

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

# iPolytech Journal

Tom **29**, № **4**. 2025 / Vol. **29**, No **4**. 2025



<https://ipolytech.elpub.ru>

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

# iPolytech Journal

Том 29, № 4. 2025 / Vol. 29, No. 4. 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](mailto:pgp@istu.edu)

## SCHOLARLY JOURNAL

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

Periodicity: Quarterly Articles are published in Russian and English.

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

(previously valid certificates:

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

ПИ No ФС77- 42847 of November 26, 2010,

ПИ No ФС77-47902 of December 22, 2011;

ПИ No ФС77-62813 of August 18, 2015).

### Founder and Publisher:

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

### Publishers:

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

### Editorial office:

83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation  
e-mail: [pgp@istu.edu](mailto: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)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**МЫЛМРИН 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)

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

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

**СУНЬ Хуалин**, профессор Цзянсуского университета (Чженьцзян, Китай)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**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)

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

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

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

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

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

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

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

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

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



## Содержание

---

### Машиностроение

---

- Громашев А.Г., Султанова А.Р.** Исследование процесса обработки отверстий в крупногабаритной конструкции со смешанными пакетами при сборке на модульном оборудовании (In Eng.) ..... 438
- Корж М.А., Перелыгина А.Ю., Савилов А.В.** Исследование влияния режимов сканирования на точность результатов и производительность процесса при контроле деталей сложной формы ..... 453
- Кузнецов В.П., Гончаров Д.С., Блинков О.Г., Шаркеев Ю.П.** Определение оптимального режима точения ультрамелкозернистых титановых сплавов системы TiNbZr методом Тагучи..... 466
- Пономарев Б.Б., Нгуен Ван Дык, Свинин В.М., Вулых Н.В., Димов Ю.В.** Выбор режимов резания в зависимости от прочности режущего инструмента..... 477
- Репецкий О.В., Нгуен Ван Мань.** Верификации созданных и применяемых конечноэлементных моделей и программ при расчёте ресурса конструкций лопаток турбомашин с учётом геометрической расстройки параметров ..... 492

### Энергетика

---

- Газизулин И.М., Дмитриев А.В., Русаков Г.Д., Бадретдинова Г.Р.** Комплексное исследование причин разрушения пенополиуретановой изоляции в системах теплоснабжения ..... 502
- Донской И.Г.** Задача теплового взрыва со стохастической границей: квазистационарное приближение и прямое численное моделирование (In Eng.) ..... 513
- Кажекин И.Е., Старостин Е.С.** Анализ высших гармоник напряжения на ранней стадии развития однофазных замыканий на землю в распределительных электрических сетях ..... 527
- Крюков А.В., Овечкин И.С.** Моделирование сложных повреждений в электрических сетях, примыкающих к тяговым подстанциям ..... 538
- Сигитов О.Ю., Суслов К.В.** Определение оптимальных мест строительства ветровых и солнечных электростанций в электроэнергетической системе ..... 550

### Металлургия

---

- Гринько С.Д., Файберг А.А., Епифоров А.В., Баликов С.В.** Переработка медноцианистых растворов с использованием сульфатредуцирующих бактерий ..... 567
- Ишимбаев А.В., Берсенев И.С., Груздев А.И., Спирин Н.А., Матюхин В.И., Торбеков Б.О., Мотыгулин И.А.** Теплофизические особенности брикетов, предназначенных для использования в качестве искусственной донной постели при производстве окатышей ..... 580

## Content

---

### Mechanical engineering

---

<b>Gromashev A.G., Sultanova A.R.</b> Machining of holes in a large hybrid structure during its assembly using modular equipment .....	438
<b>Korzh M.A., Perelygina A.Yu., Savilov A.V.</b> Accuracy and process performance in the inspection of complex geometry as a function of scanning parameters .....	453
<b>Kuznetsov V.P., Goncharov D.S., Blinkov O.G., Sharkeev Yu.P.</b> Optimization of turning parameters for ultrafine grained Ti–Nb–Zr alloys using the Taguchi method .....	466
<b>Ponomarev B.B., Nguyen Van Duc, Svinin V.M., Vulykh N.V., Dimov Yu.V.</b> Selection of cutting parameters based on tool strength .....	477
<b>Repetskii O.V., Nguyen Van Manh.</b> Turbomachine blade life assessment with geometric mistuning.....	492

### Power engineering

---

<b>Gazizullin I.M., Dmitriev A.V., Rusakov G.D., Badretdinova G.R.</b> Polyurethane foam insulation: Causes of failure in district heating systems.....	502
<b>Donskoy I.G.</b> Thermal explosion problem with a stochastic boundary: quasi-stationary approximation and direct numerical modelling .....	513
<b>Kazhekin I.E., Starostin E.S.</b> Analysis of higher voltage harmonics at an early stages of single line-to-ground faults in electrical distribution grids .....	527
<b>Kryukov A.V., Ovechkin I.S.</b> Modeling of complex faults in electrical grids connected to traction substations.....	538
<b>Sigitov O.Yu., Suslov K.V.</b> Optimal siting of wind and solar power plants in an electric power system.....	550

### Metallurgy

---

<b>Grinko S.D., Faiberg A.A., Epiforov A.V., Balikov S.V.</b> Treatment of copper cyanide solutions with the use of sulfate-reducing bacteria .....	567
<b>Ishimbaev A.V., Bersenev I.S., Gruzdev A.I., Spirin N.A., Matyukhin V.I., <u>Matyukhin V.I.</u>, Torobekov B.O.</b> Thermophysical properties of briquettes intended for use as an artificial bottom bed in iron ore pelletizing.....	580



## Уважаемые читатели!

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

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

«iPolytech Journal» реферируется и рецензируется

Приглашаем вас к активному творческому сотрудничеству  
по научным направлениям:

- **Машиностроение**

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

- **Энергетика**

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

- **Металлургия**

- 2.6.2. Металлургия черных, цветных и редких металлов

Редколлегия

## Dear Readers!

We would like to bring to your attention 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, is included to the Unified State List of Scientific publications - the "White List" (Level 2).

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

The journal "iPolytech Journal" is abstracted and reviewed

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

- **Mechanical Engineering**

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

- **Power Engineering**

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

- **Metallurgy**

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

**Editorial Board**





## Machining of holes in a large hybrid structure during its assembly using modular equipment

Andrey G. Gromashev<sup>1</sup>, Albina R. Sultanova<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup>AeroComposit JSC, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Ural Civil Aviation Plant JSC, Moscow, Russia

**Abstract.** The study aimed to examine a technology for machining holes with an automatic drilling machine during the assembly of a large hybrid structure (polymer composite material + metal) with the use of modular equipment. In order to analyze the process of hole machining in large structures during their assembly, a wing box model measuring 17,765x3050x438 mm was assembled to simulate a civil aircraft wing box—a test wing box. The used modular equipment provides a geometric position accuracy of 0.5 mm in hole machining. In order to machine holes using an automatic drilling machine, a hole machining map was created. This map details key hole parameters such as hole diameter, hole accuracy, hole center coordinates, and hole axis direction, as well as material layers. To align the automatic drilling machine with a large structure, the map of holes to be machined should be divided into areas (in the case of long parts, into subareas). It was found that the technology for machining holes with numerically controlled automatic drilling machines using a combination tool allows holes to be machined in large hybrid structures to their final diameter in one or two passes, ensuring a geometric position accuracy of 0.5 mm. The study of hole machining in large structures revealed that in order to achieve a geometric position accuracy of 0.5 mm in automatic hole machining, long parts should be divided into subsections of no longer than 1 m. The overall length of the reference zone for the automatic drilling machine was determined. The obtained results can be used to optimize hole machining in large structures in aviation, shipbuilding, and other industries.

**Keywords:** polymer composite material, mixed stack, large-sized structure, modular assembly technology, hole machining, automated drilling machine with numerical control

**For citation:** Gromashev A.G., Sultanova A.R. Machining of holes in a large hybrid structure during its assembly using modular equipment. *iPolytech Journal*. 2025;29(4):438-452. (In Eng.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-4-438-452>. EDN: DSSHNM.

### ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 629.735.3

## Исследование процесса обработки отверстий в крупногабаритной конструкции со смешанными пакетами при сборке на модульном оборудовании

А.Г. Громашев<sup>1</sup>, А.Р. Султанова<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup>АО «АэроКомпозит», Москва, Россия

<sup>2</sup>АО «Уральский завод гражданской авиации», Москва, Россия

**Резюме.** Цель работы – исследование технологии обработки отверстий, выполненных с помощью автоматизированной сверлильной машины, при сборке крупногабаритной конструкции со смешанными пакетами (полимерный композиционный материал + металл) на модульном оборудовании. Для исследования процесса обработки отверстий в крупногабаритной конструкции при сборке на модульном оборудовании был собран образец кессона габаритами 17765x3050x438 мм, имитирующий кессон крыла гражданского самолета – тестовый кессон. Используемое модульное оборудование обеспечивает достижение точности геометрического положения выполняемых отверстий 0,5 мм. Для обработки отверстий с помощью автоматизированной сверлильной машины была составлена карта обработки отверстий. В карте обработки отверстий отражены ключевые параметры отверстий, такие как диаметр отверстия, точность отверстия, координаты положения центра отверстия, направление оси отверстия, слои в пакете. Для привязки автоматизированной сверлильной машины к круп-

ногабаритной конструкции карту обработки отверстий необходимо делить на зоны, а в случае длинномерных деталей – на подзоны. Выявлено, что технология обработки отверстий на автоматизированных сверлильных машинах с числовым программным управлением с помощью комбинированного инструмента позволяет обрабатывать отверстия окончательного диаметра за один-два перехода в крупногабаритных конструкциях со смешанными пакетами, обеспечивая точность геометрического положения рассверливаемого отверстия 0,5 мм. На основании полученных результатов по исследованию обработки отверстий в крупногабаритной конструкции выявлено, что для достижения точности геометрического положения выполняемых отверстий 0,5 мм длинномерные детали необходимо делить на подзоны длиной не более 1 м для автоматизированной обработки отверстий. Определен габаритный размер длины зоны привязки для автоматизированной сверлильной машины. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации технологических процессов при обработке отверстий в крупногабаритных конструкциях в авиационной, судостроительной и других отраслях промышленности.

**Ключевые слова:** полимерный композиционный материал, смешанный пакет, крупногабаритная конструкция, технология модульной сборки, обработка отверстий, автоматизированная сверлильная машина с числовым программным управлением

**Для цитирования:** Громашев А.Г., Султанова А.Р. Исследование процесса обработки отверстий в крупногабаритной конструкции со смешанными пакетами при сборке на модульном оборудовании // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 4. С. 438–452. (In Eng.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-4-438-452>. EDN: DSSHNM.

## INTRODUCTION

The current development of aviation is leading to the increasingly widespread use of polymer composite materials (PCM) in the structures of aerospace equipment [1, 2]. This is easily explained by a number of advantages offered by PCM structures<sup>3</sup> [3–5].

Alongside parts manufactured from PCM, parts made from metal alloys are also used. These are predominantly aluminum and titanium alloys. The joining of PCM parts with parts made from metal alloys is referred to as a mixed stack. The primary difficulty in joining such stacks with mechanical fastening elements (bolts, bolt-rivets) lies in the different requirements for the hole-making technology for these fasteners [6–16]. These differences are due to the dissimilar internal properties of the materials in the parts that make up the mixed stack. In most cases, the only feasible method for joining PCM+metal structures is the installation of fasteners into pre-machined holes of the final diameter.

The reliability of these joints depends primarily on the hole surface quality parameters and the accuracy of their geometric position in the parts being joined. Consequently, the process of hole machining in PCM parts and their structural combinations with metal parts requires special attention and constitutes a significant portion of the overall labor intensity of the assembly process [17–19].

The technology of hole production using automated CNC drilling machines allows for the machining of final diameter holes in one or two operations in large-sized structures with mixed stacks. This is achieved using combined tools, following a pre-programmed machining route to ensure the specified accuracy [20, 21].

## OBJECTIVE

The objective of this work is to investigate the technology of hole machining using an automated drilling machine during the assembly of a large-sized structure with mixed stacks (PCM + metal) on modular equipment. This technology ensures the achievement of a geometric position accuracy of 0.5 mm for the machined holes.

## MATERIALS AND METHODS

To study the hole machining process in a large-sized structure during its assembly on modular equipment, a wing box sample with dimensions of 17765 x 3050 x 438 mm was assembled. This sample, referred to as the test wing box (Fig. 1), simulates a civil aircraft wing box [22–24].

Holes with a diameter of 3.1 mm were initially made in the transverse frame parts. These holes will subsequently serve as reference holes and holes for the installation of temporary fasteners during further assembly operations (Fig. 2).

<sup>3</sup>Ivanov Yu.N., Chashchin N.S., Starodubtseva D.A., Isachenko A.S., Koval A.P., Zenin K.P., et al. *Design and manufacture of products from composite materials*: textbook. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2023. 132 p. (In Russ.). EDN: ZCWNTJ./ Иванов Ю.Н., Чашин Н.С., Стародубцева Д.А., Исаченко А.С., Коваль А.П., Зенин К.П. [и др.]. *Проектирование и производство изделий из композиционных материалов*: учеб. пособ. Иркутск: ИрНТУ, 2023. 132 с. EDN: ZCWNTJ.



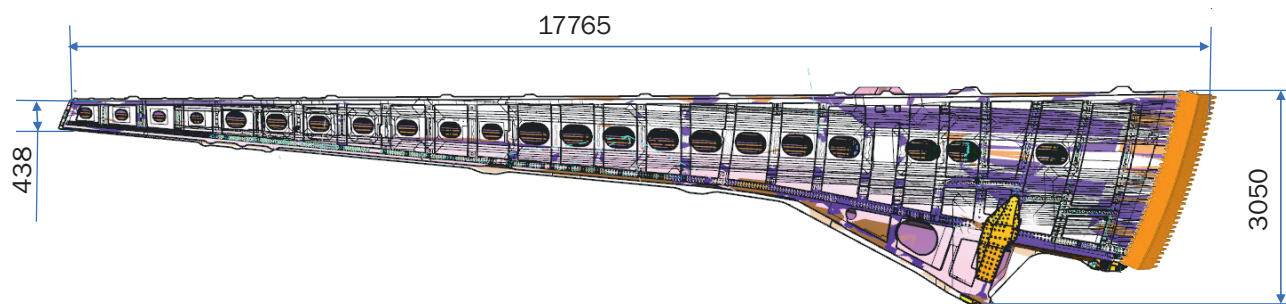
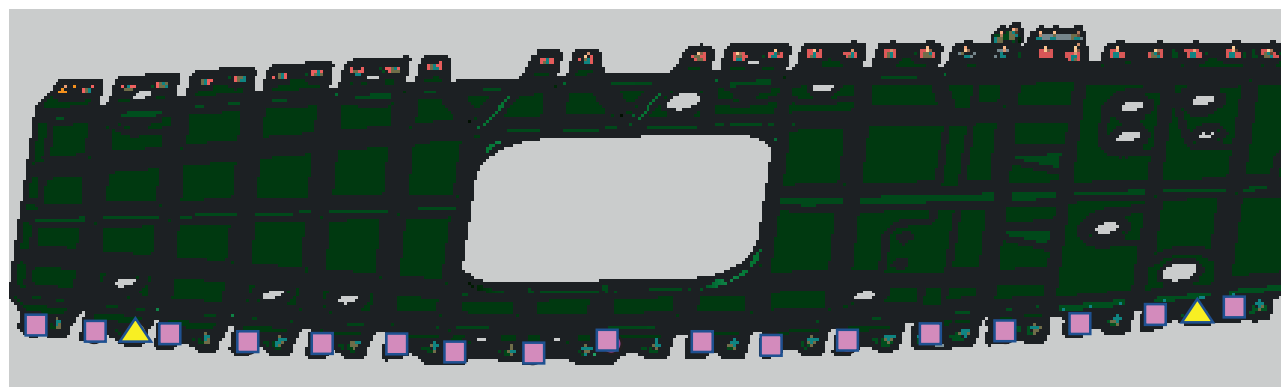


Fig. 1. Test wing box

Рис. 1. Тестовый кессон



▲ – reference holes

■ – holes for the installation of temporary fasteners

▲ – Базовые отверстия

■ – Отверстия для установки тех. крепежа

Fig. 2. Example of a layout for reference holes and holes for temporary fasteners in a transverse frame part

Рис. 2. Пример схемы выполнения базовых отверстий и отверстий под технологический крепеж в поперечной детали кессона

Through these holes, the holes were sequentially drilled—first into the upper panel and then into the lower panel—using manual power tools. Subsequently, they were drilled out from the side of the outer theoretical contour to the required diameter of 4 mm, and in the root zone, to a diameter of 6 mm. Then, temporary fasteners were installed in the corresponding holes.

Subsequently, all holes in the test wing box were drilled using an automated drilling machine (Fig. 3).

### HOLE MACHINING MAP

A hole machining map was created for the test wing box, and the coordinates of the holes to be machined were defined (Fig. 4) to study the hole machining process in a large-sized structure with mixed stacks.

The hole machining map documents basic hole parameters, such as hole diameter, hole tolerance, the coordinates of the hole center position, the hole axis direction, and the layers within the stack. A fragment of the hole machining map is presented in Table 1.



Fig. 3. Automated drilling machine with numerical control

Рис. 3. Автоматизированный сверлильный станок с числовым программным управлением

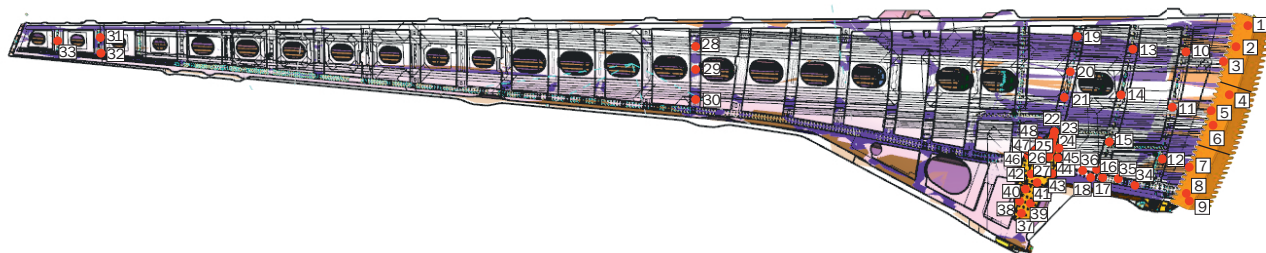


Fig. 4. Schematic diagram of the hole machining map for the test wing box

Рис. 4. Схематическая карта обработки отверстий в тестовом кессоне

Table 1. A fragment of the hole machining map

Таблица 1. Фрагмент карты обработки отверстий

Point Number	Diameter, mm	The coordinates of the hole center position, mm			The hole axis direction			Stack
		X	Y	Z	X	Y	Z	
1	14	2337.03	-1390.28	-1963.71	0.2844	0.9061	0.3131	Ti+PCM+Ti+Al
2	14	2701.15	-1477.10	-2009.32	0.2235	0.9282	0.2974	Ti+PCM+Ti
3	14	2725.67	-1496.00	-2067.61	0.2106	0.9323	0.2941	Ti+PCM+Ti
4	14	3487.99	-1613.89	-1945.57	0.0973	0.9593	0.2650	Ti+PCM+Ti
5	14	3463.91	-1614.55	-2054.23	0.0868	0.9610	0.2625	Ti+PCM+Ti
...	...	...	...	...	...	...	...	...
15	7.94	4696.71	-1341.54	-3229.84	-0.0373	0.9748	0.2201	PCM+Al
16	12.7	5198.63	-1306.25	-3491.97	-0.0876	0.9743	0.2075	PCM+Ti+Al
17	12.7	5204.49	-1304.43	-3462.70	-0.0949	0.9740	0.2058	PCM+Ti+Al
...	...	...	...	...	...	...	...	...
47	7.94	4969.03	-1177.54	-3948.35	-0.0730	0.9770	0.2002	Ti+PCM
48	7.94	5059.48	-1156.67	-4023.91	-0.0715	0.9768	0.2017	Ti+PCM

## REFERENCING

For the automated machining of holes, the CNC drilling machine must be referenced to base geometric elements, which define the position and rotation angles of the drilling spindle.

When machining holes in large-sized structures, the traditional method of positioning the CNC drilling machine from the origin of a single theoretical coordinate system cannot be implemented for two reasons:

a) It does not account for the actual position of the structural elements;

b) As the spindle moves away from the machine's "zero" point, the magnitude of the tool positioning error at the drilling point accumulates. Consequently, the total error may exceed the specified positional tolerance for the hole.

To minimize the tool positioning error at the drilling point, the structure being machined is divided into separate sections – hole machin-

ing zones – each with its own local coordinate system that accounts for local specificities. As a result of this division of the large-sized structure, the spindle position error accumulates only within each individual hole machining zone, and the accumulated error within a zone is guaranteed to remain within the hole's positional tolerance.

One method to create a coordinate system within a local hole machining zone is to align three specially selected points (the actual point cloud) in the zone with three corresponding theoretical points (the theoretical point cloud). This allows the machine to "enter" the local coordinate system of the hole machining zone.

The process of moving and rotating the actual point cloud to achieve its best (optimal) alignment with the theoretical point cloud is called roto-translation (from the English words "rotation" and "translation").

The roto-translation process requires at least three points, each with its own specific geometric requirements:

*Master* – Defines the coordinate origin (zero). This is a point (hole) with the most stringent accuracy requirements.

*Slave* – Defines the direction of the coordinate system's X-axis, i.e., the Slave point lies on the OX axis.

*Roto* – Defines the rotation angle of the coordinate system plane relative to the defined axis above, i.e., the Roto point does *not* lie on the OX axis but lies on the XOZ plane.

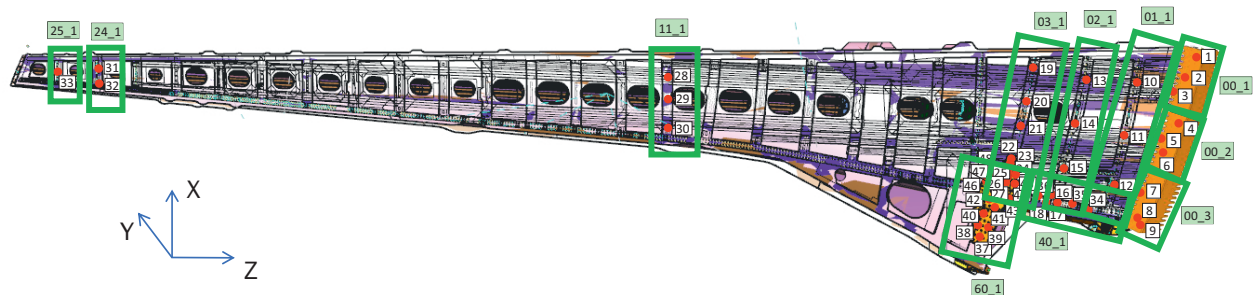
By sequentially performing the roto-translation process, the drilling head – and conse-

quently the CNC drilling machine – is referenced to a group of holes within the machining zone on the assembled wing box.

**HOLE MACHINING ZONES**

Following the logic above, the hole machining map is divided into hole machining zones (Fig. 5). For each zone, the coordinates of the reference holes are added to the coordinates of the holes to be machined (Table 2).

For ease of use, the first two digits of the zone numbering correspond to the number of the rib located within that zone. The rear spar and the traverse beam have their own numbering (Table 2).



**Fig. 5.** Schematic diagram of the hole machining zones in the test wing box  
**Рис. 5.** Схема расположения зон обработки отверстий в тестовом кессоне

**Table 2.** A fragment of the hole machining map with zone division  
**Таблица 2.** Фрагмент схемы обработки отверстий с разделением по зонам

Zone Number	Point Number	Functionality	Diameter, mm	The coordinates of the hole center position, mm			Stack
				X	Y	Z	
00_2	104	Master	5	3265.10	-1592.38	-2057.63	Ti+PCM+Ti
	105	Slave	5	3740.25	-1634.93	-2048.73	Ti+PCM+Ti
	106	Roto	5	3150.67	-1607.83	-1960.13	Ti+PCM+Ti
	4	Обработка	14	3487.99	-1613.89	-1945.57	Ti+PCM+Ti
	5	Обработка	14	3463.91	-1614.55	-2054.23	Ti+PCM+Ti
	6	Обработка	14	3511.03	-1603.75	-1995.61	Ti+PCM+Ti
11_1	119	Master	5	6015.33	-444.71	-8641.05	PCM+Al
	120	Slave	5	6312.93	-466.99	-8596.64	PCM+Al
	121	Roto	5	5824.57	-426.06	8456.11	PCM
	28	Обработка	6.35	6119.39	-365.90	-8902.64	PCM+Al
	29	Обработка	6.35	6412.90	-391.02	-8783.49	PCM+Al
	30	Обработка	6.35	6693.07	-395.42	-8666.88	PCM+Al
40_1	128	Master	5	5014.13	-1446.23	-2648.28	PCM+Ti
	129	Slave	5	5260.88	-1233.99	-3528.08	PCM+Ti
	130	Roto	5	5197.39	-1324.61	-3120.77	PCM+Ti
	34	Обработка	14.29	5089.93	-1413.38	-2761.27	PCM+Ti
	35	Обработка	14.29	5133.97	-1346.73	-3048.69	PCM+Ti
	36	Обработка	14.29	5198.34	-1283.36	-3318.83	PCM+Ti

Since during assembly, parts can be displaced relative to each other and relative to their theoretical position, it is necessary to determine the actual position of each part. This means that for each part (with a potential displacement), the roto-translation operation must be performed, and it must be designated as a separate zone.

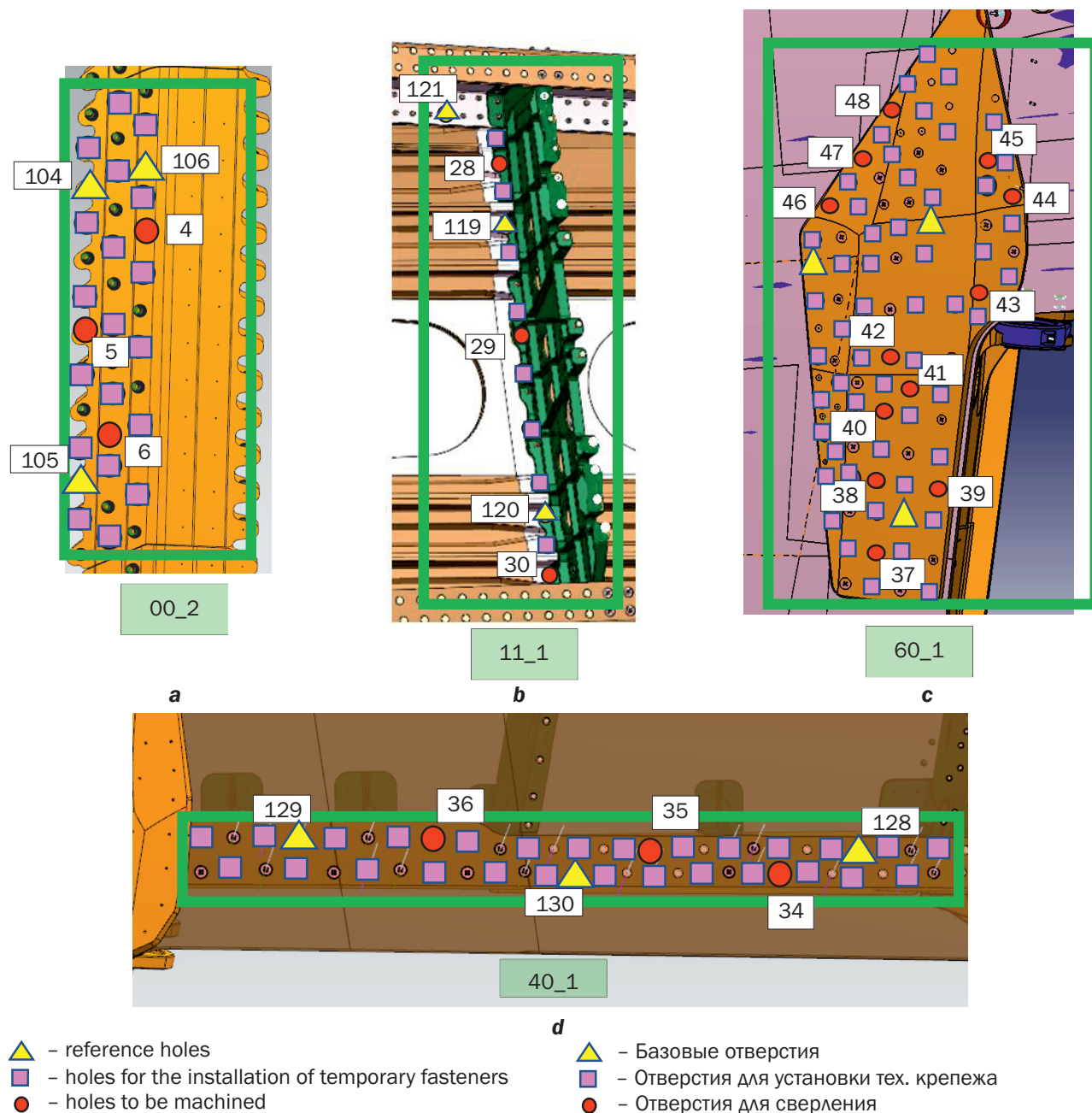
The arrangement of reference holes, holes for temporary fasteners, as well as

holes to be machined in typical zones is shown in Fig. 6.

### EXPERIMENTAL PLAN

The sequence of actions for investigating the hole machining process during assembly on modular equipment:

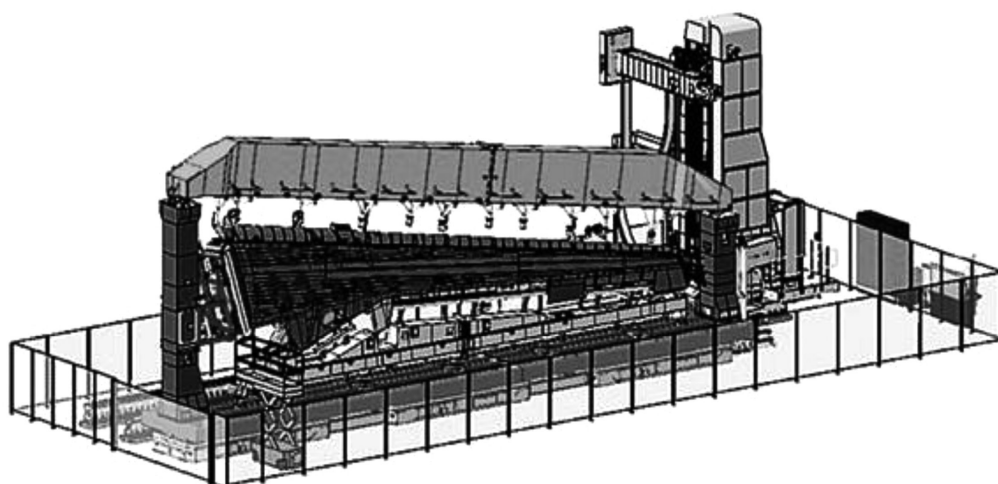
1. Position the assembled test wing box for drilling using an automated CNC drilling machine (Fig. 7).



**Fig. 6.** Typical hole machining zones in the test wing box: a – for rib 0 splice plate; b – for ribs; c – for the traverse beam; d – for the rear spar cap

**Рис. 6.** Типовые зоны обработки отверстий в тестовом кессоне: а – для накладок бортовой нервюры; б – для нервюры; с – для балки траверсы; д – для пояса заднего лонжерона





**Fig. 7.** Hole machining on an automated drilling machine with numerical control

**Рис. 7.** Обработка отверстий на автоматизированном сверлильном станке с числовым программным управлением

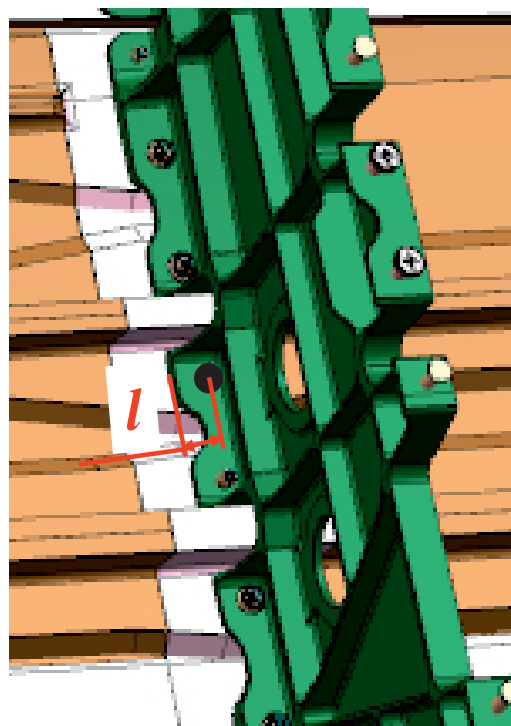
2. Machine the holes using a pre-prepared hole machining program with specified operating parameters, employing either a combination drill (drill with countersink) or a drill and a combination reamer (reamer and countersink).

3. Measure the position of the machined holes relative to the part edge on the frame elements (Fig. 8).

4. Analyze the results.

**Experiment on Determining the Dimensions of the Reference Zone for Long-Measuring Parts.** Based on the results of the investigation into hole machining in the large-sized structure, and in accordance with the methodology described above, it follows that to achieve a geometric position accuracy of the machined holes of 0.5 mm, long-measuring parts must be divided into sub-zones for hole machining.

**Samples for the Investigation.** In studying the hole machining technology for the large-sized structure to determine the overall length of the reference zone, samples used were ribs No. 1, 2, and 3, which are long-measuring parts. These ribs were divided into sub-zones according to Table 3.



**Fig. 8.** Minimum distance from hole to part edge (l)

**Рис. 8.** Минимальное расстояние от отверстия до обреза детали (l)

Based on the data from Table 1, a new hole machining map was created (Table 4).

**Table 3.** Zoning of long-measuring ribs

**Таблица 3.** Деление на зоны длинномерных нервюр

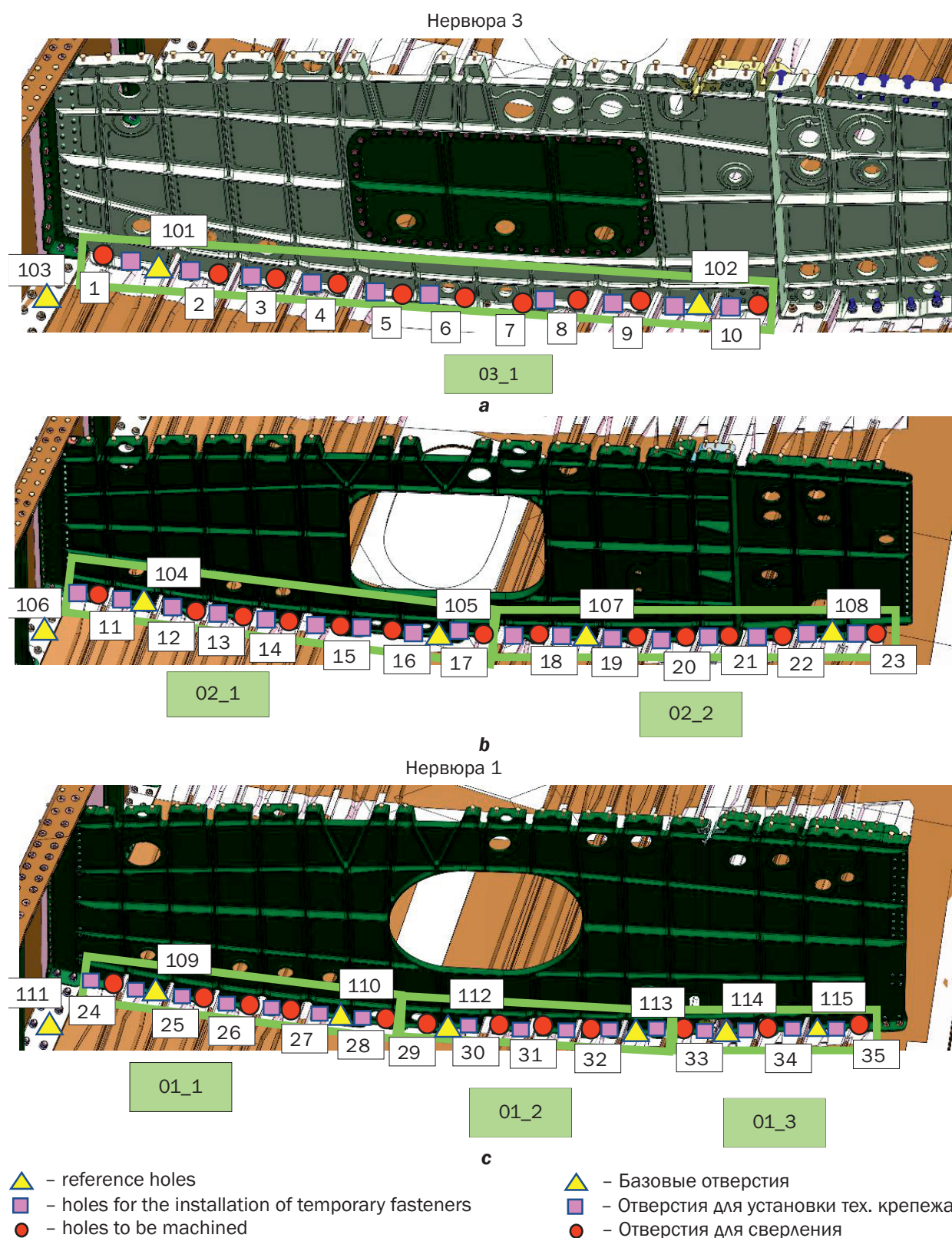
Rib Number	Number of Zones	Length of zone, mm
3	1	1500
2	2	1200; 1050
1	3	900; 800; 700

**Table 4.** Hole machining map with zone division for determining the reference zone length dimensions**Таблица 4.** Карта обработки отверстий с разбивкой на зоны для определения габаритного размера длины зоны

Zone Number	Point Number	Functionality	Diameter, mm	The coordinates of the hole center position, mm			Stack
				X	Y	Z	
03_1	101	Master	5	3522.61	-1060.62	-4063.80	PCM+AI
	102	Slave	5	4689.81	-1183.83	-3942.30	PCM+AI
	103	Roto	5	3298.19	-1033.07	-3987.10	PCM
	1	Machining	7.94	3392.85	-1030.09	-4074.10	PCM+AI
	2	Machining	7.94	3652.73	-1087.68	-4051.37	PCM+AI
	3	Machining	7.94	3779.77	-1110.26	-4039.38	PCM+AI
	4	Machining	7.94	3908.82	-1129.50	-4027.44	PCM+AI
	5	Machining	7.94	4058.24	-1147.91	-4012.23	PCM+AI
	6	Machining	7.94	4191.04	-1161.56	-3995.52	PCM+AI
	7	Machining	7.94	4310.00	-1171.08	-3980.64	PCM+AI
	8	Machining	7.94	4426.28	-1176.81	-3971.32	PCM+AI
	9	Machining	7.94	4557.11	-1181.68	-3956.56	PCM+AI
	10	Machining	7.94	4818.89	-1183.65	-3927.25	PCM+AI
02_1	104	Master	5	3143.06	-1175.24	-3391.10	PCM+AI
	105	Slave	5	3767.98	-1295.00	-3331.62	PCM+AI
	106	Roto	5	2922.09	-1157.23	-3268.92	PCM
	11	Machining	7.94	3077.33	-1157.31	-3397.81	PCM+AI
	12	Machining	7.94	3337.73	-1221.49	-3373.51	PCM+AI
	13	Machining	7.94	3464.88	-1247.01	-3362.01	PCM+AI
	14	Machining	7.94	3593.40	-1269.45	-3349.78	PCM+AI
	15	Machining	7.94	3728.55	-1289.55	-3336.50	PCM+AI
	16	Machining	7.94	3862.83	-1306.20	-3322.55	PCM+AI
	17	Machining	7.94	3992.94	-1319.30	-3308.36	PCM+AI
02_2	107	Master	5	4376.12	-1340.72	-3267.06	PCM+AI
	108	Slave	5	5020.24	-1327.56	-3191.65	PCM+AI
	106	Roto	5	2922.09	-1157.23	-3268.92	PCM
	18	Machining	7.94	4112.51	-1328.35	-3296.54	PCM+AI
	19	Machining	7.94	4243.57	-1335.85	-3282.10	PCM+AI
	20	Machining	7.94	4507.62	-1343.05	-3251.26	PCM+AI
	21	Machining	7.94	4634.15	-1342.46	-3237.64	PCM+AI
	22	Machining	7.94	4750.95	-1341.28	-3218.58	PCM+AI
	23	Machining	7.94	4891.38	-1334.75	-3207.23	PCM+AI
01_1	109	Master	5	2889.36	-1327.69	-2706.56	PCM+AI
	110	Slave	5	3353.53	-1427.38	-2664.52	PCM+AI
	111	Roto	5	2556.72	-1290.32	-2547.76	PCM
	24	Machining	7.94	2758.59	-1290.97	-2718.28	PCM+AI
	25	Machining	7.94	2958.48	-1345.45	-2700.45	PCM+AI
	26	Machining	7.94	3088.72	-1376.07	-2688.63	PCM+AI
	27	Machining	7.94	3221.49	-1403.53	-2676.69	PCM+AI
	28	Machining	7.94	3466.81	-1445.32	-2653.37	PCM+AI
01_2	112	Master	5	3685.00	-1473.20	-2631.07	PCM+AI
	113	Slave	5	4125.23	-1505.03	-2583.02	PCM+AI
	111	Roto	5	2556.72	-1290.32	-2547.76	PCM
	29	Machining	7.94	3586.83	-1461.93	-2640.44	PCM+AI
	30	Machining	7.94	3795.31	-1484.10	-2619.48	PCM+AI
	31	Machining	7.94	3926.36	-1494.48	-2605.22	PCM+AI
	32	Machining	7.94	4058.98	-1502.23	-2590.36	PCM+AI
01_3	114	Master	5	4383.41	-1509.60	-2554.67	PCM+AI
	115	Slave	5	4770.51	-1499.63	-2509.12	PCM+AI
	111	Roto	5	2556.72	-1290.32	-2547.76	PCM
	33	Machining	7.94	4254.17	-1508.61	-2568.58	PCM+AI
	34	Machining	7.94	4508.37	-1508.76	-2539.31	PCM+AI
	35	Machining	7.94	4890.39	-1492.78	-2494.64	PCM+AI

The layout of reference holes, holes for temporary fasteners, and holes to be machined for wing box rib-type parts is shown in Fig. 9.

Sequence of actions for the investigation to determine the overall length dimension of the reference zone for long parts:



**Fig. 9.** Layout of holes in the hole machining zones for wing box rib-type parts: a - rib 3; b - rib 2; c - rib 1

**Рис. 9.** Расположение отверстий в зонах обработки отверстий для деталей типа нервюры кессона: а - нервюра 3; б - нервюра 2; с - нервюра 1

1. Machine the reference holes and holes for temporary fasteners in the samples (ribs) according to the layout of holes in the hole machining zones (see Fig. 9).

2. Install the temporary fasteners according to the layout (see Fig. 9).

3. Perform hole machining using a pre-prepared hole machining program.

4. Measure the distance from the hole center to the rib edge (see Fig. 8).

5. Analyze the results.

The measurement of the position of the machined holes relative to the parts' edges was carried out using a vernier caliper (GOST 166-89<sup>4</sup>).

## RESEARCH RESULTS

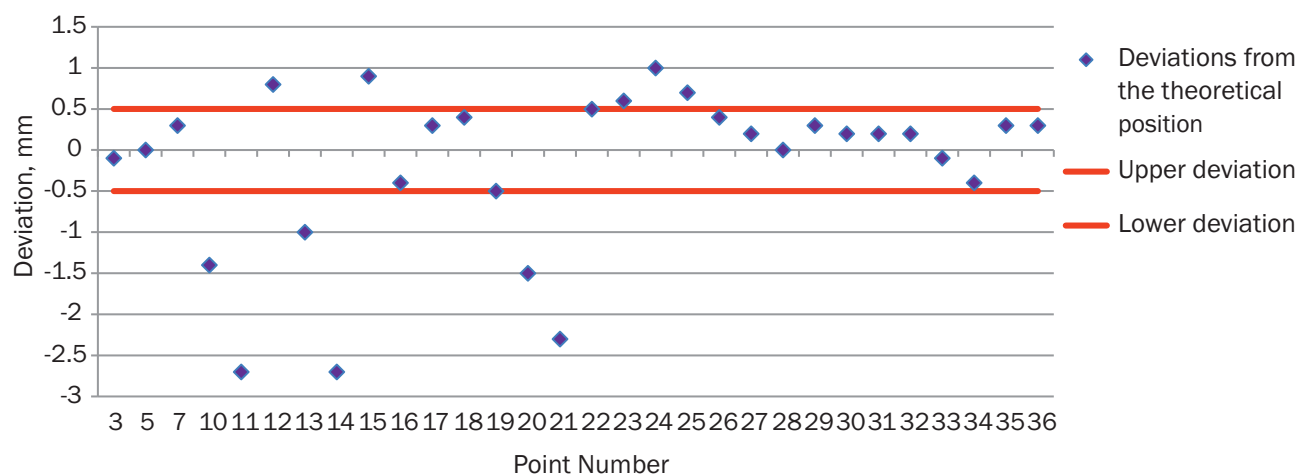
During the experiment, the values of the positional deviations of the machined holes in each zone of the investigated ribs were determined.

Fig. 10 shows the actual positional deviations of the machined holes from the edges of the frame parts.

