подаются сигналы на включение модуля дополнительных тиристорных ключей VS2 для включения в работе дополнительно реактора L3 и одновременно с этим пода-

ется команда на катушку отключения сетевого высоковольтного выключателя Q_c для его выключения, в результате чего модуль дополнительных тиристорных ключей VS2 в начале интервала времени Т-2 при угле $\alpha = 15^\circ$ полностью включается, и вводится в работу дополнительный реактор L3, параллельно с этим отключается сетевой высоковольтный выключатель Q_c , и, таким образом, напряжение в системах электроснабжения стабилизируется на заданном уровне.

Модуль дополнительных тиристорных ключей VS2 на этом интервале времени полностью шунтирует модуль основных тиристорных ключей VS1, контактора АС, основного L1 и промежуточного L2 реакторов. Падение напряжения в подстанции в этом диапазоне регулирования напряжения определяется по выражению (14). Интервал времени Т-3 иллюстрирует работу модернизируемой трансформаторной подстанции при внезапном повышении напряжения в питающей сети на +5% (рис. 3 а) или снижении тока на нагрузке на 21,5% (рис. 3 б) от номинального значения (верхний диапазон минимально-промежуточного уровня регулирования).

Здесь для поддержания напряжения в системах электроснабжения на номинальном значении из блока СИФУ-1 подаются сигналы на включение модуля основных тиристорных ключей VS1 для включения в работу промежуточного реактора L2 и параллельно с этим из блока СИФУ-2 подаются сигналы на управляемый вход модуля дополнительных тиристорных ключей VS2 для частичного его шунтирования (увеличения его угла управления), в результате чего модулем основных тиристорных ключей VS1 вводится в работу промежуточный реактор L2 при угле управления $\alpha = 15^\circ$, и одновременно с этим увеличивается угол проводящего состояния модуля дополнительных тиристорных ключей VS2 до $\alpha = 75^\circ$ для рис. 3 а и до $\alpha = 59^\circ$ для рис. 3 б.

На этом интервале времени (Т-3), благодаря созданию падения напряжения на индуктивных сопротивлениях промежуточного L2 и дополнительного L3 реакторов соответствующими тиристорными ключами, напряжение в системах электроснабжения не меняется и остается стабильным. Сетевой высоковольтный выключатель Q_c , контактор АС и основной реактор L1 на этом

уровне напряжения питающей сети и тока нагрузки выключены. В данном интервале времени падение напряжения в СЭС можно определить по формуле (15). В конце интервала времени T-3 и начале интервала времени T-4 внезапно напряжение на входе СТ повышается на +7,5% (рис. 3 а) или ток на нагрузке снижается на -31,7% (рис. 3 б) от номинального значения и создает необходимость сохранения напряжения на выходе СТ на заданном уровне (промежуточный уровень регулирования). Поддержание напряжения в системах электроснабжения на номинальном уровне на этом интервале времени достигается за счет расшунтирования модуля основных тиристорных ключей VS1, который осуществляется модулем дополнительных тиристорных ключей VS2 при увеличении его проводящего состояния до $\alpha = 88^\circ$ для рис. 3 а и до $\alpha = 67^\circ$ для рис. 3 б, в результате чего напряжение в системах электроснабжения остается по-прежнему неизменным.

На этом интервале времени сетевой высоковольтный выключатель Q_c, контактор AC и основной реактор L1 находятся в отключенном состоянии. По выражению (12) можно определить падение напряжения в подстанции в этом диапазоне регулирования напряжения. Интервал времени T-5 иллюстрирует работу модернизируемой трансформаторной подстанции при внезапном повышении напряжения в питающей сети на +10% (рис. 3 а) или снижении тока на нагрузке на -41,7% (рис. 3 б) от номинального уровня (нижний диапазон максимально-промежуточного уровня регулирования). Здесь сохранение выходного напряжения СТ на номинальном значении достигается при помощи модулей основных VS1 и дополнительных VS2 тиристорных ключей, а также промежуточного L2 и дополнительного L3 реакторов при выключенных сетевом высоковольтном выключателе Q_c, контакторе AC и основном реакторе L1. Модуль дополнительных тиристорных ключей VS2 на этом интервале времени расшунтирует модуль основных тиристорных ключей VS1 при угле управления $\alpha = 99^\circ$ для рис. 3 а и $\alpha = 77^\circ$ для рис. 3 б.

Формулой (16) можно определить падение напряжения в СЭС при нестабильности напряжения в питающей сети и тока на на-

грузке, которой иллюстрируется интервалом времени T-5. В конце интервала времени T-5 и начале интервала времени T-6 внезапно напряжение на входе СТ повышается на +12,5% (рис. 3 а) или ток на нагрузке снижается на -51,6% (рис. 3 б) от заданного значения, который создает необходимость поддержать напряжение в системах электроснабжения на номинальном значении (верхний диапазон максимально-промежуточного уровня регулирования).

Поддержание номинального напряжения в системах электроснабжения на заданном уровне на этом интервале времени выполняется при помощи модулей основных VS1 и дополнительных VS2 тиристорных ключей, а также промежуточного L2 и дополнительного L3 реакторов при выключенных сетевом высоковольтном выключателе Q_c, контакторе AC и основном реакторе L1.

Дополнительные тиристорные ключи VS2 на этом уровне напряжения питающей сети и тока нагрузки расшунтируют основные тиристорные ключи VS1 при угле управления $\alpha = 117^\circ$ для рис. 3 а и $\alpha = 89^\circ$ для рис. 3 б и поддерживают номинальное напряжение в системах электроснабжения с высокими энергетическими показателями. На этом интервале времени (T-6) падение напряжения в СЭС можно определить по формуле (17). Интервал времени T-7 иллюстрирует работу модернизируемой трансформаторной подстанции при повышении напряжения в питающей сети на +15% (рис. 3 а) или снижении тока на нагрузке на -61,5% (рис. 3 б) от номинального значения (верхний диапазон максимально-промежуточного уровня регулирования).

На этом интервале времени поддержание напряжения на шинах распределительного устройства СТ на заданном значении осуществляется при помощи модуля основных тиристорных ключей VS1, основного L1, промежуточного L2 и дополнительного L3 реакторов при включенном контакторе AC и полностью выключенных сетевом высоковольтном выключателе Q_c и модуле дополнительных тиристорных ключей VS2.

Здесь в конце интервала времени T-6 и начале интервала времени T-7 из блока СИФУ-2 подаются импульсы на управляющие входы модуля дополнительных тиристорных ключей VS2 для полного его выключе-

ния, параллельно с этим подается команда на включение контактора АС. Дополнительные тиристорные ключи VS2 на данном интервале времени выключаются при угле $\alpha = 145^\circ$ для рис. 3 а и $\alpha = 135^\circ$ для рис. 3 б. Угол проводящего состояния модуля основных тиристорных ключей VS1 при этом уровне составляет $\alpha = 85^\circ$ для рис. 3 а и $\alpha = 75^\circ$ для рис. 3 б. Модуль основных тиристорных ключей VS1 на этом интервале времени, частично шунтируя контактор АС и основной реактор L1, поддерживает номинальное напряжение в системах электроснабжения на заданном значении. Падение напряжения в подстанции на этом интервале времени (Т-7) определяется выражением (17).

В конце интервала времени Т-7 и начале интервала времени Т-8 внезапно напряжение на входе СТ повышается на +16% (рис. 3 а) или ток на нагрузке снижается на -71,2% (рис. 3 б) от номинального значения и создает необходимость поддерживать напряжение в системах электроснабжения на заданном уровне (максимальный уровень регулирования напряжения). Обеспечение номинального напряжения в системах электроснабжения на этом интервале времени достигается при помощи контактора АС, основного L1, промежуточного L2 и дополнительного L3 реакторов при полностью закрытых как основных VS1, так и дополнительных VS2 тиристорных ключей. Основные тиристорные ключи VS1 в начале интервала времени Т-8 полностью расшунтируют контактор АС и основной реактор L1 при угле $\alpha = 120^\circ$ для рис. 3 а и $\alpha = 130^\circ$ для рис. 3 б. Выражением (13) можно рассчитать падение напряжения в СЭС при максимальном уровне регулирования напряжения.

Таким образом, несмотря на нестабильность напряжения в питающей сети или тока на нагрузке, предлагаемое УРТУ поддерживает напряжение в системах электроснабжения на номинальном значении с высокими энергетическими показателями.

Для более широкой интерпретации полученных результатов исследования, которые представлены на рис. 3, и описание, приведенное к ним на рис. 4, приводятся действующие значения токов и напряжений питающей сети (I_c и U_c) и нагрузки (I_n и U_n), а также действующее значение напряжения (U_c) первичной обмотки СТ при ступенчатом

повышении напряжения питающей сети или снижении тока нагрузки.

Как иллюстрируют эти осциллограммы, напряжение в питающей сети повышается (рис. 4 а, кривая U_{nc}), а ток на нагрузке снижается (рис. 4 б, кривая I_n), в результате чего предлагаемое УРТУ, благодаря созданию просадки напряжения на реакторах, не позволяет повышаться напряжению не только у потребителей, но и в силовом трансформаторе (рис. 4 а, кривая U_{ct} и U_n). А при снижении тока нагрузки также благодаря расширению функциональных возможностей предлагаемого УРТУ не создается положительное отклонение напряжения и перенапряжение не только на нагрузке (рис. 4 б, кривая U_n), но и в силовом трансформаторе и питающей сети (рис. 4 б, кривая U_{ct} и U_{nc}) и поддерживается напряжение у потребителей на номинальном уровне с высокими энергетическими показателями.

Полученные результаты исследования, приведенные на рис. 4, подтверждают комплексное улучшение работы электротехнических систем при возникновении положительного отклонения напряжения и перенапряжения.

Анализ полученных результатов исследования позволяет сделать вывод, что применение предлагаемого УРТУ на высокой стороне трансформаторной подстанции может не только облегчить и обеспечить нормальную работу, но и повысить эффективность работы систем электроснабжения.

Работоспособность предлагаемого УРТУ при ступенчатом повышении напряжения питающей сети и снижении тока нагрузки иллюстрируют внешние, стабилизационные и регулировочные характеристики, которые представлены на рис. 5, где с левой стороны приводятся характеристики, которые построены с учетом повышения напряжения в питающей сети, а с правой стороны – с учетом снижения тока на нагрузке.

Стабилизационные и регулировочные характеристики построены при работе модуля дополнительных тиристорных ключей VS2. Регулировочные характеристики построены для систем электроснабжения с известным (кривая 1) и предлагаемым (кривая 2) устройствами. Важно отметить, что внешние характеристики (рис. 5 а) построены при фиксированных углах управления тиристорных ключей и ступенчатом повышении напряже-

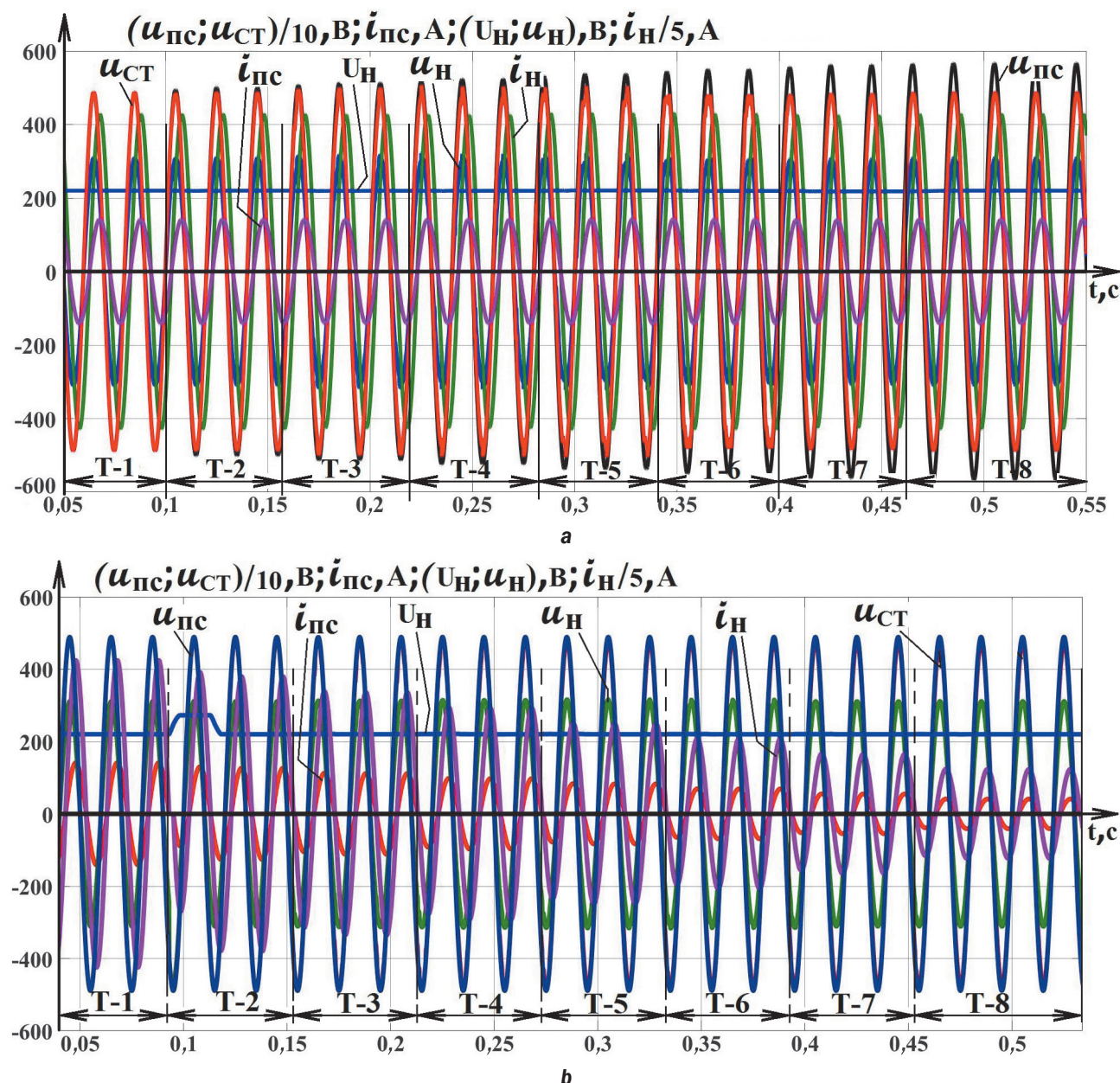


Рис. 3. Осциллограммы токов и напряжений при ступенчатом повышении напряжения питающей сети или снижении тока нагрузки

Fig. 3. Waveforms of currents and voltages during a stepwise increase in the supply network voltage or a decrease in the load current

ния в питающей сети или снижении тока на нагрузке, а регулировочные характеристики рассчитаны при изменении углов управления дополнительных тиристорных ключей VS2 таким образом, чтобы при ступенчатом повышении напряжения в питающей сети или снижении тока на нагрузке напряжение в системах электроснабжения оставалось постоянным (рис. 5 б). Характеристики стабилизации напряжения на нагрузке (рис. 5 с) построены с учетом регулировочных характеристик.

Как видно из стабилизационной характеристики (см. рис. 5 с, кривая 2), предлагаемое УРТУ обладает преимуществами по сравнению с традиционными регуляторами напряжения (см. рис. 5 с, кривая 1), в частности по регулирующим и стабилизационным свойствам. Дополнительные тиристорные ключи при ступенчатом повышении напряжения питающей сети стабилизируют напряжение в системах электроснабжения на номинальном значении при изменении углов управления в диапазонах от $\alpha = 15^\circ$ до

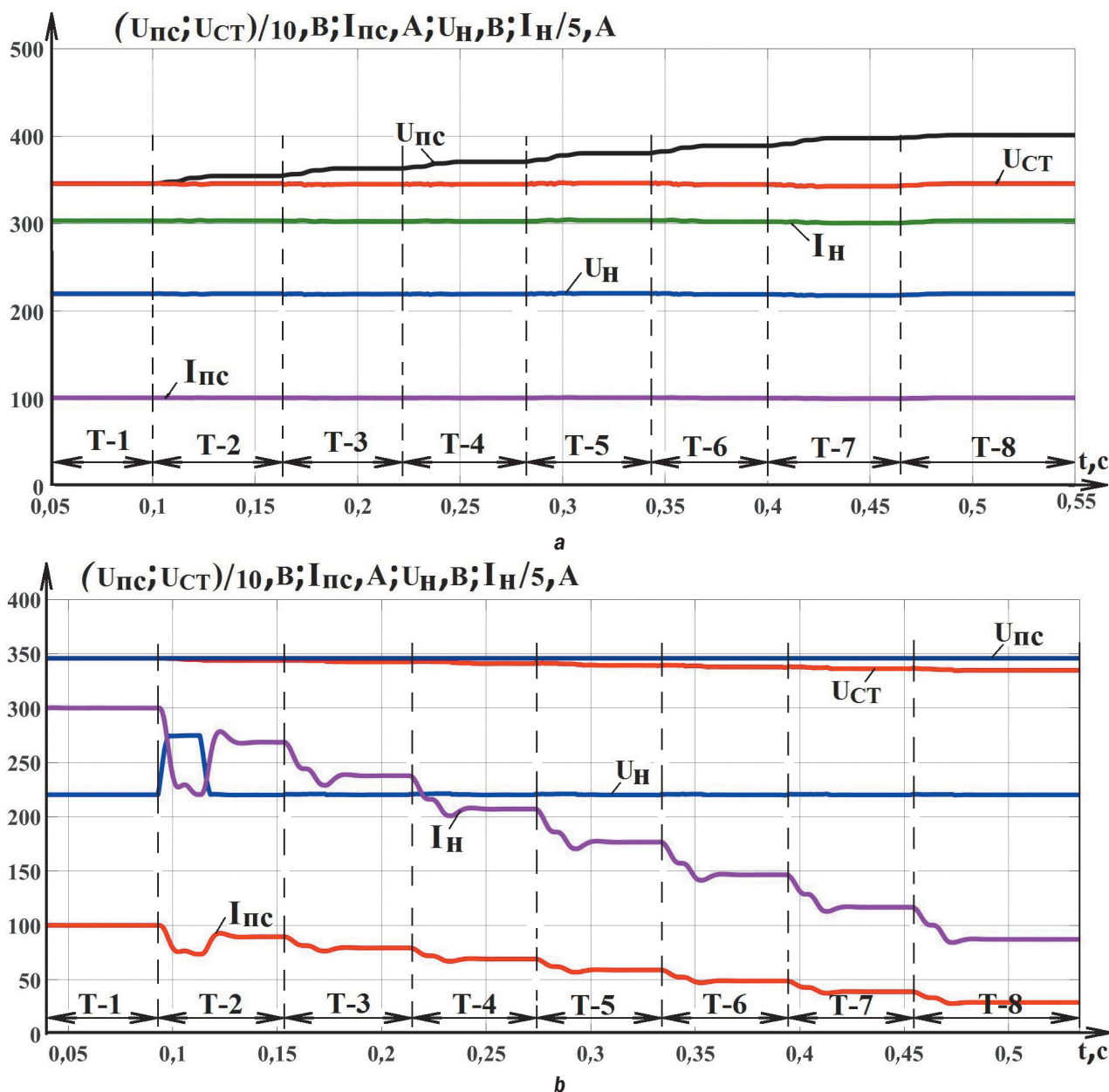


Рис. 4. Осциллограммы действующих значений токов и напряжений при ступенчатом повышении напряжения питающей сети или снижении тока нагрузки

Fig. 4. Waveforms of effective values of currents and voltages during a stepwise increase in the supply network voltage or a decrease in the load current

$\alpha = 145^\circ$ (см. рис. 5 б, с левой стороны), а при снижении тока нагрузки будут поддерживать номинальное напряжение в системах электроснабжения в диапазонах от $\alpha = 15^\circ$ до $\alpha = 135^\circ$ (см. рис. 5 б, с правой стороны). Стоит особо отметить, что изменение углов управления тиристорных ключей предлагаемого УРТУ зависит от повышения величины напряжения питающей сети или снижения величины тока нагрузки, а также от характера и угла сдвига активно-индуктивной нагрузки.

Необходимо отметить, что для большего расширения функциональных возможностей, предлагаемого УРТУ с целью сохранения высоких значений эффективности электроустановки, необходимо учитывать увеличение величины напряжения питающей сети или снижение величины тока нагрузки исследуемого объекта. Учитывая последнее, можно для каждого объекта индивидуально разработать предлагаемое УРТУ с определенным индуктивным сопротивлением реакторов и оптимальным способом управления.

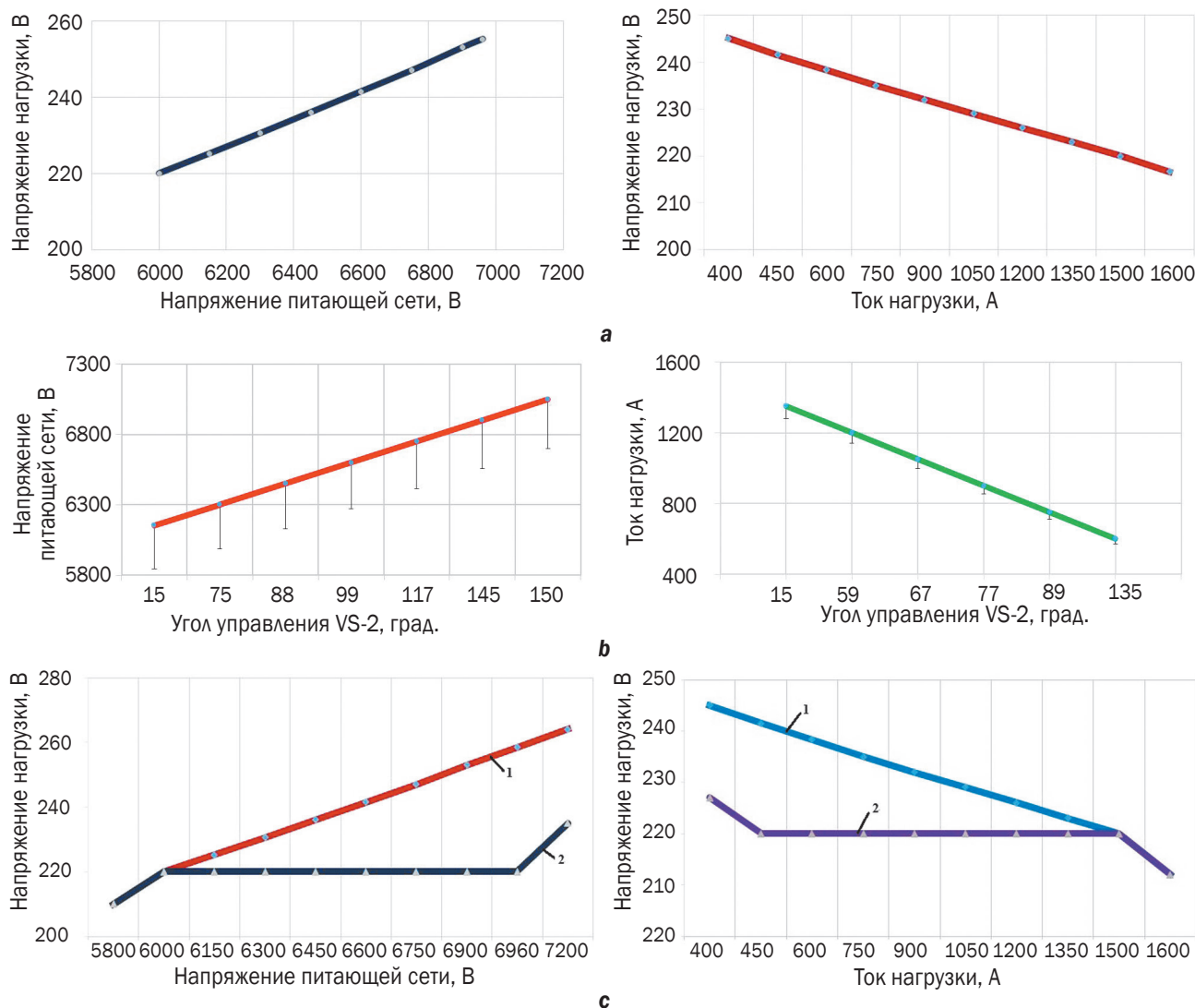


Рис. 5. Характеристики существующей и модернизируемой трансформаторной подстанции при ступенчатом повышении напряжения питающей сети или снижении тока нагрузки

Fig. 5. Characteristics of an existing and upgraded transformer substation with a stepwise increase in supply network voltage or a decrease in load current

Важно отметить, что предлагаемое устройство также имеет возможности поддерживать напряжение в системах электроснабжения на номинальном уровне в случае одновременного возникновения положительного отклонения (колебания) напряжения в питающей сети и отрицательного отклонения (колебания) тока на нагрузке с высокими энергетическими показателями.

Стоит также отметить, что по результатам анализа данной работы в дальнейшем будут проводиться исследования энергетических показателей систем электроснабжения с применением предлагаемого УРТУ, результаты которых позволят более глубоко оценить эффективность использования предложенного технического решения на высокой сто-

роне трансформаторной подстанции в качестве пускорегулирующего устройства.

Областью применения предлагаемого устройства являются трансформаторные подстанции систем электроснабжения мощностью до 63000 кВ·А, с напряжениями 35/(10-6) кВ и мощностью до 1600 кВ·А, с напряжениями (10-6)/0,4 кВ, где необходимо обеспечить регулирование напряжения на высокой стороне силового трансформатора в узком диапазоне от номинального уровня до +16%.

Наиболее целесообразной областью применения предлагаемого устройства являются системы электроснабжения, требующие многоступенчатого узкоподдиапазонного регулирования напряжения с высокой эффективностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенные исследования и анализ известных научных работ и опыта эксплуатации существующих электротехнических систем по обеспечению нормальной работы и сохранению срока службы электрооборудования систем электроснабжения при возникновении положительного отклонения напряжения и перенапряжения показали, что возникновение положительного отклонения напряжения и перенапряжения в лучшем случае приводит к предотвращению технологических процессов, в результате которых снижается объем выпускаемой продукции. Кроме этого, также ухудшается эффективность работы систем электроснабжения.

2. Предложено новое техническое решение на основе управляемого реакторно-тиристорного устройства на высокой стороне трансформаторной подстанции для поддержания напряжения в СЭС на заданном уровне при нестабильности напряжения в питающей сети или тока на нагрузке.

3. Предложены новые алгоритмы и способы непрерывного и точного регулирования напряжения на высокой стороне трансформаторной подстанции с управляемым реакторно-тиристорным устройством, позволяющие обеспечить нормальную работу систем электроснабжения.

4. Результаты исследования стабилизации напряжения в СЭС с предлагаемым устройством установлено, что применение предлагаемого технического решения на высокой стороне трансформаторной подстанции, несмотря на ступенчатые повышения напряжения в питающей сети и снижения тока на нагрузке, позволяет поддерживать напряжения исследуемого объекта на номинальном уровне с высокой эффективностью.

5. Интегральными характеристиками показано, что управляемое реакторно-тиристорное устройство (по сравнению с традиционными устройствами) обладает высокой эксплуатационной характеристикой и простотой конструкции при регулировании напряжения в широких пределах, диапазонах и поддиапазонах.

Список источников

1. Фетисов Л.В., Роженцова Н.В., Булатов О.А. Повышение качества электрической энергии в сетях низкого напряжения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. № 11-12. С. 99–106. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-99-106>. EDN: YXRTWH.
2. Lumberras D., Gálvez E., Collado A., Zaragoza J. Trends in power quality, harmonic mitigation and standards for light and heavy industries: a review // Energies. 2020. Vol. 13. Iss. 21. P. 5792. <https://doi.org/10.3390/en13215792>.
3. Дурсалиев М.Д., Бахышев И.М., Валькевич Н.И., Валькевич А.Н. Опыт эксплуатации шунтирующих реакторов 500 кВ в Кыргызской Республике // Энергетик. 2009. № 10. С. 18–20.
4. Al-Saedi W., Lachowicz S.W., Habibi D., Bass O. Power quality enhancement in autonomous microgrid operation using particle swarm optimization // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2012. Vol. 42. Iss. 1. P. 139–149. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.04.007>.
5. Montoya F.G., Banos R., Gil C., Espin A., Alcayde A., Gomez J. Minimization of voltage deviation and power losses in power networks using Pareto optimization methods // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2010. Vol. 23. Iss. 5. P. 695–703. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2010.01.011>.
6. Наумов А.А. Обеспечение требуемого качества электрической энергии // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 1. С. 85–92. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-1-85-92>. EDN: MTRTJG.
7. Popescu M., Bitoleanu A., Linca M. Improving power quality by a four-wire shunt active power filter: a case study // Energies. 2021. Vol. 14. Iss. 7. P. 1051. <https://doi.org/10.3390/en14071951>.
8. Исмоилов С.Т. Распределенное регулирование режима напряжения электрической сети // Политехнический Вестник. Серия: Техника и общество. 2014. Т. 25. № 1. С. 59–63.
9. Смирнов С.С., Осак А.Б. Управляемый подмагничиванием трансформатор как эффективное средство регулирования напряжения в сети // Вестник ИргТУ. 2016. № 6. С. 146–155. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-6-146-155>.
10. Fishov A.G., Klavsuts D.A., Klavsuts I.L. Multi-agent regulation of voltage in Smart Grid system with the use of distributed generation and customers // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 698. P. 761–767. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.698.761>.
11. Vinogradov A., Vinogradova A., Golikov I., Bolshev V. Adaptive automatic voltage regulation in rural 0.38 kV electrical networks // International Journal of Emerging Electric Power Systems. 2019. Vol. 20. Iss. 3. P. 2018–0269. <https://doi.org/10.1515/ijeeps2018-0269>.
12. Chernyshov M., Dovgun V., Temerbaev S., Shakurova Z. Hybrid power quality conditioner for three-phase four-wire power systems // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 178. P. 01009. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017801009>.

13. Klavsuts D.A., Klavsuts I.L., Levinzon S.V. New method for regulating voltage an AC current // 46th International Universities' Power Engineering Conference (Soest, 5–8 September 2011). Soest: VDE, 2011. P. 3–5.
14. Xiao Hongxia, Zhu Chunfeng, Liu Fahui. Research of power quality management technology according to distribution network involving electric arc furnace // 4th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics. 2012. <https://doi.org/10.1109/IHMSC.2012.8>.
15. Макашева С.И. Качество электрической энергии: мониторинг, прогноз, управление: монография. Хабаровск: ДВГУПС, 2020. 114 с.
16. Patent no. 7816894, United States of America, B2. Method and apparatus for regulating voltage / L.Z. Feigin, S.V. Levinson, D.A. Klavsuts. Publ. 19.10.2010.
17. Ma Jian, Jun Zhang, Xiao Luxin, Chen Kexu, Wu Jianhua. Classification of power quality disturbances via deep learning // IETE. Technical Review. 2017. Vol. 34. Iss. 4. P. 408–415. <https://doi.org/10.1080/02564602.2016.1196620>.
18. Климаш В.С., Константинов А.М. Устройство для повышения качества напряжения и энергетических показателей трансформаторных подстанций // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. Вып. 9. С. 570–581. EDN: LTKRSG.
19. Пат. № 2829330, Российская Федерация, С1, H02M, 5/25. Реакторно-тиристорное пускорегулирующее устройство на высокой стороне трансформаторной подстанции / патентообладатель Б.Д. Табаров. Заявл. 24.05.2024; опубл. 30.10.2024.
20. Табаров Б.Д., Соловьев В.А., Сериков А.В. Исследование возможности стабилизации напряжения питания промышленных потребителей при изменениях параметров нагрузки // Известия вузов. Электромеханика. 2024. Т. 67. № 1. С. 115–123. <https://doi.org/10.17213/0136-3360-2024-1-115-123>.
21. Пат. № 2834452, Российская Федерация, С1. Способ управления реакторно-тиристорным пускорегулирующим устройством силового трансформатора / патентообладатель Б.Д. Табаров. Заявл. 19.07.2024; опубл. 11.02.2025.

References

1. Fetisov L.V., Rozhencova N.V., Bulatov O.A. Improving the quality of electric power in low voltage networks. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2018;20(11-12):99-106. (In Russ.). <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-99-106>. EDN: YXRTWH.
2. Lumbreras D., Gálvez E., Collado A., Zaragoza J. Trends in power quality, harmonic mitigation and standards for light and heavy industries: a review. *Energies*. 2020;13(21):5792. <https://doi.org/10.3390/en13215792>.
3. Durusaliev M.D., Bakhyshev I.M., Valkevich N.I., Valkevich A.N. Operating experience of 500 kV shunt reactors in the Kyrgyz Republic. *Power and electrical engineering*. 2009;10:18-20. (In Russ.).
4. Al-Saedi W., Lachowicz S.W., Habibi D., Bass O. Power quality enhancement in autonomous microgrid operation using particle swarm optimization. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2012;42(1):139-149. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.04.007>.
5. Montoya F.G., Banos R., Gil C., Espin A., Alcayde A., Gomez J. Minimization of voltage deviation and power losses in power networks using Pareto optimization methods. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2010;23(5):695-703. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2010.01.011>.
6. Naumov A.A. The required quality of electrical energy provision. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(1):85-92. (In Russ.). <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-1-85-92>. EDN: MTRTJG.
7. Popescu M., Bitoleanu A., Linca M. Improving power quality by a four-wire shunt active power filter: a case study. *Energies*. 2021;14(7):1051. <https://doi.org/10.3390/en14071951>.
8. Ismailov S.T. Distributed regulation of voltage regime in electrical network. *Polytechnical Bulletin. Technique and Society*. 2014;25(1):59-63. (In Russ.).
9. Smirnov S. S., Osak A.B. Controlled magnetic biased transformer as an effective tool of supply voltage regulation. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2016;6:146-155. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-6-146-155>.
10. Fishov A.G., Klavsuts D.A., Klavsuts I.L. Multi-agent regulation of voltage in Smart Grid system with the use of distributed generation and customers. *Applied Mechanics and Materials*. 2014;698:761-767. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.698.761>.
11. Vinogradov A., Vinogradova A., Golikov I., Bolshev V. Adaptive automatic voltage regulation in rural 0.38 kV electrical networks. *International Journal of Emerging Electric Power Systems*. 2019;20(3):2018-0269. <https://doi.org/10.1515/ijeeps2018-0269>.
12. Chernyshov M., Dovgun V., Temerbaev S., Shakurova Z. Hybrid power quality conditioner for three-phase four-wire power systems. In: *E3S Web of Conferences*. 2020;178:01009. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017801009>.
13. Klavsuts D.A., Klavsuts I.L., Levinzon S.V. New method for regulating voltage an AC current. In: *46th International Universities' Power Engineering Conference*. 5–8 September 2011, Soest. Soest: VDE; 2011, p. 3-5.
14. Xiao Hongxia, Zhu Chunfeng, Liu Fahui. Research of power quality management technology according to distribution network involving electric arc furnace. In: *4th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics*. 2012. <https://doi.org/10.1109/IHMSC.2012.8>.

15. Makasheva S.I. *Electric energy quality: monitoring, forecast, control*. Khabarovsk: Far Eastern State Transport University; 2020, 114 p. (In Russ.).
16. Feigin L.Z., Levinson S.V., Klavsuts D.A. *Method and apparatus for regulating voltage*. Patent US, no. 7816894; 2010.
17. Ma Jian, Jun Zhang, Xiao Luxin, Chen Kexu, Wu Jianhua. Classification of power quality disturbances via deep learning. *IETE. Technical Review*. 2017;34(4):408-415. <https://doi.org/10.1080/02564602.2016.1196620>.
18. Klimash V.S., Konstantinov A.M. Device for increasing voltage quality and energy indicators of transformer substations. *Proceedings of the Tula State University*. 2019;9:570-581. (In Russ.). EDN: LTKRSG.
19. Tabarov B.D. *Reactor-thyristor start-up control device on the high side of a transformer substation*. Patent RF, no. 2829330; 2024. (In Russ.).
20. Tabarov B.D., Solovyev V.A., Serikov A.V. Studying the possibility of stabilizing power supply voltage of industrial consumers under changed load parameters. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika*. 2024;67(1):115-123. (In Russ.). <https://doi.org/10.17213/0136-3360-2024-1-115-123>.
21. Tabarov B.D. *A method to control a reactor-thyristor start-up control device of a power transformer*. Patent RF, no. 2834452; 2025. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Табаров Бехруз Довудходжаевич,

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Bekhruz D. Tabarov,

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

Заявленный вклад автора

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

Author's contribution

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

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests

The author declares no conflict of interests.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 06.02.2025 г.; одобрена после рецензирования 31.03.2025 г.; принята к публикации 06.05.2025 г.

Information about the article

The article was submitted 06.02.2025; approved after reviewing 31.03.2025; accepted for publication 06.05.2025.

МЕТАЛЛУРГИЯ

Обзорная статья

УДК 665.777.4

EDN: HSTOXT

DOI: 10.21285/1814-3520-2025-2-270-283



Современные способы обессеривания высокосернистых нефтяных коксов для применения в углеграфитовых материалах

В.Ю. Бажин¹, Б.Э. Матыльский²✉^{1,2}Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Резюме. Цель – провести обзор современных технологий обессеривания высокосернистых нефтяных коксов с оценкой их эффективности, экономической целесообразности и влияния на свойства углеродных материалов, используемых при производстве холоднонабивных масс, анодов алюминиевых электролизеров и графитированных электродов. На основе анализа литературных источников рассмотрены методы как обработки сырья коксования, так и готового кокса: гидрообессеривание, окислительная и щелочная обработка, термическое прокаливание, биологическое выщелачивание, а также гибридные технологии. Изучены характеристики сырья и параметры процессов (температура, давление, размер частиц, катализаторы), а также их влияние на степень удаления серы и связанные с этим структурные изменения углеродной матрицы. Установлено, что гидрообессеривание сырья коксования снижает содержание серы до 0,2–1,5%, но требует высоких затрат, обладает низким выходом по коксу и теряет эффективность при наличии металлов в золе. Щелочная обработка удаляет до 90% серы, однако повышает зольность и пористость. Термическое прокаливание до 1500 °С обеспечивает удаление 85% серы, но приводит к деградации углеродной структуры. Биологические методы демонстрируют эффективность до 92%, но требуют длительного времени. Наибольшую перспективу по обессериванию демонстрируют гибридные технологии, например, вакуумная термообработка со щелочной активацией, обеспечивающие максимальную эффективность удаления серы (до 98,5%) с сохранением механической прочности. Таким образом, показано, что выбор метода снижения содержания серы зависит от исходного состава кокса и требований к конечному продукту. Так, обессеривание сырья коксования экономически оправдано для малосернистых нефтей, тогда как обработка готового кокса подходит для высокосернистых материалов, но ухудшает их плотность и прочность. Перспективны гибридные методы, сочетающие эффективность очистки с минимальным воздействием на структуру кокса. В результате литературного обзора выявлено, что для масштабирования эффективных технологий необходимы разработка дешевых катализаторов, снижение энергозатрат и утилизация сернистых газов.