Analysis of the obtained deviations of the actual position of the machined holes from the theoretical position leads to the conclusion that points No. 10-15, 20-21, 23-25 do not meet the specified requirements. These points belong to ribs 1, 2, and 3. These ribs are long parts that can have their own deformations. Consequently, these parts require additional division into sub-zones.

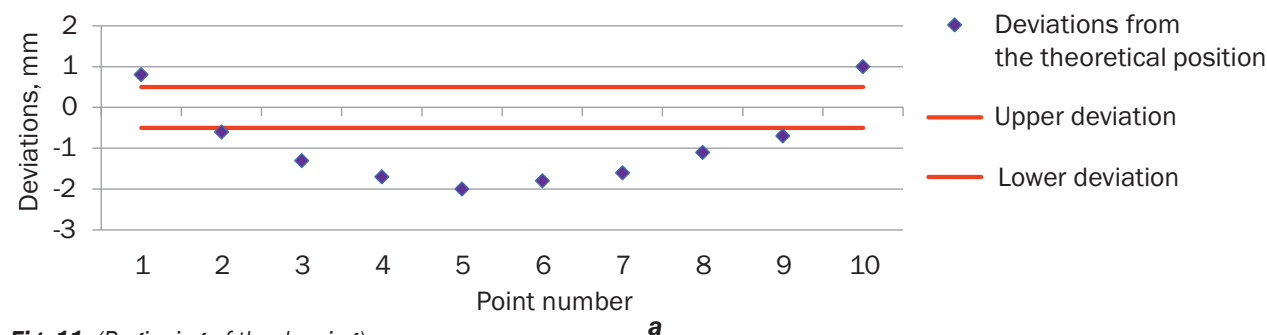
**Results of the Investigation on Determining the Reference Zone Dimensions for Long-Measuring Parts.** During the experiment, the values of the positional deviations of the machined holes in each zone of the investigated ribs were determined.

Fig. 11 shows the actual positional deviations of the machined holes from the rib edge.



**Fig. 10.** Actual positional deviations of the machined holes from the edges of the frame parts

**Рис. 10.** Фактические отклонения положения обработанных отверстий от обрезов деталей каркаса

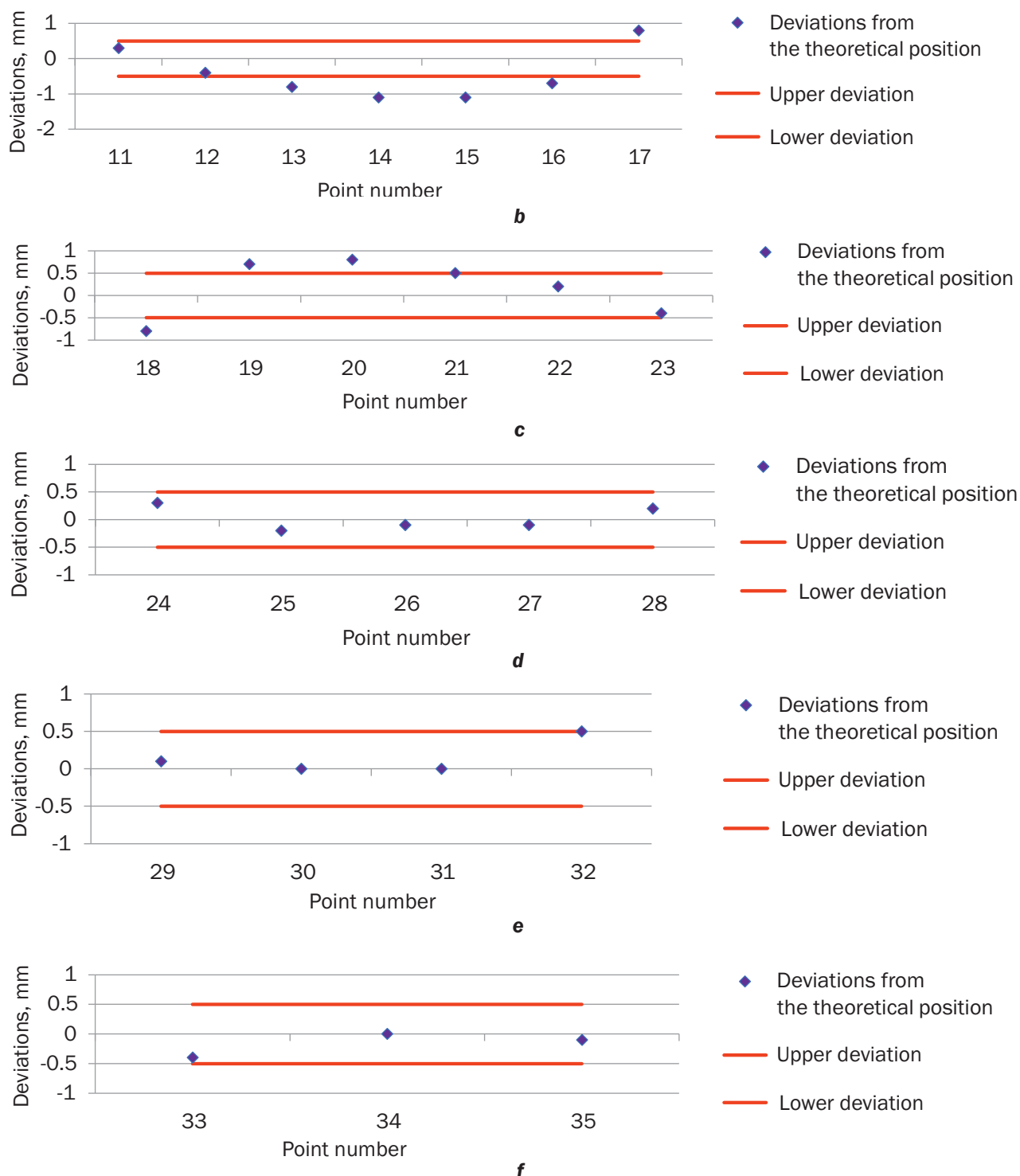


**Fig. 11.** (Beginning of the drawing)

**Рис. 11.** (Начало рисунка)

<sup>4</sup>GOST 166-89. Vernier callipers. Specifications. Introduced on January 1, 1991; valid until January 1, 1996. Moscow: Gosstandart, 1991. / ГОСТ 166-89. Штангенциркули. Технические условия. Введ. 01.01.91; срок действия до 01.01.96. М.: Госстандарт, 1991.





**Fig. 11.** Actual positional deviations of machined holes from the edges: a – for the zone length of 1500 mm; b – for the zone length of 1200 mm; c – for the zone length of 1050 mm; d – for the zone length of 900 mm; e – for the zone length of 800 mm; f – for the zone length of 700 mm

**Рис. 11.** Фактические отклонения положения обработанных отверстий от обрезов: а – для зоны длиной 1500 мм; б – для зоны длиной 1200 мм; в – для зоны длиной 1050 мм; д – для зоны длиной 900 мм; е – для зоны длиной 800 мм; ф – для зоны длиной 700 мм

Based on the analysis of the results obtained, it can be concluded that to achieve a hole positioning accuracy of 0.5 mm, the length of the subzone should not exceed 1 m.

## CONCLUSION

It has been established that the hole machining technology using automated CNC drilling machines allows for the machining of final diam-

eter holes in one or two operations in large-sized structures with mixed stacks. This is achieved using combined tools and a pre-programmed hole machining route, ensuring the geometric position accuracy of the machined hole.

Based on experimental research, it has been determined that to ensure a geometric

position accuracy of holes of 0.5 mm, long parts must be divided into sub-zones with a length not exceeding 1 m.

The obtained results can be used to optimize technological processes in the aerospace, shipbuilding, and other industries.

### References

1. Kiva D.S. Stages of development and beginning of extensive use of polymer composite materials in passenger and transport aircraft structures (1970-1995). *Aerospace and technology*. 2014;6:5-16. (In Russ.).
2. Konstantinov A.S. Polymer composites effectiveness in design and producing of special loading equipment for ramp aircrafts. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2012;14(4):633-638. (In Russ.).
3. Molchanov B.I., Gudimov M.M. Properties of carbon fiber composites and their application areas. *Aviation Industry*. 1997. No. 3-4. P. 58-60. (In Russ.). EDN: ZPNNFS.
4. Fokin I.V., Sturov A.A., Ivanov Yu.N. Development prospects of composite materials in the 21st century. In: *Aviamashinostroenie i transport Sibiri: sbornik statej XV Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii = Aircraft Engineering and Transport of Siberia: collected articles of the 15th All-Russian scientific and technical conference*. 22 December 2020, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2021, p. 208-211. (In Russ.). EDN: HLNMMU.
5. Le Tri Vinh, Koltsov V.P., Starodubtseva D.A. Simulating residual stresses formed in the technological sequence of shot-impact treatment-flap-wheel trimming. *iPolytech Journal*. 2024;28(2):202-213. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-202-213>. EDN: QAHLRO.
6. Balla O.M. Processing fine holes in packages of dissimilar materials. *Aviation Industry*. 2013;4:27-30. (In Russ.). EDN: SDJAIV.
7. Garrick R. Drilling advanced aircraft structures with PCD (Poly-Crystalline Diamond) drills. *SAE Technical Papers*. 2007. <https://doi.org/10.4271/2007-01-3893>.
8. Ivanov Y.N., Chashhin N.S., Sultanova A.R. A study of cutting forces when drilling CFRP/Ti stacks. *Journal of Physics: Conference Series: Advances in Composites Science and Technologies*. 2021;1990(1):012035. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1990/1/012035>. EDN: QQRKSV.
9. Ivanov Y.N., Chashchin N.S., Pashkov A.A. A study of cryogenic cooling when reaming holes in CFRP/Ti/Al Stacks. In: *International Conference on Industrial Engineering: Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering*. 17-21 May 2021, Sochi. Chelyabinsk: Springer; 2022, vol. 2, p. 650-656. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-85230-6\\_77](https://doi.org/10.1007/978-3-030-85230-6_77). EDN: CHYTQA.
10. Ivanov Yu.N. Drilling the holes in the mixed packets. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2014;16(1-5):1402-1406. (In Russ.). EDN: TJFAFL.
11. Ivanov Yu.N., Klantsova K.S., Chashchin N.S., Pyatykh A.S., Matlygin G.V., Isachenko A.S. A study of the influence of lubricating and cooling technological means on the accuracy and quality of processed holes in aviation materials. *Systems. Methods. Technologies*. 2025;3:29-36. <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2025-3-29-36>.
12. Kayihan M., Karaguzel U., Bakkal M. Process design and experimental study on drilling operations of a hybrid aluminum/carbon fiber reinforced polymer/titanium composite. *Materials and Manufacturing Processes*. 2024;39(11):1630-1637. <https://doi.org/10.1080/10426914.2024.2368547>.
13. Garrick R.M., Bunting J.A. *PCD drill for composite materials*. Patent US, no. 7575401; 2004.
14. Shyha I., Soo S.L., Aspinwall D.K., Bradley S., Dawson S., Pretorius C.J. Drilling of titanium/CFRP/aluminium stacks. *Key Engineering Materials*. 2010;447-448:624-633. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.447-448.624>. EDN: ODWSJD.
15. Tsao C.C. Investigation into the effects of drilling parameters on delamination by various step-core drills. *Journal of materials processing technology*. 2008;206(1-3):405-411. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.12.057>. EDN: KLUTCR.
16. Xu Jinyang, Mkaddem A., Mansori M.E. Recent advances in drilling hybrid FRP/Ti composite: a state-of-the-art review. *Composite Structures*. 2016;135(1):316-338. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.09.028>.
17. Zavatskaya T.V., Krotenko A.E., Ivanov Yu.N. Hole drilling and testing in titanium alloy-carbon fiber reinforced plastic stacks. *Zhiznennyj cikl konstrukcionnyh materialov: sbornik statej XII Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii = Life cycle of structural materials: collected articles of the 12th All-Russian scientific and technical conference*. 6 June 2022, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2022, p. 209-215. (In Russ.). EDN: CVDQBN.
18. Fokin I.V., Sturov A.A., Ivanov Yu.N. Study of the problem of mechanical processing of parts made of composite material. In: *Shestye Kolachyovskie chteniya: materialy VI Vserossijskoj molodezhnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchyonnoj pervomu poletu cheloveka v kosmos = Sixth Kolachev Readings: Proceedings of the 6th All-Russian Youth Scientific and Practical Conference dedicated to the first human space flight*. 9 April 2021, Moscow. Moscow: OOO "Nauchno-izdatel'skij centr Infra-M"; 2021, vol. 6, p. 71-73. (In Russ.). EDN: ICULLJ.

19. Sultanova A.R., Gromashev A.G. Preparing holes in mixed packages for MC-21 aircraft wing structures joints. *Aviation Industry*. 2021;1:30-35. (In Russ.). EDN: MFOUKE.
20. Mueller-Hummel P., Atarsia A., Wiemann A. One shot – dry – drilling of composites/titanium/aluminium hybrid stacked materials in IT8 quality. In: *AeroTech Congress & Exhibition*. 2013. <https://doi.org/10.4271/2013-01-2337>.
21. Prokopchik S.V. On approaches to automated calculation of optimal cutting modes during single-tool machining on drilling machines. In: *Issledovaniya i razrabotki v oblasti mashinostroeniya, energetiki i upravleniya: materialy XII Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii studentov, magistrantov i molodyh uchenyh = Research and development in mechanical engineering, power engineering and control: Proceeding of the 12th International scientific and technical conference of students, postgraduates and young scientists*. 26–27 April 2012, Gomel'. Gomel': Sukhoi State Technical University of Gomel; 2012, p. 22-25. (In Russ.). EDN: VKXGRY.
22. Gromashev A.G., Sultanova A.R., Masokhin E.V. Modular principle of aircraft structures assembly and appropriate assembly equipment. *Aviation Industry*. 2021;3-4:58-65. (In Russ.). EDN: KFFMJU.
23. Gromashev A.G., Gaidansky A.I., Ulyanov A.V., Tretyakov A.V., Reznichenko D.V., Masokhin E.V., Sultanova A.R. *Method for modular assembly of an aircraft splice rib for connecting wing consoles to the center section and a device for implementing the method*. Patent RF, no. 2749432; 2021. (In Russ.).
24. Gromashev A.G., Gaidansky A.I., Ulyanov A.V., Tretyakov A.V., Reznichenko D.V., Masokhin E.V., Danilova O.L., Sultanova A.R. *Method for modular assembly of an aircraft wing console box with parts made of carbon polymer composite materials and metals and an assembly line with devices for implementing the method*. Patent RF, no. 2774870; 2023. (In Russ.).

#### Список источников

1. Кива Д.С. Этапы становления и начала развернутого применения полимерных композиционных материалов в конструкциях пассажирских и транспортных самолетов (1970–1995 гг.) // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2014. № 6. С. 5–16.
2. Константинов А.С. Эффективность применения полимерных композиционных материалов при проектировании и изготовлении специальной погрузочной оснастки для грузовых рамповых самолетов // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2012. Т. 14. № 4. С. 633–638.
3. Молчанов Б.И., Гудимов М.М. Свойства углепластиков и области их применения // *Авиационная промышленность*. 1997. № 3-4. С. 58–60. EDN: ZPNNSF.
4. Фокин И.В., Стуров А.А., Иванов Ю.Н. Перспективы развития композиционных материалов в XXI веке // *Авиамашиностроение и транспорт Сибири: сб. ст. XV Всерос. науч.-техн. конф. (г. Иркутск, 22 декабря 2020 г.)*. Иркутск: ИрННТУ, 2021. С. 208–211. EDN: HLNMMU.
5. Ле Чи Винь, Кольцов В.П., Стародубцева Д.А. Моделирование процесса формирования остаточных напряжений при выполнении технологической последовательности «дробеударная обработка – зачистка лепестковым кругом» // *iPolytech Journal*. 2024. Т. 28. № 2. С. 202–213. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-202-213>. EDN: QAHLRO.
6. Балла О.М. Обработка точных отверстий в пакетах из разнородных материалов // *Авиационная промышленность*. 2013. № 4. С. 27–30. EDN: SDJAIV.
7. Garrick R. Drilling advanced aircraft structures with PCD (Poly-Crystalline Diamond) drills // *SAE Technical Papers*. 2007. <https://doi.org/10.4271/2007-01-3893>.
8. Ivanov Y.N., Chashhin N.S., Sultanova A.R. A study of cutting forces when drilling CFRP/Ti stacks // *Journal of Physics: Conference Series: Advances in Composites Science and Technologies*. 2021. Vol. 1990. Iss. 1. P. 012035. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1990/1/012035>. EDN: QQRKSV.
9. Ivanov Y.N., Chashchin N.S., Pashkov A.A. A study of cryogenic cooling when reaming holes in CFRP/Ti/Al Stacks // *International Conference on Industrial Engineering: Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (Sochi, 17–21 May 2021)*. Chelyabinsk: Springer, 2022. Vol. 2. P. 650–656. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-85230-6\\_77](https://doi.org/10.1007/978-3-030-85230-6_77). EDN: CHYTQA.
10. Иванов Ю.Н. Сверление отверстий в смешанных пакетах // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2014. Т. 16. № 1-5. С. 1402–1406. EDN: TJFAFL.
11. Иванов Ю.Н., Кланцова К.С., Чашин Н.С., Пятых А.С., Матлыгин Г.В., Исаченко А.С. Исследование влияния смазочно-охлаждающих технологических средств на точность и качество обрабатываемых отверстий в авиационных материалах // *Системы. Методы. Технологии*. 2025. № 3. С. 29–36. <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2025-3-29-36>.
12. Kayihan M., Karaguzel U., Bakkal M. Process design and experimental study on drilling operations of a hybrid aluminum/carbon fiber reinforced polymer/titanium composite // *Materials and Manufacturing Processes*. 2024. Vol. 39. Iss. 11. P. 1630–1637. <https://doi.org/10.1080/10426914.2024.2368547>.
13. Patent no. 7575401, United States of America, B1. PCD drill for composite materials / R.M. Garrick, J.A. Bunting. Publ. 18.11.2004.
14. Shyha I., Soo S.L., Aspinwall D.K., Bradley S., Dawson S., Pretorius C.J. Drilling of titanium/CFRP/aluminium stacks // *Key Engineering Materials*. 2010. Vol. 447-448. P. 624–633. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.447-448.624>. EDN: ODWSJD.

15. Tsao C.C. Investigation into the effects of drilling parameters on delamination by various step-core drills // Journal of materials processing technology. 2008. Vol. 206. Iss. 1-3. P. 405–411. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.12.057>. EDN: KLUTCR.
16. Xu Jinyang, Mkaddem A., Mansori M.E. Recent advances in drilling hybrid FRP/Ti composite: a state-of-the-art review // Composite Structures. 2016. Vol. 135. Iss. 1. P. 316–338. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.09.028>.
17. Завацкая Т.В., Кротенко А.Е., Иванов Ю.Н. Сверление и контроль отверстий в пакетах «титановый сплав-углепластик» // Жизненный цикл конструкционных материалов: сб. ст. XII Всерос. науч.-техн. конф. (г. Иркутск, 6 июня 2022 г.). Иркутск: ИрННТУ, 2022. С. 209–215. EDN: CVDQBN.
18. Фокин И.В., Стуров А.А., Иванов Ю.Н. Исследование проблемы механической обработки деталей из композиционного материала // Шестые Колачёвские чтения: матер. VI Всерос. молодеж. Науч.-практ. конф., посвящ. первому полету человека в космос (г. Москва, 9 апреля 2021 г.). М.: ООО «Научно-издательский центр Инфра-М», 2021. Т. 6. С. 71–73. EDN: ICULLJ.
19. Султанова А.Р., Громашев А.Г. Подготовка отверстий в смешанных пакетах для выполнения соединений деталей крыла самолета MC-21 // Авиационная промышленность. 2021. № 1. С. 30–35. EDN: MFOUKE.
20. Mueller-Hummel P., Atarsia A., Wiemann A. One shot – dry – drilling of composites/titanium/aluminium hybrid stacked materials in IT8 quality // AeroTech Congress & Exhibition. 2013. <https://doi.org/10.4271/2013-01-2337>.
21. Прокопчик С.В. О подходах к автоматизированному расчету оптимальных режимов резания при одноинструментальной обработке на сверлильных станках // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: матер. XII Междунар. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и молодых ученых (г. Гомель, 26–27 апреля 2012 г.). Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2012. С. 22–25. EDN: VKXGRY.
22. Громашев А.Г., Султанова А.Р., Масохин Е.В. Модульный принцип сборки авиационных конструкций и оборудование для его реализации // Авиационная промышленность. 2021. № 3-4. С. 58–65. EDN: KFFMJU.
23. Пат. № 2749432, Российская Федерация, С1. Способ модульной сборки стыковой нервюры самолета для соединения консолей крыла с центропланом и устройство для осуществления способа / А.Г. Громашев, А.И. Гайданский, А.В. Ульянов, А.В. Третьяков, Д.В. Резниченко, Е.В. Масохин, А.Р. Султанова; заявитель и патентообладатель АО «АэроКомпозит». Заявл. 10.01.2020; опубл. 10.06.2021.
24. Пат. № 2774870, Российская Федерация, С1. Способ модульной сборки кессона консоли крыла самолета с деталями из углеродных полимерных композиционных материалов и металлов и сборочная линия с устройствами для осуществления способа / А.Г. Громашев, А.И. Гайданский, А.В. Ульянов, А.В. Третьяков, Д.В. Резниченко, Е.В. Масохин, О.Л. Данилова, А.Р. Султанова; заявитель и патентообладатель АО «АэроКомпозит». Заявл. 17.09.2021; опубл. 22.06.2023.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Andrey G. Gromashev,**  
Dr. Sci. (Eng.),  
Chief Process Engineer,  
AeroComposit JSC,  
23 B/2, Polikarpov St.,  
Moscow 125284, Russia  
[a\\_gromashev@aerocomposit.ru](mailto:a_gromashev@aerocomposit.ru)

**Albina R. Sultanova,**  
Head of the Aircraft Aggregate and Final Assembly  
Department,  
Ural Civil Aviation Plant JSC,  
1, Prospect Marshala Zhukova, bld. 1, Moscow,  
123308, Russia  
[alja\\_8@mail.ru](mailto:alja_8@mail.ru)

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Громашев Андрей Геннадьевич,**  
д.т.н.,  
главный технолог,  
АО «АэроКомпозит»,  
125284, г. Москва, ул. Поликарпова,  
23 Б/2, Россия  
[a\\_gromashev@aerocomposit.ru](mailto:a_gromashev@aerocomposit.ru)

**Султанова Альбина Руслановна,**  
начальник отдела агрегатной и  
финальной сборки летательных аппаратов,  
АО «Уральский завод гражданской авиации»,  
123308, г. Москва, просп. Маршала Жукова, 1,  
стр. 1, Россия  
[alja\\_8@mail.ru](mailto:alja_8@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.*

#### 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.*

**Information about the article**

The article was submitted 01.09.2025; approved after reviewing 20.10.2025; accepted for publication 01.11.2025.

**Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 01.09.2025 г.; одобрена после рецензирования 20.10.2025 г.; принята к публикации 01.11.2025 г.



## МАШИНОСТРОЕНИЕ

Научная статья

УДК 621.7.08

EDN: VKAJSF

DOI: 10.21285/1814-3520-2025-4-453-465



## Исследование влияния режимов сканирования на точность результатов и производительность процесса при контроле деталей сложной формы

М.А. Корж<sup>1✉</sup>, А.Ю. Перелыгина<sup>2</sup>, А.В. Савилов<sup>3</sup>

<sup>1-3</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

**Резюме.** Цель – исследование влияния разрешения сетки сканирования на точность и время измерений деталей двойной кривизны. В качестве объекта исследования была выбрана типовая авиационная деталь «База люка», имеющая двойную кривизну и повторяющая внешние обводы самолета. Исследования проводились с применением портативного сканера Scantech KSCAN Magic1, позволяющего получать информацию о геометрии изделия без привязки к жесткой базе за счет использования позиционных меток. Сканер имеет линейную точность 0,020 мм, повторяемость 0,010 мм, объемную точность 0,015 мм + 0,030 мм/м – отклонение, которое накапливается с увеличением размера сканируемого объекта; разрешение 0,010 мм. Геометрический контроль детали выполнялся посредством измерений как на внешней, так и на внутренней поверхности. Анализ геометрии проводился на основе кривой, построенной вдоль поверхности детали и по заданным типовым элементам – центрам отверстий. Для построения указанных кривых определялись точки пересечения оси каждого отверстия с поверхностью детали как на контрольной модели, так и на полученном при сканировании изображении. Показано, что увеличение разрешения от 0,1 мм до 0,025 мм приводит к значительному увеличению времени сканирования, тем самым снижая производительность процесса контроля геометрии детали почти в 4 раза. При этом точность сканирования не повышается. Для повышения точности измерения на наиболее ответственных участках, таких как отверстия или зоны со сложной геометрией, рекомендуется применять комбинированный метод контроля – сканирование с локальным повышением разрешения на вогнутых и ответственных поверхностях. Установлено, что сканирование с разрешением сетки 0,1 мм является наиболее рациональным выбором для условий реального производства как обеспечивающее приемлемую точность при минимальных временных затратах. Внедрение подобных технологий позволит сократить продолжительность операций технического контроля, сохранив при этом требуемый уровень качества изготавливаемых деталей.

**Ключевые слова:** фрезерование, сканирование, поверхность двойной кривизны, разрешение сетки, точность, контроль геометрии

**Для цитирования:** Корж М.А., Перелыгина А.Ю., Савилов А.В. Исследование влияния режимов сканирования на точность результатов и производительность процесса при контроле деталей сложной формы // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 4. С. 453–465. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-4-453-465>. EDN: VKAJSF.

## MECHANICAL ENGINEERING

## Original article

## Accuracy and process performance in the inspection of complex geometry as a function of scanning parameters

Maksim A. Korzh<sup>1✉</sup>, Aleksandra Yu. Perelygina<sup>2</sup>, Andrey V. Savilov<sup>3</sup>

<sup>1-3</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

**Abstract.** This study examines the effects of scanning mesh resolution on the measurement accuracy and duration for parts with double curvature. The research employed a standard aircraft component, referred to as a hatch base. This component features a double curvature that conforms to the external contours of an airplane. Measurements were carried out using a portable Scantech KSCAN Magic scanner, which captures part geometry without a fixed datum using positional markers. This scanner has a linear accuracy of 0.020 mm, repeatability of 0.010 mm, volumetric accuracy of 0.015 mm + 0.030 mm/m, and resolution of 0.010 mm. Geometric inspection was performed on the external and internal surfaces of the part. The analysis involved a curve constructed along the part surface and specific datum features, namely, hole centers. For both the reference model and scanned data, the intersection points of each hole axis with the part surface were determined to construct these curves. The results demonstrate that an increase in resolution from

0.1 mm to 0.025 mm significantly extends the scanning time, thereby reducing the geometric inspection throughput by nearly a factor of four, without a corresponding improvement in accuracy. To enhance the measurement accuracy of critical features, such as holes or complex geometry zones, it is recommended to apply a combined inspection method involving scanning with locally increased resolution on concave and critical surfaces. The study established that a mesh resolution of 0.1 mm represents the most rational choice for real-world production environments, as it provides acceptable accuracy with minimal time investment. The implementation of such optimized scanning strategies can reduce the duration of quality control operations while maintaining the required quality standards for the manufactured parts.

**Keywords:** milling, scanning, double-curvature surface, mesh resolution, accuracy, geometry inspection

**For citation:** Korzh M.A., Perelygina A.Yu., Savilov A.V. Accuracy and process performance in the inspection of complex geometry as a function of scanning parameters. *iPolytech Journal*. 2025;29(4):453-465. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-4-453-465>. EDN: VKAJSF.

## ВВЕДЕНИЕ

Во многих областях машиностроения, таких как авиастроение, судостроение и автомобилестроение, применяются детали со сложными криволинейными поверхностями: лопатки турбин, фюзеляжи, крылья и хвостовое оперение самолетов, гребные винты и корпуса кораблей, панели кузовов автомобилей и другие изделия. Основной технологической операцией при их производстве, как правило, является фрезерование. Указанная операция реализуется на пятикоординатных фрезерных обрабатывающих центрах. Несмотря на технологические возможности современного оборудования, достижение заданной точности размеров и формы деталей является непростой задачей. Одним из наиболее эффективных методов решения указанной задачи выступает промежуточный контроль детали. Как правило, операция промежуточного контроля предшествует операциям окончательной обработки. Промежуточный контроль детали позволяет выявить отклонения размеров и формы деталей, обусловленные такими факторами, как отжатие и износ инструмента, перераспределение внутренних напряжений в детали и т. п.

Промежуточный контроль, как правило, включает в себя как измерение контрольных точек на поверхности детали, так и измерение геометрических элементов, например, отверстий. Полученные результаты используются для корректировки управляющей программы окончательной обработки детали. Такой подход обеспечивает заданную точность размеров и формы детали, а также позволяет избежать повышения машинного

времени на операциях предварительной обработки, обусловленного снижением режимов резания при попытке уменьшить искажение формы детали, вызванное перераспределением внутренних напряжений.

Корректировка управляющей программы предполагает, как изменение режимов резания, в первую очередь, глубины и ширины резания, так и изменение диаметра режущего инструмента. Наряду с указанной корректировкой управляющей программы может применяться трансформация осей системы координат детали, позволяющая перераспределить оставшийся припуск заготовки таким образом, чтобы компенсировать искажение формы детали. Данный метод предполагает использование как специального программного обеспечения, так и специальной зажимной оснастки.

При контроле геометрии деталей сложной формы нередко возникают проблемы с определением контрольных точек и их измерением, особенно это касается деталей, имеющих низкую изгибную и крутильную жесткость, например, панель обшивки самолета [1].

Выбор методов промежуточного контроля при обработке деталей на фрезерных обрабатывающих центрах обусловлен тем, что, во-первых, результаты контроля должны поступать в систему числового программного управления (ЧПУ) станка в цифровом виде для последующей корректировки управляющей программы и, во-вторых, в процессе контроля деталь не должна убираться со стола станка, что требуется, например, при ее контроле на координатно-измерительной машине (КИМ)<sup>4,5</sup> [2–5].

<sup>4</sup>А. с. № 590586, СССР, А1 G01 В 5/28. Способ сравнения поверхностей двоякой кривизны правого и левого исполнения / В.Х. Подойцин, В.В. Подойцин. Заявка № 2125357, заявл. 11.04.1975; опубл. 30.01.1978. Бюл. № 4. EDN: NYAGDM.

<sup>5</sup>А. с. № 1357688, СССР, А1 G01 В 5/207. Машина для контроля геометрической формы криволинейных поверхностей / В.С. Савицкий, Ю.А. Самохвалов, В.А. Чудов, Т.И. Тарасова, М.Н. Востриков, Т.И. Казакевич, Б.Ф. Ефимов, Л.Н. Скорнякова; заявитель и патентообладатель Предприятие П/Я А-1132, Предприятие П/Я М-5671. Заявка № 3840622/25-28, заявл. 29.10.1984; опубл. 07.12.1987. Бюл. № 45. EDN: PUDNOB.

Измерение детали на станке возможно с использованием контактной измерительной головки и специальных измерительных циклов системы ЧПУ станка. К основным преимуществам контактной головки относятся высокая точность измерений и независимость результатов измерения от состояния поверхности детали. При выборе конкретного типа контактной головки следует иметь в виду, что традиционные датчики с контактной системой срабатывания показывают паспортную точность только при контакте щупа вдоль координатных осей. А головки, имеющие систему срабатывания, основанную на тензодатчиках, обеспечивают заданную точность при контакте в произвольном направлении, что и имеет место при измерении криволинейных поверхностей. Основным недостатком контактных головок является более низкая производительность процесса измерения по сравнению с оптическими методами [6, 7].

Также для контроля криволинейных поверхностей используются оптические неконтактные методы. Они делятся на два основных типа: сканирование с проекцией структурированного света и фотограмметрия.

*Фотограмметрия* – это метод 3D-сканирования, при котором форма объекта восстанавливается по множеству фотографий, сделанных с разных ракурсов, значительно менее распространена в машиностроении из-за специфики применения и меньшей точности (~0,5 мм/м) по сравнению с лазерным сканированием [8].

*3D-сканирование с проекцией структурированного света* или лазеров в настоящее время является одним из самых быстрых способов контроля геометрии детали. Данный тип сканеров использует деформации от проецируемого света или лазеров для расчета трехмерных координат поверхностей объекта. Сканирующее оборудование бывает нескольких типов: стационарные лазерные радары (лидары), сканирующие головки для оборудования; различные варианты портативных сканеров [9, 10].

Сканирующие лазерные головки применяются на обрабатывающем оборудовании не только для промежуточного контроля, но и для контроля заготовок с оптимизацией управляющей программы. Широкое применение такие головки нашли в оборудо-

вании для зеркального фрезерования. С их помощью выполняется сканирование формообразованных заготовок и последующий реверс-инжиниринг, позволяющий получить 3D-модель заготовки. Полученная электронная 3D-модель используется для генерации управляющей программы станка. При изготовлении детали методом зеркального фрезерования лазерная головка применяется также для промежуточного и окончательного контроля.

Портативные сканеры являются самым универсальным оборудованием и могут применяться как для промежуточного и окончательного контроля деталей, так и для оцифровки производственной оснастки, создания цифровых двойников производственных компонентов, обратного проектирования и прототипирования [11–13]. Также есть примеры портативных ручных КИМ, которые предназначены для анализа геометрии и сравнения с CAD-моделями (от англ. Computer-Aided Design – системы автоматизированного проектирования) в реальном времени с использованием сканирующей головки. Но такие ручные КИМ, как правило, могут быть ограничены в диапазоне работы и степенях подвижности в зависимости от количества сегментов. Из-за этих недостатков зачастую предпочтение отдается ручным сканерам.

Примеры исследований эффективности лазерного сканирования в авиастроении показывают сокращение времени контроля геометрии деталей на 25–30% [14–16]. Несмотря на существование различных методов контроля, остается нерешенной проблема точного и быстрого измерения крупногабаритных криволинейных поверхностей деталей [17–19]. Решение указанной проблемы зависит от выбора параметров сканирования, обеспечивающих достижение заданной точности при максимальной производительности процесса для определенных технологических условий. Ключевым параметром при этом является разрешение сетки или шаг сканирования. Разрешение сетки при сканировании – это минимальное расстояние между двумя точками сканирования (узлами сетки), в которых измеряются и фиксируются данные о геометрии детали. Оно определяет детализацию получаемой цифровой модели или изображения. Важно отметить, что низкое разрешение может по-



влиять на определение границ контролируемого элемента [20].

Теоретически увеличение разрешения сетки должно увеличивать точность сканирования, но указанная зависимость также определяется конструктивными особенностями измеряемой детали. Зависимость точности измерения от разрешения сетки при различных технологических условиях требует дополнительного изучения. С другой стороны, при увеличении разрешения сетки увеличивается время сканирования, что повышает технологическую себестоимость изделия.

Таким образом, целью данной работы является исследование влияния разрешения сетки сканирования на точность и время измерений деталей двойной кривизны. Полученные в ходе работы результаты могут быть применены при разработке операций промежуточного контроля деталей, изготавливаемых на фрезерных обрабатывающих центрах с использованием лазерных портативных сканеров и сканирующих лазерных головок, использующих аналогичный портативным сканерам принцип измерения.

## МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объекта исследования была выбрана деталь «База люка» как имеющая типовые конструктивные элементы самолета

и повторяющая его внешние обводы (рис. 1). При проведении исследований 3D-сканирование детали выполнялось ручным портативным сканером Scantech KSCAN Magic I, который позволяет получать данные о геометрии изделия без привязки к жесткой базе за счет использования позиционных меток. Сканер подключается к портативному компьютеру через USB-интерфейс.

Существует два основных режима сканирования: режим в виде перекрещивающихся синих лазеров и режим параллельных синих лазеров (см. рис.1). Режим с параллельными линиями лазеров применяется непосредственно для увеличения разрешения и уменьшения влияния бликов на детали. Для позиционирования сканера необходимо применять позиционные метки (контрастные черно-белые точки, показанные на рис. 1 ближе к середине детали).

Основные метрологические характеристики используемого оборудования:

- точность до 0,020 мм – это максимальное отклонение от реальных размеров объекта, чем меньше значение, тем ближе сканер передает геометрию детали;
- повторяемость до 0,010 мм – это способность сканера выдавать одинаковые результаты при многократном сканировании одного и того же объекта;



**Рис. 1.** Деталь «База люка» в процессе сканирования

**Fig. 1.** Hatch Base part scanning

– объемная точность до 0,015 мм + 0,030 мм/м. Это отклонение, которое накапливается с увеличением размера сканируемого объекта;

– разрешение до 0,010 мм – минимальный размер детали, которую сканер может различить, чем выше разрешение, тем мельче элементы (например, царапины или текстура поверхности) будут видны.

Процесс контроля геометрии детали состоит из трех этапов: подготовительный, сканирование и контроль.

Подготовительный этап включает настройку параметров сканирования и размещение позиционных меток на детали. Позиционные метки – круглые контрастные маркеры со светоотражающей поверхностью в центре и темной окружностью по периметру (см. рис. 1, находятся ближе к центру). Размещение меток происходит по следующим правилам:

1) метки не должны находиться на критических для контроля местах;

2) при сканировании в поле зрения сканера должно постоянно находиться не менее четырех меток;

3) дополнительно размещаются три метки на уровне или выше стола, где расположен объект.

Метки, расположенные на столе, определяют плоскость, используемую для программного отсечения фона: все объекты, находящиеся ниже данной плоскости, не сканируются (игнорируются программным обеспечением). Для данной детали размером 300x190x15 мм потребовалось 36 меток, включая метки для плоскости отсечения фона. Время, затраченное на их нанесение, составило приблизительно 1 мин.

Настройка параметров сканирования заключается в установке времени выдержки и разрешения сетки.

Время выдержки – это интервал времени, в течение которого светочувствительная матрица сканера подвергается воздействию света, отраженного от объекта. Во всех экспериментах время выдержки было установлено на уровне 6 мс. Данное значение было определено опытным путем как оптимальное для обеспечения стабильного захвата геометрии и текстуры поверхностей исследуемой детали при доступном уровне освещения.

В экспериментах устанавливались три значения разрешения сетки:

1) 0,1 мм как граничное значение для режима «быстрого сканирования», обеспечивающее максимальное разрешение при значительно более высокой скорости сканирования;

2) 0,05 мм как среднее значение между 0,1 и минимально возможным 0,01 мм для оборудования в более медленном режиме сканирования с параллельными линиями;

3) 0,025 мм как нижнее пороговое значение, поскольку при ручном сканировании с более низкими значениями существенно возрастает сложность управления оборудованием даже при минимальной скорости перемещения.

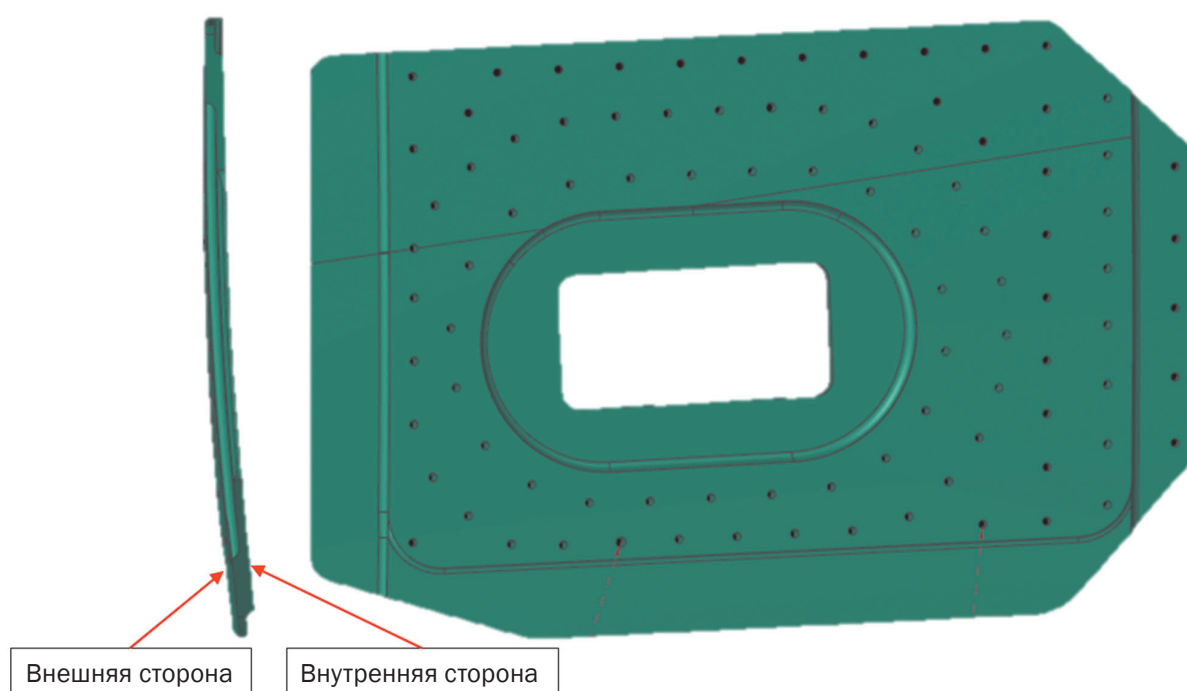
Общее время выполнения всех операций подготовительного этапа для детали составило приблизительно 11 мин.

После включения оборудования выполняется калибровка сканера с использованием эталонной калибровочной плиты.

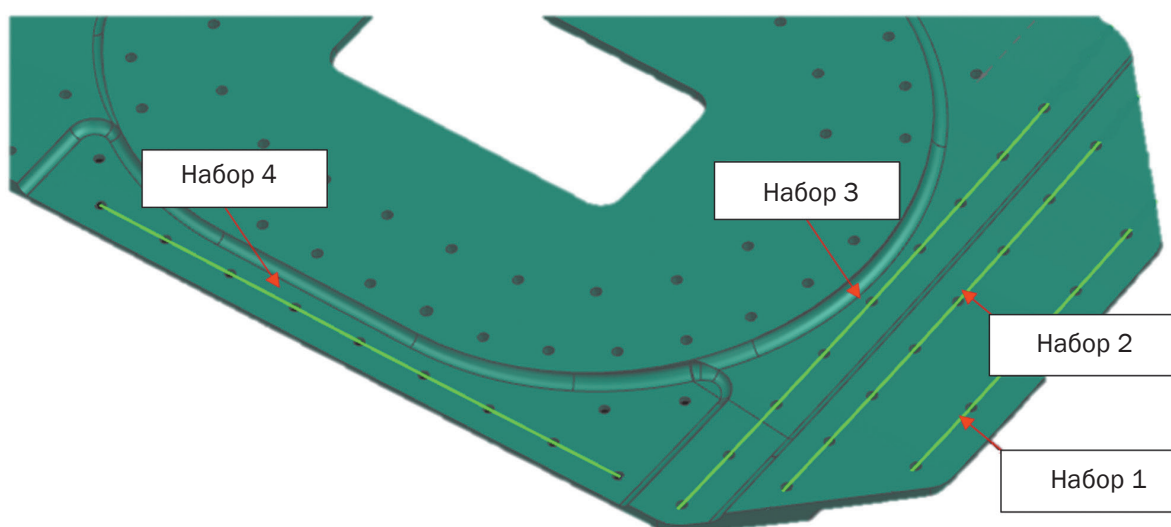
На этапе сканирования происходит измерение точек на поверхности детали.

Этап сканирования начинается с создания облака позиционных меток. Данная операция выполняется для оптимизации процесса и уменьшения ошибки позиционирования сканера относительно детали. Оператор последовательно сканирует все размещенные метки, чтобы система могла их зарегистрировать в системе координат. После создания облака меток выполняется непосредственно сканирование геометрии детали. Стратегия сканирования для значений разрешения, внешней и внутренней сторон (рис. 2), наборов отверстий (рис. 3) была одинаковой.

Для получения цифровой модели цилиндрических отверстий на максимально возможной глубине сканирование каждого отверстия проводилось по квадрантам (четвертям). Проходы осуществлялись вдоль рядов отверстий для каждого квадранта отверстия (направления наборов см. на рис. 3) под углом 30–45° к поверхности детали, что обеспечивало оптимальный захват внутренней поверхности. Такая стратегия обеспечивает не только полное сканирование целевых отверстий, но и одновременный захват данных об отверстиях в соседних рядах за счет перекрытия сканируемых участков детали (не только отверстий), что повышает общую эффективность процесса.



**Рис. 2.** Деталь «База люка» с указанием сторон детали  
**Fig. 2.** Hatch Base part with indicated sides



**Рис. 3.** Наборы отверстий на внутренней поверхности детали «База люка»  
**Fig. 3.** Sets of holes on the internal surface of the Hatch Base part

Дополнительно выполнялся проход по внешнему контуру детали для фиксации ее полных габаритных размеров и положения в пространстве. Конечным результатом этапа сканирования являлось необработанное облако точек – неструктурированное множество точек в трехмерном пространстве, где каждая точка определена своими декартовыми координатами (X, Y, Z).

Хронометраж процесса сканирования проводился с помощью секундомера.

На этапе контроля выполнялись операции обработки облака точек, построения элементов, измерения элементов и анализа полученных результатов.

Обработка облака точек осуществлялась в программном обеспечении сканера и заключалась в удалении точек, которые не от-

носятся к детали, и созданию полигональной сетки (триангуляции). Триангуляция происходила в автоматическом режиме без использования фильтров для сглаживания сетки.

Анализ геометрии проводился в программном обеспечении NX SIEMENS на основе кривой, построенной вдоль поверхности детали по заданным типовым элементам – центрам отверстий (наборы обозначены на рис. 3). Для получения данной кривой по сформированной на предыдущем этапе полигональной сетке строится поверхность, на которой расположены отверстия. Для нахождения оси отверстия строится цилиндр по отсканированному фрагменту (рис. 4). При этом глубина сканирования отверстия напрямую влияет на точность определения оси отверстия, необходимую для построения точек кривой: чем глубже отсканировано отверстие, тем точнее можно построить ось отверстия.