Ключевые слова: нефтяной кокс, обессеривание, углеграфитовые материалы, аноды алюминиевых электролизеров, высокосернистый кокс, гибридные методы очистки, вакуумное прокаливание

Для цитирования: Бажин В.Ю., Матыльский Б.Э. Современные способы обессеривания высокосернистых нефтяных коксов для применения в углеграфитовых материалах // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 2. С. 270–283. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-2-270-283>. EDN: HSTOXT.

METALLURGY

Review article

Modern methods for the desulphurisation of high sulphur content petroleum coke for use in carbon graphite materials

Vladimir Yu. Bazhin¹, Bronislav E. Matysky²✉^{1,2}Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

Abstract. Objective – a review of modern desulfurization technologies for high-sulphur petroleum coke. This study will further assess their effectiveness, economic feasibility and impact on the properties of carbon materials used in the production of cold-pressed masses, aluminium electrolyser anodes and graphitized electrodes. Based on the analysis of literature sources, methods for the treatment of both coking feedstock and finished coke are considered: hydrodesulphurisation, oxidative and alkaline treatment, thermal calcination, biological leaching and hybrid technologies. Feedstock characteristics and process parameters (temperature, pressure, particle size, catalysts) were studied as well as their effect on the degree of sulphur removal and the associated structural changes in the carbon matrix. Hydrodesulphurisation of coking feedstock reduces sulphur content to 0.2–1.5%, but is costly, has

low coke yield and loses effectiveness in the presence of metals in the ash. Alkaline treatment removes up to 90% of the sulphur, but increases ash content and porosity. Thermal calcination up to 1500 °C removes 85% of the sulphur but leads to degradation of the carbon structure. Biological processes can be up to 92% efficient, but are time consuming. Hybrid technologies, such as vacuum heat treatment with alkaline activation, show the greatest potential for desulphurisation, achieving maximum sulphur removal efficiencies (up to 98.5%) while maintaining mechanical strength. This shows that the choice of desulphurisation method depends on the initial composition of the coke and the requirements of the final product. For example, desulphurisation of coking feedstock is economically justified for low-sulphur oils, whereas treatment of finished coke is suitable for high-sulphur materials, but reduces their density and strength. Hybrid processes that combine cleaning efficiency with minimal impact on coke structure are promising. The literature review showed that the development of low-cost catalysts, reduction of energy consumption and utilisation of sulphur containing gases are necessary for the scale-up of effective technologies.

Keywords: petroleum coke, desulfurisation, carbon graphite materials, anodes of aluminium reduction cells, high-sulfur coke, hybrid purification methods, vacuum calcination

For citation: Bazhin V.Yu., Matylsky B.E. Modern methods for the desulphurisation of high sulphur content petroleum coke for use in carbon graphite materials. *iPolytech Journal*. 2025;29(2):270-283. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-2-270-283>. EDN: HSTOXT.

ВВЕДЕНИЕ

Обширные запасы минеральных ресурсов России формируют мощную сырьевую базу, которая служит основой для развития ключевых отраслей промышленности – от энергетики и металлургии до химического производства. Это, в свою очередь, обеспечивает устойчивый выпуск конкурентоспособной продукции, такой как сталь, алюминий, удобрения и нефтехимические продукты, укрепляя позиции страны на глобальных рынках и способствуя росту экспортного потенциала [1, 2].

Актуальность исследования свойств высокосернистого нефтяного кокса обусловлена глобальным увеличением доли тяжелой нефти в переработке, что приводит к росту содержания серы в побочных продуктах, включая нефтяной кокс. Высокосернистый кокс ($S > 3,0$ масс. %) сталкивается с ограничениями в промышленном применении (производство холоднонабивных масс, анодов для алюминиевых электролизеров и графитированных электродов) из-за экологических и технологических проблем. При его использовании в качестве топлива сера трансформируется в токсичные оксиды (SO_x), загрязняющие атмосферу и негативно влияющие на здоровье людей. В металлургии при производстве алюминия высокое содержание серы как в твердом наполнителе анодной массы – нефтяном коксе, так и в связующем – каменноугольном пеке – увеличивает коррозию стального оборудования, снижает качество анодов, повышает энергопотребление и приводит к существенным потерям материала [3, 4].

Рост производства высокосернистого кокса на фоне дефицита малосернистых

сортов создает дисбаланс на рынке. Традиционные методы гидроочистки остаточного сырья, разработанные в 70–80-х годах, оказались экономически нецелесообразными из-за высоких капитальных затрат и технологической сложности процессов. Современные технологии обессеривания недостаточно эффективны: даже при прокаливании до 1300 °C удаляется менее 20% серы, так как основная ее часть (до 90%) представлена термостабильными органическими формами (тиофен, бензотиофен), прочно связанными с углеродной матрицей [5, 6]. Неорганическая сера (сульфаты, пиритная сера) удаляется легче, но ее доля незначительна. Параметры сырья, такие как размер частиц, пористость, распределение функциональных групп серы, также влияют на эффективность обессеривания, однако единой закономерности взаимосвязи между составом сырья и свойствами кокса не установлено [7, 8].

Для последующего использования нефтяного кокса в качестве наполнителя электродных масс в материалах металлургической промышленности представляет научно-технический интерес решение следующих задач:

- 1) выявление форм серы в коксе (органическая, неорганическая) и анализ их поведения при термической и химической обработках;

- 2) изучение влияния параметров прокаливания (температура, скорость нагрева, размер частиц) на обессеривание, включая риски деградации углеродной матрицы;

- 3) анализ предлагаемых методов обессеривания нефтяных коксов с оценкой их эффективности;

4) оценка экономической целесообразности и экологической безопасности предлагаемых методов, включая альтернативы гидроочистки.

Решение этих задач позволит повысить эффективность использования высокосернистого кокса в производстве углеродных материалов, снизить зависимость от дефицитных малосернистых сортов и минимизировать негативное воздействие на окружающую среду.

ОСОБЕННОСТИ ПРОКАЛКИ НЕФТЯНОГО КОКСА: ОСНОВЫ И СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ

Прокаливание нефтяного кокса представляет собой высокотемпературную обработку (1150–1350 °С), направленную на удаление влаги, летучих веществ и структурную модификацию углеродной матрицы, что критически важно для получения материала с повышенной электропроводностью, механической прочностью и термической стабильностью [9, 10]. Эффективность процесса зависит от исходного качества сырья, включая содержание серы, примесей в золе (ванадий, никель) и гранулометрический состав, а также технологических параметров – температуры, скорости нагрева, конструкции печи и среды прокаливания [11–13]. Например, мелкие частицы кокса (<100 мкм) обеспечивают равномерный прогрев, но склонны к уносу, тогда как крупные фракции создают риски неравномерного обессеривания, особенно в высокосернистых коксах (с содержанием S>3%), где органическая сера (тиофен, бензотиофен) термически стабильна и удаляется лишь частично даже при 1300 °С [14].

Несмотря на то что повышение температуры до 1300 °С улучшает упорядоченность кристаллической решетки, провоцирует интенсивный ускоренный «выброс» выделения серы, приводящий к образованию микропор и снижению кажущейся плотности, что особенно проблематично при использовании кокса в составе анодной массы для анодов для алюминиевых электролизеров. Усугубляющим фактором является прямая корреляция между содержанием серы и тяжелых металлов (V, Ni), которые катализируют окисление углерода, увеличивая расход анодов и энергопотребление. Кроме того, неоднородность прокаливания, вызванная сегрегацией частиц в печах, и высокая стоимость гидроо-

чистки ограничивают промышленное применение традиционных методов [15].

Традиционные методы прокаливания, несмотря на их распространенность, сталкиваются с системными ограничениями: высокими энергозатратами, экологическими рисками, зависимостью от качества сырья и неспособностью обеспечить однородность продукта [16, 17]. Решение этих проблем требует интеграции инновационных подходов: от внедрения гибридных методов обессеривания до модернизации оборудования для рекуперации тепла и минимизации пыления. Таким образом, разработка методов, сочетающих контроль температурных режимов, модификацию сырья и утилизацию побочных продуктов, остается ключевой задачей для расширения применения высокосернистых коксов в условиях растущего спроса на углеродные материалы [18].

ОБЕССЕРИВАНИЕ СЫРЬЯ КОКСОВАНИЯ

Эффективным методом снижения серы в готовом нефтяном коксе является снижение ее содержания в сырье коксования. Исследования и реализация на практике процессов гидрообессеривания и пиролиза нефтяных остатков производились как в России, так и за рубежом.

Обессеривание сырья перед коксованием предпочтительно в случаях, когда исходное сырье имеет низкое содержание металлов в золе. Среди методов стоит выделить следующие:

1) гидрообессеривание – очистка сырья (мазутов, гудронов) водородом под высоким давлением. Позволяет снизить содержание серы до 0,5–1,5%. Нерентабелен для сырья с высоким содержанием ванадия или никеля, так как металлы дезактивируют катализаторы [19–21];

2) деасфальтизация – удаление асфальтенов с помощью растворителей (например, пропана). Снижает содержание ванадия на 30–50%, но уменьшает выход кокса [22];

3) пиролиз – термическое разложение сырья с получением этилена и смол. Остатки пиролиза используются для коксования, что позволяет снизить содержание серы до 0,3–1,5% [23].

Методы снижения серы в сырье коксования обладают существенными недостатками: высокие капитальные затраты на ка-

тализаторы и оборудование, дезактивация катализаторов металлами, снижение выхода кокса на 20% и более, а также ограниченная эффективность для высокосернистых остатков. Эти факторы делают технологии экономически нецелесообразными для сырья с высоким содержанием серы и металлов в золе [24–26]. Эти процессы в основном применяются для производства премиального продукта – игольчатого кокса, при модификации сырья обладающего требуемыми характеристиками [27–29].

Методы снижения серы в сырье коксования, такие как гидрообессеривание остатков и смешивание с гидроочищенными дистиллятами, нашли применение на отечественных предприятиях, где используют нефти с низким содержанием металлов (V, Ni) и умеренной сернистостью [30].

СПОСОБЫ ОБЕССЕРИВАНИЯ НЕФТЯНОГО КОКСА

Помимо способов обессеривания сырья коксования существуют способы обессеривания сернистых коксов, полученных из нефтяных остатков. Современные подходы к обессериванию можно классифицировать по механизму воздействия на серосодержащие компоненты (табл. 1).

Химические методы основаны на преобразовании серосодержащих соединений в легкоудаляемые формы через окислительные, восстановительные или каталитические реакции.

Гидрообессеривание нефтяного кокса – процесс удаления серы и металлов из сернистых коксов путем обработки водородом или водородосодержащим газом. Предварительное окисление кокса при 340 °С увеличивает его удельную поверхность с потерями 6–9%. Основная стадия – гидроочистка синтез-газом ($\text{CO} + \text{H}_2$) при 700 °С. Одновременно могут удаляться металлы в составе летучих карбониллов контактированием с отходящим синтез-газом. Эффективность удаления зависит от давления, температуры, скорости подачи водорода и размера частиц кокса. Механизм процесса диффузионный: водород проникает в углеродную матрицу, реагирует с серой, а сероводород удаляется через образовавшиеся поры. В диапазоне 1000–1200 К наблюдается конкуренция между десорбцией серы и термической фиксацией в виде стабильных C-S соединений, что ограничивает глубину очистки [31]. Для предотвращения обратных реакций H_2S связывается акцепторами, такими как оксиды марганца или кальция.

Таблица 1. Способы обессеривания нефтяного кокса (составлено авторами)
Table 1. Methods of petroleum coke desulfurization (authors' compilation)

Методы	Подкатегория	Механизм
Химические	Гидрообессеривание	Взаимодействие H_2 с серой при 700 °С
	Окислительная обработка	Окисление серы до сульфоксидов/сульфонов с использованием HNO_3 , H_2O_2 или O_3
	Каталитическая обработка	Применение Fe-катализаторов или ионных жидкостей (фосфомолибденовая кислота HPMo) и глубокий эвтектический растворитель (DES, от англ. Deep Eutectic Solvent)) для ускорения реакций
Термические	Прокаливание с ингибиторами	Высокотемпературная обработка (до 1800 °С) с добавлением Fe_2O_3 для подавления вспучивания
	Вакуумная обработка	Нагрев в вакууме (до 1600 °С) для предотвращения выбросов SO_2
Биологические	Микробиологическое выщелачивание	Окисление серы бактериями <i>Thiobacillus ferrooxidans</i> и <i>Thiobacillus thiooxidans</i>
Гибридные	Комбинированные методы	Комбинация прокаливания с Fe-катализаторами. Сочетание микробиологического выщелачивания с кратковременным нагревом. Прокаливание с NaOH + ультразвуковая обработка перуксусной кислотой. Десорбция серосодержащих газов при вакуумировании с щелочной активацией
Электрохимические	Электролиз	Окисление серы реактивными формами кислорода ($\text{HO}^\bullet$, O^{2-} , $\text{O}^\bullet$, H_2O_2) в электролитической среде

Глубоко очищенный кокс (содержащий менее 0,2% серы) обладает низкой прочностью, ограничивается его применение областями, где механические свойства не критичны. При умеренных режимах (0,5–1,5 МПа, 625–760 °С) получают кокс с 1–1,5% серы, пригодный для промышленного использования [7].

Окислительная обработка предполагает использование HNO_3 , H_2O_2 или O_3 для преобразования серы в сульфоксиды/сульфоны. Комбинация щелочного обжига с ультразвуковым окислением снижает содержание серы с 4,46 до 0,15% [32]. Каталитическое окисление с HPMo и DES обеспечивает эффективность 88,6% при 60 °С, но требует систем очистки токсичных газов (SO_2) [33–35].

Каталитическая обработка предполагает применение катализаторов для реакций обессеривания. Процесс обжига с использованием катализаторов на основе порошка железа позволил снизить энергетический барьер для процесса пиролиза. Наличие железа не только снижает содержание серы в нефтяном коксе, но и повышает степень его графитизации. При температуре 1400 °С железо связывает серу в FeS , удаляя до 87,93% [36]. Ионные жидкости ($[\text{Bpy}]\text{PMoVn}$) с использованием DES окисляют серу до сульфонов ($\text{S} < 1,54\%$), но их высокая стоимость ограничивает применение [37].

Щелочная обработка нефтяного кокса гидроксидом калия (KOH) применяется как для обессеривания, так и для создания высокопористых материалов. В методах активации используют соотношение KOH : кокс от 0,5 до 5 и температуры 400–800 °С. При высокотемпературной обработке (800 °С) в атмосфере азота достигается большая степень обессеривания: до 90% серы удаляется при 50% конверсии углерода. Основными продуктами являются сульфаты (K_2SO_4) и SO_2 , что объясняется реакцией взаимодействия KOH с тиофеном и сульфоксидом. Полученный материал имеет низкое содержание серы (<0,5%) и удельную поверхность до 2449 $\text{m}^2/\text{г}$ [38, 39].

Обработка KOH позволяет снижать содержание серы через образование сульфатов, сульфидов и газообразных продуктов, но нежелательными эффектами являются повышение зольности, высокий расход кокса и

образование микропористых структур с высокой площадью поверхности [40].

Обработка аммиаком (NH_3) применяется для снижения содержания серы в высокосернистом нефтяном коксе. Метод основан на восстановительных реакциях, где аммиак разлагается на водород (H_2) и азот (N_2), а H_2 выступает основным агентом для удаления серы. Органическая сера (тиофен, бензотиофен, дибензотиофен) реагирует с H_2 , образуя H_2S . При 800 °С достигается максимальная эффективность обессеривания, тогда как при превышении 900 °С эффективность снижается. При 800 °С аммиак почти полностью разлагается (более 95%), обеспечивая высокую концентрацию в газовой фазе H_2 [41, 42].

Метод демонстрирует значительные технологические преимущества, включая высокую степень обессеривания (80–90%), улучшение структурных характеристик и окислительную стабильность материала, а также повышенную безопасность процесса по сравнению с использованием молекулярного водорода. При этом аммиак демонстрирует сравнимую с водородом обессеривающую способность при меньших потерях массы кокса благодаря стабилизирующему действию азота. Но при этом существуют ограничения: образование токсичных цианистых соединений и увеличение содержания азота в продукте, что может ограничивать его дальнейшее промышленное применение [32].

Термообессеривание нефтяного кокса основано на высокотемпературной обработке, направленной на удаление серосодержащих соединений. Основным недостатком метода является развитие пористости, приводящее к снижению механической прочности материала и повышению его реакционной способности с кислородом [43]. В отличие от высокосернистых, низкосернистые коксы демонстрируют увеличение истинной плотности при температурах 1100–2500 °С без значительного образования пор, что связано с минимальным газовыделением в процессе обессеривания [44–46].

Эффективность термообессеривания напрямую зависит от температуры, скорости нагрева и размера частиц. Оптимальная температура обработки высокосернистого кокса должна составлять не менее 1500 °С, при которой достигается макси-

мальная плотность и минимальная реакционная активность. Низкая скорость нагрева способствует мягкому удалению серы, минимизируя деформацию углеродной матрицы [47, 48].

Состав серы в коксе варьируется в зависимости от ее происхождения. В высокосернистом сырье преобладают тиофены и сульфоксиды, тогда как меркаптаны и сульфоны присутствуют в незначительных количествах. Процесс термического обессеривания включает четыре стадии: десорбцию поверхностной серы ($<500^{\circ}\text{C}$), разрушение ациклических серосодержащих структур ($500\text{--}900^{\circ}\text{C}$), деструкцию сульфоксидов ($900\text{--}1100^{\circ}\text{C}$) и разрушение тиофенов ($>1100^{\circ}\text{C}$) [49]. При этом выделение H_2S характерно для низкотемпературного диапазона ($<750^{\circ}\text{C}$), а SO_2 и CH_3SH образуются преимущественно при крекинге циклических структур. При 1800°C удаляется до 85% серы, но 15% остается из-за термической стабильности тиофенов [50].

Ключевым фактором эффективности является размер частиц, который определяет температурные режимы процесса. Для фракций $<0,11$ мм эффективное обессеривание достигается при 1100°C , тогда как частицы $>0,15$ мм требуют нагрева до 1200°C . При температурах $\geq 1500^{\circ}\text{C}$ влияние размера (до 6 мм) нивелируется, так как основная масса серы удаляется [51].

Исследования показали, что стабильными продуктами термического разложения серы являются SO_2 и CS_2 , а промежуточные соединения (C_2S , CNS , COS) образуются на ранних стадиях термического обессеривания. Тиофеновая сера трансформируется в газообразные продукты через стадии образования HS -радикалов, что подтверждено методами масс-спектрометрии и моделирования ReaxFF MD [52].

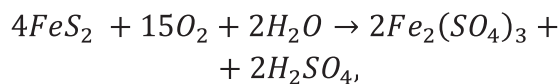
Несмотря на высокие показатели эффективности, метод сталкивается с ограничениями. Экспериментально установлено, что использование кокса со степенью обессеривания выше 40% неприменимо для изготовления анодов в чистом виде из-за критического роста пористости, однако его использование в смеси с высококачественным сырьем допустимо [53]. Промышленные испытания анодной массы на основе кокса, термообессеренного на установке БашНИИ

НП (ныне ГУП «Институт нефтехимпереработки Республики Башкортостан»), подтвердили возможность снижения содержания серы с 4,2% до 0,5–1,2% с условием соответствия ее качества требованиям к рядовой марке анодной массы АМ-О. Технология не получила широкого распространения из-за высокой энергоемкости [7]. Высокая энергоемкость, образование пор и риск локальных перегревов осложняют применение данного термического метода.

Перспективы развития термических методов обессеривания связаны с их комбинированным применением с другими технологиями. Так, использование Fe -катализаторов снижает температуру разложения тиофена на $200\text{--}300^{\circ}\text{C}$, а предварительная обработка H_2O_2 способствует окислению устойчивых сернистых соединений (например, тиофена) до растворимых форм (сульфоны, сульфоксиды), повышая их доступность для удаления в термических стадиях процесса [32].

Биологические методы обессеривания основаны на способности микроорганизмов метаболизировать серосодержащие соединения, преобразуя их в растворимые формы. Эти подходы, в отличие от термических и химических, протекают при низких температурах ($25\text{--}40^{\circ}\text{C}$) и обладают минимальным воздействием на углеродную матрицу кокса.

Ключевыми агентами процесса выступают термофильные бактерии рода *Thiobacillus* (*T. thiooxidans*, *T. ferrooxidans*), которые окисляют серу до сульфатов через ферментативные реакции. Например, пиритная сера (FeS_2) преобразуется по схеме:



где серосодержащие соединения преобразуются в водорастворимые сульфаты под действием ферментов микроорганизмов.

Смешанные культуры бактерий демонстрируют синергетический эффект, удаляя до 92% серы из нефтяного кокса за 28 дней. Однако длительность процесса и чувствительность микроорганизмов к pH (оптимум 2,0–4,5) ограничивают их промышленное применение.

Эффективность метода зависит от дисперсности частиц. Мелкодисперсный кокс

(<100 мкм) увеличивает площадь контакта с бактериями, ускоряя биовыщелачивание. Эксперименты с частицами размера 200 меш показали снижение содержания серы с 4,5 до 0,35% за 6 недель, тогда как для фракций >1 мм аналогичный результат требует 12 недель. Комбинация с предварительной механохимической активацией кокса (шаровое измельчение) позволяет сократить время обработки до 14 дней, сохраняя структурную целостность материала [54–56].

Электрохимическое обессеривание использует окисление серы до растворимых сульфатов в мягких условиях, одновременно генерируя водород на катоде. Для неорганической серы (FeS_2) в щелочной среде слабые окислители (O_2 , H_2O) преобразуют пирит в $\text{Fe}(\text{OH})_3$ и SO_4^{2-} , а сильные радикалы ($\text{HO}\cdot$, $\text{O}_2^{\cdot-}$, $\text{O}\cdot$, H_2O_2) избирательно разрушают связи Fe-S. В кислой среде ионы $\text{Fe}^{3+}/\text{Mn}^{3+}$ окисляют FeS_2 до сульфатов через циклы восстановления-регенерации. Органическая сера (тиолы, сульфиды, тиофены) удаляется сложнее: алифатические формы окисляются до сульфоксидов, сульфонов и сульфатов, а стабильные тиофеновые структуры требуют разрушения связей C-S или замены групп ($-\text{SH} \rightarrow -\text{OH}$). Однако активные формы кислорода неселективно атакуют и углерод, снижая эффективность. Метод эффективен для неорганической серы, но требует оптимизации для органических форм, чтобы минимизировать потери углерода [57].

ГИБРИДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБЕССЕРИВАНИЯ НЕФТЯНОГО КОКСА

Гибридные методы, комбинирующие физические, химические и биологические подходы, обеспечивают глубокую очистку высокосернистых коксов с минимальным воздействием на их структуру. Например, щелочной каталитический обжиг с ультразвуковым окислением объединяет прокаливание с NaOH и последующую обработку перуксусной кислотой под ультразвуком, снижая содержание серы до 0,15 масс. % за счет окисления устойчивых тиофенов. Механохимическая активация с каталитическим окислением в бинарных растворителях достигает обессеривания в 88,6% за счет увеличения поверхности частиц и гене-

рации пероксильных радикалов, разрушающих связи C-S [37].

Термокаталитические методы с добавлением порошка Fe при прокаливании до 1400°C удаляют 88% серы, предотвращая рост пористости через связывание сернистых радикалов. Биотермическая обработка сочетает микробиологическое выщелачивание (92% неорганической серы) с кратковременным нагревом, сохраняя механическую прочность кокса. Вакуумная термообработка со щелочной активацией обеспечивает удаление 98,5% серы за счет десорбции серосодержащих газов и рекуперации элементарной серы [36, 58].

Эффективность гибридных технологий превосходит традиционные методы благодаря синергии стадий, такой как механоактивация с катализом или биоочистка с умеренным обжигом. Однако масштабирование данных методов требует оптимизации затрат.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обессеривание нефтяного кокса играет ключевую роль в металлургической промышленности при производстве углеграфитовых материалов (электродов, тиглей, нагревателей), где требования к чистоте сырья являются основополагающими для обеспечения механической прочности, электропроводности и устойчивости к высокотемпературному окислению.

Экономическая целесообразность обессеривания зависит от качества сырья и требований к конечному продукту. Обессеривание сырья (гидроочистка, пиролиз) выгодно для нефти с низким содержанием в золе металлов (V, Ni) и умеренным содержанием серы, позволяя получать кокс с содержанием серы 0,31–1,26% без структурных повреждений. Однако для сырья с повышенным содержанием металлов эти методы нерентабельны из-за дезактивации катализаторов и потерь кокса.

Обессеривание готового кокса – подходящий вариант для высокосернистых продуктов (4–7% S), но оно снижает плотность (до $1,86 \text{ г/см}^3$), механическую прочность (на 10–20%). Сравнение методов обессеривания (табл. 2) позволяет выбрать оптимальные технологии для конкретных задач, учитывая их эффективность, экономические и экологические аспекты.

Таблица 2. Сравнение методов обессеривания (составлено авторами)
Table 2. Comparison of desulfurization methods (authors' compilation)

Методы	Степень обессеривания	Плюсы	Минусы	Источники
Термические	85–98,5%	универсальность, высокая эффективность, сохранение графитируемости	высокие энергозатраты, структурные дефекты (повышенная пористость)	[43–52]
Химические	60–98,5%	глубокая очистка, селективность, минимизация пористости	токсичные отходы, дорогие реагенты, риск ухудшения кристалличности	[32–42]
Биологические	40–92%	экологичность, низкие энергозатраты, сохранение структурной целостности	низкая скорость, ограниченная эффективность для тиофенов	[54–56]
Гибридные	75–98%	высокая эффективность, оптимизация баланса плотности и чистоты	сложность реализации, высокая себестоимость	[36, 37, 58]

Эффективность обессеривания напрямую определяет эксплуатационные свойства углеродных материалов, включая электропроводность и механическую прочность. При выборе технологий критично учитывать их влияние на структуру кокса, особенно в производстве электродов. Экологические требования стимулируют переход к гибридным и биологическим методам, но экономическая рентабельность остается ключевым барьером для внедрения инноваций.

Выбор метода определяется балансом затрат, доступных технологий и требований рынка. Методы обессеривания сырья коксования применимы, если используется изначально качественное сырье, соответствующее требованиям технологических процессов. В связи с чем целенаправленное их внедрение уместно при производстве иголь-

чатого кокса. В свою очередь обессеривание непосредственно коксов находит применение для массового производства рядовых коксов с допустимым ухудшением качества.

Ключевыми факторами для промышленного внедрения остаются оптимизация параметров обработки (температура, скорость нагрева, гранулометрический состав), разработка катализаторов с повышенной устойчивостью к дезактивации, а также интеграция систем рекуперации тепла и утилизации побочных продуктов (SO_2 , H_2S). Дальнейшие исследования должны быть направлены на установление корреляций между составом сырья, режимами обработки и функциональными свойствами кокса, что позволит расширить применение высокосернистых сортов в производстве углеродных материалов при соблюдении экологических и экономических требований.

Список источников

1. Литвиненко В.С., Петров Е.И., Василевская Д.В., Яковенко А.В., Наумов И.А., Ратников М.А. Оценка роли государства в управлении минеральными ресурсами // Записки Горного института. 2023. Т. 259. С. 95–111. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.100>. EDN: APFXQN.
2. Рудко В.А., Габдулхаков Р.Р., Пягай И.Н. Научно-техническое обоснование возможности организации производства игольчатого кокса в России // Записки Горного института. 2023. Т. 263. С. 795–809. EDN: KYNHWL.
3. Баранов А.Н., Гусева Е.А., Красноперов А.Н., Победаш А.С., Юдин А.Н. Исследование коррозионных процессов в производстве алюминия и разработка новых методов защиты металлов // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2008. № 4. С. 10. EDN: JVLGQV.
4. Немчинова Н.В., Коновалов Н.П., Коновалов П.Н., Дошлов И.О. Снижение экологической нагрузки на окружающую среду при производстве алюминия за счёт применения нефтяного пека // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 4. С. 800–808. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-800-808>. EDN: YRJBRD.
5. Yu Xin, Yu Dunxi, Yu Ge, Liu Fangqi, Han Jingkun, Wu Jianqun, et al. Temperature-resolved evolution and speciation of sulfur during pyrolysis of a high-sulfur petroleum coke // Fuel. 2021. Vol. 295. P. 120609. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120609>.
6. Liu Tao, Long Mujun, Jiang Wenxiang, Chen Dengfu, Yu Sheng, Duan Huamei, et al. Variations in the true density and sulfur removal forms of petroleum coke during an ultrahigh-temperature desulfurization process // Energy and Fuels. 2017. Vol. 31. No. 7. P. 7693–7699. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b01085>.

7. Ахметов М.М., Карпинская Н.Н., Теляшев Э.Г. Нефтяной кокс: получение, качество, прокаливание, области использования. Уфа: АО «Институт нефтехимпереработки», 2018. 584 с.
8. Pintowantoro S., Setiawan M.A., Abdul F. Study of variation grain size in desulfurization process of calcined petroleum coke // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 1945. No. 1. P. 020035. <https://doi.org/10.1063/1.5030257>.
9. Шарикиов Ю.В., Шарикиов Ф.Ю., Крылов К.А. Математическая модель оптимального управления процессом производства нефтяного кокса в трубчатых вращающихся печах // Теоретические основы химической технологии. 2021. Т. 55. № 4. С. 529–538. <https://doi.org/10.31857/S0040357121030192>. EDN: RSDOWU.
10. Фещенко Р.Ю., Ерохина О.О., Литаврин И.О., Рябошук С.В. Повышение окислительной стойкости графитированных электродов дуговых печей // Черные металлы. 2023. № 7. С. 31–36. <https://doi.org/10.17580/chm.2023.07.03>. EDN: DLVSZL.
11. Edwards L. The history and future challenges of calcined petroleum coke production and use in aluminum smelting // JOM. 2015. Vol. 67. No. 2. P. 308–321. <https://doi.org/10.1007/s11837-014-1248-9>.
12. Feshchenko R.Yu., Eremin R.N., Erokhina O.O., Povarov V.G. Improvement of oxidation resistance of graphite blocks for the electrolytic production of magnesium by impregnation with phosphate solutions. Part 2 // Tsvetnye Metally. 2022. Vol. 2022. No. 1. P. 24–29. <https://doi.org/10.17580/tsm.2022.01.02>.
13. Efimov I., Gabdulkhakov R.R., Rudko V.A. Fine-tuned convolutional neural network as a tool for automatic microstructure analysis of petroleum and pitch cokes // Fuel. 2024. Vol. 376. P. 132725. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.132725>.
14. Zhao Pu-jie, Ma Cheng, Wang Ji-tong, Qiao Wen-ming, Ling Li-cheng. Almost total desulfurization of high-sulfur petroleum coke by Na_2CO_3 -promoted calcination combined with ultrasonic-assisted chemical oxidation // New Carbon Materials. 2018. Vol. 33. No. 6. P. 587–594. [https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(18\)60359-2](https://doi.org/10.1016/S1872-5805(18)60359-2).
15. Fedorova E.R., Morgunov V.V., Pupysheva E.A. Effect of variation of internal diameter along the length of a rotary kiln on material movement // Non-ferrous Metals. 2024. Vol. 56. No. 1. P. 28–34. <https://doi.org/10.17580/nfm.2024.01.05>.
16. Bazhin V.Yu., Masko O.N., Nikitina L.N. Decarbonization of exhaust gases of industrial metallurgical furnaces // Metallurgist. 2024. Vol. 67. No. 9-10. P. 1407–1417. <https://doi.org/10.1007/s11015-024-01632-6>.
17. Strizhenok A.V., Bykova M.V., Korotaeva A.E. Extractive Industries as a source of greenhouse gas emissions and the possibility of its natural sequestration under the climatic conditions of Central and Northern Eurasia // Journal of Ecological Engineering. 2024. Vol. 25. Iss. 5. P. 43–69. <https://doi.org/10.12911/22998993/185585>.
18. Martynov S.A., Masko O.N., Fedorov S.N. Innovative ore-thermal furnace control systems // Tsvetnye Metally. 2022. Vol. 2022. No. 4. P. 87–94. <https://doi.org/10.17580/tsm.2022.04.11>.
19. Gao Longxin, He Wenhui, Zhai Weiming, Xin Mudi, Wang Wei, Xiang Yanjuan, et al. Influence of aromatics on the hydrodesulfurization reaction pathway of the $\text{NiMo}/\text{Al}_2\text{O}_3$ catalyst using quasi-in situ characterization techniques // Fuel. 2025. Vol. 393. P. 135052. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.135052>.
20. Коноплин Р.Р., Кондрашева Н.К., Парфенова Л.В. К вопросу о технологии производства отечественных катализаторов гидроочистки (Обзор) // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2020. № 53. С. 35–43. <https://doi.org/10.36807/1998-9849-2020-53-79-35-43>. EDN: PQQLLF.
21. Petrova D., Lyubimenko V., Ivanov E., Gushchin P., Kolesnikov I. Energy basics of catalytic hydrodesulfurization of diesel fuels // Catalysts. 2022. Vol. 12. Iss. 11. P. 1301. <https://doi.org/10.3390/catal12111301>.
22. Saha B., Vedachalam S., Paul A.K., Dalai A.K., Saxena S., Roberts W.L., et al. Microwave-assisted solvent deasphalting of heavy fuel oil and process parameters optimization // Fuel. 2023. Vol. 351. P. 128818. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128818>.
23. Uyar M., Aydin H. Production of low sulfur diesel-like fuel from crude oil wastes by pyrolytic distillation and its usage in a diesel engine // Energy. 2022. Vol. 244. Part A. P. 122683. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122683>.
24. Hart A. Modern techniques to minimize catalyst deactivation due to coke deposition in catalytic upgrading of heavy oil in situ processes // Petroleum Chemistry. 2022. Vol. 62. No. 7. P. 714–731. <https://doi.org/10.1134/S0965544122020189>.
25. Houda S., Lancelot C., Blanchard P., Poinel L., Lamonier C. Oxidative desulfurization of heavy oils with high sulfur content: a review // Catalysts. 2018. Vol. 8. Iss. 9. P. 344. <https://doi.org/10.3390/catal8090344>.
26. Haruna A., Merican Z.M.A., Musa S.G., Abubakar S. Sulfur removal technologies from fuel oil for safe and sustainable environment // Fuel. 2022. Vol. 329. P. 125370. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125370>.
27. Хайрутдинов И.Р., Тихонов А.А., Ахметов М.М. Перспектива расширения сырьевой базы для получения игольчатого кокса // Башкирский химический журнал. 2011. Т. 18. № 3. С. 103–111. EDN: OOUXGN.
28. Обухова А.В., Кузнецова Л.И., Каменский Е.С., Кузнецов П.Н., Авид Б. Получение игольчатого кокса из нефтяного и угольного сырья // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технология. 2024. Т. 17. № 6. С. 688–711. EDN: BBGDAM.
29. Zhang Zhichen, Chen Kun, Liu Dong, Lou Bin, Li Min, Guo Shuhai, et al. Comparative study of the carbonization process and structural evolution during needle coke preparation from petroleum and coal feedstock // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2021. Vol. 156. P. 105097. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105097>.
30. Ахметов М.М. Получение малосернистых коксов из сернистых нефтей: монография. Уфа: АО «Институт нефтехимпереработки», 2010. 180 с.