Через точки пересечения осей отверстий с поверхностью детали строилась трехмерная кривая (сплайн), принадлежащая этой поверхности. Всего было построено по четыре кривых на каждой стороне детали. При построении использовались следующие параметры SIEMENS NX:

- геометрическая непрерывность уровня G2 на участках между вершинами. Параметр G2 гарантирует непрерывность кривизны, что обеспечивает максимально гладкую форму кривой;

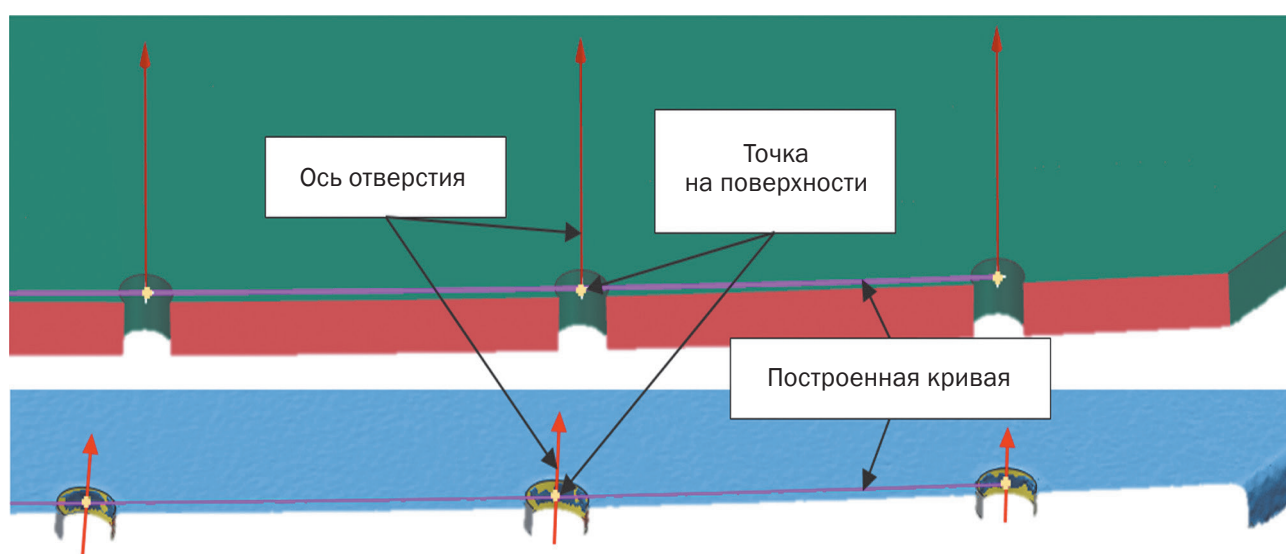
- точность аппроксимации (отклонение сплайна от исходных точек) не более 0,001 мм.

Аналогичным образом были построены сечения на контрольной модели. Для количественной оценки расхождений измерялась длина каждой полученной кривой. Полученные значения сравнивались с длиной соответствующих кривых на эталонной модели. Точность измерения оценивалась по разнице длин эталонной и фактической кривых.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе экспериментов было проведено шесть сканирований с различными разрешениями сетки с обеих сторон детали. Результаты влияния разрешения на глубину сканирования отверстий и затраченное время приведены в таблице.

При разрешении сканирования 0,1 мм (см. таблицу) наблюдается полное отсутствие фаски на границе отверстия, что обусловлено сглаживанием граней и мелких элементов, в то же время регистрируется значительная глубина отверстия. При разрешении 0,05 мм уменьшается глубина сканирования части отверстия, фаска также получается сглаженной. Четкое проявление фаски наблюдается только при разрешении 0,025 мм, глубина сканированной части отверстия сохраняется, как и при разрешении 0,05 мм. Также было установлено, что увеличение раз-

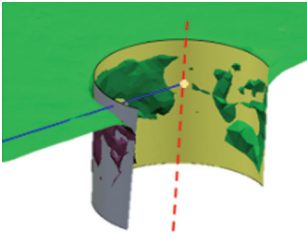
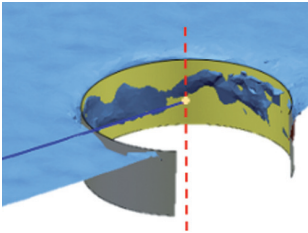
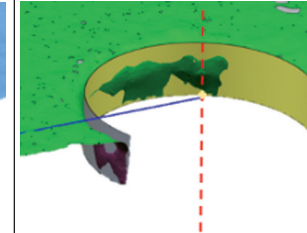


**Рис. 4.** Построение кривой на внутренней поверхности детали «База люка» (сверху – на контрольной модели, снизу – на 3D-скане)

**Fig. 4.** Curve plotting on the internal surface of the Hatch Base part (above – reference model, below – 3D scan)



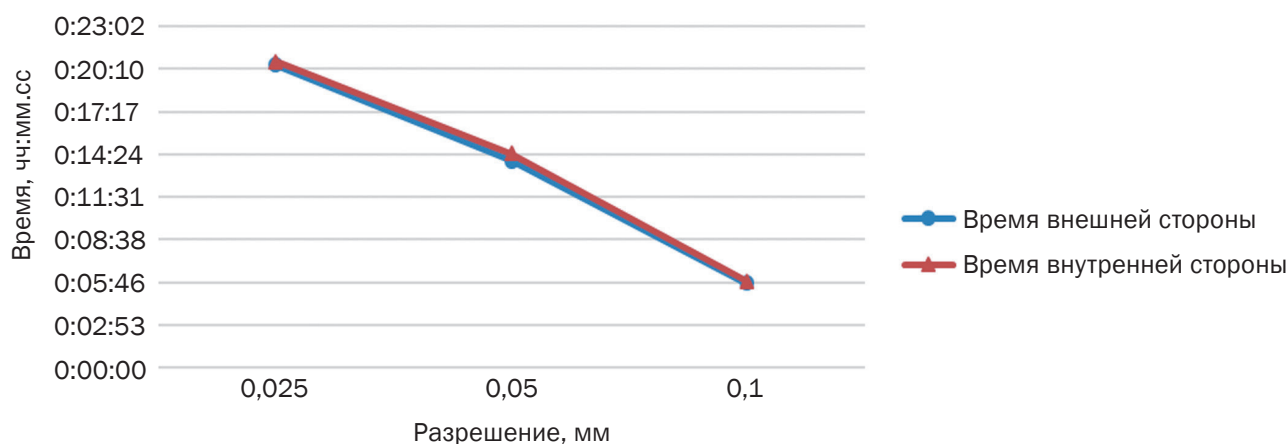
# Результаты измерения отверстий Hole measurement results

Разрешение, мм		0,1	0,05	0,025
Внешний вид построения				
Глубина сканирования отверстий, мм		1,81	0,69	0,69
Время, мин	сторона			
	внешняя	5:42	13:58	20:26
	внутренняя	5:50	14:26	20:38

решения сетки приводит к значительному увеличению времени сканирования (рис. 5).

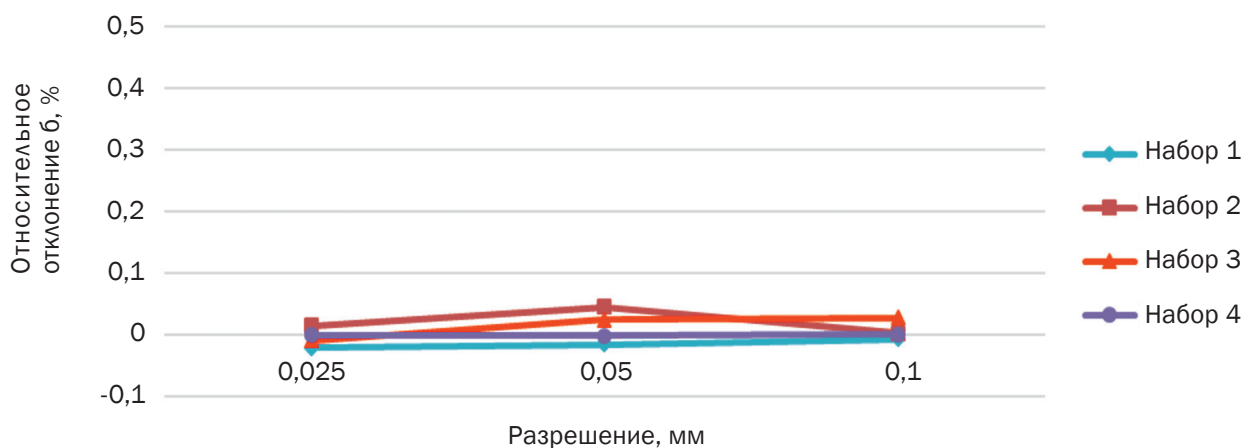
На рис. 6 и 7 представлены графики относительных отклонений длин кривых после сканирования от их эталонных значений на

внешней и внутренней сторонах детали соответственно. При сканировании с внешней стороны детали среднее отклонение находится в диапазоне  $\pm 0,05\%$  (рис. 6), при этом для кривой «Набор 4» или в рисунке отклонение



**Рис. 5.** Зависимость времени сканирования каждой из сторон детали от разрешения сетки

**Fig. 5.** Scanning time per each part side vs mesh resolution



**Рис. 6.** Относительные отклонения измерений для внешней стороны детали

**Fig. 6.** Relative measurement deviations for the outer surface of the part

составило менее 0,01%. При сканировании с внутренней стороны детали отклонения для всех кривых, кроме кривой «Набор 3», не превышают 0,12% (рис. 7). В то же время относительные отклонения для кривой «Набор 4» остаются стабильными и показывают хорошую повторяемость измерений с внешней и внутренней сторон. Это связано с тем, что поверхность, на которой расположен данный массив отверстий, имеет наименьшую кривизну.

Кривая «Набор 3» демонстрирует значительные отклонения по точности в диапазоне от 0,42 до 0,47% (рис. 7). Также наблюдаются

существенные колебания отклонений для внутренней и внешней поверхностей детали, что может свидетельствовать об особенностях ее геометрии, отличающейся от эталонной модели.

Для подтверждения этой гипотезы было выполнено совмещение 3D-скана детали с контрольной моделью и построена цветовая карта отклонений (рис. 8). На цветовой карте видно, что все отверстия «Набора 3» имеют смещения относительно эталонной модели (желтые области рядом с отверстиями), причем крайние отверстия сдвинуты внутрь набора.

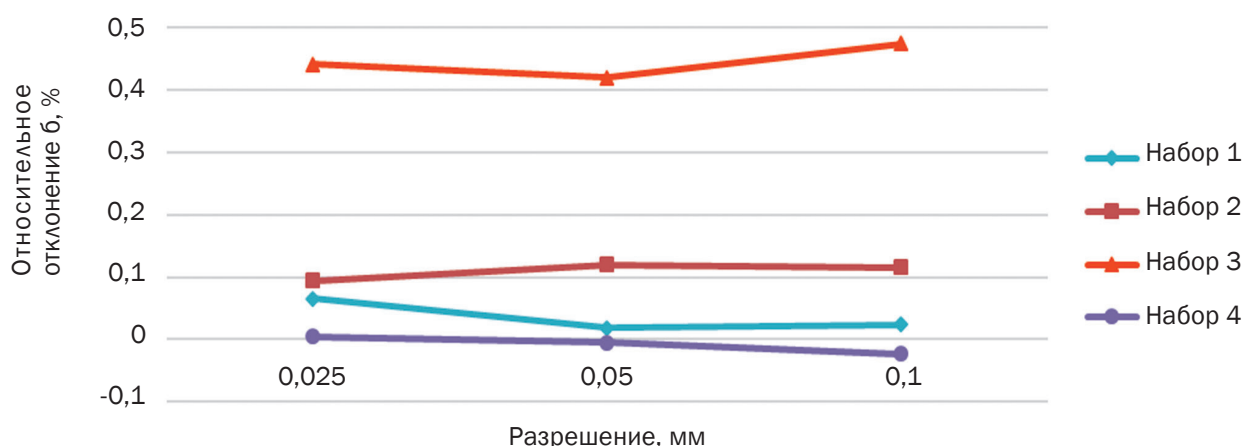


Рис. 7. Относительные отклонения измерений для внутренней стороны детали  
 Fig. 7. Relative measurement deviations for the internal surface of the part

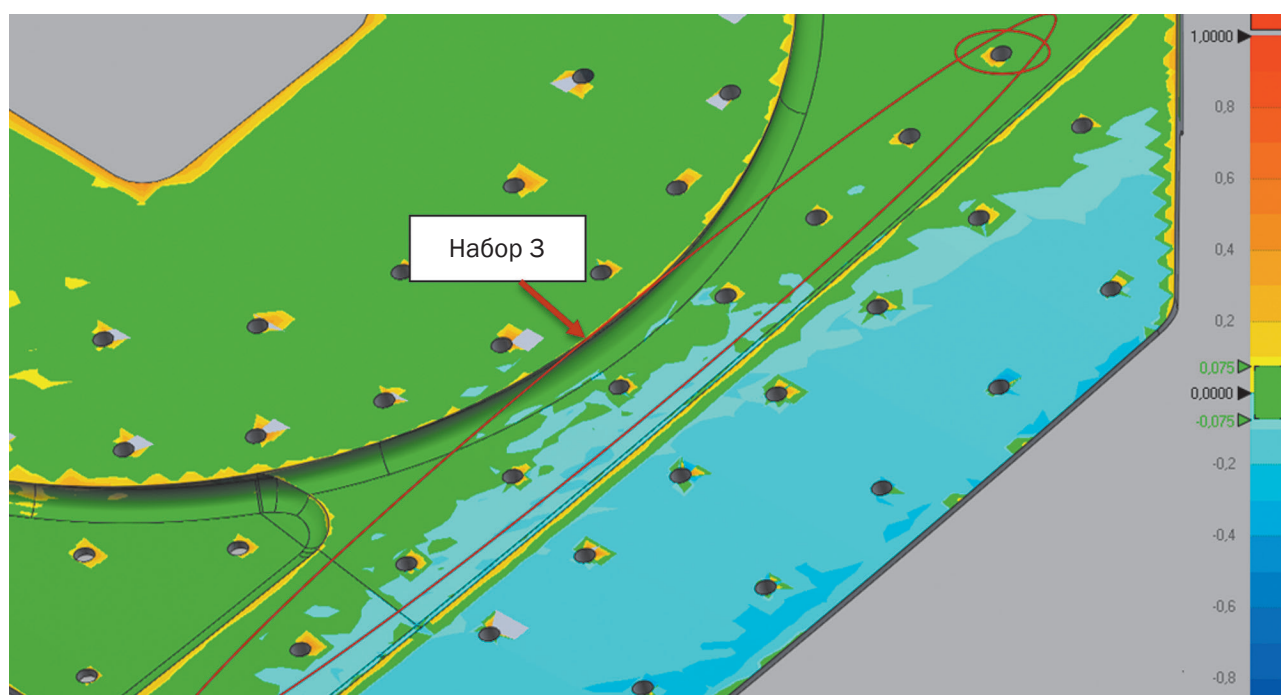


Рис. 8. Цветовая карта сравнения «Набор 3» с моделью  
 Fig. 8. Color chart to compare Set 3 with the reference model

Таким образом, было установлено, что причина существенного отклонения длины кривой после сканирования от ее эталонного значения заключается в смещении осей крайних отверстий.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволило оценить эффективность использования сканирующего оборудования для контроля криволинейных деталей двойной кривизны в производстве на примере детали «База люка». Результаты показали, что выбор разрешения сканирования при контроле геометрии детали оказывает значительное влияние на трудоемкость процесса. Было установлено, что увеличение разрешения сетки от 0,1 мм до 0,025 мм приводит к кратному росту времени выполнения операции, не повышая точность сканирования. Для повышения точности рекомендуется применять комбинированные методы контроля, такие как сканирование с локальным повышени-

ем разрешения на вогнутых и ответственных поверхностях.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что сканирование с разрешением 0,1 мм является наиболее рациональным выбором для производства, как обеспечивающее приемлемую точность при минимальных временных затратах. Для особо ответственных участков, таких как отверстия или зоны со сложной геометрией, рекомендуется применение локального повышения разрешения сканирования. Итоговое время, затрачиваемое на контроль, при возможности использования разрешения равного или большего 0,1 мм, действительно может быть меньше чем на КИМ, и значительно меньше, чем при контроле ручным инструментом. Внедрение подобных технологий позволит сократить продолжительность операций контроля и добавить возможность пересчета базирования детали после обработки, сохранив при этом требуемый уровень качества.

## Список источников

1. Wang Xinfeng, Liu Qing, Jia Kun, Zhang Yan, Zhang Haiyin, Zhen Jia. Study of aircraft skin defect detection and characterization methods // IEEE 11th International Conference on Information, Communication and Networks (Xi'an, 17–20 August 2023). Xi'an: IEEE, 2023. P. 743–750. <https://doi.org/10.1109/ICIN59530.2023.10393190>.
2. Mikeš P. Influence of stylus system configuration on the variability of measurement result on CMM // Manufacturing Technology. 2016. Vol. 16. Iss. 1. P. 184–188. <https://doi.org/10.21062/ujep/x.2016/a/1213-2489/MT/16/1/184>.
3. Савилов А.В., Пятых А.С., Тимофеев С.А. Анализ прогрессивных технологий механообработки транспедикулярных винтов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 6. С. 1190–1198. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1190-1198>. EDN: QCGMNJ.
4. Van Brügge L., Çetin K.M., Koeberle S.J., Thiele M., Sturm F., Hornung M. Application of 3D-scanning for structural and geometric assessment of aerospace structures // CEAS Aeronautical Journal. 2023. Vol. 14. P. 455–467. <https://doi.org/10.1007/s13272-023-00654-1>.
5. Кудряшова И.А., Белякова В.А. Координатно-измерительные машины: сравнительный анализ характеристик, рекомендации по применению // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 4. С. 302–307. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-4-302-307>. EDN: UJJYDK.
6. Urban Ja., Beranek L., Koptiš M., Šimota Ja., Košťák O. Influence of CMM scanning speed and inspected feature size on an accuracy of size and form measurement // Manufacturing Technology. 2020. Vol. 20. No. 4. P. 538–544. <https://doi.org/10.21062/mft.2020.074>. EDN: FHCOPM.
7. Melichar M., Kubatova D., Kutlwaser J. Influence of CMM velocity on scanning precision // 28th International DAAAM Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation (Vienna, 8–11 November 2017). Vienna: DAAAM International, 2017. P. 0400–0409. <https://doi.org/10.2507/28th.daaam.proceedings.056>.
8. Geng Jason. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial // Advances in Optics and Photonics. 2011. Vol. 3. Iss. 2. P. 128–160. <https://doi.org/10.1364/AOP.3.000128>.
9. Гура Д.А., Дьяченко Р.А., Андриященко А.В., Белоконь И.А., Степаненко В.Е. Устройство и принцип работы наземного лазерного сканера на примере LEICA SCANSTATION C10 // Научные чтения имени профессора Н.Е. Жуковского: сб. науч. статей XIII Междунар. науч.-практ. конф. (г. Краснодар, 21–22 декабря 2022 г.). Краснодар: КВБАУЛ, 2023. С. 357–361. EDN: OKSYFM.
10. Антипов Д.В., Ефремкин О.С., Самохвалов В.Н., Еськина Е.В. Определение систематических ошибок, возникающих при измерениях лазерным трекером // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 11. С. 531–538. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2021-11-531-538>. EDN: QLPYXF.
11. He Jiajue, Xiong Wei. Surface feature extraction method for cloud data of aircraft wall panel measurement points // Journal of Computational Science. 2024. Vol. 83. P. 102427. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2024.102427>. EDN: XLCWXG.

12. Суворов В.А., Кирилловский М.А., Петров В.В., Изюмова В.А. Лазерное сканирование поверхности прототипов и моделей летательных аппаратов // Дополнение к материалам КИМИЛА-2020. Дополнение к матер. IV Отраслевой конф. по измерительной технике и метрологии КИМИЛА-2020 (г. Жуковский, 10–11 ноября 2021 г.). Жуковский: ЦАГИ, 2021. С. 29–53. EDN: QAQASB.
13. Ru Wang. Research on measuring method of RVSM regional waviness // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1635. Iss. 1. P. 012006. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1635/1/012006>. EDN: KUKKLF.
14. Kumar A.S., Chandrasekaran C. Analysis of dynamic probing errors in measuring machines // Innovative Design, Analysis and Development Practices in Aerospace and Automotive Engineering / eds. U. Chandrasekhar, L.J. Yang, S. Gowthaman. Singapore: Springer, 2019. P. 473–482. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-2697-4\\_51](https://doi.org/10.1007/978-981-13-2697-4_51).
15. Ziout A., Qudeiri J.A., Murad M., Khader R., Alwahedi F., Khaleel A., et al. Exploring photogrammetry/3D scanning technology for quality control process in an aerospace manufacturing company // 13th Annual International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (Manila, 7–9 March 2023). Manila: IEOM Society International, 2023. P. 2261–2268. <https://doi.org/10.46254/AN13.20230605>.
16. Bu Huahai, Huang Nuodi, Huang Jie, Liu Gang, Wang Yuhang, Zhu Limin. Geometric feature extraction and its profile accuracy evaluation for pockets on curved aircraft skin from scanned point clouds // Measurement Science and Technology. 2025. Vol. 36. No. 1. P. 015021. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ad8cfc>. EDN: WXQMFG.
17. Kyle S. Explore3DM – a directory and more for 3D metrology // Standards. 2021. Vol. 1. Iss. 2. P. 67–78. <https://doi.org/10.3390/standards1020007>.
18. Radvar-Esfahlan H., Tahan S.-A. Nonrigid geometric metrology using generalized numerical inspection fixtures // Precision Engineering. 2012. Vol. 36. Iss. 1. P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2011.07.002>.
19. Pressley A. Elementary differential geometry, by Andrew Pressley // The Mathematical Gazette. Springer Undergraduate Mathematics Series. 2001. Vol. 85. Iss. 503. P. 372–373. <https://doi.org/10.2307/3622071>.
20. Babanezhad K., Foucault G., Sabri V., Tahan A., Bignon J. The fixtureless inspection of flexible parts based on semi-geodesic distance // Precision Engineering. 2019. Vol. 59. P. 174–184. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2019.07.002>.

### References

1. Wang Xinfeng, Liu Qing, Jia Kun, Zhang Yan, Zhang Haiyin, Zhen Jia. Study of aircraft skin defect detection and characterization methods. In: *IEEE 11th International Conference on Information, Communication and Networks*. 17–20 August 2023, Xi'an. Xi'an: IEEE; 2023, p. 743-750. <https://doi.org/10.1109/ICIN59530.2023.10393190>.
2. Mikeš P. Influence of stylus system configuration on the variability of measurement result on CMM. *Manufacturing Technology*. 2016;16(1):184-188. <https://doi.org/10.21062/ujep/x.2016/a/1213-2489/MT/16/1/184>.
3. Savilov A.V., Pyatykh A.S., Timofeev S.A. Analysis of advanced transpedicular screw machining technologies. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(6):1190-1198. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1190-1198>. EDN: QCGMNJ.
4. Van Brügge L., Çetin K.M., Koeberle S.J., Thiele M., Sturm F., Hornung M. Application of 3D-scanning for structural and geometric assessment of aerospace structures. *CEAS Aeronautical Journal*. 2023;14:455-467. <https://doi.org/10.1007/s13272-023-00654-1>.
5. Kudryashova I.A., Belyakova V.A. Coordinate-measuring machines: comparative analysis of characteristics, recommendations for application. *Proceedings of the Tula State University. Technical Science*. 2022;4:302-307. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-4-302-307>. EDN: UJJYDK.
6. Urban Ja., Beranek L., Koptiš M., Šimota Ja., Košťák O. Influence of CMM scanning speed and inspected feature size on an accuracy of size and form measurement. *Manufacturing Technology*. 2020;20(4):538-544. <https://doi.org/10.21062/mft.2020.074>. EDN: FHCOPM.
7. Melichar M., Kubatova D., Kutlwaser J. Influence of CMM velocity on scanning precision. In: *28th International DAAAM Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation*. 8–11 November 2017, Vienna. Vienna: DAAAM International; 2017, p. 0400-0409. <https://doi.org/10.2507/28th.daaam.proceedings.056>.
8. Geng Jason. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial. *Advances in Optics and Photonics*. 2011;3(2):128-160. <https://doi.org/10.1364/AOP.3.000128>.
9. Gura D.A., Dyachenko R.A., Andryushchenko A.V., Belokon I.A., Stepanenko V.E. The device and the principle of operation of a ground-based laser scanner on the example of the LEICA SCANSTATION C10. In: *Nauchnye chteniya imeni professora N.E. Zhukovskogo. Sbornik nauchnyh statej XIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Scientific readings named after the Professor N.E. Zhukovsky: collected scientific articles of the 13th International scientific and practical conference*. 21–22 December 2022, Krasnodar. Krasnodar: Krasnodar higher military aviation school named after the Hero of the Soviet Union A. K. Serov; 2023, p. 357-361. Krasnodar, 2023, p. 357-361. (In Russ.). EDN: OKSYFM.
10. Antipov D.V., Efremkin O.S., Samokhvalov V.N., Eskina E.V. Determination of systematic errors that appear during the measurements by laser tracker. *Proceedings of the Tula State University. Technical Science*. 2021;11:531-538. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2021-11-531-538>. EDN: QLPYXF.
11. He Jiajue, Xiong Wei. Surface feature extraction method for cloud data of aircraft wall panel measurement points. *Journal of Computational Science*. 2024;83:102427. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2024.102427>. EDN: XLCWGX.



12. Suvorov V.A., Kirillovskii M.A., Petrov V.V., Izyumova V.A. Laser scanning of aircraft prototype and model surfaces. *Dopolnenie k materialam KIMILA-2020. Dopolnenie k materialam IV Otrastlevoj konferencii po izmeritel'noj tekhnike i metrologii KIMILA-2020 = Supplement to the materials of the 4th Industry Conference on Measuring Technology and Metrology KIMILA-2020*. 10–11 November 2021, Zhukovskii. Zhukovskii: Central Aerohydrodynamic Institute; 2021, p. 29-53. (In Russ.). EDN: QAQASB.
13. Ru Wang. Research on measuring method of RVSM regional waviness. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1635. Iss. 1. P. 012006. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1635/1/012006>. EDN: KUKKLF.
14. Kumar A.S., Chandrasekaran C. Analysis of dynamic probing errors in measuring machines. In: Chandrasekhar U., Yang L.J., Gowthaman S. (eds.). *Innovative Design, Analysis and Development Practices in Aerospace and Automotive Engineering*. Singapore: Springer; 2019, p. 473-482. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-2697-4\\_51](https://doi.org/10.1007/978-981-13-2697-4_51).
15. Ziout A., Qudeiri J.A., Murad M., Khader R., Alwahedi F., Khaleel A., et al. Exploring photogrammetry/3D scanning technology for quality control process in an aerospace manufacturing company. In: *13th Annual International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*. 7–9 March 2023, Manila. Manila: IEOM Society International; 2023, p. 2261-2268. <https://doi.org/10.46254/AN13.20230605>.
16. Bu Huahai, Huang Nuodi, Huang Jie, Liu Gang, Wang Yuhan, Zhu Limin. Geometric feature extraction and its profile accuracy evaluation for pockets on curved aircraft skin from scanned point clouds. *Measurement Science and Technology*. 2025;36(1):015021. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ad8cfc>. EDN: WXQMFG.
17. Kyle S. Explore3DM – a directory and more for 3D metrology. *Standards*. 2021;1(2):67-78. <https://doi.org/10.3390/standards1020007>.
18. Radvar-Esfahlan H., Tahan S.-A. Nonrigid geometric metrology using generalized numerical inspection fixtures. *Precision Engineering*. 2012;36(1):1-9. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2011.07.002>.
19. Pressley A. Elementary differential geometry, by Andrew Pressley. *The Mathematical Gazette. Springer Undergraduate Mathematics Series*. 2001;85(503):372-373. <https://doi.org/10.2307/3622071>.
20. Babanezhad K., Foucault G., Sabri V., Tahan A., Bignon J. The fixtureless inspection of flexible parts based on semi-geodesic distance. *Precision Engineering*. 2019;59:174-184. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2019.07.002>.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Корж Максим Андреевич,**

аспирант,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия  
✉ korzhma@ex.istu.edu  
<https://orcid.org/0000-0001-8068-0023>

**Maksim A. Korzh,**

Postgraduate Student,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia  
✉ korzhma@ex.istu.edu  
<https://orcid.org/0000-0001-8068-0023>

**Перельгина Александра Юрьевна,**

к.т.н., доцент,  
заведующий кафедрой инженерной  
и компьютерной графики,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия  
perelygina@istu.edu  
<https://orcid.org/0000-0001-7814-0431>

**Aleksandra Yu. Perelygina,**

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Head of the Department of Engineering  
and Computer Graphics,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia  
perelygina@istu.edu  
<https://orcid.org/0000-0001-7814-0431>

**Савилов Андрей Владиславович,**

к.т.н., доцент,  
доцент кафедры технологии и оборудования  
машиностроительных производств,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия  
saw@istu.edu  
<https://orcid.org/0000-0003-2028-4162>

**Andrey V. Savilov,**

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department  
of Mechanical Engineering Production  
Technologies and Equipment,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia  
saw@istu.edu  
<https://orcid.org/0000-0003-2028-4162>

## Заявленный вклад авторов

## Authors' contribution

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

**Conflict of interests**

The authors declare no conflict of interests.

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

**Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 07.07.2025 г.; одобрена после рецензирования 31.08.2025 г.; принята к публикации 10.09.2025 г.

**Information about the article**

The article was submitted 07.07.2025; approved after reviewing 31.08.2025; accepted for publication 10.09.2025.



## Определение оптимального режима точения ультрамелкозернистых титановых сплавов системы TiNbZr методом Тагучи

В.П. Кузнецов<sup>1✉</sup>, Д.С. Гончаров<sup>2</sup>, О.Г. Блинков<sup>3</sup>, Ю.П. Шаркеев<sup>4</sup>

<sup>1-3</sup>Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

<sup>4</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия

<sup>1</sup>Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова, Курган, Россия

**Резюме.** Целью данного исследования является оптимизация режимов точения сплавов системы Ti-Nb-Zr для минимизации шероховатости поверхности. Объектом исследования служили заготовки из двух ультрамелкозернистых титановых сплавов с номерами плавов 92 и 94 системы Ti-Nb-Zr. Для повышения механических свойств за счет получения УМЗ-структуры в заготовках использовался метод АВС-прессования с последующей ручьевого прокаткой. Планирование эксперимента было проведено с использованием метода ортогональных матриц Г. Тагучи, что позволило ранжировать параметры технологического процесса точения по степени их влияния на выходную характеристику процесса. В ходе эксперимента определены оптимальные значения режимов точения для достижения минимальной величины шероховатости поверхности ультрамелкозернистых титановых сплавов. Установлено, что наименьшее значение шероховатости поверхности достигается при скорости резания 60 м/мин и подаче 0,07 мм/об для сплава 94, содержащем в качестве легирующих элементов олово и тантал, а также скорости резания 30 м/мин и подаче 0,07 мм/об для сплава 92 без содержания олова и тантала, при этом максимальное влияние на шероховатость оказывает скорость резания. Для образцов с наименьшей шероховатостью поверхности определены значения микротвердости поверхностного слоя: для сплава 92 – среднее значение микротвердости  $HV_{0,05}$  составило 321 HV, для сплава 94 – 252 HV. Микротвердость сплава 92, не содержащего олова и тантала, увеличилась на 14,6% в сравнении с первоначальным значением 280 HV. Таким образом, сочетания режимов точения, установленные в ходе исследования, можно назвать оптимальными для достижения минимальной шероховатости поверхности сплавов 92 и 94 системы Ti-Nb-Zr. Оптимальные режимы точения применены при изготовлении имплантов для остеointеграционного протезирования. В будущем планируется проведение исследования по определению оптимальной комбинации технологических параметров процесса резьбонарезания при изготовлении биомедицинских имплантатов из сплавов системы Ti-Nb-Zr.

**Ключевые слова:** ультрамелкозернистые титановые сплавы, шероховатость поверхности, поверхностное упрочнение, метод Тагучи

**Финансирование.** Работа выполнена в молодежной лаборатории модификации поверхностей материалов ФГАОУ ВО «Уральский Федеральный Университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» в рамках соглашения с Министерством науки и высшего образования № 075-03-2025-258 от 17.01.2025 (№ темы FEUZ-2024-0020)

**Для цитирования:** Кузнецов В.П., Гончаров Д.С., Блинков О.Г., Шаркеев Ю.П. Определение оптимального режима точения ультрамелкозернистых титановых сплавов системы TiNbZr методом Тагучи // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 4. С. 466–476. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-4-466-476>. EDN: XBITUE.

## Optimization of turning parameters for ultrafine grained Ti-Nb-Zr alloys using the Taguchi method

Viktor P. Kuznetsov<sup>1✉</sup>, Dmitrii S. Goncharov<sup>2</sup>, Oleg G. Blinkov<sup>3</sup>, Yurii P. Sharkeev<sup>4</sup>

<sup>1,3</sup>Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

<sup>4</sup>Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Tomsk, Russia

<sup>1</sup>National Ilizarov Medical Research Centre for Traumatology and Ortopaedics, Kurgan, Russia

**Abstract.** This study aimed to optimize turning parameters for Ti-Nb-Zr alloys in order to minimize surface roughness. Billets of two ultrafine-grained (UFG) titanium alloys, melt batches 92 and 94 of the Ti-Nb-Zr system, were investigated. To enhance mechanical properties, we produced a UFG structure by abc-pressing of billets followed by groove rolling. Experimental design employed the Taguchi method of orthogonal arrays, which enabled ranking of the technological parameters of the turning process according to their influence on the output characteristics. The experiment determined the optimal turning parameters for achieving minimal surface roughness in UFG titanium alloys. The lowest surface roughness was achieved at a feed rate of 0.07 mm/rev. The cutting speed was 60 m/min for alloy 94, which contained tin and tantalum as alloying elements, and 30 m/min for alloy 92, which contained neither tin nor tantalum. Cutting speed was found to exert the greatest influence on surface roughness. For the samples with the lowest surface roughness, the microhardness of the surface layer was measured. The average microhardness HV<sub>0.05</sub> was 321 HV for alloy 92 and 252 HV for alloy 94. The microhardness of alloy 92 increased by 14.6% compared to its initial value of 280 HV. Thus, the turning parameters established in this study can be considered optimal for achieving minimal surface roughness in alloys 92 and 94 of the Ti-Nb-Zr system. The optimized turning parameters were applied in the fabrication of implants for osseointegration prosthetics. Future work will focus on determining the optimal combination of technological parameters for the thread-cutting process in the manufacture of biomedical implants from Ti-Nb-Zr alloys.

**Keywords:** ultrafine-grained titanium alloys, surface roughness, surface hardening, Taguchi method

**Funding.** This work was carried out at the Youth Laboratory for Material Surface Modification at the Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin under agreement with the Ministry of Science and Higher Education No. 075-03-2025-258 of January 17, 2025 (subject no. FEUZ-2024-0020).

**For citation:** Kuznetsov V.P., Goncharov D.S., Blinkov O.G., Sharkeev Yu.P. Optimization of turning parameters for ultrafine grained Ti-Nb-Zr alloys using the Taguchi method. *iPolytech Journal*. 2025;29(4):466-476. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-4-466-476>. EDN: XBITUe.

## ВВЕДЕНИЕ

Титановые сплавы являются основным материалом, используемым при изготовлении биомедицинских изделий для искусственной замены твердых тканей – ортопедических изделий, зубных имплантатов. В настоящее время широкое распространение получили Ti-Al-V сплавы, однако при их длительном использовании наблюдаются токсическое воздействие на организм человека и аллергические реакции [1]. Кроме того, сплавы на основе Ti-Al-V обладают гораздо более высоким модулем упругости, порядка 100...120 ГПа, по сравнению с костной тканью (15...55 ГПа), что вызывает поздние осложнения в виде отторжения импланта или резорбции костной ткани [2].

Значительные усилия предпринимаются для разработки и исследования биомедицинских сплавов с низким модулем Юнга [3]. Для предотвращения явления резорб-

ции костной ткани необходим низкий модуль Юнга, эквивалентный модулю упругости кортикального слоя кости. Регулируя количество β-стабилизирующих элементов, таких как Nb, Ta, Zr, можно снизить риск отторжения имплантата за счет снижения модуля упругости [4–6].

Ультрамелкозернистые (УМЗ) сплавы системы Ti-Nb-Zr, обладая высокими механическими свойствами, такими как прочность, пластичность и твердость, важными для медицинских изделий, относятся к труднообрабатываемым материалам. В научных работах, посвященных исследованию обрабатываемости титановых сплавов системы Ti-Nb-Zr, особое внимание уделяется изучению анизотропии свойств титановых образцов [7], повышению производительности при обработке биомедицинских изделий из титановых сплавов [8], улучшению качества поверхности [9] и разработке методов

оценки качества поверхности [10]. Понимание особенностей обработки данных сплавов, в частности влияния режимов точения на качество обработанной поверхности и упрочнение поверхностного слоя, позволит оптимизировать условия обработки, повысить производительность и экономическую эффективность процесса производства биомедицинских изделий.

Целью данного исследования является оптимизация режимов точения сплавов системы Ti-Nb-Zr для минимизации шероховатости поверхности.

Постановка эксперимента проводилась с использованием метода Г. Тагучи. Метод обеспечивает системность, простоту и в то же время эффективность решения поставленной задачи с точки зрения минимизации затрат на достижение желаемого результата. Данный метод широко применяется при качественном исследовании свойств поверхности и оптимизации технологических параметров обработки сверлением [11–13], наноструктурирующим выглаживанием [14–16], точением [17, 18] и т.д. Следует отметить, что в ряде случаев проведение полнофакторного эксперимента оправдано, однако требует больших материальных затрат.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалом исследования служили заготовки из титановых сплавов системы Ti-Nb-Zr. Для повышения механических свойств за счет получения УМЗ-структуры в заготовках использовался метод АВС-прессования, при котором заготовка последовательно осаживалась в трех взаимно перпендикулярных направлениях (А, В и С) с последующей ручьевого прокаткой. Реализация метода осуществлялась в лаборатории нанострук-

турных биоконпозитов Института физики прочности и материаловедения СО РАН [19]. Химический состав образцов сплавов представлен в табл. 1.

Точение проводилось на токарном обрабатывающем центре OKUMA GENOS L300-M. В качестве инструмента использовалась сменная многогранная пластина CNMG 120408-VP2 (Korloy, Корея), обработка велась с подводом смазочно-охлаждающей жидкости в зону резания.

Эксперимент по определению оптимального режима финишного точения проводился на основе метода ортогональных матриц и аддитивной модели совокупного влияния входных контролируемых параметров на выходную характеристику процесса (отклик). В качестве выходной характеристики был принят параметр шероховатости поверхности после точения  $Ra$ . Входными параметрами процесса являлись скорость резания  $V_c$  м/мин и подача  $f$  мм/об. Каждый параметр имел 3 дискретных значения (уровня). Контролируемые параметры процесса и числовые значения уровней для сплавов 92 и 94 приведены в табл. 2.

В соответствии с числом технологических параметров и их уровнями была выбрана ортогональная матрица Тагучи L9. Формализованное представление матрицы L9 и план эксперимента представлены в табл. 3.

Анализ результатов эксперимента и ранжирование технологических параметров по степени их влияния на выходную характеристику процесса выполнены в программном комплексе MiniTab 19. Поскольку целью эксперимента был поиск оптимального сочетания технологических параметров процесса для достижения минимального значения выходной характеристики процесса, расчет от-

**Таблица 1.** Химический состав заготовок образцов сплавов системы Ti-Nb-Zr

**Table 1.** Chemical composition of alloy samples of the Ti-Nb-Zr system

№ образцов	Ti	Nb	Zr	Fe	Sn	Ta
92	55,302	39,5	5,23	0,029	–	–
94	51,38	39,1	5,35	0,039	2,12	1,98

**Таблица 2.** Параметры точения и их уровни

**Table 2.** Turning parameters and their levels

Параметр		Уровни		
		1	2	3
A	Скорость резания $V_c$ , мм/мин	30	60	90
B	Подача $f$ , мм/об	0,03	0,05	0,07



**Таблица 3.** Ортогональная матрица Тагучи L9 и план эксперимента  
**Table 3.** Taguchi L9 orthogonal matrix and an experimental plan

№ эксперимента	Ортогональная матрица Тагучи L9		Параметры эксперимента	
	A	B	Vc, мм/мин	f, мм/об
1	1	1	30	0,03
2	1	2	30	0,05
3	1	3	30	0,07
4	2	1	60	0,03
5	2	2	60	0,05
6	2	3	60	0,07
7	3	1	90	0,03
8	3	2	90	0,05
9	3	3	90	0,07

ношения сигнал/шум в  $i$ -том эксперименте  $SN_i$  проводился по формуле:

$$SN_i = -10 \log \left[ \sum_{n=1}^{N_i} \frac{y_n^2}{N_i} \right], \quad (1)$$

где  $i$  – порядковый номер эксперимента;  $n$  – порядковый номер измерения в эксперименте;  $N_i$  – количество измерений в  $i$ -том эксперименте;  $y_n$  – среднее значение измеренной выходной величины в  $i$ -том эксперименте.

Для определения параметров шероховатости поверхности использовался оптический 3D-профилометр WYKO NT-100 (США).

Микротвердость поверхностного слоя измерялась при помощи микротвердомера АНОТЕСН ЕсоHARD FM300 (Германия) при нагрузке на индентор 0,49 Н. Для исследования микротвердости по глубине поверхностного слоя из цилиндрического образца изготавливались поперечные шлифы.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для определения оптимального режима точения было проведено по пять измерений шероховатости  $Ra$  обработанной поверхности в каждом эксперименте после обработки девяти образцов заготовок из сплава 92 и девяти образцов из сплава 94 с различными комбинациями скорости резания  $V_c$  и подачи  $f$  в соответствии с ортогональным массивом L9 (см. табл. 3). Среднее значение шероховатости и отношение сигнал/шум  $SN$ , рассчитанное по формуле (1) для каждого эксперимента, приведены в табл. 4 и 5.

Результаты измерений параметров поверхностного слоя образцов сплавов 92 и 94 с наименьшими значениями шероховатости поверхности по параметру  $Ra$  представлены на рис. 1 (а, б).