31. Al-Haj-Ibrahim H., Morsi B.I. Desulfurization of petroleum coke: a review // *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 1992. Vol. 31. No. 8. P. 1835–1840. <https://doi.org/10.1021/ie00008a001>.
32. Luo Pen, Chen Zhengjie, Chen Xiuhua, Ma Wenhui. Deep desulfurization of high-sulfur petroleum coke via alkali catalytic roasting combined with ultrasonic oxidation // *Materials*. 2024. Vol. 17. No. 11. P. 2609. <https://doi.org/10.3390/ma17112609>.
33. Li Fu-Min, Hua Ming-Qing, Wei Yan-Chen, Liu Ji-Xing, Gong Jia-Hong, Wang Chao, et al. Insight into the oxidative desulfurization of high-sulfur petroleum coke under mild conditions: a journey of vanadium-substituted Dawson-type phosphotungstic acid // *Petroleum Science*. 2021. Vol. 18. No. 3. P. 983–993. <https://doi.org/10.1007/s12182-021-00553-2>.
34. Gong Jiahong, Xu Huanhuan, Liu Jixing, Liu Hui, Hua Mingqing, Yang Ning, et al. Interface engineering of quaternary ammonium phosphotungstate for efficient oxidative desulfurization of high-sulfur petroleum coke // *Petroleum Science and Technology*. 2023. Vol. 41. No. 1. P. 86–103. <https://doi.org/10.1080/10916466.2022.2032740>.
35. Hua Mingqing, Gong Jiahong, Wang Yan, Lu Shichao, Wu Peiwen, Cheng Huifang, et al. Mechanochemistry assisted oxidative desulfurization of high-sulfur petroleum coke over HPMo coupled binary deep eutectic solvent // *Separation and Purification Technology*. 2025. Vol. 356. Part A. P. 129882. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.129882>.
36. Luo Pen, Chen Zhengjie, Chen Xiuhua, Ma Wenhui, Gan Xiaowei, Xie Rui. Study on desulfurization and modification of high-sulfur petroleum coke via reduced iron powder catalytic roasting // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2024. Vol. 12. No. 6. P. 114860. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114860>.
37. Wang Yan, Luan Hao, Gong Jiahong, Hua Mingqing, Wu Peiwen, Cheng Huifang, et al. Mechanochemical driven oxidative desulfurization of high-sulfur petroleum coke over [Bpy]PMoV_n coupled with amide-based binary deep eutectic solvents // *Chemical Engineering Science*. 2025. Vol. 304. P. 121021. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2024.121021>.
38. Askari H., Khorasheh F., Soltanali S., Tayyebi S. Desulfurization of high sulfur petroleum coke by molten caustic leaching // *Egyptian Journal of Petroleum*. 2019. Vol. 28. Iss. 2. C. 225–231. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2019.04.001>.
39. Shan Jie, Huang Jie-jie, Li Jia-zhou, Li Guang, Zhao Jian-tao, Fang Yi-tian. Insight into transformation of sulfur species during KOH activation of high sulfur petroleum coke // *Fuel*. 2018. Vol. 215. P. 258–265. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.09.117>.
40. Литвинова Т.Е., Царева А.А., Полторацкая М.Е., Рудко В.А. Механизм и термодинамика процесса сорбции этилового спирта на активированном нефтяном коксе // *Записки Горного института*. 2024. Т. 268. С. 625–636. EDN: YUGLTO.
41. Xiao Jin, Zhang Yanbing, Zhong Qifan, Li Fachuang, Huang Jindi, Wang Bingjie. Reduction and desulfurization of petroleum coke in ammonia and their thermodynamics // *Energy and Fuels*. 2016. Vol. 30. Iss. 4. P. 3385–3391. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b02929>.
42. Zhong Qifan, Zhang Yu, Shabnam S., Xiao Jin, Van Duin A.C.T., Mathews J.P. Reductive gaseous (H₂/NH₃) desulfurization and gasification of high-sulfur petroleum coke via reactive force field molecular dynamics simulations // *Energy and Fuels*. 2019. Vol. 33. Iss. 9. P. 8065–8075. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b01425>.
43. Tsareva A.A., Litvinova T.E., Gapanyuk D.I., Rode L.S., Poltoratskaya M.E. Kinetic calculation of sorption of ethyl alcohol on carbon materials // *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2024. Vol. 98. P. 421–430. <https://doi.org/10.1134/S0036024424030312>.
44. Buzunov V., Mann V., Khramenko S., Johnson J. Influence of calcination temperature and sulfur level on coke properties // *Light Metals* / eds. A. Ratvik. Cham: Springer, 2017. P. 1151–1156. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51541-0_138.
45. Tomkute V., Lossius L.P., Gulbrandsen K., Frosta O.E. TeqMapping: a test developed to map the impact of baking temperatures on calcined petroleum cokes (CPC) // *Light Metals* / eds. L. Edwards. Cham: Springer, 2025. P. 950–958. https://doi.org/10.1007/978-3-031-80676-6_118.
46. Гапанюк Д.И. Сорбция этилового спирта на активированном нефтяном коксе // *СНК-2023: материалы LXXIII открытой Междунар. студ. науч. конф. Московского Политеха (г. Москва, 3–20 апреля 2023 г.)*. М.: Московский политех. ун-т, 2023. С. 111–113. EDN: IKZTSW.
47. Gao Shoulei, Xue Jilai, Lang Guanghui, Liu Rui, Bao Chongai, Wang Zhiguo, et al. Experimental study on preparation of prebake anodes with high sulfur petroleum coke desulfurized at high temperatures // *Light Metals* / eds. C. Chesonis. Cham: Springer, 2019. P. 1301–1309. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05864-7_160.
48. Edwards L.C., Neyrey K.J., Lossius L.P. A review of coke and anode desulfurization // *Essential Readings in Light Metals* / eds. A. Tomsett, J. Johnson. Cham: Springer, 2016. P. 130–135. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48200-2_18.
49. Gao Shoulei, Xue Jilai, Lang Guanghui, Liu Rui, Bao Chongai, Wang Zhiguo, et al. Study on the calcination performance and desulfurization mechanism of petroleum cokes with different sulfur contents between 700 and 1100 °C // *Light Metals* / eds. O. Martin. Cham: Springer, 2018. P. 1179–1187. https://doi.org/10.1007/978-3-319-72284-9_154.
50. Yu Xin, Yu Dunxi, Yu Ge, Liu Fangqi, Han Jingkun, Wu Jianqun, et al. Temperature-resolved evolution and speciation of sulfur during pyrolysis of a high-sulfur petroleum coke // *Fuel*. 2021. Vol. 295. P. 120609. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120609>.

51. Zhong Qifan, Mao Qiuyun, Xiao Jin, Van Duin A., Mathews J.P. Sulfur removal from petroleum coke during high-temperature pyrolysis. Analysis from TG-MS data and ReaxFF simulations // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2018. Vol. 132. P. 134–142. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.03.007>.
52. Gao Shoulei, Xue Jilai, Lang Guanghui, Liu Rui, Bao Chongai, Wang Zhiguo, et al. Study on the property and desulfurization mechanisms of petroleum cokes with different sulfur contents from 1200 to 2800 °C // *Light Metals* / eds. O. Martin. Cham: Springer, 2018. P. 1303–1313. https://doi.org/10.1007/978-3-319-72284-9_171.
53. Edwards L., Harp K., Kuhnt C. Use of thermally desulfurized shaft CPC for anode production // *Light Metals* / eds. A. Ratvik. Cham: Springer, 2017. P. 1173–1181. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51541-0_141.
54. Tripathi N., Singh R.S., Hills C.D. Microbial removal of sulphur from petroleum coke (petcoke) // *Fuel*. 2019. Vol. 235. P. 1501–1505. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.08.072>.
55. Koyunoğlu C., Karaca H. Microbial desulphurisation of coal: a review // *International Journal of Sustainable Energy*. 2023. Vol. 42. Iss. 1. P. 1–24. <https://doi.org/10.1080/14786451.2023.2167998>.
56. Li Xin, Yang Fuqiang, Zhao Jiale, Ge Fanliang. Mapping the knowledge domain of microbial desulfurization application in fuels and ores for sustainable industry // *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. Vol. 30. Iss. 53. P. 113151–113174. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-30236-x>.
57. Zhang Tong, Zhang Jintao, Wang Zhi, Liu Junhao, Qian Guoyu, Wang Dong, et al. Review of electrochemical oxidation desulfurization for fuels and minerals // *Fuel*. 2021. Vol. 305. P. 121562. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121562>.
58. Chen Zhengjie, Ma Wenhui, Wei Kuixian, Wu Jijun, Li Shaoyuan, Zhang Cong, et al. Detailed vacuum-assisted desulfurization of high-sulfur petroleum coke // *Separation and Purification Technology*. 2017. Vol. 175. P. 115–121. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.11.035>.

References

1. Litvinenko V.S., Petrov E.I., Vasilevskaya D.V., Yakovenko A.V., Naumov I.A., Ratnikov M.A. Assessment of the role of the state in the management of mineral resources. *Journal of Mining Institute*. 2023;259:95-111. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.100>. EDN: APFXQN.
2. Rudko V.A., Gabdulkhakov R.R., Pyagai I.N. Scientific and technical substantiation of the possibility for the organization of needle coke production in Russia. *Journal of Mining Institute*. 2023;263:795-809. (In Russ.). EDN: KYNHWL.
3. Baranov A.N., Guseva E.A., Pobedash A.S., Yudin A.N., Krasnoperov A.N. Investigation of corrosion processes in aluminum production and development of new methods of protection of metals. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2008;4:10. (In Russ.). EDN: JVLGQV.
4. Nemchinova N.V., Konovalov N.P., Konovalov P.N., Doshlov I.O. Reducing the environmental impact of aluminum production through the use of petroleum pitch. *iPolytech Journal*. 2023;27(4):800-808. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-800-808>. EDN: YRJBIRD.
5. Yu Xin, Yu Dunxi, Yu Ge, Liu Fangqi, Han Jingkun, Wu Jianqun, et al. Temperature-resolved evolution and speciation of sulfur during pyrolysis of a high-sulfur petroleum coke. *Fuel*. 2021;295:120609. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120609>.
6. Liu Tao, Long Mujun, Jiang Wenxiang, Chen Dengfu, Yu Sheng, Duan Huamei, et al. Variations in the true density and sulfur removal forms of petroleum coke during an ultrahigh-temperature desulfurization process. *Energy and Fuels*. 2017;31(7):7693-7699. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b01085>.
7. Akhmetov M.M., Karpinskaya N.N., Telyashev E.G. *Petroleum coke: production, quality, calcination, application field*. Ufa: Joint - Stock Company Institute of Petroleum Refining and Petrochemistry; 2018, 584 p. (In Russ.).
8. Pintowantoro S., Setiawan M.A., Abdul F. Study of variation grain size in desulfurization process of calcined petroleum coke. *AIP Conference Proceedings*. 2018;1945(1):020035. <https://doi.org/10.1063/1.5030257>.
9. Sharikov Y.V., Sharikov F.Y., Krylov K.A. Mathematical model of optimum control for petroleum coke production in a rotary tube kiln. *Theoretical Foundation of Chemical Engineering*. 2021. T. 55. № 4. C. 529–538. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0040357121030192>. EDN: RSDOWU.
10. Feshchenko R.Yu., Erokhina O.O., Litavrin I.O., Ryaboshuk S.V. Improvement of oxidation resistance of arc furnace graphite electrodes. *Chernye Metally*. 2023;7:31-36. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/chm.2023.07.03>. EDN: DLVSZL.
11. Edwards L. The history and future challenges of calcined petroleum coke production and use in aluminum smelting. *JOM*. 2015;67(2):308-321. <https://doi.org/10.1007/s11837-014-1248-9>.
12. Feshchenko R.Yu., Eremin R.N., Erokhina O.O., Povarov V.G. Improvement of oxidation resistance of graphite blocks for the electrolytic production of magnesium by impregnation with phosphate solutions. Part 2. *Tsvetnye Metally*. 2022;2022(1):24-29. <https://doi.org/10.17580/tsm.2022.01.02>.
13. Efimov I., Gabdulkhakov R.R., Rudko V.A. Fine-tuned convolutional neural network as a tool for automatic microstructure analysis of petroleum and pitch cokes. *Fuel*. 2024;376:132725. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.132725>.
14. Zhao Pu-jie, Ma Cheng, Wang Ji-tong, Qiao Wen-ming, Ling Li-cheng. Almost total desulfurization of high-sulfur petroleum coke by Na₂CO₃-promoted calcination combined with ultrasonic-assisted chemical oxidation. *New Carbon Materials*. 2018;33(6):587-594. [https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(18\)60359-2](https://doi.org/10.1016/S1872-5805(18)60359-2).

15. Fedorova E.R., Morgunov V.V., Pupysheva E.A. Effect of variation of internal diameter along the length of a rotary kiln on material movement. *Non-ferrous Metals*. 2024;56(1):28-34. <https://doi.org/10.17580/nfm.2024.01.05>.
16. Bazhin V.Yu., Masko O.N., Nikitina L.N. Decarbonization of exhaust gases of industrial metallurgical furnaces. *Metallurgist*. 2024;67(9-10):1407-1417. <https://doi.org/10.1007/s11015-024-01632-6>.
17. Strizhenok A.V., Bykova M.V., Korotaeva A.E. Extractive Industries as a source of greenhouse gas emissions and the possibility of its natural sequestration under the climatic conditions of Central and Northern Eurasia. *Journal of Ecological Engineering*. 2024;25(5):43-69. <https://doi.org/10.12911/22998993/185585>.
18. Martynov S.A., Masko O.N., Fedorov S.N. Innovative ore-thermal furnace control systems. *Tsvetnye Metally*. 2022;2022(4):87-94. <https://doi.org/10.17580/tsm.2022.04.11>.
19. Gao Longxin, He Wenhui, Zhai Weiming, Xin Mudi, Wang Wei, Xiang Yanjuan, et al. Influence of aromatics on the hydrodesulfurization reaction pathway of the NiMo/Al₂O₃ catalyst using quasi-in situ characterization techniques. *Fuel*. 2025;393:135052. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.135052>.
20. Konoplin R.R., Kondrasheva N.K., Parfenova L.V. On the issue of domestic hydrotreating catalysts production technology (Review). *Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University)*. 2020;53:35-43. (In Russ.). <https://doi.org/10.36807/1998-9849-2020-53-79-35-43>. EDN: PQQLLF.
21. Petrova D., Lyubimenko V., Ivanov E., Gushchin P., Kolesnikov I. Energy basics of catalytic hydrodesulfurization of diesel fuels. *Catalysts*. 2022;12(11):1301. <https://doi.org/10.3390/catal12111301>.
22. Saha B., Vedachalam S., Paul A.K., Dalai A.K., Saxena S., Roberts W.L., et al. Microwave-assisted solvent deasphalting of heavy fuel oil and process parameters optimization. *Fuel*. 2023;351:128818. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128818>.
23. Uyar M., Aydın H. Production of low sulfur diesel-like fuel from crude oil wastes by pyrolytic distillation and its usage in a diesel engine. *Energy*. 2022;244(A):122683. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122683>.
24. Hart A. Modern techniques to minimize catalyst deactivation due to coke deposition in catalytic upgrading of heavy oil in situ processes. *Petroleum Chemistry*. 2022;62(7):714-731. <https://doi.org/10.1134/S0965544122020189>.
25. Houda S., Lancelot C., Blanchard P., Poinel L., Lamonier C. Oxidative desulfurization of heavy oils with high sulfur content: a review. *Catalysts*. 2018;8(9):344. <https://doi.org/10.3390/catal8090344>.
26. Haruna A., Merican Z.M.A., Musa S.G., Abubakar S. Sulfur removal technologies from fuel oil for safe and sustainable environment. *Fuel*. 2022;329:125370. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125370>.
27. Khayrudinov I.R., Tikhonov A.A., Akhmetov M.M. Prospect of the feed base expansion for needle coke production. *Bashkir Chemical Journal*. 2011;18(3):103-111. (In Russ.). EDN: OOUXGH.
28. Obukhova A.V., Kuznetsova L.I., Kamensky E.S., Kuznetsov P.N., Avid B. Production of needle coke from oil and coal raw materials. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies*. 2024;17(6):688-711. (In Russ.). EDN: BBGDAM.
29. Zhang Zhichen, Chen Kun, Liu Dong, Lou Bin, Li Min, Guo Shuhai, et al. Comparative study of the carbonization process and structural evolution during needle coke preparation from petroleum and coal feedstock. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2021;156:105097. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105097>.
30. Akhmetov M.M. *Production of low-sulfur cokes from sulphur crude oils*. Ufa: Joint - Stock Company Institute of Petroleum refining and Petrochemistry; 2010, 180 p. (In Russ.).
31. Al-Haj-Ibrahim H., Morsi B.I. Desulfurization of petroleum coke: a review. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 1992;31(8):1835-1840. <https://doi.org/10.1021/ie00008a001>.
32. Luo Pen, Chen Zhengjie, Chen Xiuhua, Ma Wenhui. Deep desulfurization of high-sulfur petroleum coke via alkali catalytic roasting combined with ultrasonic oxidation. *Materials*. 2024;17(11):2609. <https://doi.org/10.3390/ma17112609>.
33. Li Fu-Min, Hua Ming-Qing, Wei Yan-Chen, Liu Ji-Xing, Gong Jia-Hong, Wang Chao, et al. Insight into the oxidative desulfurization of high-sulfur petroleum coke under mild conditions: a journey of vanadium-substituted Dawson-type phosphotungstic acid. *Petroleum Science*. 2021;18(3):983-993. <https://doi.org/10.1007/s12182-021-00553-2>.
34. Gong Jiahong, Xu Huanhuan, Liu Jixing, Liu Hui, Hua Mingqing, Yang Ning, et al. Interface engineering of quaternary ammonium phosphotungstate for efficient oxidative desulfurization of high-sulfur petroleum coke. *Petroleum Science and Technology*. 2023;41(1):86-103. <https://doi.org/10.1080/10916466.2022.2032740>.
35. Hua Mingqing, Gong Jiahong, Wang Yan, Lu Shichao, Wu Peiwen, Cheng Huifang, et al. Mechanochemistry assisted oxidative desulfurization of high-sulfur petroleum coke over HPMo coupled binary deep eutectic solvent. *Separation and Purification Technology*. 2025;356(A):129882. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.129882>.
36. Luo Pen, Chen Zhengjie, Chen Xiuhua, Ma Wenhui, Gan Xiaowei, Xie Rui. Study on desulfurization and modification of high-sulfur petroleum coke via reduced iron powder catalytic roasting. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2024;12(6):114860. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114860>.
37. Wang Yan, Luan Hao, Gong Jiahong, Hua Mingqing, Wu Peiwen, Cheng Huifang, et al. Mechanochemical driven oxidative desulfurization of high-sulfur petroleum coke over [Bpy]PMoV_n coupled with amide-based binary deep eutectic solvents. *Chemical Engineering Science*. 2025;304:121021. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2024.121021>.

38. Askari H., Khorasheh F., Soltanali S., Tayyebi S. Desulfurization of high sulfur petroleum coke by molten caustic leaching. *Egyptian Journal of Petroleum*. 2019;28(2):225-231. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2019.04.001>.
39. Shan Jie, Huang Jie-jie, Li Jia-zhou, Li Guang, Zhao Jian-tao, Fang Yi-tian. Insight into transformation of sulfur species during KOH activation of high sulfur petroleum coke. *Fuel*. 2018;215:258-265. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.09.117>.
40. Litvinova T.E., Tsareva A.A., Poltoratskaya M.E., Rudko V.A. The mechanism and thermodynamics of ethyl alcohol sorption process on activated petroleum coke. *Journal of Mining Institute*. 2024;268:625-636. (In Russ.). EDN: YUGLTO.
41. Xiao Jin, Zhang Yanbing, Zhong Qifan, Li Fachuang, Huang Jindi, Wang Bingjie. Reduction and desulfurization of petroleum coke in ammonia and their thermodynamics. *Energy and Fuels*. 2016;30(4):3385-3391. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b02929>.
42. Zhong Qifan, Zhang Yu, Shabnam S., Xiao Jin, Van Duin A.C.T., Mathews J.P. Reductive gaseous (H_2/NH_3) desulfurization and gasification of high-sulfur petroleum coke via reactive force field molecular dynamics simulations. *Energy and Fuels*. 2019;33(9):8065-8075. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b01425>.
43. Tsareva A.A., Litvinova T.E., Gapanyuk D.I., Rode L.S., Poltoratskaya M.E. Kinetic calculation of sorption of ethyl alcohol on carbon materials. *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2024;98:421-430. <https://doi.org/10.1134/S0036024424030312>.
44. Buzunov V., Mann V., Khramenko S., Johnson J. Influence of calcination temperature and sulfur level on coke properties. In: Ratvik A. (eds.). *Light Metals*. Cham: Springer; 2017, p. 1151-1156. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51541-0_138.
45. Tomkute V., Lossius L.P., Gulbrandsen K., Frosta O.E. TeqMapping: a test developed to map the impact of baking temperatures on calcined petroleum cokes (CPC). In: Edwards L. (eds.). *Light Metals*. Cham: Springer; 2025, p. 950-958. https://doi.org/10.1007/978-3-031-80676-6_118.
46. Gapanyuk D.I. Ethyl alcohol sorption on activated petroleum coke. In: *SNK-2023: materialy LXXIII otkrytoj Mezhdunarodnoj studencheskoj nauchnoj konferencii Moskovskogo Politekhna = SSC-2023: materials of the 73^d open International student scientific conference of Moscow Polytechnic University*. 3–20 April 2023, Moscow. Moscow: Moscow Polytechnic University; 2023, p. 111-113. (In Russ.). EDN: IKZTSW.
47. Gao Shoulei, Xue Jilai, Lang Guanghui, Liu Rui, Bao Chongai, Wang Zhiguo, et al. Experimental study on preparation of prebake anodes with high sulfur petroleum coke desulfurized at high temperatures. In: Chesonis C. (eds.). *Light Metals*. Cham: Springer; 2019, p. 1301-1309 https://doi.org/10.1007/978-3-030-05864-7_160.
48. Edwards L.C., Neyrey K.J., Lossius L.P. A review of coke and anode desulfurization. In: Tomsett A., Johnson J. (eds.). *Essential Readings in Light Metals*. Cham: Springer; 2016, p.130-135. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48200-2_18.
49. Gao Shoulei, Xue Jilai, Lang Guanghui, Liu Rui, Bao Chongai, Wang Zhiguo, et al. Study on the calcination performance and desulfurization mechanism of petroleum cokes with different sulfur contents between 700 and 1100 °C. In: Martin, O. (eds.). *Light Metals*. Cham: Springer; 2018, p. 1179-1187. https://doi.org/10.1007/978-3-319-72284-9_154.
50. Yu Xin, Yu Dunxi, Yu Ge, Liu Fangqi, Han Jingkun, Wu Jianqun, et al. Temperature-resolved evolution and speciation of sulfur during pyrolysis of a high-sulfur petroleum coke. *Fuel*. 2021;295:120609. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120609>.
51. Zhong Qifan, Mao Qiuyun, Xiao Jin, Van Duin A., Mathews J.P. Sulfur removal from petroleum coke during high-temperature pyrolysis. Analysis from TG-MS data and ReaxFF simulations. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2018;132:134-142. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.03.007>.
52. Gao Shoulei, Xue Jilai, Lang Guanghui, Liu Rui, Bao Chongai, Wang Zhiguo, et al. Study on the property and desulfurization mechanisms of petroleum cokes with different sulfur contents from 1200 to 2800 °C. In: Martin O. (eds.). *Light Metals*. Cham: Springer; 2018, p. 1303-1313. https://doi.org/10.1007/978-3-319-72284-9_171.
53. Edwards L., Harp K., Kuhnt C. Use of thermally desulfurized shaft CPC for anode production. In: Ratvik A. (eds.). *Light Metals*. Cham: Springer; 2017, p. 1173-1181. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51541-0_141.
54. Tripathi N., Singh R.S., Hills C.D. Microbial removal of sulphur from petroleum coke (petcoke). *Fuel*. 2019;235:1501-1505. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.08.072>.
55. Koyunoğlu C., Karaca H. Microbial desulphurisation of coal: a review. *International Journal of Sustainable Energy*. 2023;42(1):1-24. <https://doi.org/10.1080/14786451.2023.2167998>.
56. Li Xin, Yang Fuqiang, Zhao Jiale, Ge Fanliang. Mapping the knowledge domain of microbial desulfurization application in fuels and ores for sustainable industry. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023;30(53):113151-113174. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-30236-x>.
57. Zhang Tong, Zhang Jintao, Wang Zhi, Liu Junhao, Qian Guoyu, Wang Dong, et al. Review of electrochemical oxidation desulfurization for fuels and minerals. *Fuel*. 2021;305:121562. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121562>.
58. Chen Zhengjie, Ma Wenhui, Wei Kuixian, Wu Jijun, Li Shaoyuan, Zhang Cong, et al. Detailed vacuum-assisted desulfurization of high-sulfur petroleum coke. Separation and purification technology. 2017;175:115-121. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.11.035>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бажин Владимир Юрьевич,
д.т.н., профессор,
заведующий кафедрой металлургии,
Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II,
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2, Россия
bazhin-alfoil@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8231-3833>