Ранжирование параметров процесса по значению отношения сигнал/шум  $SN$  выполнено в программе MiniTab 19 и показано в табл. 6 и 7, где  $\Delta$  – разность между макси-

**Таблица 4.** Средние значения шероховатости поверхности  $Ra$  и расчетные значения отношения сигнал/шум  $SN$  для сплава 92  
**Table 4.** Average values of surface roughness  $Ra$  and calculated values of signal-to-noise ratio  $SN$  for alloy 92

№ эксперимента	Параметры эксперимента		Шероховатость $Ra$ , мкм					Среднее $Ra$ , мкм	$SN$
	Vc, мм/мин	f, мм/об	1	2	3	4	5		
1	30	0,03	0,625	0,705	0,526	0,59	0,495	0,5882	4,540868
2	30	0,05	0,566	0,604	0,485	0,436	0,491	0,5164	5,681302
3	30	0,07	0,81	0,694	0,52	0,587	0,5	0,6222	3,97353
4	60	0,03	1,14	1,1	0,974	1,52	1,37	1,2208	-1,8444
5	60	0,05	0,927	0,761	0,727	0,736	0,73	0,7762	2,158715
6	60	0,07	0,49	0,541	0,478	0,457	0,45	0,4832	6,298149
7	90	0,03	0,656	1,06	0,741	0,881	1,01	0,8696	1,079858
8	90	0,05	0,88	0,738	0,938	0,734	0,757	0,8094	1,790511
9	90	0,07	0,884	0,671	0,802	1,06	0,795	0,8424	1,390005



**Таблица 5.** Средние значения шероховатости поверхности  $Ra$  и расчетные значения отношения сигнал/шум SN для сплава 94

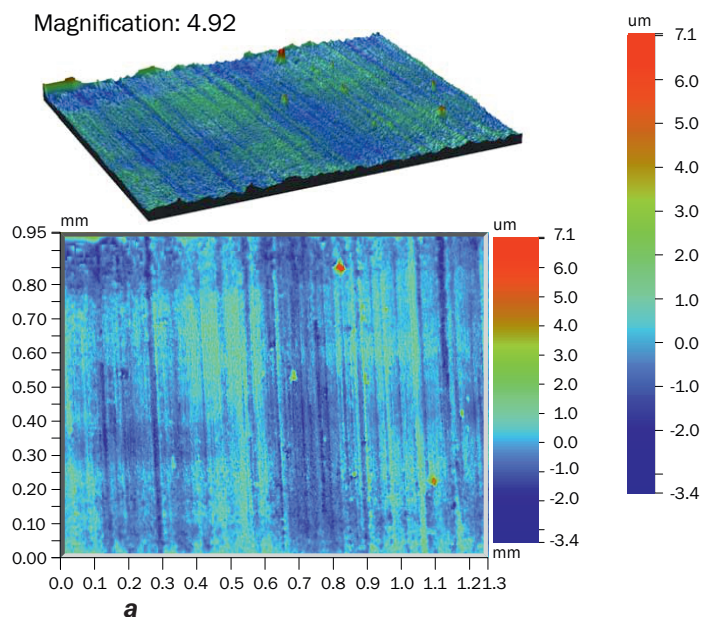
**Table 5.** Average values of surface roughness  $Ra$  and calculated values of signal-to-noise ratio SN for alloy 94

№ эксперимента	Параметры эксперимента		Шероховатость $Ra$ , мкм					Среднее $Ra$ , мкм	SN
	$V_c$ , мм/мин	$f$ , мм/об	1	2	3	4	5		
1	30	0,03	0,748	1,1	1,9	1,88	1,37	1,3996	-3,34084
2	30	0,05	0,83	0,75	0,71	0,746	0,6	0,7272	2,721309
3	30	0,07	0,65	0,55	0,53	1,24	0,47	0,688	2,573691
4	60	0,03	0,5	0,44	0,54	0,56	0,54	0,516	5,717356
5	60	0,05	0,77	0,7	0,64	0,63	0,7	0,688	3,225025
6	60	0,07	0,72	0,65	0,68	0,69	0,68	0,684	3,294202
7	90	0,03	0,67	0,87	0,81	0,63	1,05	0,806	1,724627
8	90	0,05	1,54	1,8	1,23	0,8	0,48	1,17	-2,03843
9	90	0,07	0,9	0,8	0,75	0,77	0,68	0,78	2,12143

#### Surface Stats:

**Ra:** 490.19 nm    **Sa:** 490.08 nm  
**Rq:** 640.75 nm    **Sq:** 640.66 nm  
**Rz:** 8.04  $\mu\text{m}$     **Sz:** 5.16  $\mu\text{m}$   
**Rt:** 10.48  $\mu\text{m}$   
**Rp:** 7.05  $\mu\text{m}$   
**Rv:** -3.42  $\mu\text{m}$     **Sv:** 65.27  $\text{nm}^3/\text{nm}^2$   
**Rku:** 7.07    **Sku:** 7.15  
**Rsk:** 0.59    **Ssk:** 0.61

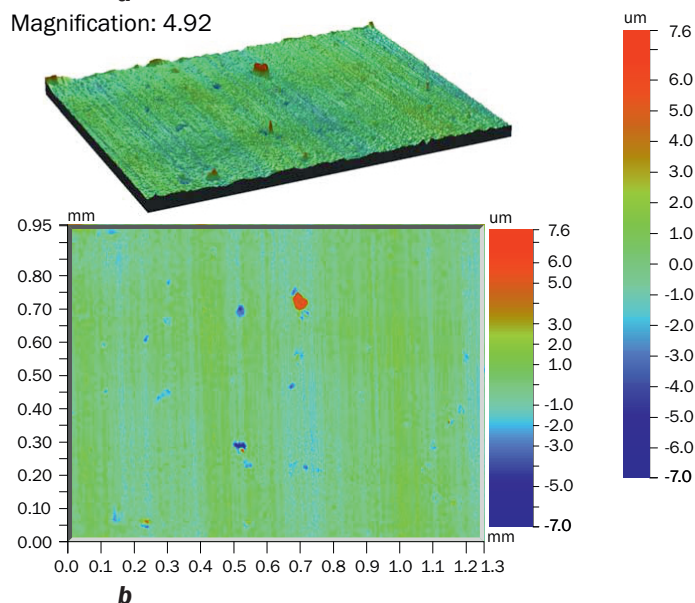
Magnification: 4.92



Magnification: 4.92

#### Surface Stats:

**Ra:** 500.83 nm    **Sa:** 500.77 nm  
**Rq:** 667.03 nm    **Sq:** 666.98 nm  
**Rz:** 11.13  $\mu\text{m}$     **Sz:** 7.65  $\mu\text{m}$   
**Rt:** 14.59  $\mu\text{m}$   
**Rp:** 7.63  $\mu\text{m}$   
**Rv:** -6.97  $\mu\text{m}$     **Sv:** 71.24  $\text{nm}^3/\text{nm}^2$   
**Rku:** 9.91    **Sku:** 9.92  
**Rsk:** 0.34    **Ssk:** 0.35



**Рис. 1.** Параметры поверхностного слоя образцов сплавов 92 (а) и 94 (b) с наименьшими значениями шероховатости поверхности по параметру  $Ra$

**Fig. 1.** Surface layer parameters of alloy samples 92 (a) and 94 (b) with the lowest values of surface roughness according to the  $Ra$  parameter

мальным и минимальным значением отношения SN в столбце. Значения  $\Delta$ , приведенные в табл. 6 и 7, показывают, что наиболее значимым фактором, влияющим на качество обработанной поверхности при точении

сплавов 92 и 94, является скорость резания  $V_c$ , вторым по значимости фактором является подача  $f$ .

На рис. 2 и 3 представлены графики изменения отношения сигнал/шум SN

**Таблица 6.** Ранжирование параметров эксперимента для сплава 92

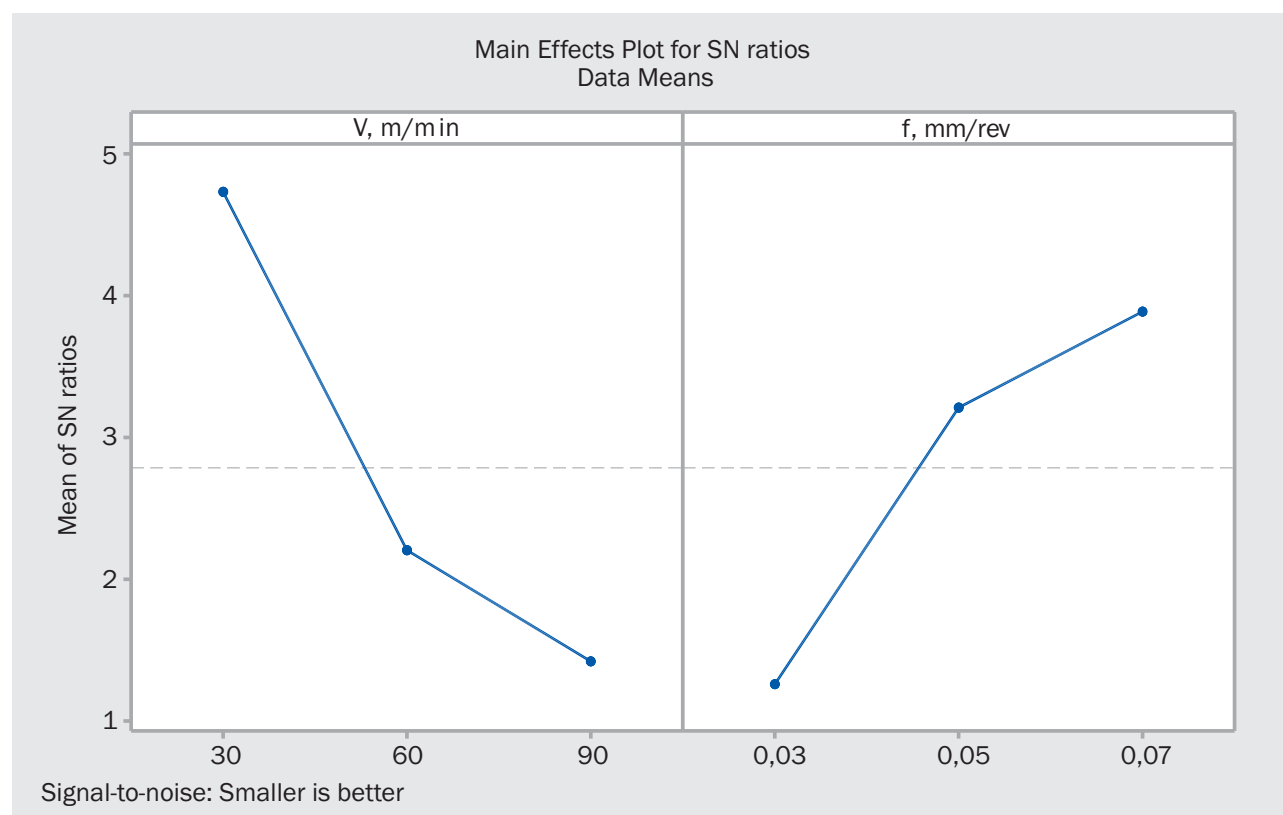
**Table 6.** Ranking of experimental parameters for alloy 92

Уровень	Параметры эксперимента	
	$V_c$ , мм/мин	$f$ , мм/об
1	<b>4,732</b>	1,259
2	2,204	3,210
3	1,420	<b>3,887</b>
$\Delta$	3,312	2,628
Ранг	1	2

**Таблица 7.** Ранжирование параметров эксперимента для сплава 94

**Table 7.** Ranking of experimental parameters for alloy 94

Уровень	Параметры эксперимента	
	$V_c$ , мм/мин	$f$ , мм/об
1	0,6514	1,3670
2	<b>4,0789</b>	1,3026
3	0,6025	<b>2,6631</b>
$\Delta$	3,4763	1,3605
Ранг	1	2



**Рис. 2.** Оценка влияния параметров процесса на выходную характеристику  $R_a$  путем анализа отношения сигнал/шум SN для сплава 92

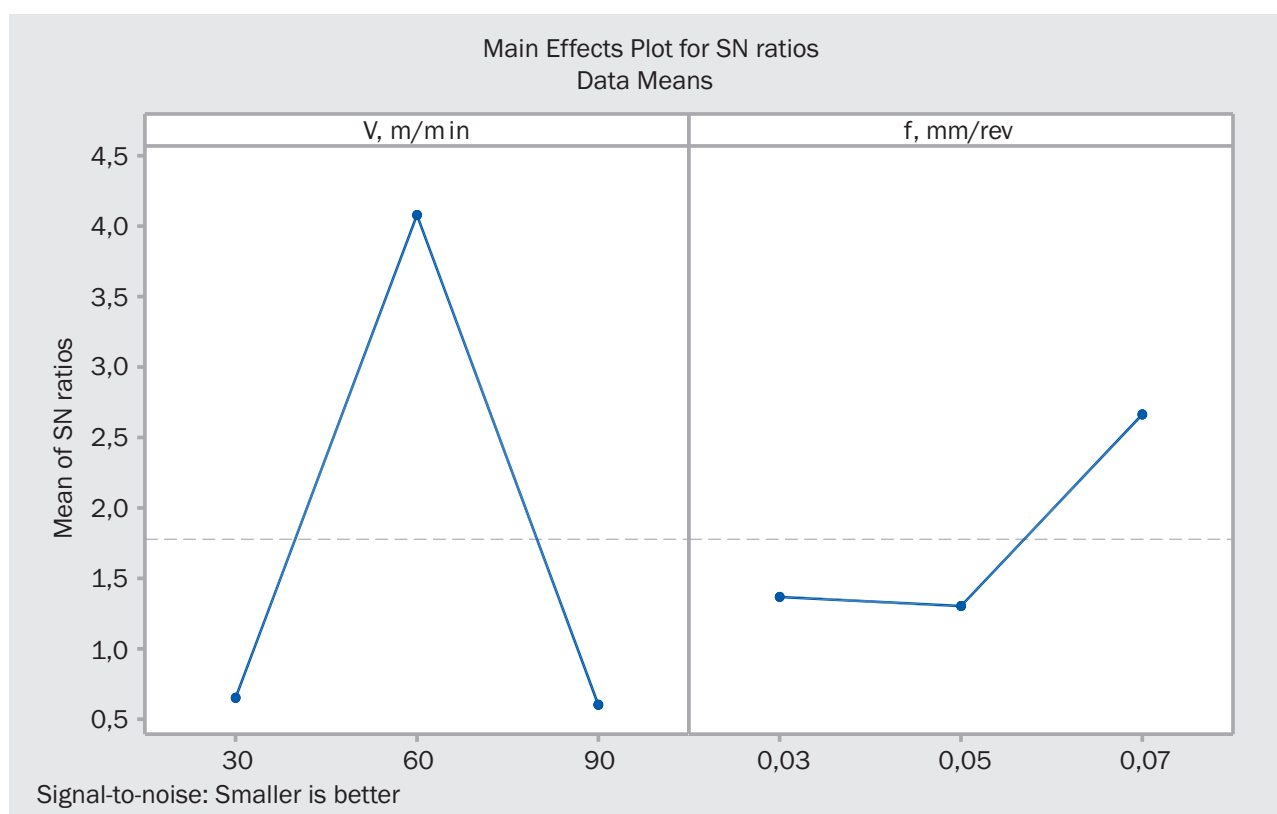
**Fig. 2.** Evaluation of the process parameter influence on the output characteristic  $R_a$  by analyzing the signal-to-noise ratio SN for alloy 92

для каждого из параметров точения, построенные в программном комплексе MiniTab на основе данных табл. 6 и 7. Оптимальное сочетание технологических параметров процесса можно определить, выбрав для каждого параметра номер уровня, имеющий максимальное значение отношения сигнал/шум. Из данных табл. 6 и 7 и графиков, представленных на рис. 2 и 3, находим оптимальное сочетание параметров  $V_c$  (2),  $f$  (3) по критерию минимизации шероховатости поверхности. Для сплава 92 оптимальным будет являться сочетание скорости резания  $V_c = 30$  мм/мин и подачи  $f = 0,07$  мм/об, для сплава 94 –  $V_c = 60$  мм/мин и  $f = 0,07$  мм/об.

Для образцов с наименьшим значением шероховатости поверхности были определены значения микротвердости поверхностного слоя (табл. 8).

Из данных табл. 8 видим, что наибольшее значение микротвердости поверхностного слоя после точения имеет сплав 92. Микротвердость сплава 92 увеличилась на 14,6% в сравнении с первоначальным значением (280 HV).

После точения заготовки из сплава 92 на токарном продольном автомате Hanwha XP12S (Корея) с установленным режимом были изготовлены винты двух типоразмеров ( $d = 4,5$  мм  $l = 60$  мм;  $d = 4,5$  мм и  $l = 90$  мм) для остеointеграционного протезирования ампутированной конечности (рис. 4).



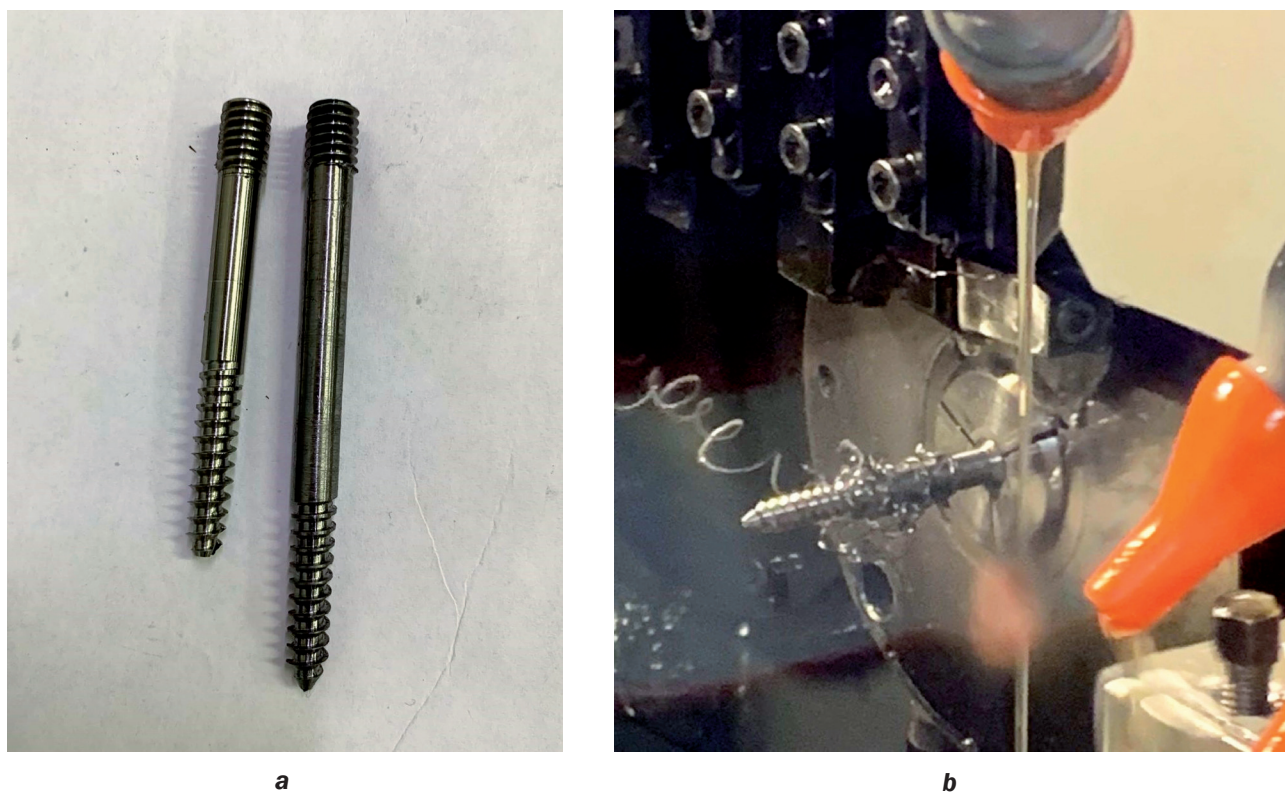
**Рис. 3.** Оценка влияния параметров процесса на выходную характеристику  $R_a$  путем анализа отношения сигнал/шум SN для сплава 94

**Fig. 3.** Evaluation of the process parameter influence on the output characteristic  $R_a$  by analyzing the signal-to-noise ratio SN for alloy 94

**Таблица 8.** Значения микротвердости  $HV_{0,05}$  поверхностного слоя образцов с наименьшими значениями шероховатости поверхности

**Table 8.** Values of surface layer microhardness  $HV_{0,05}$  of samples with the lowest surface roughness values

№ образца	Значение микротвердости $HV_{0,05}$			Среднее значение $HV_{0,05}$
	1	2	3	
92	322	323	318	321
94	261	247	248	252



**Рис. 4.** Обработка на станке (а) и внешний вид (б) готового имплантата для остеointеграционного протезирования

**Fig. 4.** Machine processing (a) and appearance (b) of the finished implant for osseointegration prosthetics

Для изготовления резьбы использовалась режущая пластина 3 VER 1.4 SAGEPARTIAL (Vargus, Израиль), применялся следующий режим резьбонарезания: скорость резания  $V_c = 30$  м/мин; подача  $f = 1,5$  мм/об;  $A_p = 0,05$  мм за проход.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено ранжирование параметров процесса обработки точением и определены оптимальные режимы точения титановых сплавов системы Ti-Nb-Zr по критерию минимизации шероховатости поверхности. Установлено, что максимальное влияние на шероховатость поверхности оказывает скорость резания  $V_c$ . Оптимальными сочетаниями значений режимов точения для достижения минимальной шероховатости поверхности являются: сплав 92 – скорость  $V_c = 30$  м/мин и подача  $f = 0,07$  мм/об; сплав 94 – скорость  $V_c = 60$  м/мин и подача  $f = 0,07$  мм/об.

Установлено, что присутствие в титановом сплаве (сплав 94) около 2% тантала (Ta) и олова (Sn) позволяет минимизировать шероховатость поверхности до значения  $R_a = 0,684$  мкм при более высокой скорости резания  $V_c = 60$  м/мин по сравнению со скоростью  $V_c = 30$  м/мин (сплав 92), тем самым повысив производительность обработки.

Для образцов титановых сплавов 92 и 94 определены значения микротвердости  $HV_{0,05}$  поверхностного слоя: для сплава 92 – среднее значение микротвердости  $HV_{0,05}$  составило 321 HV, для сплава 94 – 252 HV. Микротвердость сплава 92 увеличилась на 14,6% в сравнении с первоначальным значением (280 HV).

Установленные оптимальные режимы точения для титановых сплавов 92 и 94 применены при изготовлении имплантов для остеointеграционного протезирования.

## Список источников

1. Chen Yu., Han Pingping, Dehghan-Manshadi A., Kent D., Ehtemam-Haghighi Sh., Jowers C., et al. Sintering and biocompatibility of blended elemental Ti-xNb alloys // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. 2020. Vol. 104. P. 103691. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2020.103691>. EDN: KLEIQC.



2. Abdel-Hady G.M., Niinomi M. Biocompatibility of Ti-alloys for long-term implantation // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2013. Vol. 20. P. 407–415. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2012.11.014>. EDN: RMMTLD.
3. Mishchenko O., Pogorielov M., Ovchynnykov O., Kapustian O. New Zr-Ti-Nb alloy for medical application: development, chemical and mechanical properties, and biocompatibility // *Materials*. 2020. Vol. 13. Iss. 6. P. 1306. <https://doi.org/10.3390/ma13061306>. EDN: SSBOFU.
4. Zhang Yuqing, Sun Danni, Cheng Jun, Tsoi James Kit Hon, Chen Jiang. Mechanical and biological properties of Ti-(0-25 Wt%)Nb alloys for biomedical implants application // *Regenerative Biomaterials*. 2019. Vol. 7. Iss. 1. P. 119–127. <https://doi.org/10.1093/rb/rbz042>. EDN: ZUUGDE.
5. Angelescu R.M., Raducanu D., Cojocaru V.D., Angelescu M.L., Butu M., Cinca I., et al. Microstructural and mechanical evaluation of a Ti-Nb-Ta alloy // *Scientific Bulletin-University Politehnica of Bucharest*. 2015. Vol. 77. Iss. 3. P. 221–228.
6. Kim Kyong Min, Kim Hee Young, Miyazaki S. Effect of Zr content on phase stability, deformation behavior, and young's modulus in Ti-Nb-Zr alloys // *Materials*. 2020. Vol. 13. Iss. 2. P. 476. <https://doi.org/10.3390/ma13020476>. EDN: XTDXUB.
7. Boubaker H.B., Le-Coz G., Moufki A., Nouari M., Laheurte P. Experimental and numerical investigations of cutting forces and chip formation during precision cutting of Ti42Nb titanium alloy produced by laser-based powder bed fusion // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024. Vol. 131. Iss. 2. P. 701–717. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11511-0>. EDN: XMLOYE.
8. Maurotto A., Roy A., Babitsky V.I., Silberschmidt V.V. Analysis of machinability of Ti- and Ni-based alloys // *Solid State Phenomena*. 2012. Vol. 188. P. 330–338. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.188.330>. EDN: PQFLAR.
9. Takahashi M., Kikuchi M., Takada Yu. Grindability of Ti-Nb-Cu alloys for dental machining applications // *Metals*. 2022. Vol. 12. Iss. 5. P. 861. <https://doi.org/10.3390/met12050861>. EDN: DAPFER.
10. Jiang Shengxian, Sakurai J., Aono Y., Hata S. Novel evaluation method for machinability of Ni-Nb-Ti alloy // *The Proceedings of the Materials and Processing Conference*. 2013. Vol. 21. P. 632-1–632-1. [https://doi.org/10.1299/jsmemp.2013.21\\_632-1](https://doi.org/10.1299/jsmemp.2013.21_632-1).
11. Sakthivelu S., Anandaraj T. Prediction of optimum machining parameters on surface roughness and MRR in CNC drilling of AA6063 alloy using design of experiments // *International Journal of Engineering Research and Technology*. 2017. Vol. 5. Iss. 13. P. 1–5. <https://doi.org/10.17577/IJERTCONV5IS13078>.
12. Krishnaprakash, Pavitra A. Optimization of drilling parameters on surface roughness of Al 1200-SiC composites using Taguchi analysis // *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*. 2018. Vol. 15. Iss. 3. P. 77–84. <https://doi.org/10.9790/1684-1503047784>.
13. Suthar J., Teli S.N., Murumkar A. Drilling process improvement by Taguchi method // *Materialstoday: Proceedings*. 2021. Vol. 47. Part 11. P. 2814–2819. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.533>.
14. Kuznetsov V.P., Dmitriev A.I., Anisimova G.S., Semenova Yu.V. Optimization of nanostructuring burnishing technological parameters by Taguchi method // *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2016. Vol. 124. P. 012022. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/124/1/012022>.
15. Кузнецов В.П., Анисимова Г.С., Семенова Ю.В. Оптимизация методом Тагучи параметров наноструктурирующего выглаживания стали 20Х13 по критерию упрочнения поверхностного слоя // *Теплофизические и технологические аспекты повышения эффективности машиностроительного производства: тр. IV Междунар. науч.-техн. конф. (Резниковские чтения) (г. Тольятти, 27–29 мая 2015 г.)*. Тольятти: ТГУ, 2015. Т. 1. С. 279–286. EDN: TZDFOD.
16. Kuznetsov V.P., Gorgots V.G., Vorontsov I.A., Skorobogatov A.S., Kosareva A.V. Surface hardening of medical parts made of AISI 304 austenitic stainless steel by nanostructuring burnishing // *Physical Mesomechanics of Condensed Matter: Physical Principles of Multiscale Structure formation and the Mechanisms of Nonlinear behavior: AIP Conference Proceedings (Tomsk, 5–8 September 2022)*. Tomsk: AIP Conference Proceedings, 2023. Vol. 2899. Iss. 1. P. 020085. <https://doi.org/10.1063/5.0162889>. EDN: SZVLIH.
17. Patel R., Patel S., Patel P., Parmar P., Vohra J. Optimization of machining parameters for EN8D carbon steel by Taguchi's orthogonal array experiments in CNC turning // *Materialstoday: Proceedings*. 2021. Vol. 44. Part 1. P. 2325–2329. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.12.409>.
18. Lin Yue-Feng, Lai Pei-Yu, Chen Guan-Yu, Zhang Zi-Peng. Optimization of surface roughness and cylindricity using the Taguchi method in boring of S45C steel with tungsten steel and phosphor bronze damping materials // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024. Vol. 135. P. 5999–6015. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14796-x>.
19. Eroshenko A.Yu., Legostaeva E.V., Uvarkin P.V., Tolmachev A.I., Khimich M.A. Kuznetsov V.P., et al. Evolution of microstructure and mechanical properties of Ti-Nb-Zr and Ti-Nb-Zr-Ta-Sn alloys in severe plastic deformation // *Materials Letters*. 2025. Vol. 382. P. 137805. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2024.137805>.
20. Пат. № 2848396, Российская Федерация. С 1, А61L 27/06, А61В 17/86. Способ изготовления компрессионного винта для остеосинтеза костей стопы / В.П. Кузнецов, В.Г. Горгоц, А.С. Судницын, Ю.П. Шаркеев, А.И. Толмачев, А.Ю. Ерошенко, А.В. Корелин, Д.С. Гончаров; заявитель и патентообладатель Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. № 2024131299. Заявл. 18.10.2024; опубл. 17.10.2025. EDN: PSOUUV.

## References

1. Chen Yu., Han Pingping, Dehghan-Manshadi A., Kent D., Ehtemam-Haghighi Sh., Jowers C., et al. Sintering and biocompatibility of blended elemental Ti-xNb alloys. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2020;104:103691. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2020.103691>. EDN: KLEIQC.
2. Abdel-Hady G.M., Niinomi M. Biocompatibility of Ti-alloys for long-term implantation. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2013;20:407-415. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2012.11.014>. EDN: RMMTLD.
3. Mishchenko O., Pogorielov M., Ovchynnykov O., Kapustian O. New Zr-Ti-Nb alloy for medical application: development, chemical and mechanical properties, and biocompatibility. *Materials*. 2020;13(6):1306. <https://doi.org/10.3390/ma13061306>. EDN: SSBOFU.
4. Zhang Yuqing, Sun Danni, Cheng Jun, Tsoi James Kit Hon, Chen Jiang. Mechanical and biological properties of Ti-(0-25 Wt%)Nb alloys for biomedical implants application. *Regenerative Biomaterials*. 2019;7(1):119-127. <https://doi.org/10.1093/rb/rbz042>. EDN: ZUUGDE.
5. Angelescu R.M., Raducanu D., Cojocaru V.D., Angelescu M.L., Butu M., Cinca I., et al. Microstructural and mechanical evaluation of a Ti-Nb-Ta alloy. *Scientific Bulletin-University Politehnica of Bucharest*. 2015;77(3):221-228.
6. Kim Kyong Min, Kim Hee Young, Miyazaki S. Effect of Zr content on phase stability, deformation behavior, and young's modulus in Ti-Nb-Zr alloys. *Materials*. 2020;13(2):476. <https://doi.org/10.3390/ma13020476>. EDN: XTDXUB.
7. Boubaker H.B., Le-Coz G., Moufki A., Nouari M., Laheurte P. Experimental and numerical investigations of cutting forces and chip formation during precision cutting of Ti42Nb titanium alloy produced by laser-based powder bed fusion. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024;131(2):701-717. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11511-0>. EDN: XMLOY.
8. Maurotto A., Roy A., Babitsky V.I., Silberschmidt V.V. Analysis of machinability of Ti- and Ni-based alloys. *Solid State Phenomena*. 2012;188:330-338. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.188.330>. EDN: PQFLAR.
9. Takahashi M., Kikuchi M., Takada Yu. Grindability of Ti-Nb-Cu alloys for dental machining applications. *Metals*. 2022;12(5):861. <https://doi.org/10.3390/met12050861>. EDN: DAPFER.
10. Jiang Shengxian, Sakurai J., Aono Y., Hata S. Novel evaluation method for machinability of Ni-Nb-Ti alloy. *The Proceedings of the Materials and Processing Conference*. 2013;21:632-1-632-1. [https://doi.org/10.1299/jsmemp.2013.21\\_632-1](https://doi.org/10.1299/jsmemp.2013.21_632-1).
11. Sakthivelu S., Anandaraj T. Prediction of optimum machining parameters on surface roughness and MRR in CNC drilling of AA6063 alloy using design of experiments. *International Journal of Engineering Research and Technology*. 2017;5(13):1-5. <https://doi.org/10.17577/IJERTCONV5IS13078>.
12. Krishnaprakash, Pavitra A. Optimization of drilling parameters on surface roughness of Al 1200-SiC composites using Taguchi analysis. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*. 2018;15(3):77-84. <https://doi.org/10.9790/1684-1503047784>.
13. Suthar J., Teli S.N., Murumkar A. Drilling process improvement by Taguchi method. *Materialstoday: Proceedings*. 2021;47(11):2814-2819. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.533>.
14. Kuznetsov V.P., Dmitriev A.I., Anisimova G.S., Semenova Yu.V. Optimization of nanostructuring burnishing technological parameters by Taguchi method. *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2016;124:012022. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/124/1/012022>.
15. Kuznetsov V.P., Anisimova G.S., Semenova Yu.V. Optimization of nanostructuring smoothing parameters of 20Kh13 steel by the Taguchi method according to the surface layer hardening criterion. In: *Teplofizicheskie i tekhnologicheskie aspekty povysheniya effektivnosti mashinostroitel'nogo proizvodstva: trudy IV Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii (Reznikovskie chteniya) = Thermophysical and technological aspects of increasing efficiency of mechanical engineering production: Proceedings of the 4th International Scientific and Technical Conference (Reznikov Readings)*. 27-29 May 2015, Tolyatti: Tolyatti State University; 2015, p. 279-286. (In Russ.). EDN: TZDFOD.
16. Kuznetsov V.P., Gorgots V.G., Vorontsov I.A., Skorobogatov A.S., Kosareva A.V. Surface hardening of medical parts made of AISI 304 austenitic stainless steel by nanostructuring burnishing. In: *Physical Mesomechanics of Condensed Matter: Physical Principles of Multiscale Structure formation and the Mechanisms of Nonlinear behavior: AIP Conference Proceedings*. 5-8 September 2022, Tomsk. Tomsk: AIP Conference Proceedings; 2023, vol. 2899, Iss. 1, p. 020085. <https://doi.org/10.1063/5.0162889>. EDN: SZVLIH.
17. Patel R., Patel S., Patel P., Parmar P., Vohra J. Optimization of machining parameters for EN8D carbon steel by Taguchi's orthogonal array experiments in CNC turning. *Materialstoday: Proceedings*. 2021;44(1):2325-2329. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.12.409>.
18. Lin Yue-Feng, Lai Pei-Yu, Chen Guan-Yu, Zhang Zi-Peng. Optimization of surface roughness and cylindricity using the Taguchi method in boring of S45C steel with tungsten steel and phosphor bronze damping materials. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024;135:5999-6015. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14796-x>.
19. Eroshenko A.Yu., Legostaeva E.V., Uvarin P.V., Tolmachev A.I., Khimich M.A. Kuznetsov V.P., et al. Evolution of microstructure and mechanical properties of Ti-Nb-Zr and Ti-Nb-Zr-Ta-Sn alloys in severe plastic deformation. *Materials Letters*. 2025;382:137805. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2024.137805>.
20. Kuznetsov V.P., Gorgots V.G., Sudnitsyn A.S., Sharkeev Yu.P., Tolmachev A.I., Eroshenko A.Yu., Korelin A.V., Goncharov D.S. *Method of manufacturing a compression screw for osteosynthesis of foot bones*. Patent RF, no. 2848396; 2024. (In Russ.). EDN: PSOUUV.



## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Виктор Павлович Кузнецов,**

д.т.н., профессор,  
профессор кафедры термообработки  
и физики металлов,  
Уральский федеральный университет имени  
первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия;  
заведующий лабораторией научных исследований  
биомеханики и инжиниринга,  
Национальный медицинский исследовательский  
центр травматологии и ортопедии имени  
академика Г.А. Илизарова,  
640041, г. Курган, ул. Марии Ульяновой, 6, Россия  
✉ wpkuzn@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-8949-6345>

**Дмитрий Сергеевич Гончаров,**

аспирант,  
Уральский федеральный университет имени  
первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия  
[goncharovv.d@yandex.ru](mailto:goncharovv.d@yandex.ru)  
<https://orcid.org/0009-0009-9603-5980>

**Олег Геннадьевич Блинков,**

д.т.н., доцент,  
заведующий кафедрой «Технологии  
машиностроения, станки и инструменты»,  
Уральский федеральный университет имени  
первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия  
[o.g.blinkov@urfu.ru](mailto:o.g.blinkov@urfu.ru)  
<https://orcid.org/0000-0001-7353-9582>

**Юрий Петрович Шаркеев,**

д.ф.-м.н., профессор,  
главный научный сотрудник лаборатории  
физики наноструктурных биоконпозитов,  
Институт физики прочности и  
материаловедения СО РАН,  
634055, г. Томск, просп. Академический, 2/4, Россия  
[sharkeev@ispms.ru](mailto:sharkeev@ispms.ru)  
<https://orcid.org/0000-0001-5037-245X>

## Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготов-  
ку публикации.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный ва-  
риант рукописи.*

## Информация о статье

Статья поступила в редакцию 21.07.2025 г.; одобрена  
после рецензирования 28.08.2025 г.; принята к пу-  
бликации 10.09.2025 г.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Viktor P. Kuznetsov,**

Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Professor of the Department of Heat Treatment  
and Physics of Metals,  
Ural Federal University named after the first  
President of Russia B.N. Yeltsin,  
19, Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia  
Head of the Laboratory of Scientific Research  
in Biomechanics and Engineering,  
National Ilizarov Medical Research  
Centre for Traumatology and Ortopaedics,  
6 Maria Ulyanova St., Kurgan 640041, Russia  
✉ [wpkuzn@mail.ru](mailto:wpkuzn@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0001-8949-6345>

**Dmitrii S. Goncharov,**

Postgraduate Student,  
Ural Federal University named after the first  
President of Russia B.N. Yeltsin,  
19, Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia  
[goncharovv.d@yandex.ru](mailto:goncharovv.d@yandex.ru)  
<https://orcid.org/0009-0009-9603-5980>

**Oleg G. Blinkov,**

Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Head of the Department of Mechanical  
Engineering Technologies, Machine Tools and Instruments,  
Ural Federal University named after the first  
President of Russia B.N. Yeltsin,  
19, Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia  
[o.g.blinkov@urfu.ru](mailto:o.g.blinkov@urfu.ru)  
<https://orcid.org/0000-0001-7353-9582>

**Yurii P. Sharkeev,**

Dr. Sci. (Phys.-Math), Professor,  
Chief Researcher of the Laboratory  
of Physics of Nanostructured Biocomposites,  
Institute of Strength Physics and Materials Science,  
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
2/4 Akademicheskii pr., Tomsk 634055, Russia  
[sharkeev@ispms.ru](mailto:sharkeev@ispms.ru)  
<https://orcid.org/0000-0001-5037-245X>

## 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 21.07.2025; approved  
after reviewing 28.08.2025; accepted for publication  
10.09.2025.



## Выбор режимов резания в зависимости от прочности режущего инструмента

Б.Б. Пономарев<sup>1</sup>, Ван Дык Нгуен<sup>2✉</sup>, В.М. Свинин<sup>3</sup>, Н.В. Вулых<sup>4</sup>, Ю.В. Димов<sup>5</sup>

<sup>1-5</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

**Резюме.** Цель – повышение эффективности процесса свободного резания металлов за счет максимизации работоспособности режущего инструмента путем выбора режимов резания в зависимости от его запаса прочности. В работе использовали метод конечных элементов со специальной моделью Джонсона–Кука и алгоритмом локальной адаптации сетки срезаемого слоя Arbitrary Lagrangian-Eulerian для моделирования процесса резания и выявления распределения напряженного состояния в инструменте. В качестве материала инструмента принят твердый сплав VK8, заготовки – сталь 45. Также были изучены алюминиевый и титановый сплавы 6061T-6, Ti-6Al-4V – в качестве материалов заготовки. Адекватность модели подтверждена соответствием полученных распределений напряжений «растяжение–сжатие» в инструменте, наблюдаемых в виде линий изохром при резании свинца резцом из эпоксидного материала. Установлено влияние на прочность режущего инструмента режимов резания, механических свойств материалов заготовок и геометрии режущей кромки инструмента. Выявлено, что при увеличении глубины резания от 0,2 до 1,4 мм максимальное главное напряжение  $\sigma_1^{\max}$  линейно возрастает в 2,05 раза, а прочность режущего зуба инструмента, соответственно, уменьшается. При глубине резания 1,4 мм максимальное главное напряжение  $\sigma_1^{\max}$  достигает 780 МПа, и режущий инструмент разрушается. Показано, что влияние скорости резания изменяется по экспоненте. С ростом переднего угла прочность режущего инструмента уменьшается. Так, при обработке инструментом с передним углом, равным 20° (при  $\sigma_1^{\max} = 760$  МПа), он теряет способность резания. Установлено, что запас прочности у инструмента при обработке материала из алюминиевого сплава 6061T-6 в 3,1 раза больше, чем при свободном резании заготовки из стали 45. На основе расчетной модели и результатов анализа взаимосвязи прочности режущего инструмента с технологическими факторами предложена методика назначения режимов свободного резания с учетом его запаса прочности.

**Ключевые слова:** методика, моделирование, метод конечных элементов, рациональный режим резания, работоспособность, максимизация, запас прочности

**Для цитирования:** Пономарев Б.Б., Нгуен Ван Дык, Свинин В.М., Вулых Н.В., Димов Ю.В. Выбор режимов резания в зависимости от прочности режущего инструмента // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 4. С. 477–491. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-4-477-491>. EDN: XPEMKH.

## MECHANICAL ENGINEERING

### Original article

## Selection of cutting parameters based on tool strength

Boris B. Ponomarev<sup>1</sup>, Nguyen Van Duc<sup>2✉</sup>, Valery M. Svinin<sup>3</sup>,  
Nikolay V. Vulykh<sup>4</sup>, Yuri V. Dimov<sup>5</sup>

<sup>1-5</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

**Abstract.** This study aimed to improve the efficiency of free cutting of metals by maximizing tool performance. This was achieved through the selection of cutting parameters based on the safety factor of tools. This work employed the finite element method with a Johnson–Cook constitutive model and an Arbitrary Lagrangian–Eulerian mesh adaptation algorithm to simulate the cutting process and reveal the stress distribution in the tool. The tool material was cemented carbide VK8, while the workpieces were steel 45, aluminum alloy 6061-T6, and titanium alloy Ti-6Al-4V. Model adequacy was confirmed by the agreement between the calculated tensile–compressive stress distributions in the tool and the isochromatic lines observed during cutting of lead with an epoxy resin tool. The study established the influence of cutting regimes, workpiece mechanical properties, and tool edge geometry on tool strength. An increase in the cutting depth from 0.2 to 1.4 mm led to a linear increase in the maximum principal stress  $\sigma_1^{\max}$  by

a factor of 2.05, thereby reducing tool tooth strength. At a depth of 1.4 mm,  $\sigma_1^{\text{макс}}$  reached 780 MPa, resulting in tool failure. The influence of cutting speed was shown to follow an exponential relationship. An increase in the rake angle reduced tool strength; for instance, during machining with a rake angle of  $20^\circ$  ( $\sigma_1^{\text{макс}} = 760$  MPa), the tool failed to maintain its cutting capacity. The safety factor of the tool when machining aluminum alloy 6061-T6 was found to be 3.1 times greater than during free cutting of steel 45. The computational model and analysis of the relationship between tool strength and technological factors enabled the development of a methodology for assigning free-cutting regimes that incorporate the safety factor of a tool.

**Keywords:** methodology, modeling, finite element method, rational cutting mode, efficiency, maximization, safety margin

**For citation:** Ponomarev B.B., Nguyen Van Duc, Svinin V.M., Vulykh N.V., Dimov Yu.V. Selection of cutting parameters based on tool strength. *iPolytech Journal*. 2025;29(4):477-491. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-4-477-491>. EDN: XPEMKH.

## ВВЕДЕНИЕ

В практике резания металлов остается нерешенной проблема, связанная с определением на стадии технологической подготовки производства периода эксплуатационной работоспособности режущего инструмента, с учетом его прочностных характеристик, что не позволяет достичь максимального эффекта использования инструмента и процесса резания в целом. Это объясняется отсутствием обоснованных решений данной проблемы и, в частности, критериев и рекомендаций по предельно допустимым значениям прочности при назначении режимов резания, а также разработанных методов прогнозирования момента потери работоспособности инструментом по запасу прочности, что приводит к неполному использованию возможностей режущего инструмента или его разрушению в процессе работы. В настоящее время для поиска решения этой проблемы в России и за рубежом проводятся исследования, направленные на разработку методов назначения режимов, которые не только позволяют достигать заданных требований к точности формы и качества обработанной поверхности, но и повышать эффективность процесса резания путем полного использования запаса прочности режущего инструмента, заложенного в его конструкции. При этом количество опубликованных работ, авторы которых предлагали бы технологические решения с целью повышения эффективности процесса резания с использованием подходов, направленных на достижение максимизации эксплуатационной работоспособности режущего инструмента, с учетом запаса прочности, весьма ограничено<sup>6</sup> [1–4]. В связи с этим поиск решений и путей повышения эффективности использования режущего инструмента и связанных с этим напрямую вопросов минимизации экономических потерь в процессах резания металлов является достаточно новым и перспективным направлением исследования.

Известно, что запас прочности режущего инструмента определяется на основе распределения напряжений в его материале, возникающих под действием сопротивления срезаемого слоя материала заготовки в процессе резания, и величинами значений, определяющими допускаемую прочность этого материала [1, 2]. Поэтому для определения запаса прочности режущего инструмента требуется провести расчет напряжений. Такой расчет может быть выполнен с помощью аналитического метода или с использованием метода конечных элементов. Суть аналитического метода заключается в том, что напряжения в режущем инструменте определяются с помощью математических зависимостей и допущением, что воздействие сопротивления материала срезаемого слоя заготовки заменяется силами резания, действующими на него в определенный момент времени. Такая замена сводит динамическую задачу расчета напряжений в режущем инструменте к статической, а картина распределения напряжений в материале может не соответствовать реальности.

Метод конечных элементов (МКЭ) позволяет учитывать динамику процесса. При использовании МКЭ в модели процесса резания режущий инструмент отображается как тело, контактирующее с заготовкой и деформирующееся под прямым воздействием сопротивления удаляемой части материала заготовки. Это позволяет получить распределение напряжений, максимально соответствующее реальным условиям обработки.

<sup>6</sup>Ким А.Б. Резание металлов и режущий инструмент: метод. указания и инд. задания. Томск: ТПУ, 2013. 72 с.

Цель настоящего исследования заключается в поиске метода назначения режимов резания в зависимости от прочностных возможностей режущего инструмента при свободном резании с учетом хрупко-пластического состояния обрабатываемого материала.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В РЕЖУЩЕМ ИНСТРУМЕНТЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ПРОГРАММЫ ИНЖЕНЕРНОГО АНАЛИЗА ABAQUS

Возможности применения МКЭ для моделирования процесса резания отражены в ряде отечественных и зарубежных работ [5–18]. В большинстве из них [6–11, 13, 15–17] в качестве модели режущего инструмента принято абсолютно жесткое тело, недеформируемое в процессе резания под действием сопротивления материала срезаемого слоя заготовки. Задание модели инструмента в виде абсолютно жесткого тела обеспечивает сокращение времени расчета, но в этом случае в нем условно не возникают напряжения. В некоторых работах [12, 14, 18] путем задания модели режущего инструмента как деформируемого тела получены результаты по распределению напряжений, но подтверждение достоверности не представлено. Оценка же достоверности полученных результатов имеет самое важное значение, позволяющее сделать заключение об адекватности модели, чтобы рекомендовать ее к практическому применению и использованию в дальнейших исследованиях.

В настоящей работе в качестве численного примера моделирования процесса выбрана схема, представленная на рис. 1, обработки заготовки при свободном резании. Режимы резания взяты из нормативов режимов резания<sup>7</sup>: скорость резания  $V = 0,25$  м/с; глубина резания  $t = 0,4$  мм. Параметры геометрии режущего инструмента: передний и задний углы  $\gamma = 10^\circ$ ,  $\alpha = 10^\circ$ , радиус округления  $\rho = 20$  мкм. Материал заготовки – конструкционная сталь 45 ГОСТ 1050-2013<sup>8</sup>, а инструмента – твердый сплав марки ВК8 ГОСТ 3882-74<sup>9</sup> с допускаемым пределом прочности  $\sigma_b = 735$  МПа [1]. Механические свойства этих материалов приведены в табл. 1.