Матыльский Бронислав Эдуардович,
аспирант,
Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II,
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2, Россия
✉ bronislav98@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 28.12.2024 г.; одобрена после рецензирования 03.02.2025 г.; принята к публикации 11.04.2025 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir Yu. Bazhin,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of the Metallurgy Department,
Empress Catherine II Saint-Petersburg
Mining University,
2, 21 Line, Saint Petersburg, 199106, Russia
bazhin-alfoil@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8231-3833>

Bronislav E. Matylsky,
Postgraduate Student,
Empress Catherine II Saint-Petersburg
Mining University,
2, 21 Line, Saint Petersburg, 199106, Russia
✉ bronislav98@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 28.12.2024; approved after reviewing 03.02.2025; accepted for publication 11.04.2025.



Модернизация технологической схемы переработки руд Удоканского месторождения

Н.В. Васюнина^{1✉}, К.Е. Дружинин², Е.А. Бурдакова³, И.В. Дубова⁴,
С.П. Бакшеев⁵, И.К. Иванова⁶, Е.В. Богданов⁷, И.И. Бакшеева⁸

^{1,3-5,7,8}Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

^{2,6}ООО «Индаст-ПРО», Красноярск, Россия

Резюме. Цель – разработка технологических решений, позволяющих полностью исключить цикл экстракции в технологической схеме переработки руд Удоканского месторождения с полным выводом ценного элемента в катодную медь. Оценка эффективности внедрения в цикл флотации двух перечисток проводили на пробе окисленной медной руды с исходным содержанием меди 1,1%. Флотацию осуществляли на флотомашинах ФМП-Л1, ФМП-Л3. Для проработки предлагаемого металлургического цикла сульфидный концентрат с содержанием меди 12,2% получали из сульфидной руды с исходным содержанием меди 2,5%. Обжиг сульфидного концентрата осуществляли в трубчатой вращающейся печи. Сернокислотное выщелачивание огарка с барботажом воздуха вели с концентрацией 3 г/дм³ при Ж:Т=5:1, содержании кислоты 3 г/дм³ и температуре 60–70 °С. Фазовые и элементные составы твердых продуктов определяли комплексным методом рентгенофазового и рентгеноспектрального анализов. Предложенные технологические решения включают в себя: получение коллективного концентрата с более высоким содержанием меди (до 15% и выше) путем введения в цикл коллективной флотации двух перечистных операций; проведение сульфатизирующего обжига полученного концентрата; сернокислотное выщелачивание огарка при интенсивном барботаже пульпы воздухом (или воздухом, обогащенным кислородом) с последующим осаждением железа, фильтрацией пульпы и электролизом раствора с получением катодной меди. Выявлено, что внедрение предварительного сульфатизирующего обжига перед гидрометаллургическим циклом позволяет получить извлечение меди (от операции) в раствор при атмосферном выщелачивании в районе 95–97%, снизить расход серной кислоты на побочные реакции, исключить переделы сульфидной флотации и экстракции/реэкстракции, получить на выходе катодную медь и анодный шлак, направляемый на аффинажное производство. Модернизация схемы переработки руд Удоканского месторождения с исключением цикла экстракции приведет к упрощению технологической схемы, повышению показателей обогащения в цикле флотации, снижению расхода реагента и значительному снижению себестоимости получения флотоконцентрата и катодной меди.

Ключевые слова: переработка смешанных медных руд, Удоканское месторождение, флотация, окислительный обжиг, сульфатизирующий обжиг коллективного концентрата, атмосферное выщелачивание

Для цитирования: Васюнина Н.В., Дружинин К.Е., Бурдакова Е.А., Дубова И.В., Бакшеев С.П., Иванова И.К., Богданов Е.В., Бакшеева И.И. Модернизация технологической схемы переработки руд Удоканского месторождения // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 2. С. 284–296. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-2-284-296>. EDN: HXUUUM.

METALLURGY

Original article

Modernized technological scheme for ore processing of the Udokan deposit

Natalya V. Vasyunina^{1✉}, Konstantin E. Druzhinin², Ekaterina A. Burdakova³, Irina V. Dubova⁴,
Sergey P. Baksheev⁵, Irina K. Ivanova⁶, Evgeniy V. Bogdanov⁷, Irina I. Baksheeva⁸

^{1,3-5,7,8}Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

^{2,6}Indast-PRO LLC, Krasnoyarsk, Russia

Abstract. This study aims to develop engineering solutions that would facilitate the elimination of the extraction stage from the processing of Udokan ore (Russia), while ensuring complete recovery of the target element into

copper cathode. The efficiency of incorporating two cleaning stages into the flotation cycle was evaluated using a sample of oxidized copper ore with an initial copper content of 1.1%. The flotation was carried out using FMP-L1 and FMP-L3 flotation units. To develop the proposed metallurgical process, we obtained a sulfide concentrate with a copper content of 12.2% from sulfide ore containing 2.5% copper. The concentrate was roasted in a tubular rotary furnace. The sulfuric acid leaching of the roasted product was carried out using bubbling with air at a liquid-to-solid ratio (L/S) of 5:1, an acid concentration of 3 g/L, and a temperature of 60–70 °C. The phase and elemental compositions of the solid products were determined using a combined X-ray diffraction and X-ray spectroscopy method. The proposed process solutions include: (1) production of a bulk concentrate with a copper content exceeding 15% through two additional cleaning stages during bulk flotation; (2) sulphatising roasting of the resulting concentrate; (3) sulfuric acid leaching of the roasted product under intensive bubbling with air or oxygen-enriched air, followed by iron precipitation, pulp filtration, and solution electrolysis to produce copper cathodes. It was established that the introduction of a preliminary sulfatizing roasting stage prior to the hydrometallurgical cycle results in 95–97% copper extraction into solution under atmospheric leaching conditions. Furthermore, this approach reduces sulfuric acid consumption in side reactions and eliminates the need for sulfide flotation and extraction/re-extraction stages. copper cathode and anode slime for subsequent refining. The exclusion of the extraction cycle from the Udokan ore processing scheme simplifies the process, improves flotation performance and reduces reagent consumption, thereby resulting in a significant decrease in production costs for both flotation concentrate and copper cathode.

Keywords: mixed copper ore processing, Udokan deposit, flotation, oxidizing roasting, sulfating roasting of bulk concentrate, atmospheric leaching

For citation: Vasyunina N.V., Druzhinin K.E., Burdakova E.A., Dubova I.V., Baksheev S.P., Ivanova I.K., Bogdanov E.V., Baksheeva I.I. Modernized technological scheme for ore processing of the Udokan deposit. *iPolytech Journal*. 2025;29(2):284-296. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-2-284-296>. EDN: NXUUYM.

ВВЕДЕНИЕ

Производство цветных металлов является неотъемлемой частью российской экономики и во многом определяется ее конкурентоспособностью на мировом рынке [1].

Технический прогресс в области цветной металлургии развивается по пути совершенствования действующего производства, решения вопросов по охране окружающей среды, ведения разработок по утилизации техногенных отходов и повышения качества производимой продукции [2–7].

Также к настоящему времени богатые и легкообогатимые месторождения руд цветных металлов практически отработаны. В переработку вовлечено рудное сырье с низким содержанием ценных компонентов, труднообогатимое, тонковкрапленное, а также техногенное [8–10].

Одно из крупнейших месторождений в России – Удоканское – характеризуется огромными запасами богатых руд, что выдвигает его в качестве первоочередного объекта для освоения.

Основная масса руд Удоканского месторождения представлена на 87% кварцевидными песчаниками и довольно однообразна по составу пустой породы. Изменяется главным образом набор минералов меди, содержание и степень ее окисленности, которая условно делится на три технологических типа: сульфидные, смешанные, окисленные. Окисленные минералы меди представлены

хризокolloй, малахитом, брошантитом, купритом и азурином, а сульфидные минералы – халькозином, борнитом, ковеллином и халькопиритом.

Неравномерная и размытая структура рудных полей по минералам меди не позволяет организовать выборку руды по отдельным технологическим сортам и требует при валовой добыче организации усреднения перед их переработкой. Таким образом, при валовой выемке рудная шихта представлена смесью сульфидной, смешанной и окисленной сортов руд. По своему минеральному, фазовому и химическому составу такая руда соответствует смешанному типу руды, содержащему полный набор медных сульфидных и окисленных минералов, имеющему различную степень окисленности от 50 до 75%; содержание меди составляет от 1,1 до 4,0%; серебра – от 5,5 до 52 г/т; серы – от 0,2 до 2,0%; оксида углерода – от 0,25 до 2,8%.

Крепость по шкале Протодяконова – 12–16. Естественная влажность руды лежит в пределах 1–4%, вода находится в виде льда [11].

Сульфидные минералы преимущественно обладают крупностью в диапазонах 10–20 мкм и 20–38 мкм, степень раскрытия зерен 60–100%, часть зерен может иметь степень раскрытия до 10%.

Окисленные минералы преимущественно состоят из мелкодисперсных зерен. Максимальная крупность зерна может достигать

10 мкм, реже – 20–30 мкм. Большинство зерен имеет низкую степень раскрытия – до 10%.

Высокая степень окисленности руд, составляющих около половины его запасов, создает затруднения в разработке эффективных схем их переработки [9, 10].

Горно-металлургическая компания АО «Удоканская медь» перерабатывает смешанную руду Удоканского месторождения по флотационно-гидрометаллургической схеме с получением катодной меди и сульфидного медного концентрата. Особенности минерального состава руд Удоканского месторождения приводят к усложнению схемы обогащения, высокому расходу реагентов.

Технологическая схема АО «Удоканская медь» основана на проведении коллективной флотации предварительно подготовленной руды с получением суммарного коллективного концентрата (две операции коллективной флотации) с высоким выходом (21,2%) и извлечением (91,4%) меди при небольшом содержании (5,4%).

В дальнейшем концентрат направляется на гидрометаллургический передел – атмосферное выщелачивание, в результате которой окисленная медь выщелачивается и направляется в цикл экстракции/реэкстракции с последующим электролизом и получением катодной меди, а сульфидная медь уходит в кек, направляемый на нейтрализацию известью и затем в цикл сульфидной флотации с получением, соответственно, сульфидного концентрата. При этом выход кека, направляемого на сульфидную флотацию, составляет 91% (286,6 т меди/ч), в раствор при атмосферном выщелачивании переходит всего 28,3 т/ч меди.

При такой схеме очевидно, что имеет место большой расход серной кислоты, при этом более 70% из него идет на «паразитные» реакции с алюминием, железом и т.п. Кроме того, в цикл замкнуты слишком большие для столь низкого извлечения меди в раствор водные потоки, почти 1 тыс. м³/ч.

Раствор с атмосферного выщелачивания ранее (до исключения цикла экстракции) подавался на цикл экстракции, состоящий из трех стадий экстракции, стадии промывки

экстракта, двух стадий реэкстракции и контура двухстадийной контрольной жидкостной экстракции. На проведении экстракции по технологии необходимо подавать дорогостоящий импортный экстрагент AcorgaM577 с расходом около 1200 м³/год.

На сегодняшний момент предлагалось несколько решений, направленных на модернизацию существующей технологической схемы переработки Удоканского месторождения.

В работах⁹ [12] проводились исследования по разработке комплексной схемы переработки руд Удоканского месторождения введением предварительной серноокислотной обработки исходной руды с получением кека, который направлялся на сульфидную флотацию, и раствора, отправляемого на экстракцию. При предварительной серноокислотной обработке повышалось извлечение меди в сульфидный концентрат по сравнению с коллективным концентратом на 4–10%, т.е. до 92–95%, в цикле флотации снижался расход реагентов в связи с уменьшением его производительности и отказом от собирателей окисленной части⁹ [13]. Медный концентрат с содержанием меди 34,2% и серебра 702,0 г/т поступал на пирометаллургическое производство с получением катодной меди. Раствор с выщелачивания после фильтрации направлялся на экстракцию, после этого на электроэкстракцию, также с получением катодной меди. Отработанный электролит возвращался на выщелачивание руды. При такой схеме сквозное извлечение меди в катодную медь составило 93,8%.

В работах [14, 15] авторы предложили автоклавное выщелачивание, при котором происходило практически полное разложение сульфидов меди с переходом меди в раствор более чем на 92%, а благородные металлы оставались в твердой фазе. Медь из раствора предлагалось выделять в виде катодной меди, а золото и серебро из кека выщелачивания – цианированием.

Авторы [16] при переработке отвалов забалансовых смешанных медных руд в процесс измельчения вводили сульфат аммония и выщелачивали окисленные медные минералы с переходом меди в водорастворимые

⁹Крылова Л.Н. Физико-химические основы комбинированной технологии переработки смешанных медных руд Удоканского месторождения: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.13. М., 2008. 195 с.

медно-аммиачные комплексные соединения. Последующее флотационное обогащение позволило достаточно полно извлечь сульфидные медные минералы в медный концентрат с содержанием меди 29,9% при извлечении 46,41%. Отделение жидкой фазы от всех продуктов флотации позволило получить продуктивный раствор с содержанием меди 0,9 г/дм³ и тем самым извлечь в жидкую фазу 37,76% меди. Суммарное извлечение меди в медные продукты по комбинированной флотационно-гидрометаллургической схеме составило 84,17%. Дальнейшая переработка продуктивного раствора предполагалась ионообменными методами или экстракцией с последующим электролизом и получением катодной меди.

В работах [17–19] приведены исследования по оптимизации технологии переработки руд Удоканского месторождения путем стабилизации электродных потенциалов медных минералов по Eh. После стабилизации Eh и электрохимической обработки авторы предложили два цикла флотации: сульфидный и коллективный. В первом цикле получают сульфидный концентрат с содержанием меди 42,18; 31,02; 32,25% и извлечении меди 86,15; 86,5; 84,75% при флотации сульфидной, смешанной и окисленной руды соответственно. Во втором цикле на хвостах перечисток первого цикла получают смешанный концентрат при содержании меди 15,1; 15,0; 13,5% при извлечении 5,63; 4,96; 2,55% соответственно. Такой подход позволил более чем в два раза уменьшить время флотации, в зависимости от степени окисления руды, и сократить расход всех применяемых реагентов. Предложенная технология легко компонуется в производственных условиях, позволяет повысить технологические показатели процессов обогащения, снизить эксплуатационные затраты, отказаться от селективной выемки руды.

Сульфидный концентрат предложено перерабатывать пирометаллургическим методом с использованием одного из вариантов автогенной плавки, а смешанный медный концентрат можно эффективно переработать выщелачиванием солянокислыми растворами хлорного железа. Общее извлечение меди при такой схеме составит 99,2–99,5%.

Авторами данной статьи предлагается модернизация схемы с исключением цикла

экстракции, повышением показателей обогащения в цикле флотации, снижением расхода серной кислоты, упрощением технологической схемы и значительным снижением себестоимости получения флотоконцентрата и катодной меди.

Исходя из низкого содержания меди, в коллективном концентрате предлагается внедрить в схему две перечистные операции суммарного коллективного концентрата для достижения содержания в нем меди в районе 12–15% с возвратом хвостов первой перечистки в голову второй коллективной флотации для предотвращения переизмельчения материала, нагрузки на третью стадию измельчения и первую коллективную флотацию (относительно возврата хвостов первой перечистки в голову первой коллективной флотации).

Ввиду комплексности руды Удоканского месторождения (ценность имеют как медь, так и серебро), значительной мощности фабрики по исходной руде и крупности питания второй стадии обогащения флотацией на уровне 85% кл. -0,074 мм целесообразно рассмотреть возможность установки в операциях основной флотации и перечистных операций флотомашин типа реактор-сепаратор. Отечественной промышленностью в настоящее время выпускаются аналоги наиболее известных машин струйного типа (аналогов Jameson Cell), которые планируются к установке на рудах цветных и благородных металлов [20, 21].

Исходя из этого, актуальным является уточнение реагентного режима в части подбора наиболее эффективного собирателя окисленных форм меди, долевого отношения реагентов и суммарного расхода собирателей по операциям флотации и повышение содержания меди в суммарном коллективном концентрате до порядка 15% путем добавления двух перечисток. При этом главными критериями при оценке целесообразности использования аналогов импортного реагента будут являться эффективность обогащения по меди – не меньшая чем при фабричном реагентном режиме, а также не дефицитность (доступность в связи с производством на территории РФ).

В предлагаемой схеме включается подготовка сырья к выщелачиванию путем проведения сульфатизирующего обжига кон-

центрата в трубчатой вращающейся печи с выводом SO_2 на производство собственной серной кислоты. Поскольку степень окисленности используемой сейчас руды в основном достаточно высокая, то сульфатизирующий обжиг должен проходить достаточно стабильно и с приемлемой скоростью с получением преимущественно сульфатов меди, что доказано в результате проведения лабораторных испытаний. Положительными моментами включения в технологическую схему окислительного обжига являются низкая температура процесса, повышение скорости, полноты и селективности выщелачивания меди, существенно меньший расход серной кислоты при выщелачивании.