Моделирование процесса обработки с использованием МКЭ предложено осуществлять последовательно. На первом этапе строятся геометрические модели заготовки и инструмента, затем осуществляется описание моделей материалов и создание сетки из предварительно выбранных элементов. Далее описываются характеристика контакта инструмента с заготовкой, граничные условия и требования к результатам анализа. Наиболее важным является

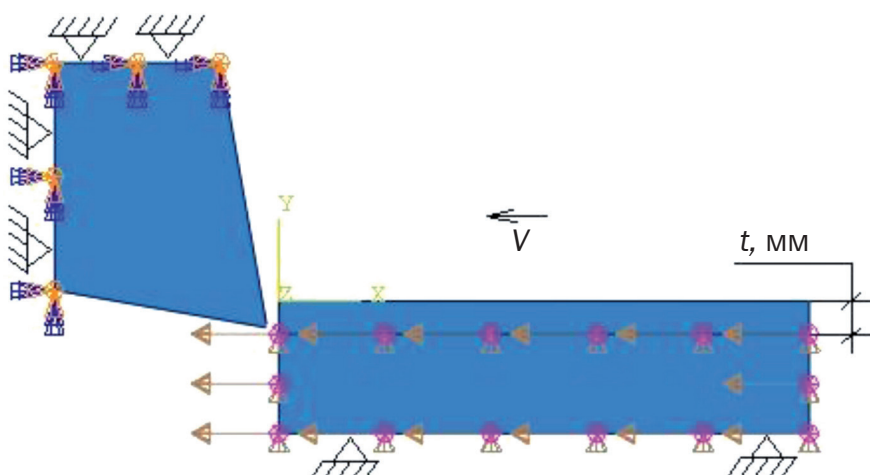


Рис. 1. Схема обработки свободным резанием  
Fig. 1. Free cutting processing diagram

<sup>7</sup>Нормативы режимов резания. Часть 2: Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания для нормирования работ, выполняемых на универсальных и многоцелевых станках с числовым программным управлением. М.: Экономика, 1990. 473 с.

<sup>8</sup>ГОСТ 1050-2013. Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия. Введ. 28.10.2014. М.: Стандартинформ, 2014.

<sup>9</sup>ГОСТ 3882-74. Сплавы твердые спеченные. Марки. Введ. 15.08.74. (изм. в 2008 г.). М.: Изд-во стандартов, 2008.

этап описания моделей материалов и создание сетки элементов. Под моделью материала в данном случае понимается база данных, представленная в виде множества групп, соответствующих каждому отдельному свойству материала. Описание каждой группы этой базы производится путем задания коэффициентов, полученных по результатам проведенных экспериментов или из справочной литературы.

Известно, что в процессе резания (укрупненно) в материале заготовки протекают последовательно три сложных физико-механических процесса: упругое деформирование, пластическое деформирование и отделение срезаемого слоя от заготовки [19]. В материале же инструмента – только упругое деформирование.

В настоящее время в программах инженерного анализа для описания материала заготовки наиболее часто используется специальная модель материала Джонсона–Кука<sup>10</sup> [21]. В этой модели упругая деформация описывается выражением (1) с двумя параметрами: модулем Юнга  $E$  и коэффициентом Пуассона  $\mu$ :

$$\sigma = E \times \varepsilon, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – эквивалентное напряжение, МПа;  $\varepsilon$  – деформация;  $E = G(1 + \mu)$ ,  $G$  здесь – модуль сдвига, МПа.

Для стали 45 их значения представлены в табл. 1.

**Таблица 1.** Параметры свойств стали 45 по ГОСТ 1050-2013<sup>8</sup> и ВК8 [20]

**Table 1.** Steel 45 property parameters according to GOST 1050-2013<sup>8</sup> and VK8 [20]

Параметры материала	Сталь 45	ВК8
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	7800	14 000–16 000
Модуль упругости Юнга, ГПа	200	600
Коэффициент Пуассона	0,3	0,2
Температура плавления, °C	1460	–
Комнатная температура, °C	25	25

Упругая деформация происходит в начальный момент при контакте инструмента с заготовкой и быстро развивается до величины предела текучести  $\sigma_{0,2}$ . После этого в материале заготовки наблюдается эффект пластического деформирования. Для описания пластической деформации Г.Р. Джонсон и У.Г. Кук предложили следующее выражение (2):

$$\bar{\sigma} = [A + B(\bar{\varepsilon}^{pl})^n] \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\bar{\varepsilon}}^{pl}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right], \quad (2)$$

где  $\bar{\sigma}$  – эквивалентное напряжение, МПа;  $A$  – статический предел текучести;  $B$  – модуль деформационного упрочнения;  $C$  – коэффициент скорости деформации;  $n$  – показатель степени в зоне деформационного упрочнения;  $m$  – показатель степени в зоне температурного разупрочнения;  $T$  – абсолютная мгновенная температура материала, °C;  $T_m$  – температура плавления материала, °C;  $T_r$  – комнатная температура, °C;  $\bar{\varepsilon}^{pl}$  – эквивалентная пластическая деформация;  $\dot{\bar{\varepsilon}}^{pl}$  – мгновенная скорость пластической деформации;  $\dot{\varepsilon}_0$  – пороговое значение скорости пластической деформации (1 с<sup>-1</sup>). Коэффициенты  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $m$ ,  $n$  приведены в табл. 2.

**Таблица 2.** Параметры свойств пластической деформации стали 45 [21]

**Table 2.** Steel 45 plastic deformation property parameters [21]

$A$ , МПа	$B$ , МПа	$C$	$n$	$m$	$\bar{\varepsilon}^{pl}$
553	600,8	0,0134	0,234	1	0,001

<sup>10</sup>Руководство пользователя «ABAQUS 2016». Режим доступа: <http://abaqus.software.polimi.it/v2016/> (дата обращения: 15.08.2025).



С течением времени контакта режущего инструмента с заготовкой эквивалентное напряжение и пластическая деформация непрерывно увеличиваются. Интенсивность возрастания эквивалентного напряжения значительно меньше интенсивности пластического деформирования. При достижении в процессе деформирования материалом критического значения эквивалентного напряжения  $\sigma_0$  (при сжатии  $\sigma_{\text{сж}}$ , растяжении  $\sigma_{\text{р}}$ ) происходит разрушение материала. При этом пластическая деформация  $\varepsilon_f$ , соответственно, достигает критического значения  $\varepsilon_0$ . Для описания этой характеристики в модели Джонсона–Кука использован подход, заключающийся в том, что процесс выделения элементов из сетки, соответствующих разрушению материала в реальном резании, происходит в момент, когда величина эквивалентной пластической деформации  $D_\omega$ , определяемой по выражению (3), превышает 1 [21]:

$$D_\omega = \sum \left( \frac{\Delta \bar{\varepsilon}^{pl}}{\bar{\varepsilon}_f} \right), \quad (3)$$

где  $\Delta \bar{\varepsilon}^{pl}$  – приращение эквивалентной пластической деформации;  $\bar{\varepsilon}_f$  – деформация при разрушении. Суммирование проводят по всем приращениям. Деформация при разрушении сетки имеет вид [21]:

$$\bar{\varepsilon}_f = \left[ D_1 + D_2 \exp \left( D_3 \frac{p}{q} \right) \right] \left[ 1 + D_4 \ln \left( \frac{\dot{\bar{\varepsilon}}^{pl}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[ 1 + D_5 \left( \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right) \right], \quad (4)$$

где  $D_1 \dots D_5$  – параметры разрушения по Джонсону–Куку;  $p$  – давление в рассматриваемом конечном элементе, МПа;  $q$  – эффективное давление, МПа. Значения параметров разрушения по Джонсону–Куку для стали 45 представлены в табл. 3.

**Таблица 3.** Параметры разрушения по Джонсону–Куку стали 45 [21]  
**Table 3.** Johnson–Cook fracture parameters of steel 45 [21]

$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$D_5$
0,06	3,31	-1,96	0,0018	0,58

Как известно, инструмент обычно изготавливают из хрупких материалов или материалов с низкими пластическими свойствами. Пределы текучести и прочности у таких материалов почти одинаковы. При превышении предела упругой деформации материал режущего инструмента разрушается. В связи с этим для описания инструментальных материалов требуется задание только модуля Юнга  $E$  и коэффициента Пуассона  $\mu$  (1). Значения этих коэффициентов в нашем случае представлены в табл. 1.

Особенность выполнения этапа создания сетки элементов при моделировании процесса обработки материала заготовки связана с проблемой искажения формы элементов сетки заготовки, вызванного ее большой деформацией. Эта проблема приводит к нереальной деформации элементов сетки и порождает неточности в результатах моделирования, а также делает невозможным моделирование процесса стружкообразования. Для устранения этой проблемы применен метод локальной адаптации сетки элементов Arbitrary Lagrangian-Eulerian, предназначенный для описания зоны срезаемого слоя заготовки. Этот метод позволяет исключить искажение формы элементов, имеющих большую деформацию, за счет обеспечения свободного перемещения сетки относительно материала исследуемого объекта. При этом узлы каждого элемента адаптированной сетки в модели перемещаются с учетом выполнения условия сохранения топологической формы этого элемента<sup>10</sup>. Недостатком такого подхода является значительное увеличение времени проведения расчетов для получения результатов.

В данной работе на основе предварительного анализа выбран тип элемента S4R с размерами 5 мкм для заготовки с адаптацией сетки в зоне срезаемого слоя, а для инструмента применен тип S4R с размерами 20 мкм.

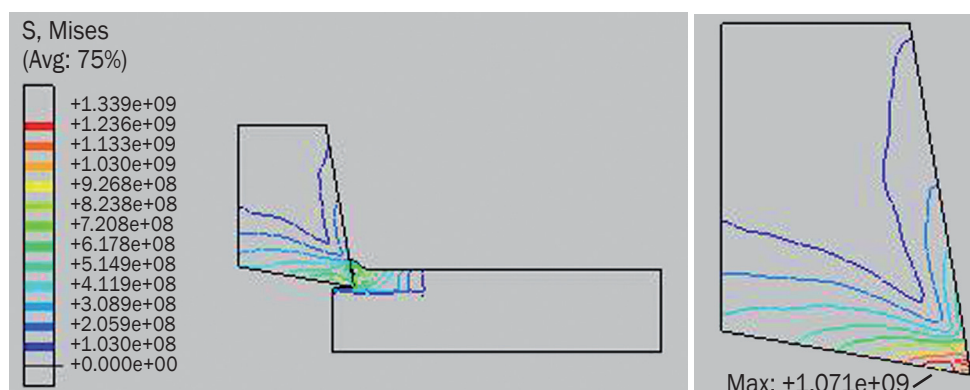
Для описания характеристики контакта режущего инструмента с заготовкой используется коэффициент трения  $\mu = 0,2$ .

Результаты моделирования, включая стружкообразование и распределение возникающих напряжений, могут быть представлены в виде величины эквивалентного напряжения  $\sigma_{\text{ЭКВ}}$  и главных составляющих напряжений  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  ( $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ). На рис. 2 представлено распределение эквивалентного напряжения  $\sigma_{\text{ЭКВ}}$  в сечении материала режущего инструмента, рассчитанного по IV теории прочности (теории Мизеса)<sup>11</sup>:

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}, \quad (5)$$

где  $\sigma_1$  – наибольшее главное напряжение, МПа;  $\sigma_2$  – среднее главное напряжение, МПа;  $\sigma_3$  – наименьшее главное напряжение, МПа.

По полученному распределению напряжений (рис. 2) видно, что эквивалентное напряжение  $\sigma_{\text{ЭКВ}}$  распределяется по изолиниям убывающих значений с тремя центрами, находящимися на передней и задней гранях, а также в зоне округления режущей кромки. Максимальное значение  $\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{макс}} = 1071$  МПа достигается в центре полос на задней грани, расположенном на расстоянии  $x = 0,41$  мм от вершины кромки, а в зоне округления наибольшее значение  $\sigma_{\text{ЭКВ}} = 759$  МПа и на передней грани  $\sigma_{\text{ЭКВ}} = 556$  МПа. По мере удаления от вершины режущей кромки эквивалентное напряжение на передней и задней гранях уменьшается. Это полностью соответствует выводам, полученным на основании экспериментальных исследований и опубликованным авторами в широко известных работах [1, 2].

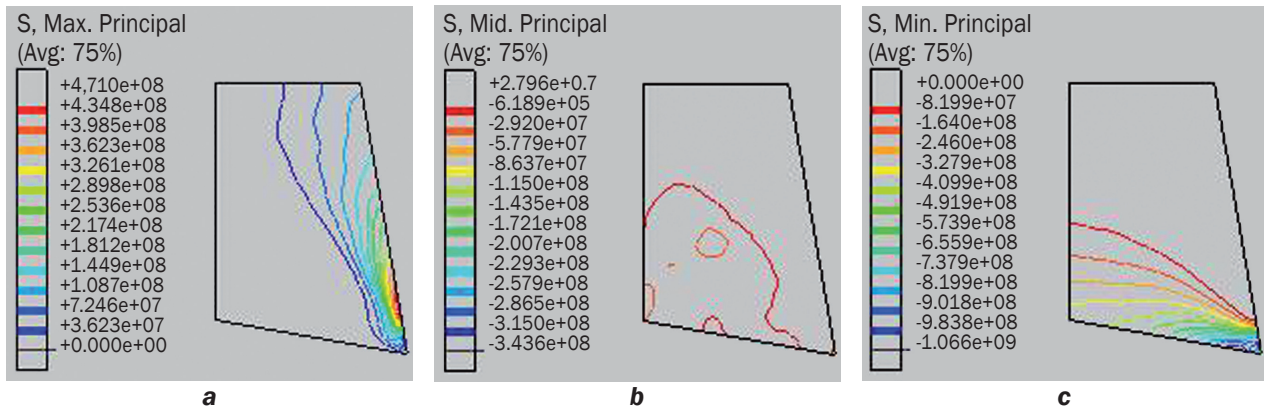


**Рис. 2.** Распределение эквивалентного напряжения в режущем инструменте

**Fig. 2.** Equivalent stress distribution in a cutting tool

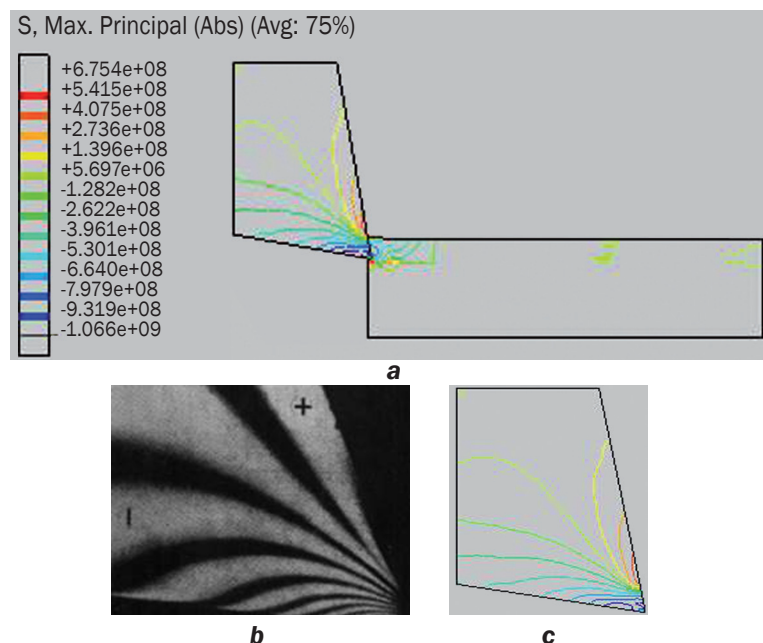
На рис. 3 изображены распределения главных напряжений  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ . Главное напряжение  $\sigma_1$  имеет только положительное значение, главное напряжение  $\sigma_3$  – только отрицательное, а главное напряжение  $\sigma_2$  – как положительное, так и отрицательные значения. Главные напряжения  $\sigma_1, \sigma_3$  распределяются по изолиниям аналогично эквивалентному напряжению. Максимального значения  $\sigma_{1\text{max}} = 471$  МПа достигает на передней поверхности инструмента вне длины контакта передней поверхности режущего клина со стружкой на расстоянии от вершины режущей кромки  $x = 0,597$  мм, и уменьшается до нуля по мере удаления от нее в нормальном сечении инструмента. Своего максимального значения, равного по абсолютной величине  $-1066$  МПа, главное напряжение  $\sigma_{3\text{max}}$  достигает на задней грани также на расстоянии, равном  $0,415$  мм от вершины режущей кромки, и уменьшается с удалением от нее по аналогии с главным напряжением  $\sigma_1$ . Главное напряжение  $\sigma_2$  с положительным и отрицательными значениями располагается в зоне округления режущей кромки и задней грани инструмента и изменяется в диапазоне от  $-346$  МПа до  $+28$  МПа. При этом абсолютная величина отрицательного напряжения значительно больше положительного.

<sup>11</sup>Степин П.А. Сопротивление материалов: учебник. М.: Лань, 2022. 320 с.



**Рис. 3.** Распределение трех главных напряжений  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  в режущем инструменте: а – максимальное  $\sigma_1$ ; б – среднее  $\sigma_2$ ; в – минимальное  $\sigma_3$   
**Fig. 3.** Distribution of three main stresses  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  in a cutting tool: а – maximum  $\sigma_1$ ; б – average  $\sigma_2$ ; в – minimum  $\sigma_3$

Отображение отдельных распределений главных напряжений  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  на рис. 3 не позволяет определить переходную зону по знакам в полном сечении материала режущего инструмента, что создает затруднения в исследовании состояния «растяжение–сжатие» инструмента. Для объективной оценки этого состояния в работе использована функция *Max. Principal (Abs)* программного комплекса ABAQUS, которая позволяет определить наибольшее значение по абсолютной величине напряжения из трех главных напряжений  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ . Распределения в инструменте трех главных напряжений  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  со знаками представлены на рис. 4. Выявлено, что знак максимальных значений главных напряжений  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  в инструменте изменяется от положительного на передней поверхности ( $\sigma_1$ ) к отрицательному на задней ( $\sigma_3$ ). Поэтому часть режущего инструмента с главным напряжением  $\sigma_1$  с положительным знаком испытывает растяжение, а другая часть, включая зону округления режущей кромки и заднюю грань режущего клина, с главными напряжениями  $\sigma_2, \sigma_3$  с отрицательными знаками находится в сжатом состоянии. Это полностью соответствует физическому состоянию режущего зуба инструмента в зоне контакта его с заготовкой, что представлено на рис. 4 б в виде фотографии линий изохром, образованных в эпоксидном резце при свободном резании свинца по результатам исследований, представленных в работе [1, 2, 22].



**Рис. 4.** Изолинии в инструменте: а – напряжения в зоне контакта модели с заготовкой; б – линии изохром [1]; в – напряжения в нормальном сечении резца модели  
**Fig. 4.** Isolines in the tool: а – stresses in the contact zone of the model and the workpiece; б – isochromatic lines [1]; в – stresses in the normal section of the model cutter

Имея на основании модели данные о состоянии материала режущего инструмента – «растяжение–сжатие», появляется возможность определить опасное место в режущем зубе с целью проверки его на вероятность разрушения и провести расчеты по определению запаса прочности. Для проверки и расчета запаса прочности в рассматриваемой работе предложено использовать критерий Писаренко–Лебедева [23]. Согласно этому критерию, наибольшее эквивалентное напряжение в зоне растяжения (опасном месте) не должно превышать допускаемое значение:

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \chi \sigma_i + (1 - \chi) \sigma_1 A^{1-J} \leq \sigma_B, \quad (6)$$

где  $\chi = \frac{\sigma_B}{\sigma_{-B}}$  – параметр, определяющий долю сдвиговой деформации в разрушении;  $\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$  – интенсивность напряжений;  $A$  – константа, определяющая статический фактор развития разрушения;  $J = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i}$  – параметр, характеризующий жесткость нагружения.

Запас прочности режущего инструмента определяется по следующей форме [1, 2]:

$$K_3 = \frac{\sigma_B}{\sigma_{\text{ЭКВ}}}. \quad (7)$$

В рассматриваемом случае распределения главных напряжений зона растяжения находится на передней поверхности режущего зуба вне участка контакта со стружкой. В этой зоне главные напряжения  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ . Тогда эквивалентное напряжение становится равно главному напряжению  $\sigma_{\text{ЭКВ}} = \sigma_1$ . График распределения этого главного напряжения представлен на рис. 5. Опасная точка с наибольшим эквивалентным напряжением  $\sigma_{\text{ЭКВ}} = \sigma_1^{\text{макс}} = 471$  МПа находится на расстоянии от вершины  $x = 0,65 \approx 1,58 \times l$  мм ( $l$  – длина контакта режущего клина со стружкой). Этот вывод полностью соответствует выводам, представленным в работах [1, 2]. В рассматриваемом случае результаты проверки показали, что режущий инструмент сохраняет прочность, а ее запас составляет 1,56.

Соответствие полученных результатов выводам авторов известных работ [1, 2] подтверждает адекватность модели напряженного состояния инструмента в процессе свободного резания, что позволяет применить этот метод в дальнейших исследованиях.

## ВЫБОР РЕЖИМОВ СВОБОДНОГО РЕЗАНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПРОЧНОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

**Изменение прочности режущего инструмента в процессе резания.** Прочность режущего инструмента изменяется в связи с изменением максимального эквивалентного напряжения в опасной точке на передней грани, что представлено на рис. 5. В момент врезания это напряжение достигает наибольших значений  $\sigma_{\text{ЭКВ}} = \sigma_1 = 471$  МПа и, соответственно, запас прочности в этой области инструмента минимален. При установившемся резании эквивалентное напряжение снижается, и запас прочности увеличивается. Во время выхода стружки из контакта с инструментом эквивалентное напряжение незначительно возрастает. Значит, уменьшается и запас прочности.

Самый опасный момент для режущего инструмента, как известно, наступает при входе режущего зуба в материал заготовки. Это объясняется тем, что объем срезаемого слоя, подвергающегося упругой деформации, в этот момент наибольший. Разница эквивалентного напряжения в инструменте в момент входа режущего клина в заготовку и при установившемся резании зависит от глубины резания и свойств материала заготовки. При обработке материалов с большим модулем упругости (материалов после термообработки или хрупко-пластичных) эта разница значительна, что может привести к выкрашиванию или сколам режущей кромки.

Разработанная модель процесса свободного резания позволяет оценить влияние режимов резания, параметров, определяющих геометрию режущего инструмента, и механических свойств материала заготовки на прочность режущего инструмента.



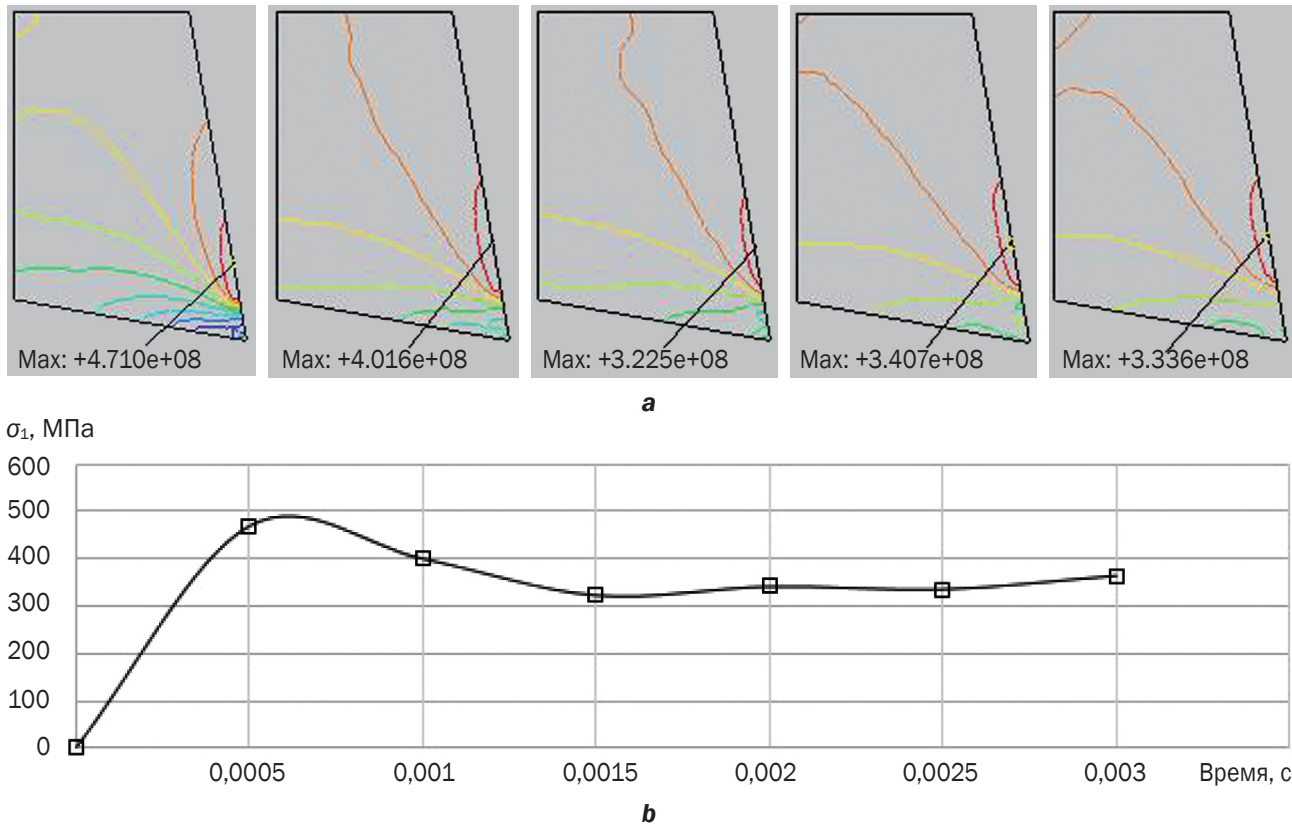
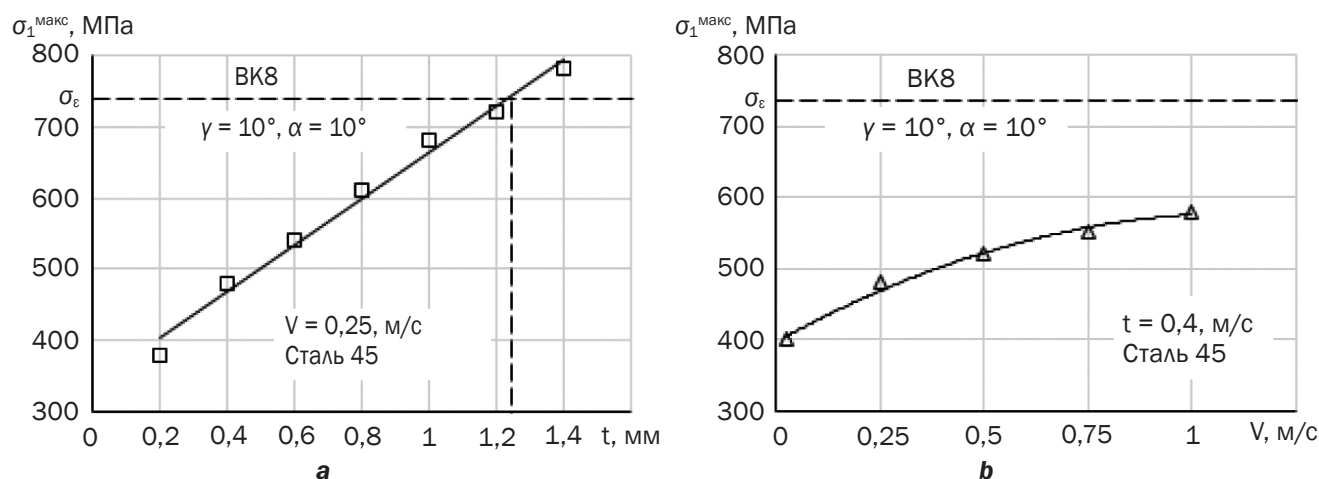


Рис. 5. Изменение главного напряжения в одном рабочем ходе резания  
 Fig. 5. Change in the main stress  $\sigma_1$  in one cutting stroke

**Влияние режимов резания на прочность режущего инструмента.** Как известно, при свободном резании металлов наибольшее влияние на прочность инструмента оказывают глубина  $t$  и скорость резания  $V$ . Результаты моделирования влияния этих параметров на прочность режущего инструмента представлены на рис. 6. При увеличении каждого из этих параметров максимальное главное напряжение  $\sigma_1^{\text{макс}}$  возрастает, что приводит, как было ранее отмечено, к снижению коэффициента запаса прочности режущего инструмента  $K_3$ . По результатам моделирования изменение максимального главного напряжения  $\sigma_1^{\text{макс}}$  по каждому параметру характеризуется по-разному. По параметру глубины резания  $t$  это изменение близко к линейному, а по скорости резания  $V$  – описывается экспонентой. При увеличении глубины резания  $t$  от 0,2 до 1,4 мм интенсивность роста максимального главного напряжения  $\sigma_1^{\text{макс}}$  составляет 2,05, и при глубине резания  $t = 1,4$  мм достигает величины 780 МПа, превышающей допустимый предел для инструментального материала ВК8 ( $\sigma_b = 735$  МПа). В результате режущий инструмент разрушается. При изменении скорости резания от 0,025 до 1 м/с интенсивность роста  $\sigma_1^{\text{макс}}$  составляет только 1,48. Следовательно, увеличение скорости резания на максимальное главное напряжение  $\sigma_1^{\text{макс}}$  и запас прочности оказывает меньшее влияние по сравнению с глубиной резания  $t$ .

**Влияние геометрии режущего инструмента и материала заготовки на прочность инструмента.** Влияние геометрии режущего инструмента на его прочность демонстрируют графики на рис. 7 а. В качестве главного параметра геометрии режущего инструмента выбран передний угол как самый важный фактор, влияющий на процесс стружкообразования и динамику резания. С увеличением величины переднего угла  $\gamma$  максимальное главное напряжение  $\sigma_1^{\text{макс}}$  заметно возрастает. В связи с этим падает коэффициент запаса прочности режущего инструмента  $K_3$ . При увеличении переднего угла от 0 до  $20^\circ$  максимальное главное напряжение возрастает в 2,38 раза. При  $\gamma = 20^\circ$   $\sigma_1^{\text{макс}} = 780$  МПа, что превышает допустимое предельное значение, и также наблюдается выкрашивание режущей кромки зуба инструмента либо его разрушение. Изменение максимального главного напряжения  $\sigma_1^{\text{макс}}$





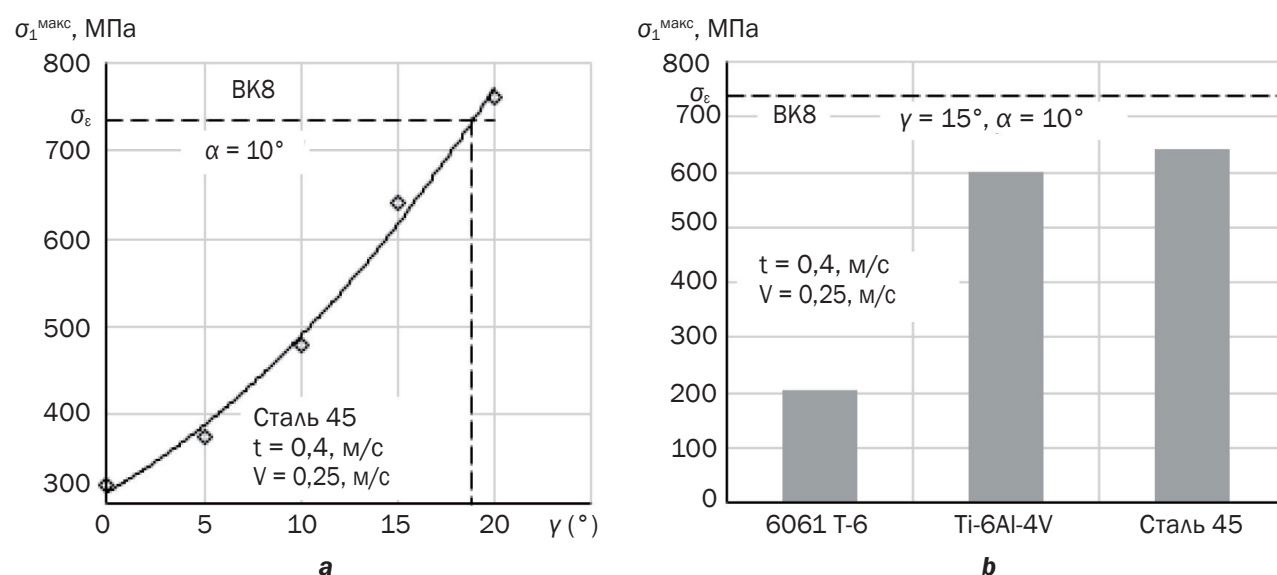
**Рис. 6.** Влияние режимов резания на максимальное главное напряжение: а – при изменении глубины резания; б – при изменении скорости резания

**Fig. 6.** Effect of cutting modes on maximum principal stress: a – with changing cutting depth; b – with changing cutting speed

и прочности режущего инструмента объясняется тем, что из-за увеличения переднего угла  $\gamma$  площадь нормального сечения части режущего инструмента, находящейся под воздействием сил сопротивления срезаемого слоя материала заготовки, значительно уменьшается. С другой стороны, как известно, увеличение переднего угла приводит к возрастанию угла сдвига срезаемого слоя и снижению силы резания. Влияние изменения силы на величину напряжения меньше, чем изменение площади сечения инструмента, что объясняется значительно большей степенью снижения площади сечения при изменении переднего угла по сравнению с интенсивностью изменения силы резания.

Полученные результаты в полной мере соответствуют практике резания. Для черновой обработки, характеризуемой большими объемами удаляемого материала в единицу времени и большим сопротивлением материала заготовки, обычно применяется режущий инструмент с малыми передними углами, а для чистовой обработки – с большим передним углом.

На рис. 7 б показано влияние материала заготовки на прочность режущего инструмента. Для моделирования процесса свободного резания были выбраны следующие сплавы: 6061T-6,



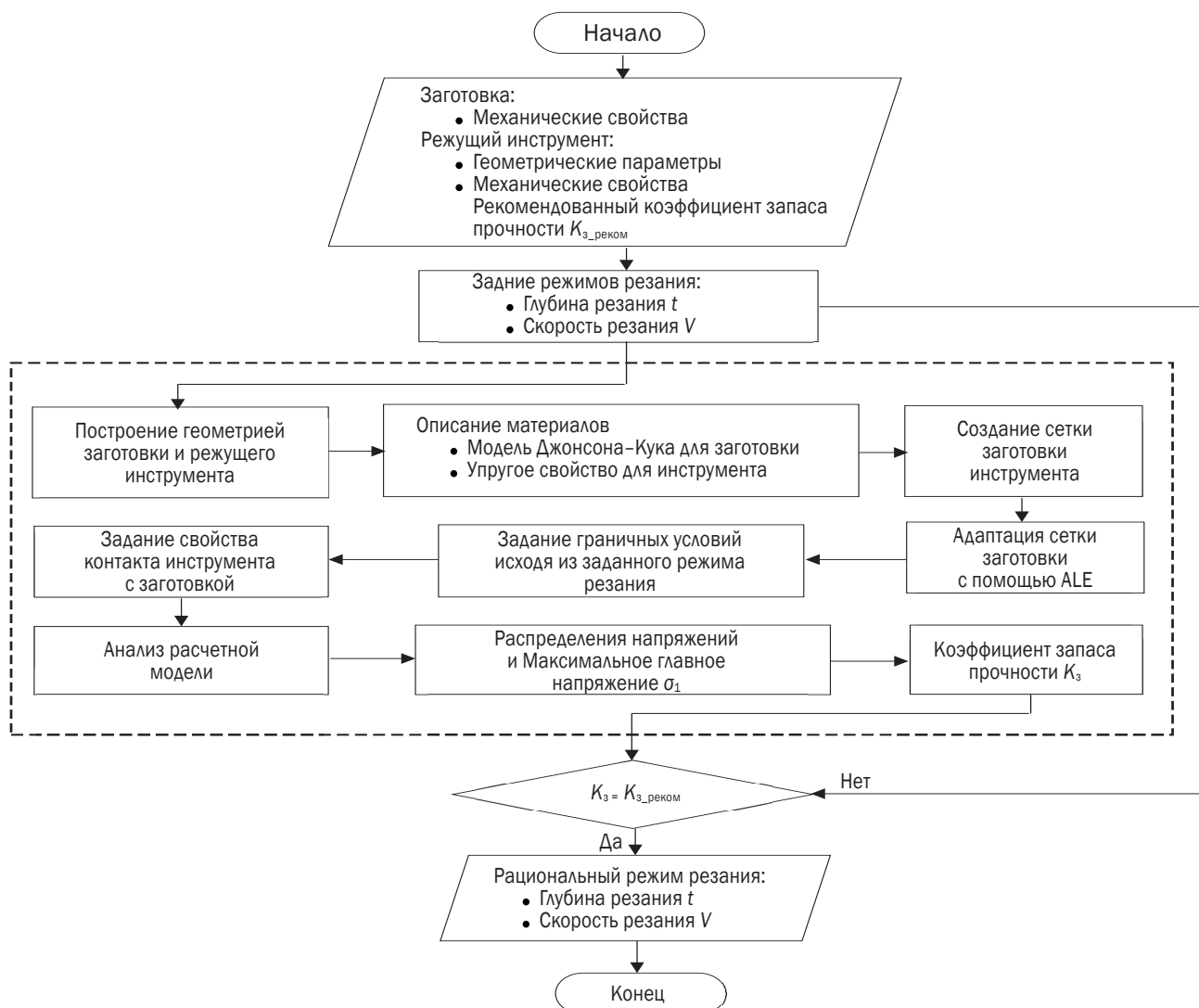
**Рис. 7.** Влияние геометрии режущего инструмента и материала заготовки на максимальное главное напряжение: а – передний угол; б – материал заготовки

**Fig. 7.** Influence of cutting tool geometry and workpiece material on maximum principal stress: a – rake angle; b – workpiece material

ГОСТ 21631-2019<sup>12</sup>; Ti-6Al-4V, UNS R56400; сталь 45, ГОСТ 1050-2013<sup>8</sup>. Модели материалов Джонсона–Кука для алюминиевого и титанового сплавов представлены в работе [24, 25].

Из полученного графика следует, что запас прочности режущего инструмента при обработке заготовки из алюминиевого сплава 6061T-6 ( $\sigma_1^{\max} = 205$  МПа) в 3,1 раза больше, чем при обработке стали 45 ( $\sigma_1^{\max} = 642$  МПа). А при обработке титанового сплава Ti-6Al-4V ( $\sigma_1^{\max} = 602$  МПа) запас прочности режущего инструмента также больше, но отличие незначительное. На основе рассчитанного максимального главного напряжения  $\sigma_1^{\max}$  и коэффициента запаса прочности режущего инструмента  $K_3$  при обработке заготовки из разных материалов технолог имеет возможность назначить режимы резания с учетом факторов, влияющих на стабильность процесса резания.

**Методика выбора режимов свободного резания в зависимости от установленного запаса прочности режущего инструмента.** Для повышения эффективности процесса резания в настоящей работе предлагается выбор режимов резания осуществлять в зависимости от запаса прочности режущего инструмента. Методика такого выбора представлена в виде блок-схемы на рис. 8. Сущность этой методики заключается в том, что коэффициент запаса прочности режущего инструмента  $K_3$ , соответствующий выбираемым режимам резания, должен находиться в интервале рекомендованного диапазона коэффициента запаса прочности



**Рис. 8.** Методика выбора режимов резания в зависимости от запаса прочности режущего инструмента  
**Fig. 8.** Methodology for selecting cutting modes depending on the cutting tool safety margin

<sup>12</sup>ГОСТ 21631-2019. Листы из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия. Введ. 01.06.2020. М.: Стандартинформ, 2020.

$K_{3\_реком}$ , зависящего от стоимости и ответственности конструкции изделия с учетом однородности, хрупкости, остаточной напряженности материалов [1]. Например, для резцов  $K_{3\_реком} = 1,2 \div 1,5$ , а для более дорогих инструментов  $K_{3\_реком} = 2,5 \div 3,0$  [25]. По предложенной методике в начале требуется задание одного или нескольких режимных параметров резания, затем производится моделирование процесса резания с помощью вышеописанного решения определения величины максимального главного напряжения  $\sigma_1^{макс}$  и коэффициента запаса прочности  $K_3$ . Заданные режимы резания считаются принятыми при выполнении условия сравнения рассчитанного коэффициента запаса прочности  $K_3$  с рекомендованным диапазоном  $K_{3\_реком}$ . Поиск рациональных режимов резания для задания разработчиком их значений в управляющей программе процесса обработки осуществляется с использованием метода деления пополам диапазона данных, полученных расчетным путем по предложенной модели.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение МКЭ с учетом особенностей описания материала заготовки с помощью специальной модели Джонсона–Кука и алгоритма локальной адаптации сетки Arbitrary Lagrangian-Eulerian для моделирования процесса свободного резания позволяет достаточно точно определять распределение напряжений в режущем инструменте. Достоверность полученных результатов подтверждена соответствием распределений главных напряжений в материале режущего инструмента, что соответствует результатам фундаментальных исследований академика АН Грузинской ССР Т.Н. Лоладзе [2] и профессора А.И. Бетанели [1], представленным в опубликованных работах в виде линий изохром в специальном инструменте, наблюдаемых в зоне растяжения-сжатия при резании свинца.

Возможность получения расчетным путем величины максимального главного напряжения  $\sigma_1$ , возникающего на передней грани и вне длины контакта режущего клина со стружкой, позволяет определить коэффициент запаса прочности режущего инструмента  $K_3$ .

Применение разработанной расчетной модели для исследования влияния факторов, включающих режимы резания, механические свойства материалов заготовки и геометрию режущей кромки инструмента при свободном резании, на прочность инструмента позволило получить следующие результаты:

1. Глубина резания линейно влияет на максимальное главное напряжение и запас прочности инструмента  $K_3$ . С увеличением глубины резания от  $t = 0,2$  мм до  $t = 1,4$  мм максимальное главное напряжение увеличивается в 2,05 раза. При глубине резания  $t = 1,4$  мм ( $\sigma_1^{макс} = 780$  МПа) режущий инструмент разрушается из-за превышения допускаемого предела прочности инструментального материала  $\sigma_b$ . Влияние скорости резания описывается экспонентой.

2. Увеличение переднего угла инструмента  $\gamma$  приводит к возрастанию максимального главного напряжения  $\sigma_1$  и снижению запаса прочности  $K_3$ . При обработке с передним углом инструмента  $\gamma = 20^\circ$  максимальное главное напряжение достигает  $\sigma_1^{макс} = 760$  МПа, что превышает допускаемые пределы прочности материала инструмента и приводит к его разрушению.

3. Запас прочности режущего инструмента при обработке материала из алюминиевого сплава 6061Т-6 в 3,1 раза больше, чем при обработке стали 45.

4. Адекватность модели подтверждена соответствием результатов, получаемых расчетным путем, экспериментальным данным, приведенным в ранее опубликованных работах.

В дальнейшем МКЭ может быть использован в алгоритме и программном обеспечении прогнозирования параметров, определяющих микрогеометрию образуемой при обработке поверхности и зависящих от режимов резания, выступающих наряду с коэффициентом запаса прочности инструмента в качестве второго условия при оценке принятого технологического решения.

## Список источников

1. Бетанели А.И. Прочность и надежность режущего инструмента. Тбилиси: Сабчота Сакартвело, 1973. 301 с.
2. Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. М.: Машиностроение, 1982. 320 с.
3. Пикалов А.А., Чайников К.К. Применение специальной технологической оснастки и гибких сверлильных шаблонов для сверлильных машин с автоматической подачей режущего инструмента // Известия Самарского научного центра РАН. 2016. Т. 18. № 1-2. С. 260–263. EDN: WLWZBD.

4. Bouzakis K.D., Michailidis N., Vidakis N., Efstathiou K., Leyendecker T., Erkens G., et al. Optimization of the cutting edge radius of PVD coated inserts in milling considering film fatigue failure mechanisms // *Surface and Coatings Technology*. 2000. Vol. 133-134. P. 501–507. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(00\)00971-3](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(00)00971-3). EDN: KJJYKR.
5. Остафьев В.А. Расчет динамической прочности режущего инструмента. М.: Машиностроение, 1979. 168 с.
6. Мокрицкий Б.Я., Верещагин В.Ю., Верещагина А.С. Моделирование процессов резания с применением программы ANSYS // *Вестник машиностроения*. 2018. № 4. С. 69–72. EDN: XMZUXR.
7. Öpöz T.T., Chen X. Chip formation mechanism using finite element simulation // *Journal of Mechanical Engineering*. 2016. No. 11. P. 636–646. <https://doi.org/10.5545/SV-JME.2016.2523>.
8. Gamboa C.B., Andersson T., Svensson D., Vilches F.J.T., Martín-Béjar S., Hurtado L.S. Modeling of the fracture energy on the finite element simulation in Ti6Al4V alloy machining // *International Journal of Scientific Reports*. 2021. Vol. 11. Iss. 1. P. 18490. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-98041-5>.
9. Pal S., Velay X., Saleem W. Finite element investigation of cutting speed effects on the machining of Ti6Al4V alloy // *Discover Mechanical Engineering*. 2024. Vol. 3. Iss. 1. P. 1–24. <https://doi.org/10.1007/s44245-024-00031-0>. EDN: WQXTAU.
10. Qiao Shifan, Feng Chaobo, Wang Gang, Liu Taofu, Singh Jenisha. Two-dimensional finite element analysis and cutting force model for the cutting of circular steel bars using negative rake angle cutters: accounting for chip accumulation effects // *Materials*. 2025. Vol. 18. Iss. 6. P. 1339. <https://doi.org/10.3390/ma18061339>. EDN: CBYZXX.
11. Krumme E., Donnerbauer K., Saelzer J., Zabel A., Walther F. Numerical chip formation simulations of AISI 304 steel with varying cutting tools // *Procedia CIRP*. 2025. Vol. 133. P. 132–137. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2025.02.024>.
12. Пивкин П.М., Бабаев А.С., Козлов В.Н., Семёнов А.Р., Назаренко Е.С., Надыкто А.Б. Методология численного моделирования резания для расчетов распределения контактных напряжений на примере фрезерования стали // *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*. 2025. № 96. С. 92–107. <https://doi.org/10.17223/19988621/96/8>. EDN: HEGJKT.
13. Ghani J.A., Ismanizan M.A., Rahman H.A., Haron C.H.C., Juri A.Z., Kasim M.S., et al. Machining analysis of S45C carbon steel using finite element method // *Journal Tribologi*. 2024. Vol. 40. P. 226–246.
14. Савенков В.Н., Тимохин Ю.В., Тимохина В.Ю. Исследование процесса несвободного резания при механической обработке деталей машин // *Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта*. 2021. № 62. С. 56–66. EDN: XHMQPP.
15. Astakhov V.P., Outeiro J.C. Metal cutting mechanics, finite element modelling // *Machining: Fundamentals and Recent Advances*. London: Springer, 2008. P. 1–27. [https://doi.org/10.1007/978-1-84800-213-5\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-84800-213-5_1). EDN: YDNBJR.
16. Cheng Wenyu, Outeiro J.C.M. Modelling orthogonal cutting of Ti–6Al–4V titanium alloy using a constitutive model considering the state of stress // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. Vol. 119. Iss. 7-8. P. 4329–4347. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08446-9>.
17. Xu Xiang, Outeiro José, Zhang Jun, Xu Binbin, Zhao Wanhua. Machining simulation of Ti6Al4V using coupled Eulerian-Lagrangian approach and a constitutive model considering the state of stress // *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2021. Vol. 110. P. 102312. <https://doi.org/10.1016/J.SIMPAT.2021.102312>. EDN: YCMGBE.
18. Schraknepper D., Peng Bingxiao, Bergs T. Advanced calculation of the stress distribution in milling tools during cutting under consideration of residual stresses and tool wear // *Procedia CIRP*. 2021. Vol. 102. P. 19–24. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.09.004>. EDN: LEWIEG.
19. Вульф А.М. Резание металлов. М.: Машиностроение, 1973. 496 с.
20. Лошак М.Г. Прочность и долговечность твердых сплавов. Киев: Наукова Думка, 1984. 328 с.
21. Johnson G.R., Cook W.H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures // *Engineering Fracture Mechanics*. 1985. Vol. 21. No. 1. P. 31–48. [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(85\)90052-9](https://doi.org/10.1016/0013-7944(85)90052-9).
22. Свинин В.М., Шутенков А.В., Пономарев Б.Б. Определение основных технических параметров проектируемой сверлильной машины с автоматической подачей // *iPolytech Journal*. 2024. Vol. 28. № 2. P. 224–237. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-224-237>. EDN: DQWDDT.
23. Писаренко Г.С., Лебедев А.А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. Киев: Наукова Думка, 1976. 415 с.
24. Spear D.G., Palazotto A.N., Kemnitz R.A. Modeling and simulation techniques used in high strain rate projectile impact // *Mathematics*. 2021. Vol. 9. Iss. 3. P. 1–29. <https://doi.org/10.3390/math9030274>. EDN: IELUYA.
25. Бобров В.Ф., Грановский Г.И., Зорев Н.Н., Исаев А.И., Клушин М.И., Ларин М.Н. [и др.]. Развитие науки о резании металлов. М.: Машиностроение, 1967. 417 с.

## References

1. Betaneli A.I. *Strength and dependability of the cutting tool-tip*. Tbilisi: Sabchota Sakartvelo; 1973, 301 p. (In Russ.).
2. Loladze T.N. *Strength and wear resistance of cutting tools*. Moscow: Mashinostroenie; 1982, 320 p. (In Russ.).
3. Pikalov A.A., Chainikov K.K. Special jigs and drilling templates for automated drilling units. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2016;18(1-2):260-263. (In Russ.). EDN: WLWZBD.
4. Bouzakis K.D., Michailidis N., Vidakis N., Efstathiou K., Leyendecker T., Erkens G., et al. Optimization of the cutting edge radius of PVD coated inserts in milling considering film fatigue failure mechanisms. *Surface and Coatings Technology*. 2000;133-134:501-507. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(00\)00971-3](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(00)00971-3). EDN: KJJYKR.



5. Ostafiev V.A. *Cutting tool dynamic strength calculation*. Moscow: Mashinostroenie; 1979, 168 p. (In Russ.).
6. Mokritskiy B.Ya., Vereshchagin V.Yu., Vereshchagina A.S. Simulation of cutting process using ANSYS program. *Russian Engineering Research*. 2018;4:69-72. (In Russ.). EDN: XMZUXR.
7. Öpöz T.T., Chen X. Chip formation mechanism using finite element simulation. *Journal of Mechanical Engineering*. 2016;11:636-646. <https://doi.org/10.5545/SV-JME.2016.2523>.
8. Gamboa C.B., Andersson T., Svensson D., Vilches F.J.T., Martín-Béjar S., Hurtado L.S. Modeling of the fracture energy on the finite element simulation in Ti6Al4V alloy machining. *International Journal of Scientific Reports*. 2021;11(1):18490. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-98041-5>.
9. Pal S., Velay X., Saleem W. Finite element investigation of cutting speed effects on the machining of Ti6Al4V alloy. *Discover Mechanical Engineering*. 2024;3(1):1-24. <https://doi.org/10.1007/s44245-024-00031-0>. EDN: WQXTAU.
10. Qiao Shifan, Feng Chaobo, Wang Gang, Liu Taofu, Singh Jenisha. Two-dimensional finite element analysis and cutting force model for the cutting of circular steel bars using negative rake angle cutters: accounting for chip accumulation effects. *Materials*. 2025;18(6):1339. <https://doi.org/10.3390/ma18061339>. EDN: CBYZXX.
11. Krumme E., Donnerbauer K., Saelzer J., Zabel A., Walther F. Numerical chip formation simulations of AISI 304 steel with varying cutting tools. *Procedia CIRP*. 2025;133:132-137. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2025.02.024>.
12. Pivkin P.M., Babaev A.S., Kozlov V.N., Semyonov A.R., Nazarenko E.S., Nadykto A.B. Methodology of the numerical modeling of cutting for calculating the contact stress distribution: A case study on steel milling. *Tomsk State University. Journal of Mathematics and Mechanics*. 2025;96:92-107. (In Russ.). <https://doi.org/10.17223/19988621/96/8>. EDN: HEGJKT.
13. Ghani J.A., Ismanizan M.A., Rahman H.A., Haron C.H.C., Juri A.Z., Kasim M.S., et al. Machining analysis of S45C carbon steel using finite element method. *Journal Tribologi*. 2024;40:226-246.
14. Savenkov V.N., Timokhin Yu.V., Timokhina V.Yu. Investigation of the process of non-free cutting during machining of machine parts: Collected scientific papers of Donetsk railway transport institute. 2021;62:56-66. (In Russ.). EDN: XHMQPP.
15. Astakhov V.P., Outeiro J.C. Metal cutting mechanics, finite element modelling. In: *Machining: Fundamentals and Recent Advances*. London: Springer; 2008, p. 1-27. [https://doi.org/10.1007/978-1-84800-213-5\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-84800-213-5_1). EDN: YDNBJR.
16. Cheng Wenyu, Outeiro J.C.M. Modelling orthogonal cutting of Ti-6Al-4V titanium alloy using a constitutive model considering the state of stress. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022;119(7-8):4329-4347. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08446-9>.
17. Xu Xiang, Outeiro José, Zhang Jun, Xu Binbin, Zhao Wanhua. Machining simulation of Ti6Al4V using coupled Eulerian-Lagrangian approach and a constitutive model considering the state of stress. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2021;110:102312. <https://doi.org/10.1016/J.SIMPAT.2021.102312>. EDN: YCMGBE.
18. Schraknepper D., Peng Bingxiao, Bergs T. Advanced calculation of the stress distribution in milling tools during cutting under consideration of residual stresses and tool wear. *Procedia CIRP*. 2021;102:19-24. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.09.004>. EDN: LEWIEG.
19. Vulf A.M. *Metal cutting*. Moscow: Mashinostroenie; 1973, 496 p. (In Russ.).
20. Loshak M.G. *Strength and durability of hard alloys*. Kiev: Naukova Dumka; 1984, 328 p. (In Russ.).
21. Johnson G.R., Cook W.H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. *Engineering Fracture Mechanics*. 1985;21(1):31-48. [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(85\)90052-9](https://doi.org/10.1016/0013-7944(85)90052-9).
22. Svinin V.M., Shutenkov A.V., Ponomarev B.B. Main technical parameters for designing a new self-feed drilling machine. *iPolytech Journal*. 2024;28(2):224-237. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-2-224-237>. EDN: DQWDDT.
23. Pisarenko G.S., Lebedev A.A. *Deformation and strength of materials under complex stress state*. Kiev: Naukova Dumka; 1976, 415 p. (In Russ.).
24. Spear D.G., Palazotto A.N., Kemnitz R.A. Modeling and simulation techniques used in high strain rate projectile impact. *Mathematics*. 2021;9(3):1-29. <https://doi.org/10.3390/math9030274>. EDN: IELUYA.
25. Bobrov V.F., Granovskij G.I., Zorev N.N., Isaev A.I., Klushin M.I., Larin M.N., et al. *Development of metal cutting science*. Moscow: Mashinostroenie; 1967, 417 p. (In Russ.).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Пonomarev Борис Борисович,**

д.т.н., профессор,  
начальник управления по дополнительному  
образованию и социальной работе,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия  
[pusw@ex.istu.edu](mailto:pusw@ex.istu.edu)  
<https://orcid.org/0000-0003-1185-8638>

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Boris B. Ponomarev,**

Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Head of the Department of Continuing  
Education and Social Work,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia  
[pusw@ex.istu.edu](mailto:pusw@ex.istu.edu)  
<https://orcid.org/0000-0003-1185-8638>



**Нгуен Ван Дык,**  
аспирант,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия  
✉ Vanduc021086@gmail.com

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

**Вулых Николай Валерьевич,**  
к.т.н., доцент,  
доцент кафедры материаловедения  
сварочных и аддитивных технологий,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия  
vulix2011@yandex.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-2607-4302>

**Димов Юрий Владимирович,**  
д.т.н., профессор,  
профессор-консультант кафедры конструирования  
и стандартизации в машиностроении,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия  
dimov-ura@yandex.ru

**Van Duc Nguyen,**  
Postgraduate Student,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia  
✉ Vanduc021086@gmail.com

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

**Nikolay V. Vulykh,**  
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  
vulix2011@yandex.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-2607-4302>

**Yury V. Dimov,**  
Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Consulting Professor of the Department  
of Mechanical Engineering  
Design and Standardization,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia  
dimov-ura@yandex.ru

#### **Заявленный вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

#### **Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 24.06.2025 г.; одобрена после рецензирования 01.08.2025 г.; принята к публикации 10.08.2025 г.

#### **Authors' contribution**

The authors contributed equally to this article.

#### **Conflict of interests**

The authors declare no conflict of interests.

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

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

The article was submitted 24.06.2025; approved after reviewing 01.08.2025; accepted for publication 10.08.2025.

## МАШИНОСТРОЕНИЕ

Научная статья

УДК 62-135.1

EDN: HAEDBL

DOI: 10.21285/1814-3520-2025-4-492-501



## Верификации созданных и применяемых конечноэлементных моделей и программ при расчёте ресурса конструкций лопаток турбомашин с учётом геометрической расстройки параметров

О.В. Репецкий<sup>1✉</sup>, Ван Мань Нгуен<sup>2</sup><sup>1,2</sup>Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского, Иркутск, Россия

**Резюме.** Целью настоящего исследования является проверка математических моделей, численных методов и комплекса программ для подтверждения их адекватности и возможности применения в оценке долговечности реальных рабочих колес турбомашин. Анализ прочностных характеристик высоконагруженных элементов роторов турбомашин с учетом расстройки параметров является одной из актуальных и ключевых задач в энергетическом и транспортном двигателестроении. Основным методом изучения данных характеристик является метод конечных элементов в трехмерной постановке. Дополнительно в работе используются теории упругости и колебаний, механика деформируемого твердого тела, методы суммирования повреждений и гипотезы накопления усталостных напряжений. Применены матричные вычисления, численное интегрирование и методы решения алгебраических систем уравнений. В данной работе представлен анализ долговечности модели рабочего колеса паровой турбины с использованием трехмерных конечных элементов TET10 в коммерческом программном комплексе ANSYS WORKBENCH с применением авторских программ. Полученные численные результаты в рамках созданных конечноэлементных моделей для всех видов расстройки сопоставлены с экспериментом, аналитическим решением и расчетными данными в программе ABAQUS с учетом геометрической расстройки. Это позволяет расширить их применение с модельных конструкций паровых турбин на реальные промышленные изделия. В результате вычислительного эксперимента получены новые научные результаты по верификации авторского программного обеспечения и интерфейса, связывающего эти программы с известными коммерческими пакетами, при анализе ресурса модели паровой турбины с расстройкой геометрических параметров. Практическая значимость работы заключается в возможности применения данного подхода к оценке долговечности реальных конструкций осевых и радиальных турбомашин при их проектировании и доводке, что существенно сокращает временные и финансовые затраты для создания новых компрессоров и турбин.

**Ключевые слова:** верификация, конечноэлементная модель, расстройка, долговечность, рабочие лопатки, турбомашин, напряжения

**Финансирование.** Данная работа выполнена в рамках гранта РНФ № 24-29-20061. Авторы благодарят РНФ за поддержку настоящих исследований.

**Для цитирования:** Репецкий О.В., Нгуен Ван Мань. Верификации созданных и применяемых конечноэлементных моделей и программ при расчёте ресурса конструкций лопаток турбомашин с учётом геометрической расстройки параметров // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 4. С. 492–501. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-4-492-501>. EDN: HAEDBL.

## MECHANICAL ENGINEERING

Original article

## Turbomachine blade life assessment with geometric mistuning

O.V. Repetskii<sup>1✉</sup>, Van Manh Nguyen<sup>2</sup><sup>1,2</sup>Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky, Irkutsk, Russia

**Abstract.** This study aims to verify the mathematical models, numerical methods, and software suite developed for assessing the service life of actual turbomachine rotors and confirm their adequacy for industrial applications. The strength analysis of highly loaded turbomachine rotor components, accounting for parameter mistuning, represents a critical challenge in power generation and aerospace engine design. The primary investigative method employed is the finite element method (FEM) in a three-dimensional formulation. The research utilizes theories of elasticity and vibration, mechanics of deformable solids, damage summation methods, and fatigue accumulation hypotheses. The computational framework involves matrix computations, numerical integration, and methods for solving systems of algebraic equations.

A durability analysis of a steam turbine wheel model was carried out using TET10 three-dimensional finite elements within the commercial ANSYS WORKBENCH software, enhanced with custom-developed codes. The numerical results from these finite element models for all mistuning types were compared with the experimental data, analytical solutions, and computational results from the ABAQUS software, which incorporated geometric mistuning. This integrated validation confirms the accuracy of the models and facilitates their application not only to simplified steam turbine models but also to real industrial components. The computational experiments verified the proprietary software and the interface that connects it with conventional commercial software for analyzing the service life of a steam turbine with geometric mistuning. The practical significance of this work lies in the applicability of the developed approach for durability assessment in the design and fine-tuning of real axial and radial turbomachinery. This methodology substantially reduces the time and financial costs associated with the development of new compressors and turbines.

**Keywords:** verification, finite element model, mistuning, durability, rotor blades, turbomachines, stresses

**Funding.** This work was carried out within the framework of the Russian Science Foundation Grant No. 24-29-20061. The authors thank the Russian Science Foundation for the support of the study.

**For citation:** Repetskii O.V., Nguyen Van Manh. Turbomachine blade life assessment with geometric mistuning. *iPolytech Journal*. 2025;29(4):492-501. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-4-492-501>. EDN: HAEDBL.

## ВВЕДЕНИЕ

Рабочие лопатки турбины играют ключевую роль в работе энергетических и транспортных двигателей, поскольку являются основными элементами, обеспечивающими преобразование поступательного движения высокотемпературного и сжатого пара или газа во вращательное движение вала турбины. Усталостные разрушения рабочих лопаток являются основной причиной отказа роторов турбомашин. Любое нарушение работы паровой турбины, такое как отказ лопатки, может привести к значительным финансовым и другим потерям<sup>3</sup> [1, 2]. Прогнозирование срока службы лопаток паровой турбины с учетом расстройки геометрии лопаток, закрепленных на общем диске, представляет собой одно из основных направлений исследований в мировой науке при создании новых турбомашин<sup>4</sup> [3].

В данной работе представлены результаты оценки многоциклового усталости моделей лопаток паровых турбин с учетом расстройки геометрии лопаток. Модель лопатки была разработана с использованием программного обеспечения ANSYS WORKBENCH и метода конечных элементов (МКЭ) для создания численной модели, которая охватывает все геометрические изменения лопатки [4, 5]. Проведена верификация созданной численной модели и расчетных методов в сопоставлении полученных результатов в сравнении с аналитическим решением, расчетными и экс-

периментальными данными, полученными другими авторами.

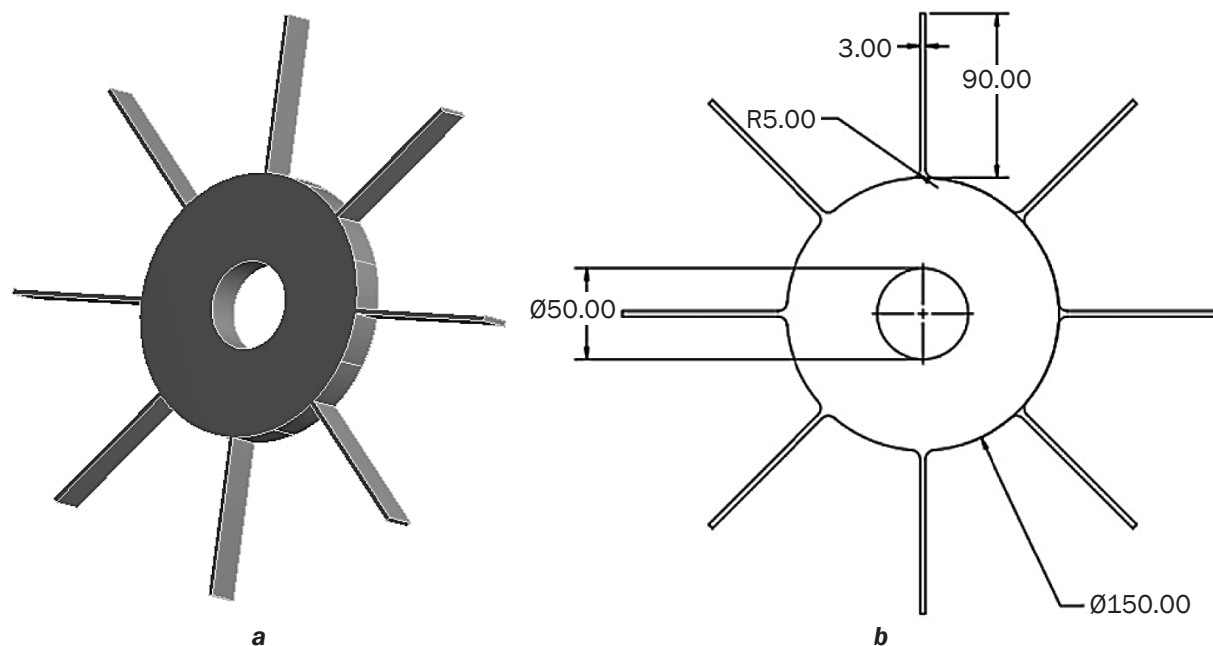
## МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Для верификации созданных и применяемых автором конечноэлементных (КЭМ) моделей, используемых при расчете ресурса конструкций без и с учетом расстройки параметров, был проведен численный анализ модели рабочего колеса паровой турбины [6]. Трехмерная модель рабочего колеса и его геометрические размеры представлены на рис. 1.

Рабочее колесо изготовлено из нержавеющей стали СТ304 со следующими механическими характеристиками: модуль Юнга –  $1,93 \cdot 10^5$  МПа; плотность – 7900 кг/м<sup>3</sup>; коэффициент Пуассона – 0,25; прочность на растяжение – 600 МПа, предел текучести – 310 МПа, твердость – 170 НВ [7, 8]. В качестве конечноэлементной модели данной работы применяется конечный элемент TET10 коммерческой программы ANSYS WORKBENCH с 3-мя степенями свободы в узле и с общим количеством конечных элементов – 117888 и 176499 узловыми точками. Количество степеней свободы составляет 529497. На рис. 2 представлены КЭМ и изображение трехмерного конечного элемента TET10. Моделирование динамического отклика к поверхности лопаток осуществлено путем приложения синусоидальной нагрузки под давлением из работы [9, 10] с помощью одной из авторских программ, связка которых с ANSYS WORKBENCH осуществляется

<sup>3</sup>Костюк А.Г., Фролов В.В., Булкин А.Е., Трухний А.Д. Паровые и газовые турбины для электростанций: учебник. М.: МЭИ, 2016. 556 с.

<sup>4</sup>Костюк А.Г. Динамика и прочность турбомашин: учебник. 3-е изд., перераб. и доп. М.: МЭИ, 2007. 476 с.

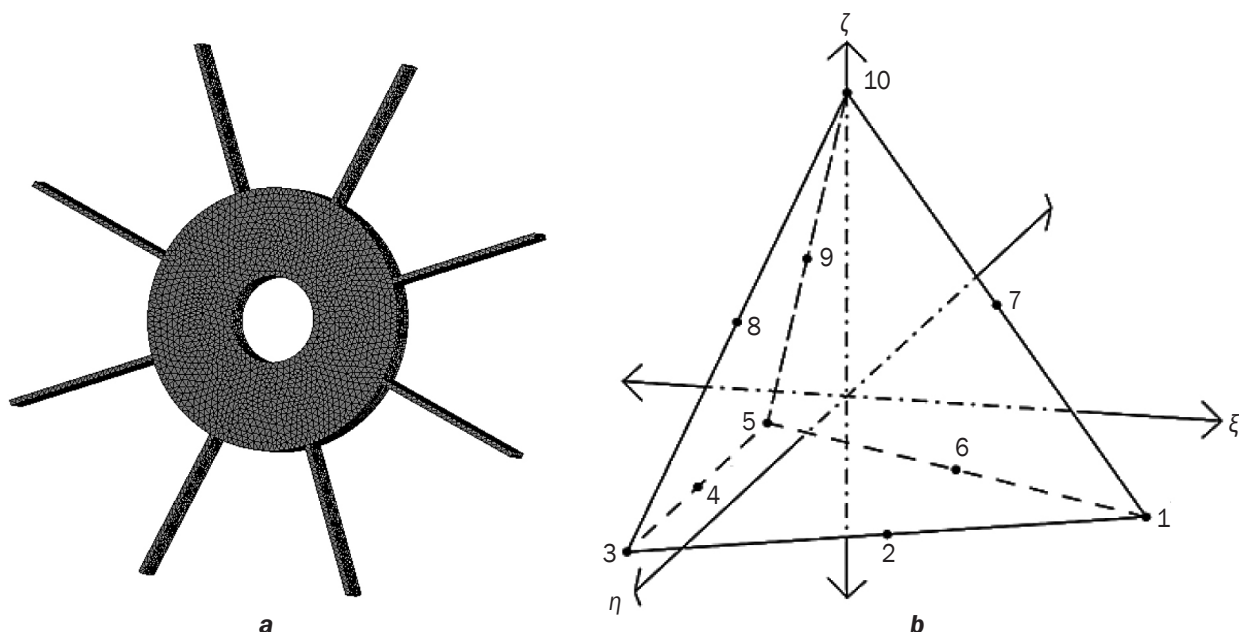


**Рис. 1.** Трехмерная модель и размеры рабочего колеса паровой турбины: а – трехмерная модель колеса; б – размеры колеса (мм)

**Fig. 1.** A three-dimensional model and dimensions of a steam turbine impeller: а – a three-dimensional model of the impeller; б – impeller dimensions (mm)

через созданный авторами программный интерфейс. Использование авторских программ необходимо в конкретных случаях, когда требуется реализовать поставленную задачу, которая не может быть решена имеющимися в

коммерческих пакетах программными средствами. Примеры таких авторских программ для связки с ANSYS WORKBENCH и описание их характеристик и назначения приведены в нескольких публикациях, например в работе<sup>5</sup>.



**Рис. 2.** Конечнорементная модель (а) и трехмерный конечный элемент TET10 (б)

**Fig. 2.** Finite element model (а) and a three-dimensional finite element TET 10 (б)

<sup>5</sup>Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024618569, Российская Федерация. Программа для расчёта уровня возбуждающих сил при использовании модифицированного статора (USE\_MOD\_VANES) / О.В. Репецкий, Ван Мань Нгуен; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ. Заявка № 2024617307, заявл. 05.04.2024; опубл. 15.04.2024. EDN: ATSLZR.

В рамках анализа динамического отклика к поверхности лопаток была приложена синусоидальная нагрузка под давлением [9]:

$$P = P_0 + P_a \cos(\Omega t), \quad (1)$$

где  $P_0 = P_a = 0,05$  МПа;  $\Omega = 314,159$  рад/с.

В ходе исследования статики, собственных и вынужденных колебаний и ресурсных характеристик предполагается, что колесо имеет неподвижную опору в центре для исключения осевых перемещений при моделировании (рис. 3). При этом частота вращения составляет 314,159 рад/с, а угловая скорость была приложена в осевом направлении вдоль центральной ступицы.

На рис. 4 представлена схема, иллюстрирующая процесс анализа методом конечных элементов, применяемого для прогнозирования срока службы модели рабочего колеса. Этот процесс включает в себя создание трехмерной геометрической модели колеса с использованием программного обеспечения ANSYS, создание сетки конечных элементов с определенными типами элементов и свойствами, ввод свойств материала с учетом температурных условий эксплуатации, определение нагрузок и граничных условий [10, 11]. После этого выполняется анализ напряженно-деформированного состояния (НДС), расчет собственных частот, динамических напряжений и долговечности рабочего колеса. Полученные результаты сопоставле-

ны с аналитическим решением, экспериментальными и расчетными данными других авторов.

Статическое НДС конструкции определяется по формуле [12–14]:

$$([K_E] + [K_G] + [K_R]) \cdot \{\delta\} = \{F_\Omega\} + \{F_T\} + \{F_G\}. \quad (2)$$

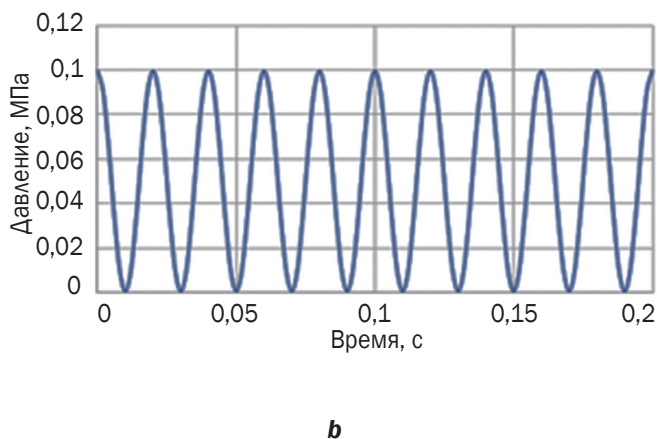
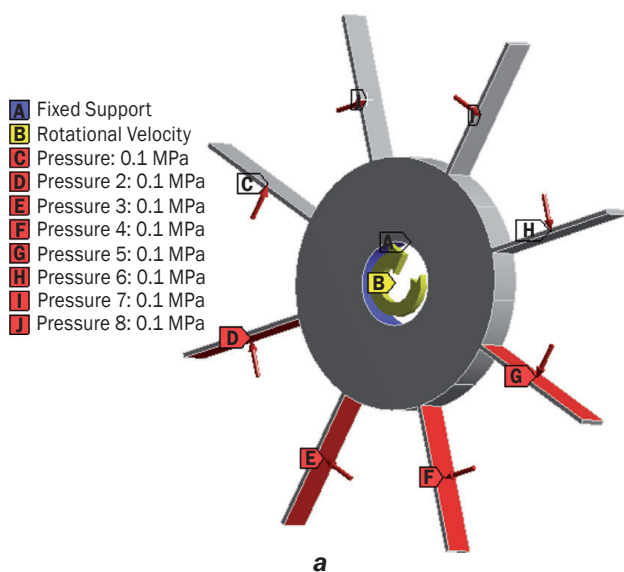
Собственные частоты и формы колебаний конструкции вычисляются из уравнения:

$$[M] \{\ddot{\delta}\} + [C] \{\dot{\delta}\} + ([K_E] + [K_G] + [K_R]) \cdot \{\delta\} = 0. \quad (3)$$

Динамический отклик конструкции можно получить из выражения:

$$[M] \{\ddot{\delta}\} + [C] \{\dot{\delta}\} + ([K_E] + [K_G] + [K_R]) \cdot \{\delta\} = \{F_{дин}\}, \quad (4)$$

где  $[K_E]$  и  $[M]$  – основные матрицы жесткости и масс конструкции;  $[K_G]$  – матрица геометрической жесткости;  $[K_R]$  – дополнительная матрица жесткости, возникающая в результате вращения;  $\{F_\Omega\}, \{F_T\}, \{F_G\}$  – векторы, соответствующие силам от вращения, температуры и давления газа соответственно;  $\{C\}$  – ма-



**Рис. 3.** Граничные условия задачи: а – схема нагружения рабочего колеса; б – динамическое давление, приложенное к поверхности лопаток

**Fig. 3.** Boundary conditions of the problem: а – impeller loading diagram; б – dynamic pressure applied to the blade surface



трица демпфирования;  $\{\ddot{\delta}\}$  – ускорение узловых точек;  $\{\dot{\delta}\}$  – скорость узловых точек;  $\{\delta\}$  – вектор перемещений;  $\{F_{\text{дин}}\}$  – вектор возбуждающих сил.

Для решения системы матричных уравнений применяются следующие основные численные методы: исключения Гаусса (статическое НДС); Якоби (расчет собственных колебаний); суперпозиции мод (расчет вынужденных колебаний). Для задачи прогнозирования ресурса рабочих колес турбомашин разработанные или развитые алгоритмы были объединены на основе МКЭ [15–17].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 5 показаны результаты расчета статического НДС, вызванного вращением ротора со скоростью 314,159 рад/с и давлением 0,1 МПа. Значение максимального напряжения, полученное в ходе моделирования в программе ABAQUS, составляет 175,2 МПа, в то время как в программе ANSYS авторы получили 175,33 МПа.

В табл. 1 приведены результаты анализа собственных частот колебаний рабочего колеса. Результаты, полученные авторами, хорошо согласуются с экспериментальными данными Х.М. Машиахиди из Технологического университета Тшвана (ТУТ) [18].

В табл. 2 и 3 представлены результаты анализа долговечности рабочего колеса с учетом и без учета расстройки геометрических параметров лопаток. Как видно из представленных данных, результаты численного исследования, выполненного авторами с использованием авторских программ и программы ANSYS, хорошо согласуются с данными, полученными в программе ABAQUS, а также с аналитическим решением.

Актуальность использования программы ANSYS и стыкуемых с ней авторских программ связана с тем, что верификация разработанных авторами математических моделей и программного обеспечения требует проверки их точности и достоверности на конструкциях, для которых имеются известные численные решения или эксперимент.

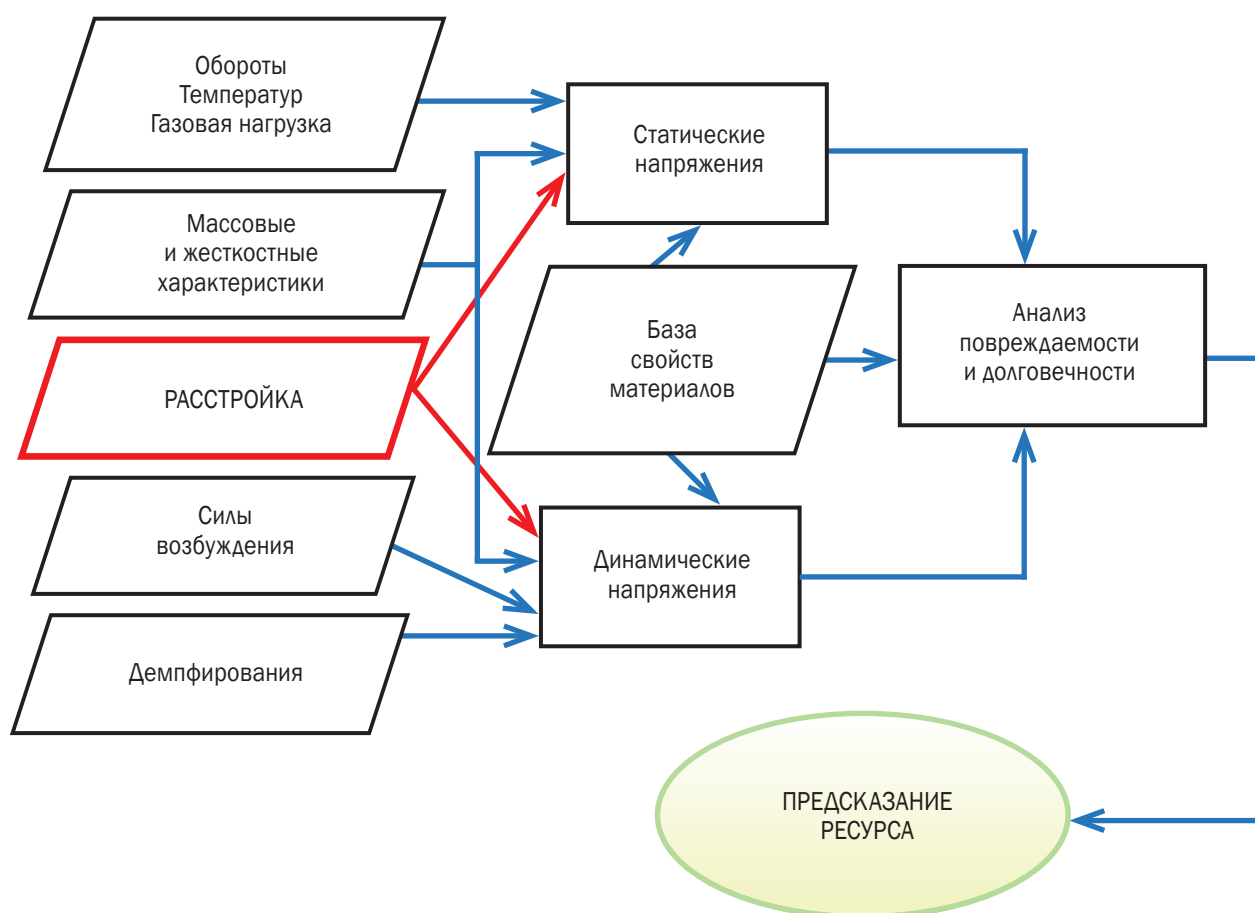


Рис. 4. Схема исследования для предсказания ресурса  
Fig. 4. Research diagram for fatigue life prediction

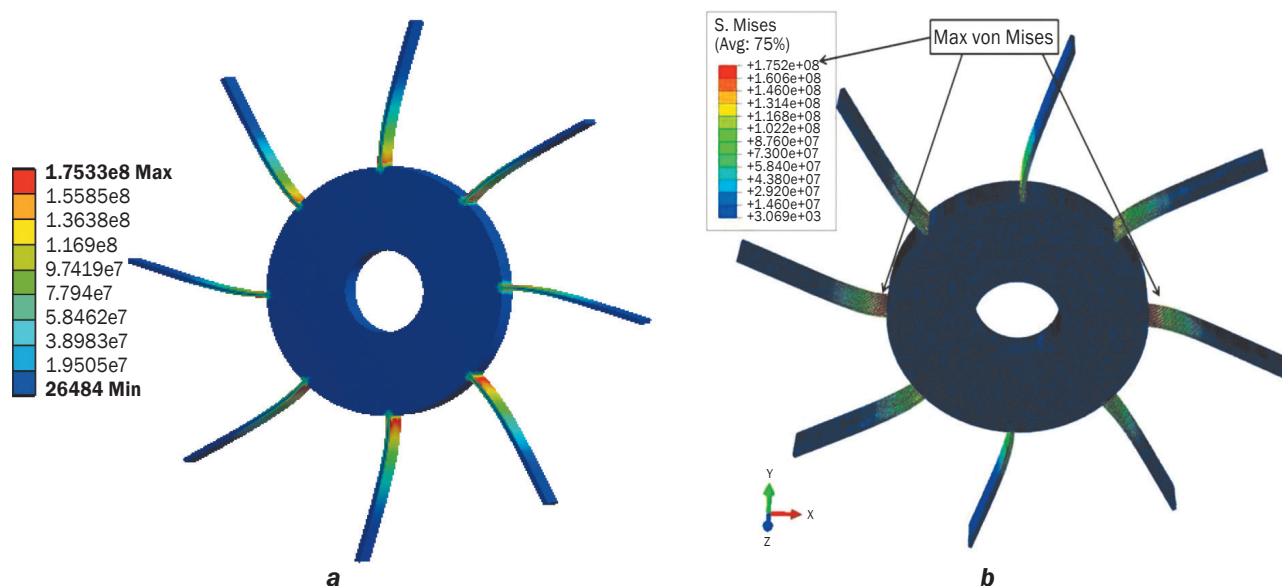


Рис. 5. Результаты расчета напряженно-деформированного состояния рабочего колеса: а – расчет в ANSYS; б – расчет в ABAQUS

Fig. 5. Calculation results of impeller stress-strain state: a – calculation in ANSYS; b – calculation in ABAQUS

Таблица 1. Результаты верификации частот собственных колебаний модельного колеса

Table 1. Results of model impeller natural vibration frequencies verification

Форма колебаний	Авторы (ANSYS)	Эксперимент (ТУТ)	Расчет ABAQUS (ТУТ)
1	225	222	233
2	1408	1352	1,430
3	1874	1770	1878
4	2090	1935	1960
5	2103	2256	2,263
6	3938	3997	4,002
7	5763	5421	5,780
8	6706	6544	6,163

Особенно это актуально для анализа долговечности систем с расстройкой параметров, где практически отсутствуют известные результаты [6]. В этой связи выполненная верификация созданного программного комплекса на модели рабочего колеса паровой турбины позволила распространить численную методику авторов на решение реальных ресурсных задач турбомашиностроения, в том числе высоконагруженных роторных элементов двигателей НК-12 и Rolls-Royce [5, 17]. Решение реальных промышленных задач в программе ABAQUS не представляется возможным из-за ограничений данной программы по спектру решаемых задач, библиотеке конечных элементов, набору численных методов и другим аспектам.

В качестве аналитической оценки долговечности рабочего колеса используется уравнение зависимости долговечности от деформации Брауна-Миллера, по которому был выполнен расчет в ТУТ Х.М. Машиахиди и его соавторами [18]:

$$\frac{\Delta\gamma_{max}}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_n}{2} = 1,65 \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + 1,7 + 1,75\varepsilon'_f (2N_f)^c, \quad (5)$$

где  $N_f$  – количество циклов до разрушения;  $\Delta\varepsilon_n$  – номинальный диапазон напряжений для цикла;  $\Delta\gamma_{max}$  – максимальный диапазон или амплитуда деформации сдвига для данного цикла;  $\sigma'_f = 1057$  МПа – коэффициент

**Таблица 2.** Результаты верификации долговечности модельного колеса без и с учетом расстройки геометрических параметров**Table 2.** Results of model impeller durability verification with and without mistuning of geometric parameters

Вариант исследования	Долговечность рабочего колеса ( $\times 10^6$ циклов)	
	Авторы (ANSYS)	ABAQUS (ТУТ)
Уменьшение длины двух соседних лопаток (-1 мм, L)	4,457	4,574
Увеличение ширины двух соседних лопаток (-1 мм, w)	4,234	4,188
Уменьшение ширины двух соседних лопаток (-1 мм, w)	4,180	4,130
Смешанный вариант расстройки (+/- L, t, и w)	4,112	4,097
Увеличение ширины двух лопаток, расположенных напротив (+1 мм, w)	4,127	4,093
Уменьшение ширины двух лопаток, расположенных напротив (-1 мм, w)	4,095	4,090
Уменьшение длины всех лопаток (-L)	4,092	4,090
Смешанный вариант расстройки (+/- L, t, и w)	4,055	4,043
Смешанный вариант расстройки (+/- L, t, и w)	4,046	4,020
Уменьшение длины двух лопаток, расположенных напротив (-1 мм, L)	4,041	4,016
Смешанный вариант расстройки (+/- w, и t)	4,036	4,012
Увеличение толщины двух лопаток, расположенных напротив (+1 мм, t)	4,001	3,997
Смешанный вариант расстройки (+/- L, и w)	3,993	3,980
Увеличение длины двух лопаток, расположенных напротив (+1 мм, L)	3,974	3,960
Увеличение длины двух соседних лопаток (+1 мм, L)	4,024	3,955
Увеличение толщины двух соседних лопаток (+1 мм, t)	3,943	3,911
Уменьшение толщины двух соседних лопаток (-1 мм, t)	4,058	3,999
Уменьшение толщины двух лопаток, расположенных напротив (-1 мм, t)	3,964	3,907
Смешанный вариант расстройки (+/- L, t, и w)	3,996	3,966

усталостной прочности;  $b = -0,0385$  – показатель усталостной прочности;  $\varepsilon'_f$  – коэффициент усталостной пластичности;  $a$  с – показатель усталостной пластичности (исходя из усталостных свойств нержавеющей стали марки 304);  $E$  – модуль упругости.

Вышеприведенные согласования расчетов авторов и известных решений (табл. 2 и 3) подтверждают адекватность созданных и применяемых конечноэлементных моделей для расчета ресурса конструкций и надежность предложенной методики численного анализа.

**Таблица 3.** Результаты верификации долговечности модельного колеса с аналитическим решением и численными данными**Table 3.** Results of model impeller durability verification with an analytical solution and numerical data

Вариант исследования	Долговечность рабочего колеса ( $\times 10^6$ циклов)		
	Авторы (ANSYS)	ABAQUS (ТУТ)	Аналитическое решение (ТУТ)
Без расстройки	4,551	4,587	4,435
Уменьшение длины двух соседних лопаток (-1 мм, L)	4,457	4,574	4,357

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ подтвердил возможность использования разработанных и применяемых автором конечноэлементных моделей для исследования ресурсных характеристик рабочих колес паровой турбины с учетом отклонений параметров лопаток. Рассмотрены различные типы расстройки лопаточного аппарата, включая увеличение или уменьшение длины, ширины и толщины лопаток, а также их комбинированные вариации.

Установлено, что даже простейшие виды расстройки, обусловленные отклонениями в

процессе изготовления, износом или коррозией, могут существенно снижать долговечность рабочего колеса. Разработанный подход предлагается использовать при проектировании новых турбомашин для повышения ресурса рабочих колес с учетом расстройки, а также оптимизации затрат на ремонт и техническое обслуживание двигателей [19, 20].

Разработанный авторами подход является рабочим инструментом для дальнейшего исследования влияния расстройки лопаток на ресурс и другие характеристики рабочих лопаток реальных осевых и радиальных турбомашин.

## Список источников

1. 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>.
2. Репецкий О.В. Компьютерный анализ динамики и прочности турбомашин: монография. Иркутск: ИргТУ, 1999. 301 с. EDN: TTNLQR.
3. 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>.
4. Нгуен Ван Винь, Репецкий О.В. Математическое моделирование и его применение в преднамеренной расстройке параметров и оптимизации ресурсных характеристик турбомашин // *Информационные и математические технологии в науке и управлении*. 2022. № 2. С. 24–30. <https://doi.org/10.38028/ESI.2022.26.2.002>. EDN: AYJBLR.
5. 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). EDN: TFPDQQ.
6. Mashiachidi M.H., Desai D.A. Fatigue life prediction of mistuned steam turbine blades subjected to deviations in blade geometry // *Science, Engineering and Technology*. 2023. Vol. 3. Iss. 2. P. 24–35. <https://doi.org/10.54327/set2023/v3.i2.101>. EDN: QBPZDN.
7. Kanumuri L., Srishuka M., Gupta A.K., Singh S.K. Application of support vector regression on mechanical properties of austenitic stainless steel 304 at elevated temperatures // *Materials Today: Proceedings*. 2015. Vol. 2. Iss. 4. P. 1479–1486. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.07>.
8. Bomidi J.A.R., Weinzapfel N., Wang Chin-Pei, Sadeghi F. Experimental and numerical investigation of fatigue of thin tensile specimen // *International Journal of Fatigue*. 2012. Vol. 44. P. 116–130. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2012.05.013>. EDN: RPPPPR.
9. Simmons H.R., Allison T.C. Impulse testing and blade load simulation tools to estimate cyclic stress life in blades and impellers // *ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea, and Air (Glasgow, 14–18 June 2010)*. Glasgow, 2010. Vol. 5. P. 777–787. <https://doi.org/10.1115/GT2010-23745>.
10. 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>.
11. Рыжиков И.Н., Нгуен Т.К. Влияние расстройки параметров на частоты и формы колебаний конструкций с поворотной симметрией // *Механика XXI века*. 2015. № 14. С. 29–33. EDN: TRMXFN.
12. Rani P., Agrawal A.K. Fatigue life evaluation of a lowpressure stage steam turbine blade // *Journal of Vibration Engineering and Technologies*. 2023. Vol. 12. P. 5431–5443. <https://doi.org/10.1007/s42417-023-01173-3>.
13. 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: Proceedings of the ASME Turbo Expo*. 2021. Vol. 9B. P. V09BT29A016. <https://doi.org/10.1115/GT2021-59126>. EDN: UJPBAK.
14. Зайдес С.А. Оценка усталостной долговечности осевого рабочего колеса турбомашин с учетом преднамеренной расстройки // *Системы. Методы. Технологии*. 2022. № 1. С. 57–62. <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2022-1-57-62>. EDN: UXUXYQ.
15. Жужукин А.И., Непеин К.Г. Применение спекл-интерферометрии для экспериментального исследования колебаний рабочих колёс турбомашин с расстройкой параметров // *Динамика и виброакустика*. 2023. Т. 9. № 1. С. 21–32. <https://doi.org/10.18287/2409-4579-2023-9-1-21-32>. EDN: ESNZYI.