При проведении сульфатизирующего обжига небольшой процент серы будет переокисляться кислородом и выделяться в газовую фазу. Образующийся диоксид серы будет отводиться в систему очистки пылегазового потока, где в первой ступени проводится обеспыливание, а во второй – сорбция SO_2 с производством серной кислоты, направляемой в дальнейшем на атмосферное окислительное выщелачивание. Огарок окислительного обжига обрабатывается полученной серной кислотой с подачей воздуха, насыщенного кислородом для интенсификации выщелачивания меди и серебра. Выщелачивание проводят в мешалках, оснащенных системой подачи воздуха в пульпу барботажом в целях перевода серебра в раствор и, наоборот, осаждения железа. Пульпа после выщелачивания подается на сгущение и фильтрацию, и затем фильтрат направляется на электролиз меди, при этом для проведения электролиза достаточно содержания меди в фильтрате в районе 50–60 г/дм³. Кек после промывки и нейтрализации будет направляться в отвал.

Полученную в процессе электролиза катодную черновую серебросодержащую медь после проведения электролиза сдирают с осноров и направляют на переплав с разливом на аноды для дальнейшего электрорафинирования. При электрорафинировании получают чистую товарную медь с выделением серебра в анодный шлак: более электроотрицательные, чем медь, металлы (никель, ко-

бальт, цинк) переходят в электролит, а электроположительные (золото, серебро, селен, теллур, олово, свинец, сурьма) концентрируются в шламе. Анодный серебросодержащий шлак направляется на аффинажное производство. Отработанный электролит с электролиза направляется в оборот на атмосферное выщелачивание. Есть другой вариант выделения серебросодержащего продукта путем проведения атмосферного выщелачивания, вывода серебра в кек с дальнейшим проведением хлорирующего обжига последнего и с конденсированием серебросодержащего продукта возгонки, либо с проведением сорбционного цианирования кека.

Целью исследования является предложение альтернативной технологической схемы переработки руд Удоканского месторождения с исключением цикла экстракции и полным выводом меди в катодную медь как продукта с высокой добавленной стоимостью.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для флотации были использованы флотационные машины ФМП-Л1, ФМП-Л3 (производитель ООО «Вэктис Минералз»), объем камер 3, 0,7 и 0,5 л. Флотация велась на фабричном режиме, на I и II перемешках добавлялось натриевое стекло в количестве 200 и 100 г/т соответственно.

Обжиг сульфидного концентрата проводился в трубчатой вращающейся печи при температуре 750°C, частота вращения трубы – 2 об/мин, продолжительность процесса составляла 1 ч. Диоксид серы улавливался системой поглотителей путем пропускания газов с помощью аспиратора.

Сернокислотное выщелачивание велось с концентрацией серной кислоты 3 г/дм³, при Ж:Т, равном 5:1, температура процесса варьировалась в пределах 60–70°C, скорость перемешивания пульпы лопастной мешалкой – 200 об/мин. В процесс выщелачивания для интенсификации процесса в пульпу вводился воздух при помощи воздухоподогревателя с расходом 220 л/ч. Время процесса составило 2 ч.

Содержание железа, серебра и меди в фильтрате после выщелачивания определялись по ГОСТ 2642.5-2016¹⁰, ГОСТ

¹⁰ГОСТ 2642.5-2016. Огнеупоры и огнеупорное сырье. Методы определения оксида железа (III). Введ. 01.01.2017. М.: Стандартинформ, 2017.

3240.17-76¹¹ и ГОСТ 12561.1-78¹² соответственно.

Фазовые и элементные составы твердых продуктов определялись с помощью методов рентгенофазового (на рентгеновском дифрактометре XRD-6000 Shimadzu) и рентгеноспектрального (на автоматизированном волновом рентгенофлуоресцентном спектрометре ShimadzuXRF-1800) анализа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Отработка обогатительного цикла. По предлагаемой технологии были проведены тестовые (точечные) испытания для обоснования эффективности схемы (рис. 1). Необходимо отметить, что в работе не оптимизировались режимные параметры, и предполагается, что отработка схемы позволит существенно повысить показатели эффективности.

Оценку эффективности внедрения в цикл флотации двух перечисток проводили на пробе окисленной медной руды Удоканского месторождения с исходным содержанием меди 1,1%. Степень окисленности исследуемой пробы руды составляла порядка 74%. Согласно минеральному анализу, основное содержание меди находится в брошантите, содержание которого 4,17%. Также медь находится в сульфидах меди, содержание которых в районе 0,54% и малахите 0,54%. Стоит отметить наличие гипса в данной руде, содержание которого 1,13, что является высоким. Наличие гипса оказывает негативное влияние на процесс ввиду его способности частично адсорбировать некоторые реагенты, что в первую очередь проявляется в ухудшении пенообразования.

Исходя из актуальной работы обогатительной фабрики, смешанный концентрат 2 коллективных операций флотации перед операцией репульпации (питание репульпирования) имеет содержание меди порядка 5–5,5%.

Медь в полученном конечном концентрате, выход (γ) которого составил 2,5%, находится в основном в брошантите, содержание которого 26,5%. Также медь содержится в сульфидах меди – 1,95%, борни-

те – 6,64% и антлерите – 6,78%. Стоит отметить снижение содержание кварца с 54,3 до 35,5%.

Таким образом, включение в схему двух перечисток позволяет повысить содержание меди (β_{Cu}) в концентрате с 5 до 28,5%. Однако при этом зафиксировано снижение извлечения меди (ϵ_{Cu}) до 63,4%. Стоит отметить, что опыт проводился в открытом цикле, без возвращения хвостов в поток, а также было низкое качество исходной руды, 1,1% по меди. Для последующей операции обжига достаточно содержание меди в концентрате – от 10–15%. Таким образом, при отработке реагентного режима флотации можно повысить извлечение меди в концентрат при соответствующем снижении качества.

Можно рассмотреть несколько вариантов схемы обогащения данного типа руды:

1. Исключение второй перечистки при содержании в концентрате первой перечистки порядка 20% при извлечении 70–75%.

2. Корректировка фабричного реагентного режима без перечисток при извлечении в суммарный концентрат порядка 80–85% и содержания в нем меди до 10–15%.

3. Включение двух перечистных операций с целью высокой концентрации меди в нем до 30% и извлечении до 60%.

Отработка металлургического цикла. С целью наработки концентрата с высоким содержанием меди для последующей проработки предлагаемого металлургического цикла использовалась сульфидная руда с содержанием меди 2,5% и степенью окисленности в районе 50%. В результате проведения испытаний по двум коллективным операциям был получен объединенный коллективный концентрат с содержанием меди 12,2%. Фазовые составы наработанного концентрата, огарка и кека показаны в таблице.

Отмечается, что в концентрате степень окисленности составляет порядка 50%. По результату сульфатизирующего обжига был получен огарок с содержанием сульфатной и оксидной меди в районе 1:1, что подтверждает полноту проведения обжига. Выход огар-

¹¹ГОСТ 3240.17-76. Сплавы магниевые. Методы определения серебра. Введ. 01.01.1978. (изм. в июне 1987 г.). М.: Изд-во стандартов, 1987.

¹²ГОСТ 12561.1-78. Сплавы палладиево-серебряно-медные. Метод определения меди и серебра. Введ. 01.07.1979. М.: Изд-во стандартов, 1979.

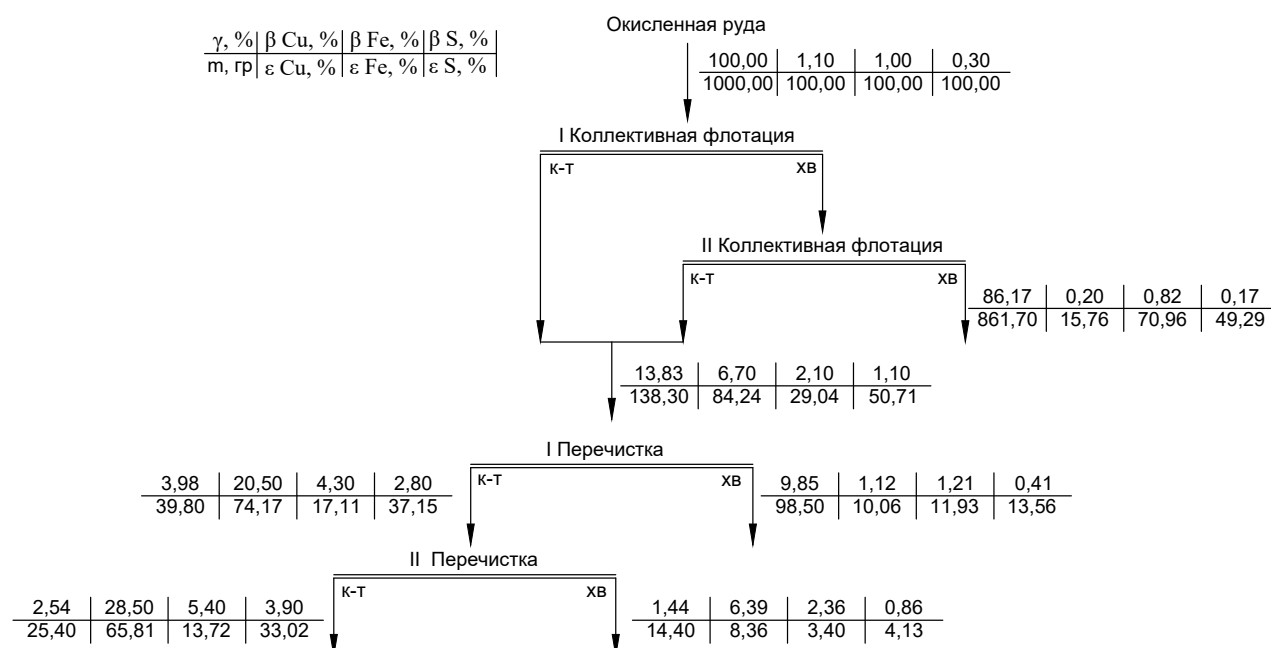


Рис. 1. Качественно-количественная схема тестового опыта: β – содержание компонента, %; ε – извлечение компонента, %; γ – выход продукта, %; m – масса продукта, г

Fig. 1. Material balance flowsheet of the test run: β – component grade, %; ε – component recovery, %; γ – product yield, %; m – product weight, g

Фазовый состав образцов, масс. %

Phase composition of samples, wt%

Формула	Минерал	Концентрат	Огарок	Кек
SiO_2	кварц	39,8	44	48,29
$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	альбит	11,2	10,4	12,88
KAlSi_3O_8	микроклин	8,31	4,11	8,57
$(\text{K}, \text{Na}, \text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}_{3,1}\text{Al}_{0,9}\text{O}_{10}(\text{OH})_2)$	мусковит	–	12,3	13,53
$\text{Cu}_4(\text{SO}_4)(\text{OH})_6$	брошантит	6,54	–	–
$\text{Cu}_3(\text{SO}_4)(\text{OH})_4$	антлерит	3,04	–	–
Cu_5FeS_4	борнит	7,44	–	–
$\text{Cu}_{1,8}\text{S}$	–	3,01	–	–
CuO	–	–	8,2	1,74
$\text{Cu}_2\text{O}(\text{SO}_4)$	долерофанит	–	9,01	0,40
Fe_2O_3	гематит	–	2,4	2,20
$\text{H}_2\text{KAl}_3(\text{SiO}_4)_3$	мусковит	16,5	–	–
CaSO_4	–	–	9,44	6,05
CaCO_3	–	4	–	–
$\text{Ca}(\text{SO}_4)_{0,5}\text{H}_2$	бассанит	–	–	6,01

ка ($W_{\text{ог}}$) при обжиге составил 754,5 кг/т концентрата, степень десульфуризации в районе 6,7% (рис. 2).

Сульфатизирующий обжиг и атмосферное выщелачивание с подачей в раствор

воздуха в режиме барботажа позволили извлечь 93% меди и 86,6% серебра при извлечении железа в раствор на уровне 40%. Выход кека ($W_{\text{к}}$) составил 645 кг/т огарка.

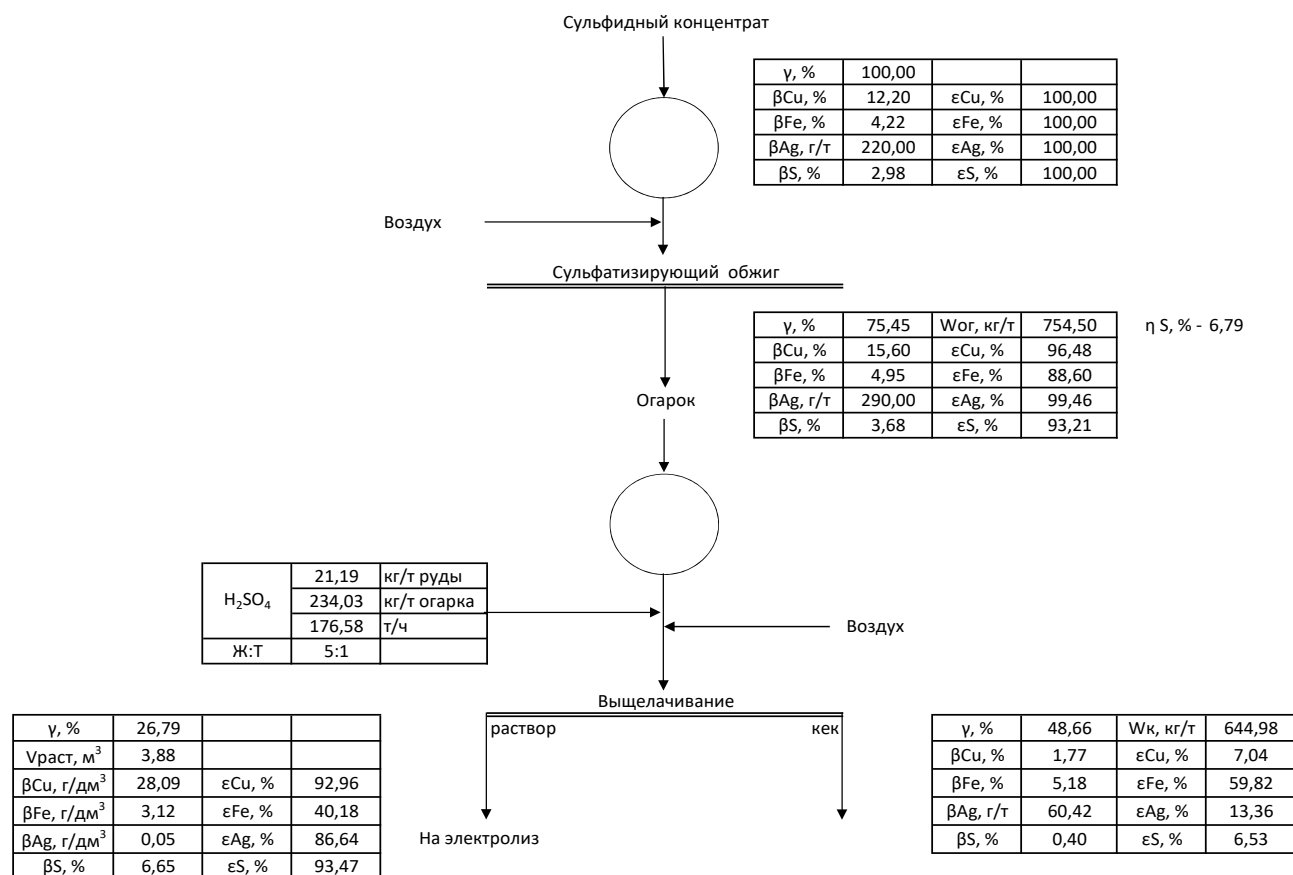


Рис. 2. Качественно-количественная схема металлургического цикла: W – выход продукта, кг; $V_{\text{раст}}$ – объем отфильтрованного раствора с выщелачивания, м³

Fig. 2. Material balance flowsheet of the metallurgical cycle: W – product yield, kg; $V_{\text{факт}}$ – volume of filtered leaching solution, m^3

Согласно фазовому анализу, преимущественно выщелочилась медь в виде сульфата, расход серной кислоты на выщелачивание составил 21,2 кг/т руды (см. рис. 2).

ОБСУЖДЕНИЕ

Планируемые показатели извлечения предлагаемой технологической схемы составляют 95–97% по меди и около 88–90% по серебру. Данная схема позволяет исключить передел экстракции, получить на выходе катодную медь и анодный шлам на аффинажное производство.

Экспериментально достигнуто извлечение железа в раствор при атмосферном выщелачивании на уровне 40%, оставшееся железо можно осадить гидролитически и получить железный купорос как товарный продукт.

В схему необходимо включать подготовку сырья к выщелачиванию путем проведения сульфатизирующего обжига концентрата в трубчатой вращающейся печи с выводом SO_2 на производство собственной серной кислоты. Поскольку степень окисленности ис-

пользуемой сейчас руды в основном достаточно высокая, то сульфатизирующий обжиг должен проходить достаточно стабильно и с приемлемой скоростью с получением преимущественно сульфатов меди, что доказано в результате проведения лабораторных испытаний. Положительными моментами включения в технологическую схему окислительного обжига являются низкая температура процесса, повышение скорости, полноты и селективности выщелачивания меди, меньший расход серной кислоты при выщелачивании.

Мощностей участка атмосферного выщелачивания будет достаточно, при этом высвободившееся оборудование позволит иметь резерв (60–80%) на случай увеличения производительности цикла флотации или выведения на внеплановые ремонты. Извлечение меди при выщелачивании составит до 95–97%. Кеки после выщелачивания можно подвергать дефлотации с получением вторичного концентрата, обогащенного серебром, либо проводить хлорирующий обжиг с получением конденсата, направляемого

го затем на аффинажное производство.

Возможно снижение Ж:Т пульпы, подаваемой на выщелачивание, это позволит поднять содержание меди в фильтрате до 60 г/дм³, что является оптимальным для проведения последующего электролиза.

При реализации схемы не потребуется значительной реконструкции, участок будет проще организовать на площадях участка экстракции, а его пропускная способность станет существенно выше.

Потребуется увеличение потребляемой мощности в два раза электролизных ванн и площадей участка электролиза либо их количества для переработки всего концентрата на катодную медь (продукт с высокой добавленной стоимостью). Возможна реализация участка переплава катодной меди на анодную с последующим проведением ее электрорафинирования и получением анодного серебросодержащего шлама.

Преимуществом указанной технологии является возможное значительное снижение потребления серной кислоты. Даже без вывода режимных параметров на оптимальные в предлагаемой технологической схеме, расход кислоты составит в районе 21,2 кг/т руды при существующем расходе более 25 кг/т руды. По технологии окислительно-сульфатизирующего обжига сульфидная сера окисляется и переходит в сульфатную, без эвакуации в газовую фазу. Также при обжиге частично железо в магнетите окисляется до гематита и не требует расхода кислоты на побочные реакции. При этом необходимо учитывать четырехкратное снижение объемов коллективного концентрата с повышением содержания ценного компонента. Кроме того, предлагаемая технология позволит организовать производство собственной серной кислоты, что позволит дополнительно снизить расходы на выщелачивание.