16. Beirow B., Kühhorn A., Figashevsky F., Bornhorn A., Repetckii O.V. Forced response reduction of a blisk by means of intentional mistuning // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2019. Vol. 141. Iss. 1. P. 011008. <https://doi.org/10.1115/1.4040715>. EDN: RQRYSA.
17. Ермаков А.И., Урлапкин А.В., Федорченко Д.Г. Формирование разброса резонансных напряжений в рабочих колёсах с неидентичными лопатками и слабой связанностью колебаний // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва*. 2014. № 5-4. С. 9–13. EDN: UGKQWZ.
18. Mashiachidi M.H., Desai D.A. Prediction of fatigue life of geometrically deviated steam turbine blades under thermo-mechanical conditions // *Frontiers in Manufacturing Technology*. 2024. Vol. 3. P. 1338222. <https://doi.org/10.3389/fmtec.2023.1338222>. EDN: ZQHATA.
19. Figaschewsky F., Kühhorn A., Beirow B., Nipkau J., Giersch T., Power B. Design and analysis of an intentional mistuning experiment reducing flutter susceptibility and minimizing forced response of a jet engine fan // *Turbomachinery Technical Conference and Exposition: ASME Turbo Expo 2017 (Charlotte, North Carolina, 26–30 June 2017)*. Charlotte, North Carolina: ASME, 2017. Vol. 7B. P. V07BT36A020. <https://doi.org/10.1115/GT2017-64621>.
20. Schönleitner F., Traussnig L., Marn A., Heitmeir F. Detection of blade mistuning in a low-pressure turbine rotor resulting from manufacturing tolerances and differences in blade mounting // *Journal of Mechanics Engineering and Automation*. 2015. Vol. 5. P. 297–308. <https://doi.org/10.17265/2159-5275/2015.05.005>.

### References

1. 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>.
2. Repetckii O.V. *Computer analysis of dynamics and strength of turbomachines*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 1999, 301 p. (In Russ.). EDN: TTNLQR.
3. 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>.
4. Nguyen Van Vinh, Repetckii O.V. Mathematical modeling and its application in intentional mistuning of parameters and optimization of life characteristics of turbomachines. *Information and mathematical Technologies in Science and Management*. 2022;2:24-30. <https://doi.org/10.38028/ESI.2022.26.2.002>. EDN: AYJBLR.
5. Repetckii O.V., Nguyen Van Manh. 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). EDN: TFPDQQ.
6. Mashiachidi M.H., Desai D.A. Fatigue life prediction of mistuned steam turbine blades subjected to deviations in blade geometry. *Science, Engineering and Technology*. 2023;3(2):24-35. <https://doi.org/10.54327/set2023/v3.i2.101>. EDN: QBPZDN.
7. Kanumuri L., Srishuka M., Gupta A.K., Singh S.K. Application of support vector regression on mechanical properties of austenitic stainless steel 304 at elevated temperatures. *Materials Today: Proceedings*. 2015;2(4):1479-1486. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.07>.
8. Bomidi J.A.R., Weinzapfel N., Wang Chin-Pei, Sadeghi F. Experimental and numerical investigation of fatigue of thin tensile specimen. *International Journal of Fatigue*. 2012;44:116-130. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2012.05.013>. EDN: RPPPPR.
9. Simmons H.R., Allison T.C. Impulse testing and blade load simulation tools to estimate cyclic stress life in blades and impellers. In: *ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea, and Air*. 14–18 June 2010, Glasgow. Glasgow; 2010, vol. 5, p. 777-787. <https://doi.org/10.1115/GT2010-23745>.
10. 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>.
11. Ryzhikov I.N., Nguen T.K. Mistuned parameter effect on vibration frequencies and modes of structures with rotational symmetry. *Mekhaniki XXI veku*. 2015;14:29-33. (In Russ.). EDN: TRMXFN.
12. Rani P., Agrawal A.K. Fatigue life evaluation of a lowpressure stage steam turbine blade. *Journal of Vibration Engineering and Technologies*. 2023;12:5431-5443. <https://doi.org/10.1007/s42417-023-01173-3>.
13. 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: Proceedings of the ASME Turbo Expo*. 2021;9B:V09BT29A016. <https://doi.org/10.1115/GT2021-59126>. EDN: UJPBAK.
14. Zaides S.A. Fatigue life evaluation of an axial impeller of the turbomachine taking into account intentional mistuning. *Systems. Methods. Technologies*. 2022;1:57-62. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2022-1-57-62>. EDN: UXUXYQ.
15. Zhuzhukin A.I., Nepein K.G. Speckle interferometry application for investigating the effect of parameter mistuning of turbomachine rotor wheels on their natural vibrations. *Journal of Dynamics and Vibroacoustics*. 2023;9(1):21-32. (In Russ.). <https://doi.org/10.18287/2409-4579-2023-9-1-21-32>. EDN: ESNZYI.
16. Beirow B., Kühhorn A., Figashevsky F., Bornhorn A., Repetckii O.V. Forced response reduction of a blisk by means of intentional mistuning. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2019;141(1):011008. <https://doi.org/10.1115/1.4040715>. EDN: RQRYSA.

17. Ermakov A.I., Uralapkin A.V., Fedorchenko D.G. Formation of spread in resonance stresses in bladed disks with non-identical blades and loose vibration connectedness. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2014;5-4:9-13. (In Russ.). EDN: UGKQWZ.
18. Mashiachidi M.H., Desai D.A. Prediction of fatigue life of geometrically deviated steam turbine blades under thermo-mechanical conditions. *Frontiers in Manufacturing Technology*. 2024;3:1338222. <https://doi.org/10.3389/fmtec.2023.1338222>. EDN: ZQHATA.
19. Figaschewsky F., Kühhorn A., Beirow B., Nipkau J., Giersch T., Power B. Design and analysis of an intentional mistuning experiment reducing flutter susceptibility and minimizing forced response of a jet engine fan. In: *Turbomachinery Technical Conference and Exposition: ASME Turbo Expo 2017*. 26–30 June 2017, Charlotte, North Carolina. Charlotte, North Carolina: ASME; 2017, vol. 7B, p. V07BT36A020. <https://doi.org/10.1115/GT2017-64621>.
20. Schönleitner F., Traussnig L., Marn A., Heitmeir F. Detection of blade mistuning in a low-pressure turbine rotor resulting from manufacturing tolerances and differences in blade mounting. *Journal of Mechanics Engineering and Automation*. 2015;5:297-308. <https://doi.org/10.17265/2159-5275/2015.05.005>.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

##### **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](mailto:repetckii@igsha.ru)  
<https://orcid.org/0000-0003-2560-2721>

##### **Нгуен Ван Мань,**

аспирант,  
Иркутский государственный аграрный  
университет имени А.А. Ежевского,  
664038, г. Иркутск, Россия  
[manhzhucov@gmail.com](mailto:manhzhucov@gmail.com)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

##### **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](mailto:repetckii@igsha.ru)  
<https://orcid.org/0000-0003-2560-2721>

##### **Van Manh Nguyen,**

Postgraduate Student,  
Irkutsk State Agrarian University  
named after A.A. Ezhevsky,  
Irkutsk 664038, Russia  
[manhzhucov@gmail.com](mailto:manhzhucov@gmail.com)

#### 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 28.02.2025 г.; одобрена после рецензирования 15.04.2025 г.; принята к публикации 24.04.2025 г.

#### Information about the article

The article was submitted 28.02.2025; approved after reviewing 15.04.2025; accepted for publication 24.04.2025.



## Комплексное исследование причин разрушения пенополиуретановой изоляции в системах теплоснабжения

И.М. Газизуллин<sup>1✉</sup>, А.В. Дмитриев<sup>2</sup>, Г.Д. Русаков<sup>3</sup>, Г.Р. Бадретдинова<sup>4</sup>

<sup>1-4</sup>Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

**Резюме.** Цель – рассмотреть механизмы образования дефектов пенополиуретановой изоляции, используемой в трубопроводах, в частности, для энергетики и централизованного теплоснабжения. Объектом исследования является пенополиуретановая изоляция, находящаяся между сталью и полиэтиленом. Численный термомеханический анализ был проведен с использованием программного обеспечения ANSYS на П-образном участке трубы с пенополиуретановой изоляцией для моделирования условий эксплуатации при температуре теплоносителя 130 °С с различной температурой окружающей среды от -20 до +20 °С с шагом в 5 °С. Рассмотрены различные причины возникновения дефектов в изоляции, включая технологические факторы при производстве (например, неравномерное нанесение, неправильная температура вспенивания, загрязнение влагой), механические нагрузки (удары, вибрации) и термические напряжения. Описан процесс разрушения пенополиуретана, включающий конденсацию, коррозию и химический распад. В ходе проведенных исследований установлено, что значительные концентрации напряжений возникают в местах поворота труб с пенополиуретановой изоляцией. Показано, что максимальное напряжение фон Мизеса составляет 0,45678 МПа при температуре окружающей среды -20 °С (с разницей температуры теплоносителя и окружающей среды 150 °С). Это близко к пределу прочности пенополиуретана, что при циклических процессах сжатия и расширения может привести к возникновению дефектов с последующей деградацией изоляционного слоя. Таким образом, показано, что термические нагрузки, наряду с дефектами производства и механическими воздействиями, являются основными причинами возникновения дефектов в пенополиуретановой изоляции (таких как трещины, расслоения, усталости), которые нарушают структурную целостность и тепловые характеристики труб с полиуретановой изоляцией.

**Ключевые слова:** пенополиуретан, термические напряжения, механические волны, ANSYS, диагностика трубопроводов, коэффициент теплового расширения, деформации

**Финансирование.** Данная работа выполнена в рамках гранта РНФ № 24-29-20061, <https://rscf.ru/project/24-29-20061/>. Авторы благодарят РНФ за поддержку настоящих исследований.

**Для цитирования:** Газизуллин И.М., Дмитриев А.В., Русаков Г.Д., Бадретдинова Г.Р. Комплексное исследование причин разрушения пенополиуретановой изоляции в системах теплоснабжения // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 4. С. 502–512. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-4-502-512>. EDN: JFTCLA.

### MECHANICAL ENGINEERING

#### Original article

## Polyurethane foam insulation: Causes of failure in district heating systems

Il'giz M. Gazizullin<sup>1✉</sup>, Andrei V. Dmitriev<sup>2</sup>, Grigorii D. Rusakov<sup>3</sup>,  
Guzel R. Badretdinova<sup>4</sup>

<sup>1-4</sup>Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

**Abstract.** This study investigates the mechanisms of defect formation in polyurethane foam (PUF) insulation used in pipelines for energy and central heating applications. The research focuses on PUF insulation placed between a steel pipe and a polyethylene casing. A numerical thermomechanical analysis was performed using ANSYS software on a U-shaped section of an insulated pipe to simulate the operational conditions with a heat-transfer fluid temperature of 130 °C and ambient temperatures varying from -20 °C to +20 °C in 5 °C increments. Various causes of insulation defects were examined, including manufacturing factors (e.g., uneven application, incorrect foaming temperature, and moisture contamination), mechanical loads (impact and vibration), and thermal stress. The PUF failure process, which involves condensation, corrosion, and chemical degradation, is described. The investigation established that significant stress concentrations occur at the bends of pipes

covered with PUF insulation. The maximum von Mises stress was determined to be 0.45678 MPa at an ambient temperature of  $-20^{\circ}\text{C}$  with a temperature differential of  $150^{\circ}\text{C}$  between the fluid and environment. This value approaches the ultimate strength of the polyurethane foam, indicating that cyclic compression and expansion processes can initiate defects and lead to subsequent degradation of the insulating layer. Thus, the study demonstrates that thermal loads, along with manufacturing defects and mechanical impacts, are the primary factors in the formation of defects in PUF, such as cracks, delamination, and fatigue, which compromise the structural integrity and thermal performance of insulated pipes.

**Keywords:** polyurethane foam, thermal stresses, mechanical waves, ANSYS, diagnostics of pipelines, coefficient of thermal expansion, deformations

**Funding.** This work was carried out within the framework of the Russian Science Foundation Grant No. 24-29-20061, <https://rscf.ru/project/24-29-20061/>. The authors thank the Russian Science Foundation for the support of the study.

**For citation:** Gazizullin I.M., Dmitriev A.V., Rusakov G.D., Badretdinova G.R. Polyurethane foam insulation: Causes of failure in district heating systems. *iPolytech Journal*. 2025;29(4):502-512. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-4-502-512>. EDN: JFTCLA.

## ВВЕДЕНИЕ

Изучение механизмов формирования и последствий дефектов в трубах с пенополиуретановой (ППУ) изоляцией является одной из ключевых задач в области инженерной безопасности, экологии и энергоэффективности. В энергетике и нефтегазовой отрасли трубопроводы с ППУ изоляцией используются для транспортировки высокотемпературных и высоконапорных сред (рис. 1). Популярность труб с ППУ изоляцией обусловлена хорошими теплоизоляционными свойствами пенополиуретана, его теплопроводность не превышает  $0,03 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ .

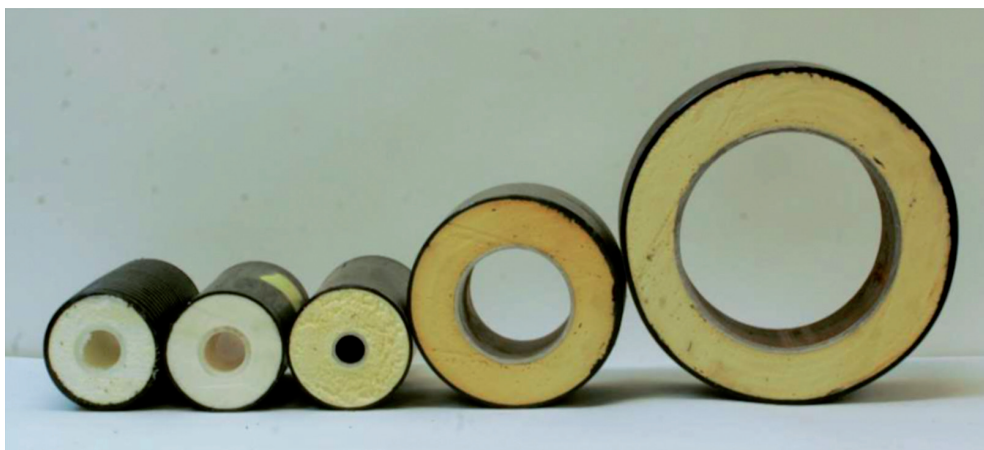
Это самый низкий показатель среди остальных материалов, применяемых для утепления трубопроводов.

Дефекты в изоляции могут привести к утечкам нефтепродуктов, химических веществ

или тепловой энергии, что негативно влияет на экосистемы. Например, разрывы трубопроводов с нефтью в экологически уязвимых регионах (как Арктика) или в охраняемых природных зонах могут вызвать масштабные аварии. Также повреждения ППУ слоя увеличивают теплопотери, что требует дополнительного потребления энергоресурсов.

Средние ежегодные потери от теплопотерь в трубопроводах с дефектами в России<sup>6</sup> оцениваются в 10–15% при норме в 5–7% [1]. Дефекты, такие как пустоты и трещины, создают области с повышенной теплопроводностью, так как воздух внутри пустот обладает более высокой теплопроводностью, чем ППУ [2].

Процесс разрушения труб с ППУ изоляцией можно описать следующим образом. Когда температура внешней поверхности



**Рис. 1.** Наиболее распространенные теплоизолированные трубы с пенополиуретановой изоляцией<sup>5</sup>  
**Fig. 1.** The most common thermally insulated pipes with polyurethane foam insulation<sup>5</sup>

<sup>5</sup>Gutierrez L.D. A Circular economy approach to multifunctional sandwich structures: polymeric foams for district heating pre-insulated pipes: thesis. Hamburg: HafenCity Universität Hamburg, 2022. 218 p. <https://doi.org/10.34712/142.35>

<sup>6</sup>Кузник И.В. Российское теплоснабжение. Учет и эксплуатация: эссе. 2-е изд., перераб. и доп. М.: МЭИ, 2006. 190 с.



металлической трубы падает ниже точки росы окружающей среды, начинается процесс конденсации водяного пара. Дефекты в ППУ слое ускоряют этот процесс – пустоты и трещины создают каналы для миграции водяного пара из окружающей среды к металлической трубе; конденсат скапливается на поверхности металла, особенно в областях с дефектами, где теплопередача наиболее интенсивна. Далее конденсат, содержащий примеси в виде солей и кислот из окружающей среды, вызывает электрохимическую коррозию металлической трубы, железо взаимодействует с кислородом и водой, образуя ржавчину [3–5].

Дефекты в ППУ слое образуются под воздействием следующих факторов:

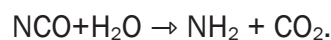
- технологических (неравномерное нанесение ППУ, нарушение температурно-временных режимов вспенивания, влажность компонентов);
- механических нагрузок (внешние удары, вибрации, внутреннее давление);
- термических напряжений (перепады температур между слоями).

Вспенивание полиуретана происходит в результате химической реакции, одновременно протекающей при смешивании изоцианата, полиола и воды. Изоцианат вступает в реакцию с водой или с влагой окружающей среды, образуя карбаминую кислоту, которая затем разлагается на  $\text{CO}_2$  и амины [6]. Параллельно изоцианаты и полиолы вступают в реакцию с образованием полиуретана. Образующийся газ  $\text{CO}_2$  превращает полиуретан в пену [4]. В случае если ППУ нанесен неравномерно из-за неправильной подачи компонентов или некалиброванного оборудования, в отдельных зонах слоя возникает неравномерность плотности ППУ, например, плотность  $40 \text{ кг/м}^3$  в одной области и  $80 \text{ кг/м}^3$  в другой [5].

Также ввиду неравномерности нанесения ППУ слоя могут образоваться незаполненные участки. В зонах с низкой плотностью модуль Юнга ППУ снижается до  $E \approx 0,01 \text{ ГПа}$ , что может вызывать локальные деформации при термических расширениях и трещины на границе раздела «более плотный ППУ – менее плотный ППУ» [7].

Немаловажным фактором является влажность компонентов заливки. Излишняя вода провоцирует чрезмерное образование  $\text{CO}_2$ ,

что приводит к возникновению крупных пор и пустот, а также нестабильности в ячеистой структуре [8]:



Механические нагрузки, такие как внешние удары, вибрации, внутреннее давление, возникают при кратковременных, но интенсивных механических воздействиях на трубу, например, удар вызывает резкое сжатие или растяжение ППУ слоя<sup>5</sup> [9].

## МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Напряжения, возникающие в результате механических повреждений, можно оценить через уравнение упругости. Общий вид уравнения напряжений можно записать в виде закона Гука. Так, для пенополиуретана в изотропном виде уравнение выглядит следующим образом:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}, \quad (1)$$

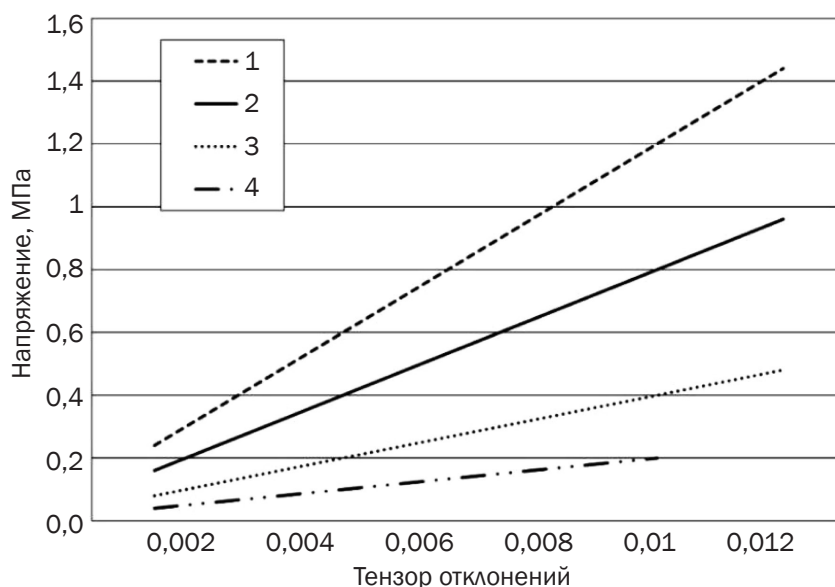
где  $\sigma_{ij}$  – тензор напряжений, МПа;  $\varepsilon_{kl}$  – тензор деформаций, МПа;  $C_{ijkl}$  – тензор жесткости ППУ упрощается до параметра модуля Юнга, МПа.

График зависимости напряжений до момента достижения предела прочности от деформаций для ППУ различной плотности приведен на рис. 3. Значения Модуля упругости и пределов прочности (табл. 1) для различных ППУ приблизительно равны нижней границе в соответствии с данными из справочной литературы [10].

Приведенные значения являются приблизительными, точные значения пределов прочности в значительной степени зависят от конкретного химического состава, производственного процесса – заготовки, распыления, формования и структуры ячеек [11, 12].

Ниже приведены приблизительные данные для жестких пенополиуретанов с закрытыми порами. Для более точных расчетов их необходимо сверять с техническим паспортом производителя [13].

Кроме того, одной из причин возникновения дефектов является возникновение термических напряжений (рис. 4). Данные напряжения возникают в материалах при изменении их температуры  $\Delta T$ , когда де-



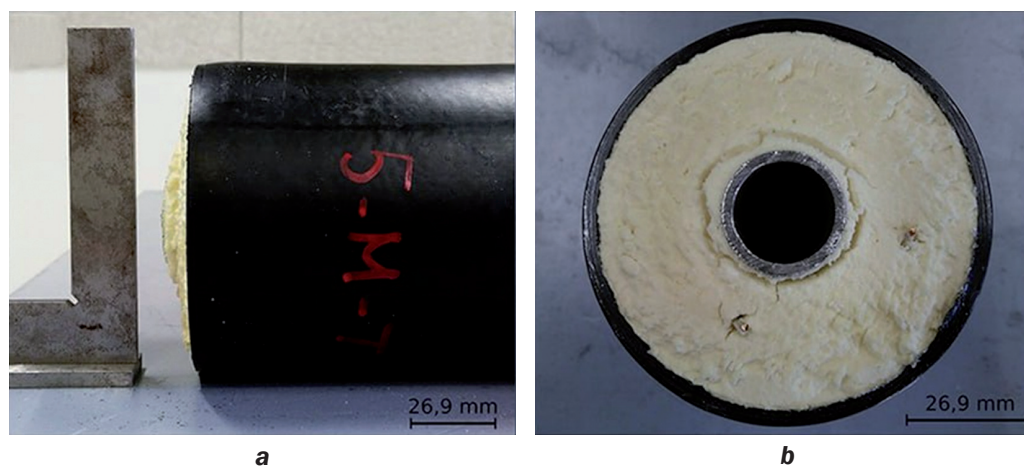
**Рис. 2.** Приблизительная зависимость тензора напряжений от тензора деформаций. Пенополиуретан плотностью, кг/м<sup>3</sup>: 1 – 100; 2 – 80; 3 – 60; 4 – 40

**Fig. 2.** Approximate dependence of the stress tensor on the strain tensor. Polyurethane foam density, kg/m<sup>3</sup>: 1 – 100; 2 – 80; 3 – 60; 4 – 40

**Таблица 1.** Пределы прочности для пенополиуретана различной плотности<sup>7</sup>

**Table 1.** Ultimate strength limits for polyurethane foam of various densities<sup>7</sup>

Плотность ППУ, кг/м <sup>3</sup>	Модуль Юнга, МПа	Предел прочности на сжатие, МПа
40	20	0,2
60	40	0,5
80	80	1
100	120	1,5



**Рис. 3.** Деформация и сжатие оболочки (а) и разрушение пены на границе раздела пена-сталь (b) [15]

**Fig. 3.** Deformation and compression of the shell (a) and foam fracture at the foam-steel interface (b) [15]

формация, вызванная тепловым расширением, ограничена другими материалами<sup>5,7</sup> [5, 7, 8, 14].

ППУ изоляция постоянно подвергается воздействию повышенных температур от горячей стальной трубы, особенно внутренних

<sup>7</sup>Oertel G., Abele L. Polyurethane handbook: chemistry, raw materials, processing, application, properties. Munich; New York: Hanser; Cincinnati: Hanser/Gardner, 1994. Режим доступа: <https://archive.org/details/polyurethanehand0000unse/mode/2up> (дата обращения: 15.02.2025).

слой ППУ, и циклическим изменениям температуры. В первую очередь разрушаются наименее стабильные уретановые связи в полимерной матрице. В результате возникают снижение молекулярной массы полимера, возможное образование трещин, усадка, выделение летучих продуктов разложения, которые могут влиять на свойства замкнутых ячеек [16].

При изменении температуры  $\Delta T$  материал стремится изменить свою длину по закону линейного теплового расширения:

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T, \quad (2)$$

где  $L_0$  – исходная длина, м;  $\alpha$  – коэффициент теплового расширения,  $K^{-1}$ .

Если деформация ограничена, например, другими слоями или фиксацией, возникают напряжения. Для одномерного случая продольное расширение трубы определяется как

$$\sigma = E \alpha \Delta T, \quad (3)$$

где  $E$  – модуль Юнга, МПа.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рассматриваемом случае труба состоит из трех слоев с разными коэффициентами теплового расширения, модулями Юнга и коэффициентами Пуассона. Свойства материалов приведены в табл. 2.

Определение относительных расширений для каждого слоя выявляется следующими формулами [17–19]:

$$\varepsilon_{Ст3} = \alpha_{Ст3} \Delta T; \quad (4)$$

$$\varepsilon_{ППУ} = \alpha_{ППУ} \Delta T; \quad (5)$$

$$\varepsilon_{ПЭ} = \alpha_{ПЭ} \Delta T. \quad (6)$$

В качестве объекта был выбран П-образный пролет в сети труб с ППУ изоляцией. Геометрические размеры трубы и пролета приведены на рис. 5.

Циклические тепловые нагрузки могут привести к накоплению усталостных повреждений, особенно в точках концентрации напряжений, характерных для геометрии соединения [9, 20].

Для моделирования температурных расширений необходимо задать граничные условия. Температура внутренней поверхности равна температуре теплоносителя  $T = 130^\circ C^{10}$ . Температура окружающей среды  $T$  в пределах от  $-20$  до  $+20^\circ C$  с шагом в  $5^\circ C$ .

Методика моделирования в ANSYS (рис. 5–8) следующая: для начала проводится тепловой анализ Steady-State Thermal с учетом теплопередачи на внешней поверхности, далее – термомеханический анализ Static Structural для расчета напряжений от теплового расширения.

**Таблица 2.** Свойства материалов трехслойной трубы с пенополиуретаном, параметры пенополиуретана, согласно ГОСТ 30732–2020<sup>8</sup> (EN 448:2016<sup>9</sup>)

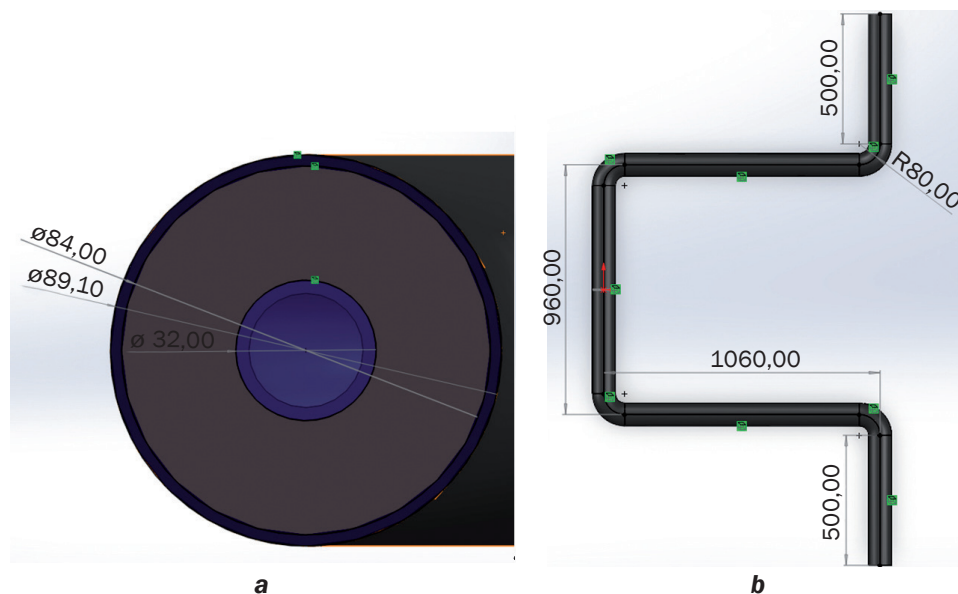
**Table 2.** Properties of three-layer polyurethane foam pipe materials, polyurethane foam parameters according to GOST 30732-2020<sup>8</sup> (EN 448:2016<sup>9</sup>)

Материал	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплового расширения, К <sup>-1</sup>	Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Внешний диаметр слоя, мм	Внутренний диаметр слоя, мм	Толщина слоя, мм
Сталь (Ст3)	7850	12	210	0,3	45	32	26	3
Пенополиуретан	60	80	0,04	0,3	0,03	84	32	26
Полиэтилен	920	200	0,8	0,4	0,4	89,1	84	2,5

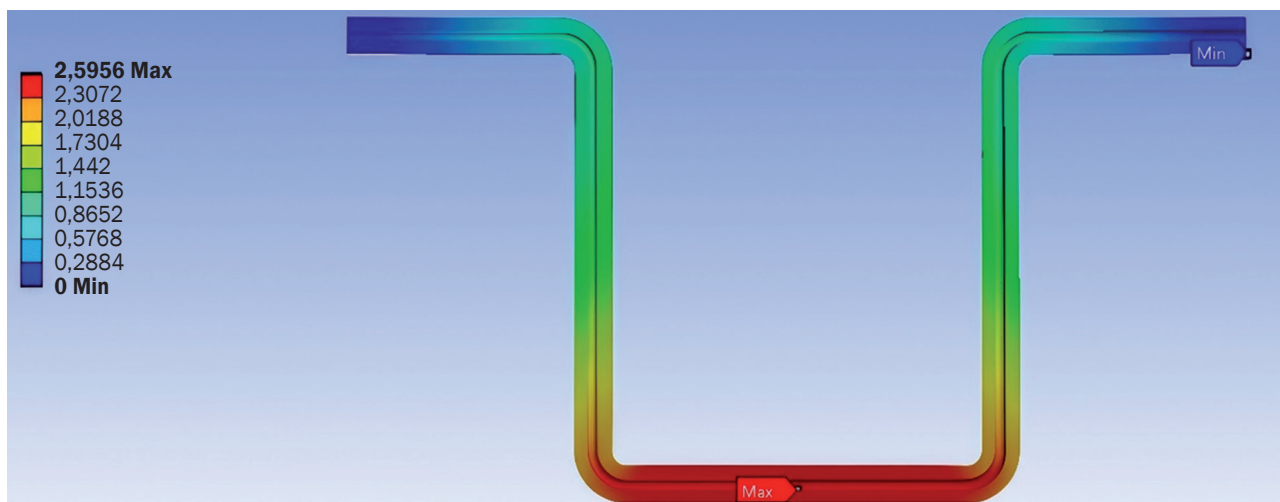
<sup>8</sup>ГОСТ 30732–2020. Трубы и фасонные изделия стальные с тепловой изоляцией из пенополиуретана с защитной оболочкой. Введ. 11.08.2020. М.: Стандартинформ, 2020.

<sup>9</sup>EN 448:2016. District heating pipes - Preinsulated bonded pipe systems for directly buried hot water networks - Fitting assemblies of steel service pipes, polyurethane thermal insulation and outer casing of polyethylene. Режим доступа: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/feeebe2c-2546-40a6-8081-10f97aeb8365/sist-en-448-2016> (дата обращения: 15.02.2025).

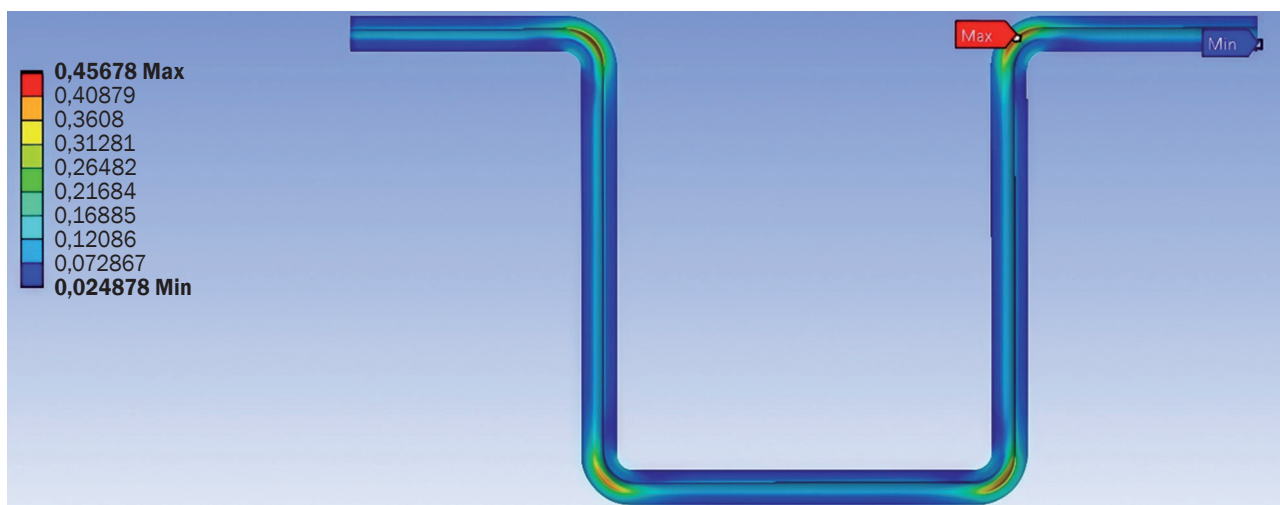
<sup>10</sup>DIN EN 253:2019. District heating pipes - Bonded single pipe systems for directly buried hot water networks - Factory made pipe assembly of steel service pipe, polyurethane thermal insulation and a casing of polyethylene. Режим доступа: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/d2d185d6-780e-4081-8161-a3b1e5b70ebf/en-253-2019> (дата обращения: 17.02.2025).



**Рис. 4.** Геометрические параметры П-образного пролета: а – в разрезе; б – габаритные размеры  
**Fig. 4.** Geometric parameters of the U-shaped span: a – in section; b – overall dimensions

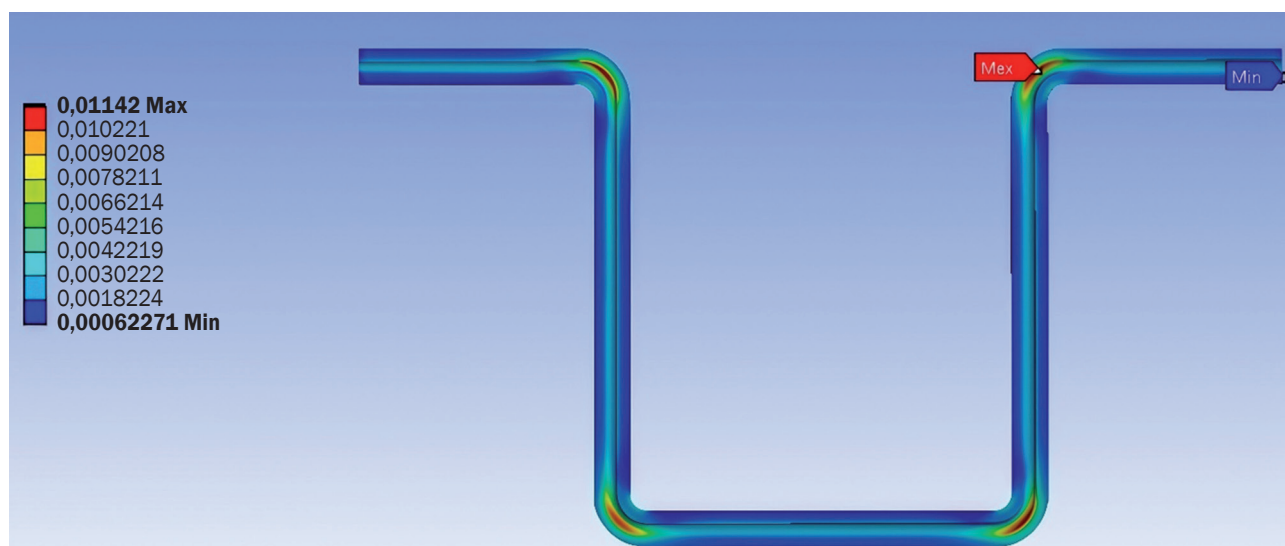


**Рис. 5.** Деформации П-образного пролета, возникающие в результате теплового расширения  
**Fig. 5.** Deformations of the U-shaped span resulting from thermal expansion



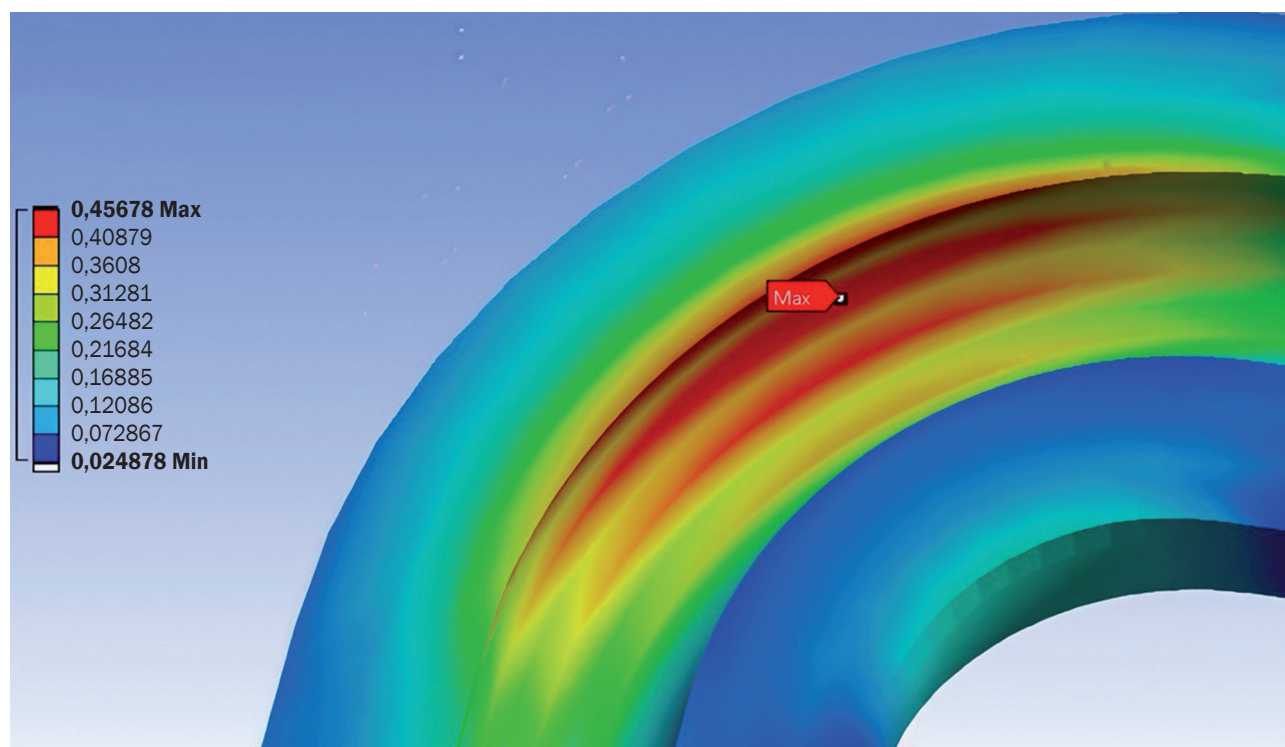
**Рис. 6.** Относительные отклонения П-образного пролета, возникающие в результате теплового расширения  
**Fig. 6.** Relative deviations of the U-shaped span resulting from thermal expansion





**Рис. 7.** Исследование напряжения фон Мизеса при тепловых расширениях в ANSYS

**Fig. 7.** Investigation of the von Mises stress during thermal expansion in ANSYS



**Рис. 8.** Приближенный вид, демонстрирующий распределение напряжений в углах П-образного пролета

**Fig. 8.** Approximate view showing stress distribution at the corners of the U-shaped span

Полученные распределения расширений и напряжений в слое пенополиуретана дают четкое представление об участках возможного расположения дефектов, таких как отслоения или трещины. Области с наибольшим относительным расширением и возникающими напряжениями обладают наибольшей вероятностью возникновения отслоений и последующего разрушения как ППУ слоя, так и металлической оболочки.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты моделирования показывают, что углы в трубопроводах с полиуретановой изоляцией являются областями повышенных напряжений (см. рис. 8) при тепловом расширении из-за сочетания осевых усилий. Важно отметить, что полиуретановая изоляция испытывает значительное напряжение сдвига, поскольку она передает нагрузки между расширяющейся стальной трубой и внешней оболочкой.

**Таблица 3.** Полученные значения напряжений и относительных расширений при различной температуре окружающей среды

**Table 3.** Obtained values of stresses and relative expansions at different ambient temperatures

Температура окружающей среды, °С	Температура теплоносителя, °С	Разница температур, °С	Напряжение, МПа	Относительные расширения
20	130	110	0,33583	0,0083964
15		115	0,35095	0,0087744
10		120	0,36607	0,0091524
5		125	0,38119	0,0095304
0		130	0,39631	0,0099083
-5		135	0,41143	0,010286
-10		140	0,42654	0,010664
-15		145	0,44166	0,011042
-20		150	0,45678	0,01142

Проводя аналогичный анализ при различной температуре окружающей среды, были получены следующие данные о напряжениях и относительных расширениях в ППУ слое (табл. 3).

Результаты численного моделирования указывают на линейность в зависимости от относительного расширения и создаваемого напряжения от температуры окружающей среды при постоянной температуре теплоносителя.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Технологические факторы в процессе производства могут привести к появлению таких дефектов, как пустоты, колебания плотности и участки с плохой адгезией. Механические нагрузки, включая удары при монтаже, а также вибрации от работающего оборудования

или внешних источников могут привести к образованию трещин, расслоению и усталостных напряжений. Однако термомеханический анализ, проведенный с использованием программного обеспечения ANSYS на типичном участке трубы П-образной формы, выявил критическую роль термических напряжений.

Согласно полученным данным при исследовании тепловых расширений, при относительном расширении ППУ слоя 0,01142, максимальное напряжение, возникающее в результате теплового расширения при разности температур теплоносителя и окружающей среды 150 °С, составляет 0,45678 МПа, что близко к пределу прочности и при периодическом расширении и сжатии, и может привести к различным повреждениям.

## Список источников

1. Кузник И.В., Колубков А.Н., Ильин Е.Т., Белов В.М., Михайлов М.А., Плехов А.Г. [и др.]. Методы повышения энергоэффективности в централизованном теплоснабжении // Сантехника. Отопление. Кондиционирование. 2017. № 10. Режим доступа: <https://www.c-o-k.ru/articles/metody-povysheniya-energoeffektivnosti-v-centralizovannom-teplosnabzhenii> (дата обращения: 15.02.2025).
2. Ваньков Ю.В., Зиганшин Ш.Г., Горбунова Т.Г., Политова Т.О., Хабибуллин Р.М. Анализ повреждаемости тепловых сетей г. Казани и разработка рекомендаций для повышения их надежности // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2012. № 7-8. С. 9–18. EDN: PHGHNB.
3. Ostrogorsky A.G., Glicksman L.R., Reitz D.W. Aging of polyurethane foams // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1986. Vol. 29. Iss. 8. P. 1169–1176. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(86\)90148-1](https://doi.org/10.1016/0017-9310(86)90148-1).
4. Tesser R., Di Serio M., Sciafani A., Santacesaria E. Modeling of polyurethane foam formation // Journal of Applied Polymer Science. 2004. Vol. 92. Iss. 3. C. 1875–1886. <https://doi.org/10.1002/app.20170>.
5. McDonough W., Braungart M., Anastas P.T., Zimmerman J.B. Peer reviewed: applying the principles of green engineering to cradle-to-cradle design // Environmental Science and Technology. 2003. Vol. 37. Iss. 23. P. 434A–441A. <https://doi.org/10.1021/es0326322>.
6. Eriksson D., Sundén B. Heat and mass transfer in polyurethane insulated district cooling and heating pipes // Journal of Thermal Envelope and Building Science. 1998. Vol. 22. Iss. 1. P. 49–71. <https://doi.org/10.1177/109719639802200105>.