Оборудование и строительно-монтажные работы (СМР) для обжига не требуют ни больших затрат, ни строительства теплых зданий и цехов. Печи и газоочистные установки стоят на открытом воздухе и пригодны для использования при любой температуре. Реализация предлагаемой схемы может обеспечить извлечение меди и серебра не менее 98% с получением высококачественной катодной меди и значительно снизит энергоемкость данного производства.

Дополнительное преимущество данной схемы позволяет полностью уйти от процесса экстракции, получить экономию не только на серной кислоте, но и на экстрагенте, растворителе экстрагента, бентоните, очистке экстрагента, но также на автотранспорте и складской логистике.

По предварительной экономической оценке, годовая прибыль от реализации проекта составит свыше 3,5 млрд руб. при окупаемости проекта меньше года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена модернизация схемы переработки руд Удоканского месторождения с исключением цикла экстракции, повышением показателей обогащения в цикле флотации, снижением расхода серной кислоты, упрощением технологической схемы и значительным снижением себестоимости получения флотоконцентрата и катодной меди. Реализация схемы в промышленных условиях не потребует значительной реконструкции, участок гидрохимии легче организовать в здании участка экстракции. Пропускная способность участка гидрохимии будет существенно выше.

Преимуществом указанной технологии, согласно предварительной оценке, является значительное снижение потребления серной кислоты (с учетом потерь примерно в пять раз). Исключается участок экстракции/реэкстракции и потоки экстрагентов. По схеме не предусмотрено получение концентрата для продажи. Реализуется сразу схема с переработкой всего концентрата на катодную медь (продукт с высокой добавленной стоимостью). Оборудование и СМР для обжига не требуют ни больших затрат, ни строительства зданий и цехов. Печи стоят на открытом воздухе и пригодны для использования при любой температуре, как и пыле-газоочистное оборудование. Потребуется увеличение количества электролизных ванн примерно в два раза и, соответственно, энергетических мощностей электролизного отделения, организация участка переплава черновой меди на медные аноды, а также участка электрорафинирования. Реализация предлагаемой схемы может обеспечить извлечение меди и серебра не менее 98–99% с получением высококачественной катодной меди и позволит значительно снизить себестоимость данного производства.

Список источников

1. Сизяков В.М., Власов А.А., Бажин В.Ю. Стратегические задачи российского металлургического комплекса // Цветные металлы. 2016. № 1. С. 32–37. <https://doi.org/10.17580/tsm.2016.01.05>. EDN: VWTIRH.
2. Харченко Е.М., Ульява Г.А., Егорова Т.Г., Рахимбеков С.С. Переработка шлаков медеплавильного производства // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 7-1. С. 30–33. EDN: TVZOTL.
3. Котельникова А.Л. Исследование подвижности загрязняющих веществ при кислотном выщелачивании хвостов переработки медеплавильных шлаков // Инженерная экология. 2006. № 1. С. 54–62.
4. Sarfo P., Young Jamie, Ma Guojun, Young Courtney A. Characterization and recovery of valuables from waste copper smelting slag // Advances in Molten Slags, Fluxes, and Salts: Proceedings of the 10th International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts. Cham: Springer, 2016. P. 889-898. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48769-4_95.
5. Davenport W.G., King M.J., Schlesinger M.E., Biswas A.K. Extractive metallurgy of copper. Great Britain: Pergamon, 2002. 452 p.
6. Шнеерсон Я.М., Иванова Н.Ф. Применение автоклавных методов для рафинирования труднообогатимых медных полиметаллических концентратов // Цветные металлы. 2003. № 7. С. 63–67. EDN: QAEYGT.
7. Чантурия В.А. Инновационные процессы в технологиях переработки минерального сырья сложного вещественного состава // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № S15. С. 9–25. EDN: LAKAFD.
8. Манцевич М.И., Малинский Р.А., Лапшина Г.А., Херсонский М.И., Бочаров В.А., Игнаткина В.А. Комбинированные технологии переработки руд цветных металлов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № S15. С. 529–538. EDN: LAKBDJ.
9. Зиновьев Ю.И. Закономерности пространственного размещения окисленных руд Удоканского месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. № S4. С. 180–185. EDN: MUPCDH.
10. Сенченко А.Е., Куликов Ю.В., Аксенов А.В. Технологические особенности руд Удоканского месторождения меди, определяющие рациональную схему переработки, и перспективные направления совершенствования технологии // Цветные металлы. 2017. № 10. С. 105–120. <https://doi.org/10.17580/tsm.2017.10.04>. EDN: ZXAMRH.
11. Зиновьев Ю.И. Геохимические особенности сакуканских отложений и медных руд Удокана // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № S3. С. 63–68. EDN: LASVRH.
12. Денисов М.Э., Руднев Б.П., Крылова Л.Н., Кучмина Ю.С. Технология переработки медной руды Удоканского месторождения с предварительным сернокислотным выщелачиванием // Цветная металлургия. 2014. № 3. С. 25–30. EDN: TGWFEN.
13. Золотова Е.С., Рябинин В.Ф., Котельникова А.Л., Иванова Н.С. Оценка мобильности элементов из отходов переработки медеплавильных шлаков в лесные почвы // Литосфера. 2020. Т. 20. № 5. С. 717–726. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2020-20-5-717-726>. EDN: ZSABLA.
14. Зайцев П.В., Плешков М.А., Шнеерсон Я.М. Разработка автоклавной технологии переработки медно-золотого сырья // Золото и технологии. 2016. № 1. С. 157–167.
15. Лодейщиков В.В. Технология извлечения золота и серебра из упорных руд: в 2 т., т. 2. Иркутск: ОАО «Иргиредмет», 1999. С. 343-785.
16. Горлова О.Е., Шадрюнова И.В., Синянская О.М. Разработка комбинированной флотационно-гидрометаллургической неокислотной технологии переработки отвалов забалансовых медных руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 12. С. 157–167. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-12-0-151-167>. EDN: YOPAPJ.
17. Фатьянова А.В., Щеглова С.А. Оптимизация технологии переработки медных руд Удоканского месторождения // Вестник Забайкальского государственного университета. 2021. Т. 27. № 7. С. 33–40. <https://doi.org/10.21209/2227-9245-2021-27-7-33-40>. EDN: MMHGUF.
18. Лапшин Д.А., Простакишин М.Ф., Золотарев В.Н., Храмцова И.Н. Разработка технологии переработки руд Удоканского месторождения. Ч. 1. Лабораторные исследования по определению основных технических решений // Цветные металлы. 2014. № 8. С. 14–19. EDN: SNND RP.
19. Лапшин Д.А., Простакишин В.Н. Разработка технологии переработки руд Удоканского месторождения. Ч. 2. Особенности технологических свойств руд // Цветные металлы. 2015. № 2. С. 21–25. EDN: TNISPL.
20. Васюнина Н.В., Иванова И.К., Дружинин К.Е., Сысоева Я.С., Иванова И.К. Исследование возможности установки флотомашин струйного типа при обогащении медно-молибденовых руд // Металлургия цветных, редких и благородных металлов: сб. докл. XVI Междунар. конф. имени члена-корреспондента РАН Г.Л. Пашкова (г. Красноярск, 5–8 сентября 2023 г.). Красноярск: Красноярский краевой Дом науки и техники Российского союза научных и инженерных общественных объединений, 2023. С. 202–209. <https://doi.org/10.47813/sfu.mnfrpm.2023.202-209>.
21. Bennett D., Crnkovic I., Walker P. Recent process developments at the Phu Kham copper-gold concentrator, Laos // 11th AusIMM Mill Operators' Conference 2012 (Hobart, 29–31 October 2012). Hobart, 2012. P. 257–272.

References

1. Sizyakov V.M., Vlasov A.A., Bazhin V.Yu. Strategy tasks of the Russian metallurgical complex. *Tsvetnye metally*. 2016;1:32-37. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2016.01.05>. EDN: VWTIRH.

2. Kharchenko E.M., Ul'eva G.A., Egorova T.G., Rakhimbekov S.S. The copper smelting slag recycling production. *International Journal of Applied and Basic Research*. 2015;7-1:30-33. (In Russ.). EDN: TVZOTL.
3. Kotelnikova A.L. Investigation of the mobility of pollutants during acid leaching of tailings from the processing of copper smelting. *Inzhenernaya ekologiya*. 2006;1:54-62. (In Russ.).
4. Sarfo P., Young Jamie, Ma Guojun, Young Courtney A. Characterization and recovery of valuables from waste copper smelting slag. In: *Advances in Molten Slags, Fluxes, and Salts: Proceedings of the 10th International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts*. Cham: Springer; 2016, p. 889-898. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48769-4_95.
5. Davenport W.G., King M.J., Schlesinger M.E., Biswas A.K. *Extractive metallurgy of copper*. Great Britain: Pergamon; 2002, 452 p.
6. Shneerson Ya.M., Ivanova N.F. Using pressure oxidation methods for refractory copper polymetallic concentrate refining. *Tsvetnye metally*. 2003;7:63-67. (In Russ.). EDN: QAEYGT.
7. Chanturiya V.A. Innovated processes in refinement technologies for raw materials of complex minerals. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2009;S15:9-25. (In Russ.). EDN: LAKAFD.
8. Mantsevich M.I., Malinskiy R.A., Lapshina G.A., Hersonskiy M.I., Bocharov V.A., Ignatkina V.A. Integrated technologies of non-ferrous metals processing. *Mining informational and analytical bulletin*. 2009;S15:529-538. (In Russ.). EDN: LAKBDJ.
9. Zinoviev Yu.I. Regularities of Udokan deposit oxidized ore spatial distribution. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2007;S4:180-185. (In Russ.). EDN: MUPCDH.
10. Senchenko A.E., Kulikov Yu.V., Aksenov A.V. Process characteristics of Udokan copper deposit ores, defining the efficient processing flowsheet and prospective ways of the process improvement. *Tsvetnye metally*. 2017;10:105-120. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2017.10.04>. EDN: ZXAMRH.
11. Zinoviev Yu.I. Geochemical features of the Sakukan deposits and copper ores of Udokan. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2009;S3:63-68. (In Russ.). EDN: LASVRH.
12. Denisov M.E., Rudnev B.P., Krylova L.N., Kuchmina Yu.S. Technology of processing of copper ore Udokan deposit with preliminary sulfuric acid leaching. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2014;3:25-30. (In Russ.). EDN: TGWFEN.
13. Zolotova E.S., Ryabinin V.F., Kotelnikova A.L., Ivanova N.S. Assessment of element mobility from copper smelting waste slag into forest soils. *Lithosphere*. 2020;20(5):717-726. (In Russ.). <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2020-20-5-717-726>. EDN: ZSABLA.
14. Zaitsev P.V., Pleshkov M.A., Shneerson Ya.M. Development of autoclave technology for copper-gold raw material processing. *Zoloto i tekhnologii*. 2016;1:157-167. (In Russ.).
15. Lodeishchikov V.V. *Technology of gold and silver recovery from refractory ores*. Irkutsk: Irgiredmet; 1999, p. 343-785. (In Russ.).
16. Gorlova O.E., Shadrinova I.V., Sinyanskaya O.M. Development of a combined technology for nonacid flotation-hydrometallurgical processing of noneconomic copper ore stock piles. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2018;12:157-167. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-12-0-151-167>. EDN: YOPAPJ.
17. Fatyanov A.V., Shcheglova S.A. Optimization of the processing technology of copper ores of the Udokan deposit. *Transbaikal State University Journal*. 2021;27(7):33-40. (In Russ.). <https://doi.org/10.21209/2227-9245-2021-27-7-33-40>. EDN: MMHGUF.
18. Lapshin D.A., Prostakishin M.F., Zolotarev V.N., Khramtsova I.N. Technology development of the Udokan copper deposit. Part 1. Laboratory studies to determine the main technical solutions. *Tsvetnye metally*. 2014;8:14-19. (In Russ.). EDN: SNNDRP.
19. Lapshin D.A., Prostakishin V.N. Technology development of the Udokan copper deposit. Part 2. Features of ore technological properties. *Tsvetnye metally*. 2015;2:21-25. (In Russ.). EDN: TNISPL.
20. Vasyunina N.V., Burdakova E.A., Druzhinin K.E., Sisoeva Y.S., Ivanova I.K. Study of the possibility of installing jet flotation machines for the enrichment of copper-molybdenum ores. In: *Metallurgiya cvetnykh, redkikh i blagorodnykh metallov: sbornik dokladov XVI Mezhdunarodnoy konferencii imeni chlena-korrespondenta RAN G.L. Pashkova = Metallurgy of non-ferrous, rare and noble metals: collection of reports of 16th International Conference named after the Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences G.L. Pashkov*. 5–8 September 2023, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk: Scientific and Technology City Hall Krasnoyarsk; 2023, p. 202-209. (In Russ.). <https://doi.org/10.47813/sfu.mnfrpm.2023.202-209>.
21. Bennett D., Crnkovic I., Walker P. Recent process developments at the Phu Kham copper-gold concentrator, Laos. In: *11th AusIMM Mill Operators' Conference 2012*. 29–31 October 2012, Hobart. Hobart; 2012, p. 257-272.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Васюнина Наталья Валерьевна,

к.т.н., доцент,
доцент кафедры металлургии цветных металлов,
Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск,
Свободный просп., 79, Россия
✉ vvasyunina@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4334-3914>

Natalya V. Vasyunina,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Non-Ferrous Metals Metallurgy,
Siberian Federal University,
79 Svobodny pr., Krasnoyarsk 660041, Russia
✉ nvvasyunina@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4334-3914>

Дружинин Константин Евгеньевич,
ведущий инженер-металлург,
ООО «Индаст-ПРО»,
660025, г. Красноярск,
ул. Вавилова, 56/197, Россия
bearget@mail.ru

Бурдакова Екатерина Александровна,
к.т.н., доцент,
заведующий кафедрой обогащения
полезных ископаемых,
Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск,
Свободный просп., 79, Россия
kate-groo@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2167-7216>

Дубова Ирина Владимировна,
к.т.н., доцент,
доцент кафедры фундаментального
естественнонаучного образования,
Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск,
Свободный просп., 79, Россия
idubova@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3910-7513>

Бакшеев Сергей Пантелеймонович,
независимый исследователь,
Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск,
Свободный просп., 79, Россия
bsp77@yandex.ru

Иванова Ирина Константиновна,
инженер-исследователь,
ООО «Индаст-ПРО»
660025, г. Красноярск,
ул. Вавилова 56/197, Россия
irinaswix11@gmail.com

Богданов Евгений Вячеславович,
студент,
Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск,
Свободный просп., 79, Россия
bogdanov295@yandex.ru

Бакшеева Ирина Игоревна,
к.т.н., доцент,
доцент кафедры обогащения
полезных ископаемых,
Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск,
Свободный просп., 79, Россия
Irina_igorevna@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3838-7429>

Konstantin E. Druzhinin,
Lead Metallurgical Engineer,
Indast-PRO LLC,
56/197 Vavilova St., Krasnoyarsk
660025, Russia
bearget@mail.ru

Ekaterina A. Burdakova,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Head of the Mineral Processing Department,
Siberian Federal University,
79 Svobodny pr, Krasnoyarsk
660041, Russia
kate-groo@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2167-7216>

Irina V. Dubova,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Fundamental Science Education,
Siberian Federal University,
79 Svobodny pr., Krasnoyarsk
660041, Russia
idubova@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3910-7513>

Sergey P. Baksheev,
Independent Researcher,
Siberian Federal University,
79 Svobodny pr., Krasnoyarsk
660041, Russia
bsp77@yandex.ru

Irina K. Ivanova,
Research Engineer,
Indast-PRO LLC,
56/197 Vavilova St., Krasnoyarsk
660025, Russia
irinaswix11@gmail.com

Evgeniy V. Bogdanov,
Student,
Siberian Federal University,
79 Svobodny pr., Krasnoyarsk
660041, Russia
bogdanov295@yandex.ru

Irina I. Baksheeva,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the
Mineral Processing Department,
Siberian Federal University,
79 Svobodny pr., Krasnoyarsk
660041, Russia
Irina_igorevna@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3838-7429>

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.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 10.01.2025 г.; одобрена после рецензирования 17.02.2025 г.; принята к публикации 05.05.2025 г.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Information about the article

The article was submitted 10.01.2025; approved after reviewing 17.02.2025; accepted for publication 05.05.2025.

Уважаемые коллеги!

Мы приглашаем Вас к участию в нашем журнале в качестве авторов, рекламодателей и читателей и сообщаем требования к статьям, принимаемым к публикации

I. Рукопись статьи направляется в редакцию через online форму (после предварительной регистрации авторов). Рекомендуемый объем статьи не менее 20 000 знаков.

К статье прилагаются:

1. Экспертное заключение от аффилированной организации о возможности публикаций в открытой печати.
2. Лицензионный договор.
3. Название рубрики, в которой должна быть размещена Ваша статья; УДК; название статьи; реферат (аннотация), количество слов в реферате – не менее 200; ключевые слова (5–7); сведения об авторах: название учреждения, его адрес; фамилия, имя, отчество (полностью); ученая степень; звание и должность; контактный телефон, e-mail и ORCID (вся информация предоставляется одним файлом).

3. Статья должна иметь личную подпись автора; на статьях адъюнктов и аспирантов должна стоять также подпись научного руководителя.

II. **Текст статьи, сведения об авторах, реферат, ключевые слова, адрес учреждения, контактный телефон и E-mail** должны быть также представлены по электронной почте: pgp@istu.edu **в виде файла с расширением *.DOC** – документа, построенного средствами Microsoft Word 97 или последующих версий.

При наборе статьи в Microsoft Word рекомендуются следующие установки:

- 1) параметры страницы и абзаца: отступы сверху и снизу – 2 см; слева и справа – 2 см; табуляция – 2 см; ориентация – книжная;
- 2) шрифт – **Times New Roman**, размер – **12**, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;

3) при вставке формул использовать **Microsoft Equation 3** при установках: элементы формулы выполняются курсивом; для греческих букв и символов назначать шрифт **Symbol**, для остальных элементов – **Times New Roman**. Размер символов: обычный – 12 пт, крупный индекс – 7 пт, мелкий индекс – 5 пт, крупный символ – 18 пт, мелкий символ – 12 пт. Все экспликации элементов формул необходимо также выполнять в виде формул;

4) рисунки, вставленные в текст, должны быть выполнены с разрешением 300 dpi, B&W – для черно-белых иллюстраций, Grayscale – для полутонов, максимальный размер рисунка с надписью: ширина 150 мм, высота 245 мм и представлены в виде файла с расширением *.BMP, *.TIFF, *.JPG, должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. **Схемы, графики** выполняются во встроенной программе **MS Word** или в **MS Excel**, с приложением файлов (**представляемые иллюстрации должны быть четкими и ясными во всех элементах**);

- 5) библиографические ссылки должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ Р 7.05 2008.

Внимание! Публикация статьи является бесплатной.

«iPolytech Journal» включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, (Категория К-1) в DOAJ, международный каталог периодических изданий «UlrichsPeriodicals Directory», EBSCO, Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU), представлен в Научной электронной библиотеке «Киберленинка» (CYBERLENINKA), рассылается в Российскую книжную палату, ВИНТИ РАН.

Статьи, опубликованные в журнале «iPolytech Journal», реферируются и рецензируются.

Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям.

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 30.06.2025 г.
Формат 60х90/8.
Бумага офсетная. Печать трафаретная.
Усл. печ. л. 19.
Тираж 500 экз. Номер по реестру 48/3н.

Издание распространяется бесплатно



iPolytech Journal

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