7. Vega A., Yarahmadi N., Jakubowicz I. Determination of the long-term performance of district heating pipes through accelerated ageing // *Polymer Degradation and Stability*. 2018. Vol. 153. P. 15–22. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2018.04.003>.
8. Gaidukovs S., Gaidukova G., Ivdre A., Cabulis U. Viscoelastic and thermal properties of polyurethane foams obtained from renewable and recyclable components // *Journal of Renewable Materials*. 2018. Vol. 6. Iss. 7. P. 755–763. <https://doi.org/10.7569/JRM.2018.634112>.
9. Menges G., Knipschild F. Estimation of mechanical properties for rigid polyurethane foams // *Polymer Engineering and Science*. 1975. Vol. 15. Iss. 8. P. 623–627. <https://doi.org/10.1002/pen.760150810>.
10. Chen Yichong, Li Dongyang, Zhang Hong, Ling Yijie, Wu Kaiwen, Tao Liu, et al. Antishrinking strategy of micro-cellular thermoplastic polyurethane by comprehensive modeling analysis // *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2021. Vol. 60. Iss. 19. P. 7155–7166. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c00895>. EDN: RUIENS.
11. Doyle L., Weidlich I., Illguth M. Anisotropy in polyurethane pre-insulated pipes // *Polymers*. 2019. Vol. 11. Iss. 12. P. 2074. <https://doi.org/10.3390/polym11122074>.
12. Doyle L., Weidlich I. Moisture uptake and effects of hygrothermal exposure on closed-cell semicrystalline polyethylene terephthalate foam // *Polymer Degradation and Stability*. 2022. Vol. 202. P. 110009. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2022.110009>. EDN: GUGMWJ.
13. Pellizzi E., Lattuat-Derieux A., Lavédrine B., Cheradame H. Degradation of polyurethane ester foam artifacts: chemical properties, mechanical properties and comparison between accelerated and natural degradation // *Polymer Degradation and Stability*. 2014. Vol. 107. P. 255–261. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2013.12.018>.
14. Cotgreave T., Shortall J.B. Failure mechanisms in fibre reinforced rigid polyurethane foam // *Journal of Cellular Plastics*. 1977. Vol. 13. Iss. 4. P. 240–244. <https://doi.org/10.1177/0021955X7701300401>.
15. Doyle L., Weidlich I. Effects of thermal and mechanical cyclic loads on polyurethane pre-insulated pipes // *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 2021. Vol. 44. Iss. 1. P. 156–168. <https://doi.org/10.1111/ffe.13347>. EDN: SQMJKG.
16. Yarahmadi N., Vega A., Jakubowicz I. Accelerated ageing and degradation characteristics of rigid polyurethane foam // *Polymer Degradation and Stability*. 2017. Vol. 138. P. 192–200. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2017.03.012>.
17. Kakroodi A.R., Khazabi M., Maynard K., Sain M., Kwon Oh-Sung. Soy-based polyurethane spray foam insulations for light weight wall panels and their performances under monotonic and static cyclic shear forces // *Industrial Crops and Products*. 2015. Vol. 74. P. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.03.092>.
18. Johns A.I., Scott A.C., Watson J.T.R., Ferguson D., Clifford A.A. Measurement of the thermal conductivity of gases by the transient hot-wire method // *Philosophical Transactions of the Royal Society A. Series: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 1988. Vol. 325. Iss. 1585. P. 295–356. <https://doi.org/10.1098/rsta.1988.0054>.
19. McLinden M.O., Klein S.A., Perkins R.A. An extended corresponding states model for the thermal conductivity of refrigerants and refrigerant mixtures // *International Journal of Refrigeration*. 2000. Vol. 23. Iss. 1. P. 43–63. [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(99\)00024-9](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(99)00024-9). EDN: LTDREZ.
20. Ridha M., Shim V.P.W. Microstructure and tensile mechanical properties of anisotropic rigid polyurethane foam // *Experimental Mechanics*. 2008. Vol. 48. Iss. 6. P. 763–776. <https://doi.org/10.1007/s11340-008-9146-0>. EDN: ZMUTPG.

### References

1. Kuznik I.V., Kolubkov A.N., Il'in E.T., Belov V.M., Mikhailov M.A., Plekhov A.G., et al. Methods for improving energy efficiency in district heating. *Santehnika. Otoplenie. Kondicionirovanie*. 2017;10. Available from: <https://www.c-o-k.ru/articles/metody-povysheniya-energoeffektivnosti-v-centralizovannom-teplosnabzhenii> [Accessed 15th February 2025]. (In Russ.).
2. Vankov Y.V., Ziganshin S.G., Gorbunova T.G., Politova T.O., Khabibullin R.M. Analysis of damage to heating systems Kazan and develop recommendations to improve reliability. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2012;7-8:9-18. (In Russ.). EDN: PHGHNB.
3. Ostrogorsky A.G., Glicksman L.R., Reitz D.W. Aging of polyurethane foams. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1986;29(8):1169-1176. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(86\)90148-1](https://doi.org/10.1016/0017-9310(86)90148-1).
4. Tesser R., Di Serio M., Sclafani A., Santacesaria E. Modeling of polyurethane foam formation. *Journal of Applied Polymer Science*. 2004;92(3):1875-1886. <https://doi.org/10.1002/app.20170>.
5. McDonough W., Braungart M., Anastas P.T., Zimmerman J.B. Peer reviewed: applying the principles of green engineering to cradle-to-cradle design. *Environmental Science and Technology*. 2003;37(23):434A-441A. <https://doi.org/10.1021/es0326322>.
6. Eriksson D., Sundén B. Heat and mass transfer in polyurethane insulated district cooling and heating pipes. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*. 1998;22(1):49-71. <https://doi.org/10.1177/109719639802200105>.
7. Vega A., Yarahmadi N., Jakubowicz I. Determination of the long-term performance of district heating pipes through accelerated ageing. *Polymer Degradation and Stability*. 2018;153:15-22. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2018.04.003>.



8. Gaidukovs S., Gaidukova G., Ivdre A., Cabulis U. Viscoelastic and thermal properties of polyurethane foams obtained from renewable and recyclable components. *Journal of Renewable Materials*. 2018;6(7):755-763. <https://doi.org/10.7569/JRM.2018.634112>.
9. Menges G., Knipschild F. Estimation of mechanical properties for rigid polyurethane foams. *Polymer Engineering and Science*. 1975;15(8):623-627. <https://doi.org/10.1002/pen.760150810>.
10. Chen Yichong, Li Dongyang, Zhang Hong, Ling Yijie, Wu Kaiwen, Tao Liu, et al. Antishrinking strategy of microcellular thermoplastic polyurethane by comprehensive modeling analysis. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2021;60(19):7155-7166. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c00895>. EDN: RUIENS.
11. Doyle L., Weidlich I., Ilguth M. Anisotropy in polyurethane pre-insulated pipes. *Polymers*. 2019;11(12):2074. <https://doi.org/10.3390/polym11122074>.
12. Doyle L., Weidlich I. Moisture uptake and effects of hygrothermal exposure on closed-cell semicrystalline polyethylene terephthalate foam. *Polymer Degradation and Stability*. 2022;202:110009. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2022.110009>. EDN: GUGMWJ.
13. Pellizzi E., Lattuati-Derieux A., Lavédrine B., Cheradame H. Degradation of polyurethane ester foam artifacts: chemical properties, mechanical properties and comparison between accelerated and natural degradation. *Polymer Degradation and Stability*. 2014;107:255-261. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2013.12.018>.
14. Cotgreave T., Shortall J.B. Failure mechanisms in fibre reinforced rigid polyurethane foam. *Journal of Cellular Plastics*. 1977;13(4):240-244. <https://doi.org/10.1177/0021955X7701300401>.
15. Doyle L., Weidlich I. Effects of thermal and mechanical cyclic loads on polyurethane pre-insulated pipes. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 2021;44(1):156-168. <https://doi.org/10.1111/ffe.13347>. EDN: SQMJKG.
16. Yarahmadi N., Vega A., Jakubowicz I. Accelerated ageing and degradation characteristics of rigid polyurethane foam. *Polymer Degradation and Stability*. 2017;138:192-200. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2017.03.012>.
17. Kakroodi A.R., Khazabi M., Maynard K., Sain M., Kwon Oh-Sung. Soy-based polyurethane spray foam insulations for light weight wall panels and their performances under monotonic and static cyclic shear forces. *Industrial Crops and Products*. 2015;74:1-8. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.03.092>.
18. Johns A.I., Scott A.C., Watson J.T.R., Ferguson D., Clifford A.A. Measurement of the thermal conductivity of gases by the transient hot-wire method. *Philosophical Transactions of the Royal Society A. Series: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 1988;325(1585):295-356. <https://doi.org/10.1098/rsta.1988.0054>.
19. McLinden M.O., Klein S.A., Perkins R.A. An extended corresponding states model for the thermal conductivity of refrigerants and refrigerant mixtures. *International Journal of Refrigeration*. 2000;23(1):43-63. [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(99\)00024-9](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(99)00024-9). EDN: LTDREZ.
20. Ridha M., Shim V.P.W. Microstructure and tensile mechanical properties of anisotropic rigid polyurethane foam. *Experimental Mechanics*. 2008;48(6):763-776. <https://doi.org/10.1007/s11340-008-9146-0>. EDN: ZMUTPG.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Газизуллин Ильгиз Маратович**,  
аспирант,  
Казанский государственный энергетический  
университет,  
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, Россия  
✉ [ilgizgazizullin@mail.ru](mailto:ilgizgazizullin@mail.ru)

**Дмитриев Андрей Владимирович**,  
д.т.н., профессор,  
заведующий кафедрой автоматизации  
технологических процессов и производств,  
Казанский государственный энергетический  
университет,  
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, Россия  
[ieremiada@gmail.com](mailto:ieremiada@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0001-8979-4457>

**Русаков Григорий Денисович**,  
студент,  
Казанский государственный энергетический  
университет,  
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, Россия  
[grrusacov06@mail.ru](mailto:grrusacov06@mail.ru)

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Il'giz M. Gazizullin**,  
Postgraduate Student,  
Kazan State Power Engineering University,  
51, Krasnoselskaya St., Kazan 420066, Russia  
✉ [ilgizgazizullin@mail.ru](mailto:ilgizgazizullin@mail.ru)

**Andrei V. Dmitriev**,  
Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Head of the Department of Automation  
of Technological Processes and Production,  
Kazan State Power Engineering University,  
51, Krasnoselskaya St., Kazan 420066, Russia  
[ieremiada@gmail.com](mailto:ieremiada@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0001-8979-4457>

**Grigorii D. Rusakov**,  
Student,  
Kazan State Power Engineering University,  
51, Krasnoselskaya St., Kazan 420066, Russia  
[grrusacov06@mail.ru](mailto:grrusacov06@mail.ru)



**Бадретдинова Гузель Рамилевна,**

старший преподаватель кафедры автоматизации технологических процессов и производств, Казанский государственный энергетический университет, 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, Россия  
nice.badretdinova@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-5910-5312>

**Guzel R. Badretdinova,**

Senior Lecturer of the Department of Automation of Technological Processes and Production, Kazan State Power Engineering University, 51, Krasnoselskaya St., Kazan 420066, Russia  
nice.badretdinova@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-5910-5312>

**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 06.06.2025 г.; одобрена после рецензирования 29.07.2025 г.; принята к публикации 09.08.2025 г.

**Information about the article**

The article was submitted 06.06.2025; approved after reviewing 29.07.2025; accepted for publication 09.08.2025.



## Thermal explosion problem with a stochastic boundary: quasi-stationary approximation and direct numerical modelling

Igor G. Donskoy<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup>Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia

**Abstract.** This paper considers a stochastic modification of the Frank–Kamenetskiy problem of exothermic reaction dynamics in a plane-parallel layer with random temperature fluctuations at the outer boundary as a means of modeling the behavior of chemical reactors when operating under uncontrolled environment impacts. Unlike deterministic formulations, such approaches take into account the possibility of a thermal explosion whose probability depends on the noise intensity. Based on random process theory, the conditions for achieving ignition in the quasi-stationary approximation (i.e., when the thermal relaxation rate is much higher than the rate of temperature change) are estimated. The possibility of using such a formulation to obtain an approximate relationship between the parameters of the noise and the dynamic characteristics of ignition (expected thermal explosion time) is demonstrated. The equation of non-stationary heat transfer in the reacting medium is solved numerically for a large number of random temperature trajectories at the boundary of the region of interest using a scheme combining explicit approximation of the nonlinear source with implicit approximation of the temperature field. By comparing the two approaches, the main regularities of non-stationary development of a thermal explosion in a stochastic environment can be approximated with good accuracy. Such a comparison relies on dependencies obtained when solving the quasi-stationary problem, taking into account a small correction for the critical temperature (marking the stability boundary for the stationary problem). Distributions of ignition characteristics (ignition temperature, maximum ambient temperature, and ignition time) and their dependence on input parameters (reactivity and noise intensity) are discussed.

**Keywords:** exothermic reaction, ignition, stochastic differential equations, numerical simulation

**Funding.** The research was carried out under the State Assignment Project (no. FWEU-2021-0005) of the Fundamental Research Program of the Russian Federation for the period of 2021-2030.

**For citation:** Donskoy I.G. Thermal explosion problem with a stochastic boundary: quasi-stationary approximation and direct numerical modelling. *iPolytech Journal*. 2025;29(4):513-526. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-4-513-526>. EDN: MMLYGK.

### ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 536.2:519.63

## Задача теплового взрыва со стохастической границей: квазистационарное приближение и прямое численное моделирование

И.Г. Донской<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup>Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск, Россия

**Резюме.** Цель работы состоит в численном исследовании стохастической модификации задачи Франка-Каменицкого о развитии экзотермической реакции в плоскопараллельном слое со случайными флуктуациями температуры на внешней границе. Изменение температуры задается случайным процессом (броуновским движением). Такая задача может моделировать поведение некоторых типов химических реакторов, например, при их работе в условиях неуправляемых внешних воздействий. Важное отличие рассмотренной постановки от детерминированной заключается в том, что наличие шума допускает достижение критических условий при любых начальных условиях. Методы, используемые в работе, включают математическую теорию случайных процессов, а также численные методы решения стохастических дифференциальных уравнений. С помощью известных результатов теории случайных процессов оценены условия достижения зажигания в квазистационарном приближении (т.е. когда скорость тепловой релаксации намного выше скорости изменения температуры).

Показано, что в такой постановке можно получить приближенную зависимость между параметрами случайного блуждания и динамическими характеристиками зажигания (ожидаемым временем достижения условий теплового взрыва). Кроме этого, уравнение нестационарного теплопереноса в реагирующей среде решается численно для большого количества случайных траекторий температуры на границе области. Для этого используется комбинированная схема с явной аппроксимацией нелинейного источника и неявной аппроксимацией температурного поля. Сравнение двух подходов показало, что основные закономерности нестационарного развития теплового взрыва в стохастической среде могут быть с хорошей точностью приближены зависимостями, которые получаются из решения квазистационарной задачи с учетом небольшой корректировки для критической температуры (отвечающей границе устойчивости для стационарной задачи). Получены распределения характеристик зажигания (температуры зажигания, максимальной температуры окружающей среды, времени зажигания) при разных значениях реакционной способности и интенсивности шума.

**Ключевые слова:** экзотермическая реакция, зажигание, стохастические дифференциальные уравнения, численное моделирование

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (no. FWEU-2021-0005) программы фундаментальных исследований РФ на 2021-2030 гг.

**Для цитирования:** Донской И.Г. Задача теплового взрыва со стохастической границей: квазистационарное приближение и прямое численное моделирование // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 4. С. 513–526. (In Eng.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-4-513-526>. EDN: MMLYGK.

## INTRODUCTION

Chemical reactions often occur under conditions with dynamic variations of temperature, pressure, and concentrations. The average rate of a chemical reaction cannot always be estimated by the average values of the determining parameters. In the simplest cases, variations in conditions can be represented as noise with given spectral characteristics. However, the influence of these characteristics on the reaction rate (in particular) and the stability of the reaction system (in general) is an important task which requires special research for each individual set of chemical reactions and range of conditions.

Fluctuation processes are particularly important in relation to problems related to the thermal stability of exothermic chemical reactors and other heat-generating devices, for example, in the study of emergency modes of electrochemical elements and methods for preventing them [1, 2].

The classic Frank-Kamenetskiy problem involves determining the conditions for thermal explosion (thermal ignition) in a sample with competition between heat release due to a chemical reaction and heat removal due to thermal conductivity. If we neglect reagent conversion, then the problem is reduced to solving the following equation [3]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} + Fk \exp\left(\frac{\theta}{1 + Ar \theta}\right). \quad (1)$$

Here,  $\theta$  is the nondimensional temperature,  $t$  is the time (in Fourier number units),

$\xi$  is the spatial coordinate,  $Ar$  is the Arrhenius number (usually a small parameter), and  $Fk$  is Frank-Kamenetskiy number, which is a critical parameter of the problem. The initial condition is the uniform distribution of the temperature  $\theta(0, \xi) = 0$ . The boundary conditions are as follows:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \xi}(t, 0) = 0; \quad \frac{\partial \theta}{\partial \xi}(t, 1) = Bi[\theta_b - \theta(t, 1)]. \quad (2)$$

If  $\theta_b = 0$ ,  $Ar = 0$  and  $Bi = \infty$ , then the critical value of  $Fk_0$  is about of 0.88. If  $Fk$  is greater than  $Fk_0$ , then the problem (1)–(2) does not have a stationary solution, and the temperature tends to infinity (thermal explosion occurs). Naturally, the unbound increase in the sample temperature is a result of an accepted approximation, namely, conversion neglect: in this case, we study ignition conditions, not the development of a process after ignition.

Often, ignition occurs in environments with stochastic perturbations of external parameters, for example, those associated with natural causes (noise, flow instability). In this regard, it is important to estimate the probability of ignition for a known range of such variations.

The influence of fluctuations on the development of a thermal explosion in adiabatic systems was investigated in [4–6], where the different nature of fluctuation dynamics in sub- and supercritical conditions was established. Simpler models (for complex chemical reactions under isothermal conditions) were considered in [7–9], including stochastic

chain termination reaction [10]. Small reacting systems were investigated in [11–13]. Linear heat losses (Semenov's problem) were studied by the authors of [14, 15]; fluctuations of the mass transfer coefficient for a heterogeneous exothermic reaction – in [16].

As was pointed out in [17], there is mutual influence of a chemical reaction and transport processes at the fluctuation level even despite the different tensor dimensions of the corresponding flows. In [18, 19], the mutual influence of a chemical reaction and transport coefficients was considered; in [20], the fluctuation-dissipation relations for mass transfer and chemical reactions were derived (in the absence of mass transfer, such relations are given in [21, 22]). Markov approximations for linear equations of chemical kinetics were considered in [23, 24], and in [25, 26], numerical algorithms based on the Monte Carlo method were proposed for their implementation (including those based on splitting methods [27]). Bistable potentials for reaction-diffusion equations were used to study thermal stability in [28, 29]. The problem of thermal explosion with temperature fluctuations was considered in [30, 31]; the influence of reaction rate fluctuations on the stability of flat samples was investigated in [32] using the Lyapunov method.

In relation to the topic of the present work, the works of Derevich and coauthors are of interest, in which statistics of the behavior of reacting particles in stochastic media were studied [33, 34], as well as the influence of the stochastic distribution of active centers in porous catalytic granules [35] (a similar formulation was also considered in [36] for simpler symmetry). In [37] a one-dimensional problem of a thermal explosion with temperature fluctuations at the spherical symmetry boundary was considered.

In the present work, a non-stationary one-dimensional problem of heat conduction with a nonlinear source and stochastic fluctuations in the ambient temperature is numerically solved for cylindrical symmetry. The subject of interest is the dependence of the expected ignition characteristics (time, ambient temperature, and heat fluxes on the particle surface) on the intensity of fluctuations, which are represented by white noise. We study the influence of temperature fluctuations on the

thermal ignition conditions of a flat sample (layer). Unlike previous works, this article focuses on the environmental parameters that lead to thermal explosion and the patterns of the simulated ignition dynamics.

## QUASI-STATIONARY THEORY

Quasi-stationary approximation is based on a time-scale splitting: thermal relaxation is considered fast enough to adapt to environmental disturbances. This assumption is not valid for high-amplitude impacts and near-explosion conditions, but it is quite reasonable for subcritical modes with moderate noise intensity. Using the quasi-stationary approximation, we can solve the dynamic problem for boundary temperature only.

Let us consider the Frank-Kamenetskiy problem with temperature fluctuations at the outer boundary (in the environment). We will assume that these fluctuations follow a Wiener process:

$$d\theta_b = \sigma \delta W. \quad (3)$$

Then, we can write the diffusion equation (Fokker-Planck equation) for the probability density function of the environmental temperature:

$$\frac{\partial P_\theta}{\partial t} = \frac{\sigma^2}{2} \frac{\partial^2 P_\theta}{\partial \theta_b^2}. \quad (4)$$

We assume that the conditions in the sample are such that the Frank-Kamenetskiy number is below its critical value ( $Fk_0 = 0.88$ ). From dimensional analysis, it follows that the critical boundary temperature for the quasi-stationary problem can be found by the following formula:

$$\frac{Fk_0}{Fk} = \frac{1}{(1 + Ar\theta_b^*)^2} \exp\left(\frac{\theta_b^*}{1 + Ar\theta_b^*}\right) \approx \exp(\theta_b^*). \quad (5)$$

From here, we obtain:

$$\theta_b^* \approx \ln\left(\frac{Fk_0}{Fk}\right). \quad (6)$$

If at the initial moment, the temperature at the boundary is zero, then the solu-



tion to the diffusion equation (4) is the fundamental solution to the heat equation as long as the distribution is concentrated near zero (which results in  $\text{Var}[\theta_b(t)] = \sigma^2 t$ ). At later times, it is necessary to consider that specific random trajectories do not have physical meaning after ignition conditions are reached. Therefore, let us change the boundary conditions and consider the diffusion equation with an absorbing boundary:

$$P(t, -\infty) = 0; P(t, \theta_b^*) = 0. \quad (7)$$

It can be shown that for the integral of  $P(t, \theta)$  to be finite over the entire state space, it is also necessary that:

$$\frac{\partial P}{\partial \theta_b}(t, -\infty) = 0. \quad (8)$$

We integrate equation (4) over the state space (possible boundary temperature values):

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\theta_b^*} \frac{\partial P(t, y)}{\partial t} dy &= \frac{\sigma^2}{2} \int_{-\infty}^{\theta_b^*} \frac{\partial^2 P(t, y)}{\partial y^2} dy = \\ &= \frac{\sigma^2}{2} \frac{\partial P}{\partial \theta_b}(t, \theta_b^*). \end{aligned} \quad (9)$$

The resulting equation shows that the number of realizations corresponding to different random trajectories decreases in time due to absorption at the right boundary (i.e., systems that have reached a critical temperature do not evolve further). At low critical temperatures, we can present the equation for the distribution function in difference form (we assume that most of the distribution is close to zero):

$$\frac{d\Phi}{dt} \approx \frac{\sigma^2}{2} \frac{\Phi}{(\theta_b^*)^2}. \quad (10)$$

Here  $\Phi(t) = \int_{-\infty}^{\theta_b^*} P(t, y) dy$  is the survival probability, i.e., the probability that the system has not reached critical conditions for thermal ignition (has not drifted beyond the right boundary). Then we can introduce a

characteristic non-dimensional diffusion parameter:

$$\frac{\sigma^2 \tau}{2(\theta_b^*)^2} = O(1). \quad (11)$$

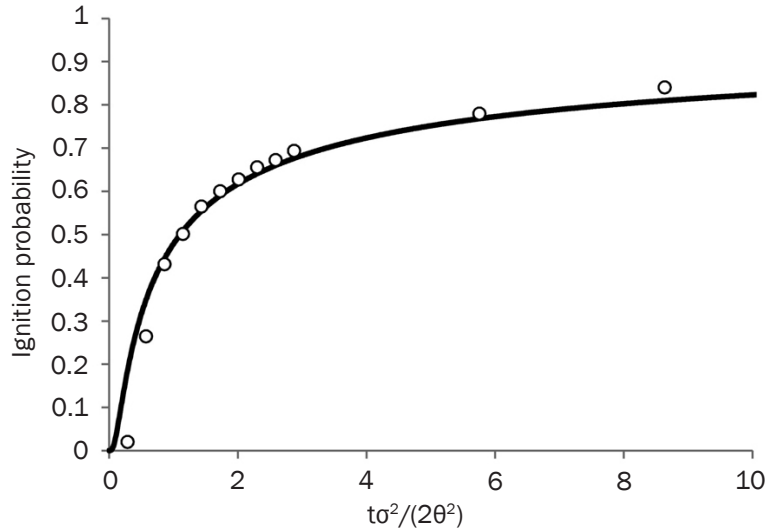
This gives us an estimate of the half-life:

$$\tau = O\left[\frac{2(\theta_b^*)^2}{\sigma^2}\right]. \quad (12)$$

According to this equation, as the critical temperature increases, the expected ignition time also increases (in this case, the dependence  $t \sim \theta^2$ , which is expected for diffusion processes, is observed). With increasing noise intensity, the expected ignition time decreases [32], a similar dependence is found.

Fig. 1 presents the result of the numerical solution of the diffusion equation in a semi-infinite region with an absorbing boundary, namely, the dependence of the ignition probability on time. There is an exponential decrease in the survival probability  $\Phi_{\text{surv}}$  (correspondingly, an increase in the ignition probability  $\Phi_{\text{ign}} = 1 - \Phi_{\text{surv}}$ ); soon after this, the curve tends to zero (or, correspondingly, one) as  $t^{-1/2}$  (such a slowdown is associated with trajectories that move towards low temperatures and rarely return). The half-life appears to be quite close to the above estimate. The plotted markers are discussed below.

Upon closer examination, it turns out that the boundary condition in the form of an absorbing boundary is a fairly rough approximation. It is necessary to solve the heat transfer equation for a stochastic reacting medium in a nonstationary form. The stochastic equation for environmental temperature is complemented by the thermal conductivity equation in the medium. Then, the ignition conditions are determined not only by the possibility of achieving a critical environmental temperature but also by the propagation of thermal disturbances in the medium. As direct numerical modelling shows below, situations are possible when exceeding the critical temperature at the sample boundary does not lead to the development of a thermal explosion in a stochastic environment. The stochastic dynamics of the environmental temperature lead, to the residence time



**Fig. 1.** Solution of the diffusion equation with an absorbing boundary (the markers are the results of calculations using the Monte Carlo method with correction)

**Рис. 1.** Решение уравнения диффузии с поглощающей границей (маркеры – результаты расчетов с использованием метода Монте-Карло с поправкой)

in the supercritical region possibly being too short for temperature disturbances to develop. Thus, the only way to study the stochastic problem of thermal explosion is direct numerical simulation.

#### DIRECT NUMERICAL SIMULATION

For calculations, we use the following semi-implicit difference scheme:

$$\frac{\theta_i - \theta_i^0}{\Delta t} = \frac{\theta_{i-1} - 2\theta_i + \theta_{i+1}}{h^2} + Fk \exp\left(\frac{\theta_i^0}{1 + Ar \theta_i^0}\right). \quad (13)$$

The boundary conditions for this system of difference equations are written as follows:

$$\theta_1 - \theta_2 = 0; \theta_N - \theta_{N-1} = h Bi (\theta_b - \theta_N). \quad (14)$$

We use the following parameter values for calculations: spatial grid step  $2 \times 10^{-3}$ ; time grid step  $1 \times 10^{-3}$  (adaptation of the grid step is needed, as a rule, only near the explosion time; in this work, a time grid step is constant, so the ignition time is determined up to its value). Using explicit approximation for the heat source in (13), we obtain a system of linear equations that is solved by the tridiagonal matrix algorithm (the numerical solution is described in more detail in [36, 38]). The

stochastic equation for the boundary temperature has the following difference approximation (Euler-Maruyama method [39]):

$$\theta_b = \theta_b^0 + \varepsilon \sigma \sqrt{\Delta t}. \quad (15)$$

Here,  $\varepsilon$  is a normally distributed random number with unit variance.

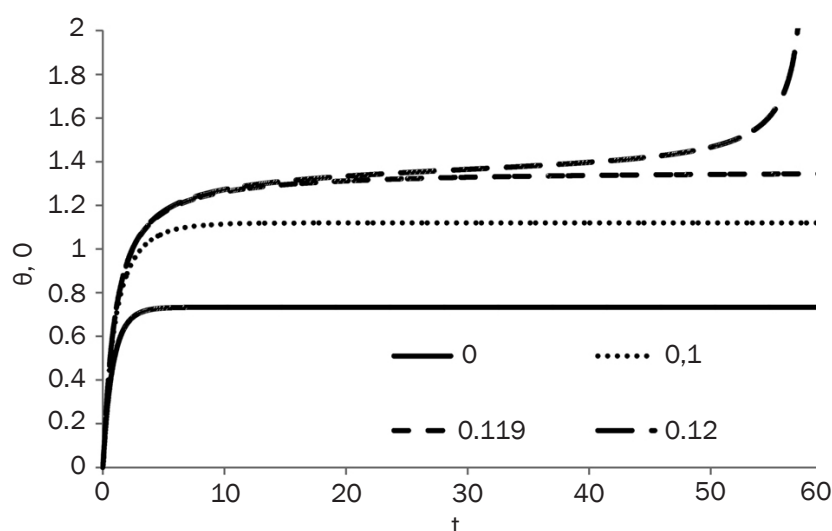
Let us consider ignition under conditions where the initial state and parameters of the problem at  $\sigma = 0$  correspond to subcritical conditions. As mentioned above, the critical number  $Fk_0$  is 0.88 for  $Bi = \infty$  and  $Ar = 0$ . Under  $Bi = 1000$  and  $Ar = 0.02$ , the critical number  $Fk_0$  slightly increases to approximately 0.897 (a time period of approximately 80 Fourier numbers is considered). The value  $Fk = 0.8$  was chosen as the deliberately subcritical mode. Numerical calculations show that at this  $Fk$ , a stationary solution is established with a maximum temperature of approximately 0.73. According to several papers [32, 33], the onset of a thermal explosion in a stochastic system is inevitable, although the expected ignition time increases sharply with distance from the stability limit [3]. For  $Fk = 0.8$ , the critical ignition temperature is 0.118; the numerical calculation is shown in Fig. 2, confirming the validity of formula (6). The ignition criterion in the calculations is the achievement of a high temperature in the centre of the sample ( $\theta(\tau_{ign}, 0) > 10$ ).

Note that even at a value of  $Fk$  above the critical value, there are random trajectories leading to the region of low temperatures, so the onset of a thermal explosion, in the general case, is not guaranteed even for samples with high reactivity (this effect can be seen even for the quasi-stationary approximation in (Fig. 1). Calculations show that for  $Fk = 1$ , the probability of ignition after 40 temporal units is 0.87 (for  $Fk = 2$ , it is already 0.98 but still less than 1).

The overall calculation time for all the cases is 40 temporal units (in this case, the time unit corresponds to the Fourier number). The ignition time, as mentioned above, increases sharply when approaching the critical value  $Fk$ , so calculating the exact limit is practically impossible. The graph in Fig. 3 shows that the ignition probability expectedly increases with the time span. The behaviours of the curves in

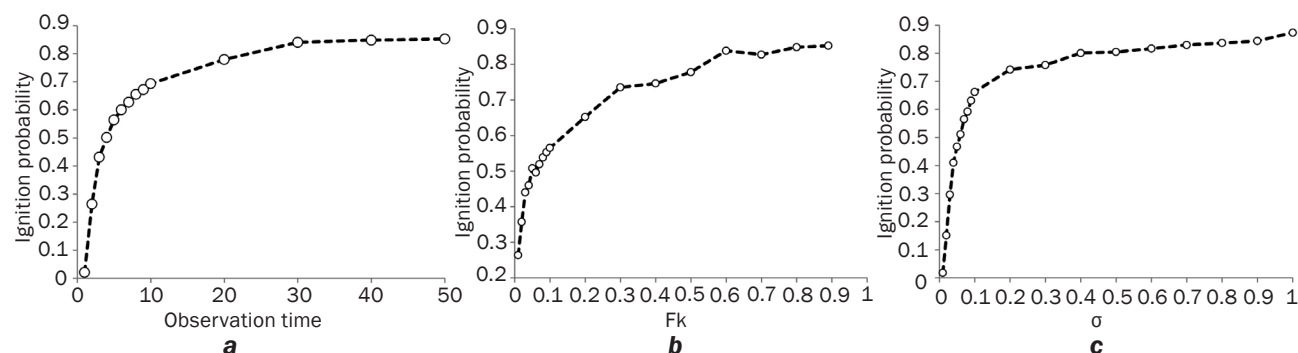
Fig. 1 and 3a qualitatively coincide (up to the time scale).

We solve a system of equations with the initial condition  $\theta(0, \xi) = 0$  for different random trajectories  $\theta_b(t)$  (a total of 1000 trajectories for each value of  $\sigma$ ) and study the distribution of the resulting solutions. Note that the histograms presented below contain only solutions with successful ignition. The probability of ignition  $\Phi_{ign}$ , calculated as the ratio of the number of calculations with successful ignition to the total number of calculations, is shown in Fig. 3: this value does not exceed 0.87 for all considered parameter values. In this case, however, only the ignition probability in a given time interval is considered: as the previous analysis shows, the ignition probability increases slowly over large periods of time. The equipment of multi-access center "High-temperature circuit" was used for computations.



**Fig. 2.** Temperature dynamics in the centre of the sample for a deterministic problem for  $Fk = 0.8$  and different values of the environment temperature

**Рис. 2.** Динамика температуры в центре образца для детерминированной задачи при  $Fk = 0,8$  и при различных значениях температуры окружающей среды



**Fig. 3.** Ignition probability vs calculation time,  $Fk$  number and noise intensity  $\sigma$

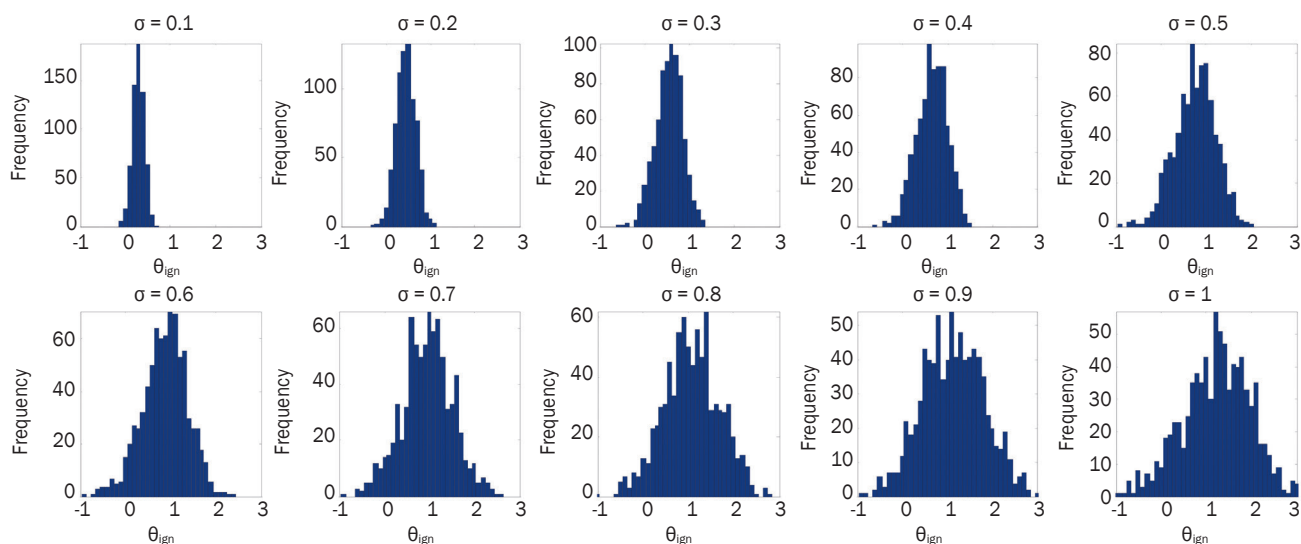
**Рис. 3.** Зависимость вероятности воспламенения от времени расчета, числа  $Fk$  и шага случайного блуждания  $\sigma$

## CALCULATION RESULTS AND DISCUSSION

The results are presented in two types of figures: histograms showing the distributions from computational experiments (probability is interpreted as relative frequency, Figs. 4–9); and moments of these distributions (mean and variance, Figs. 10 and 11).

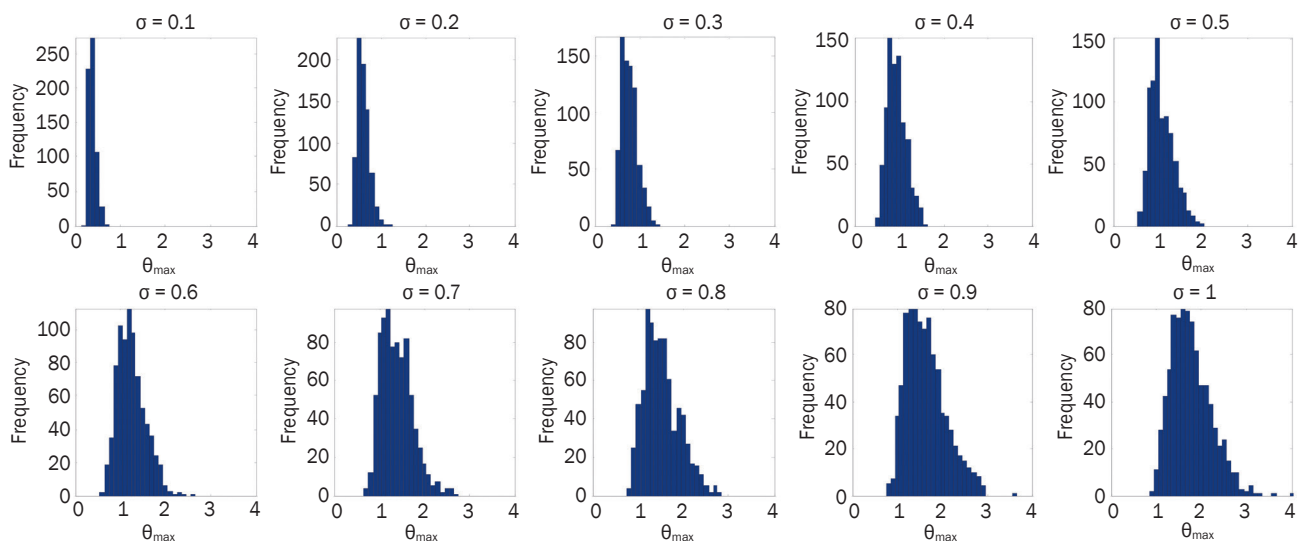
As the step of the noise intensity  $\sigma$  increases, the variance of the temperature at which ignition occurs also increases (Fig. 4). The maximum of the distributions in all the cases is shifted toward positive values of the dimensionless temperature. At  $\sigma = 0.1$ , the distribution is concentrated near  $\theta_{ign} = 0$ , while at  $\sigma > 0.7$ , the maximum of the distribution is at  $\theta_{ign} > 1$ . Since the critical

temperature in this case is low, ignition requires that the environment temperature remained in the region  $\theta_b > \theta_b^*$  long enough for the thermal disturbance to propagate throughout the sample. With a small  $\sigma$ , the  $\theta_b$  values stay longer within the ignition range after entering it, while with larger variances, the temperature will change more significantly. With increasing  $\sigma$ , the fraction of solutions with successful ignition increases when the environmental temperature is lower than the critical value. That is, if “no return” conditions are achieved (i.e., thermal disturbances developed enough), then the environmental temperature decrease caused by the noise cannot prevent ignition. Fig. 5 shows the values of the



**Fig. 4.** Distribution of the environment temperature at the ignition moment for  $Fk = 0.8$  and different  $\sigma$  values

**Рис. 4.** Распределение температуры окружающей среды в момент воспламенения при  $Fk = 0,8$  и различных значениях  $\sigma$



**Fig. 5.** Distribution of the maximum environment temperature achieved during random walks for  $Fk = 0.8$  and different  $\sigma$  values

**Рис. 5.** Распределение максимальной температуры окружающей среды, достигнутой при случайных блужданиях при  $Fk = 0,8$  и различных значениях  $\sigma$



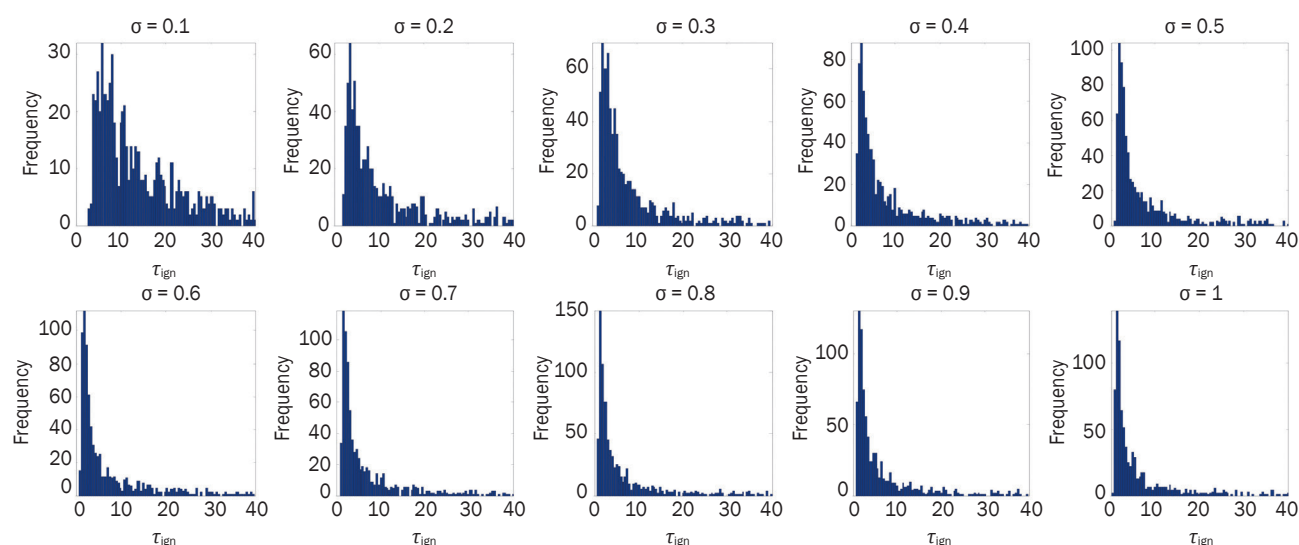
highest achieved environment temperature (for successful ignition solutions). The higher the average environmental temperature, the lower the ignition time, as shown in Fig. 6. The fraction of solutions with early ignition increases with noise intensity.

Further, calculations were carried out for a constant  $\sigma$  with varying  $Fk$ . The ignition characteristics were the same: the environmental temperature at which ignition occurred, the highest environment temperature reached before ignition, and the ignition time delay. In contrast to varying the noise intensity, varying the value of  $Fk$  has little effect on the shape of the ignition temperature distribution. As shown in Fig. 7, an increase in reactivity leads to a shift

in the distribution toward lower temperatures (following eq. (6)). That is, after reaching the ignition limits, the environment temperature changes similarly for all values of  $Fk$ , which results from the randomness of the walk.

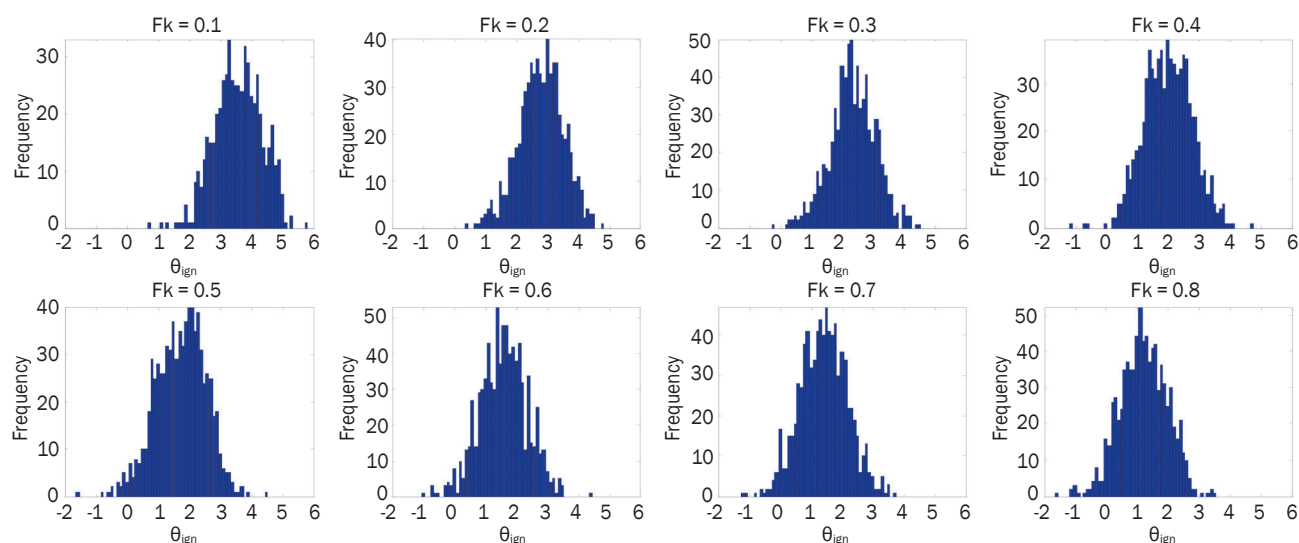
Fig. 8 shows similar shifts in the distribution for the maximum temperature. The left shoulder of the distribution decays more sharply (since ignition is less likely at low temperatures). The right shoulder of the distribution follows the same pattern as in the previous figure.

The higher the  $Fk$  value, the lower the ignition temperature and, therefore, the less the average time needed to reach a critical temperature. The distribution of ignition times is then concentrated in the region of small values.



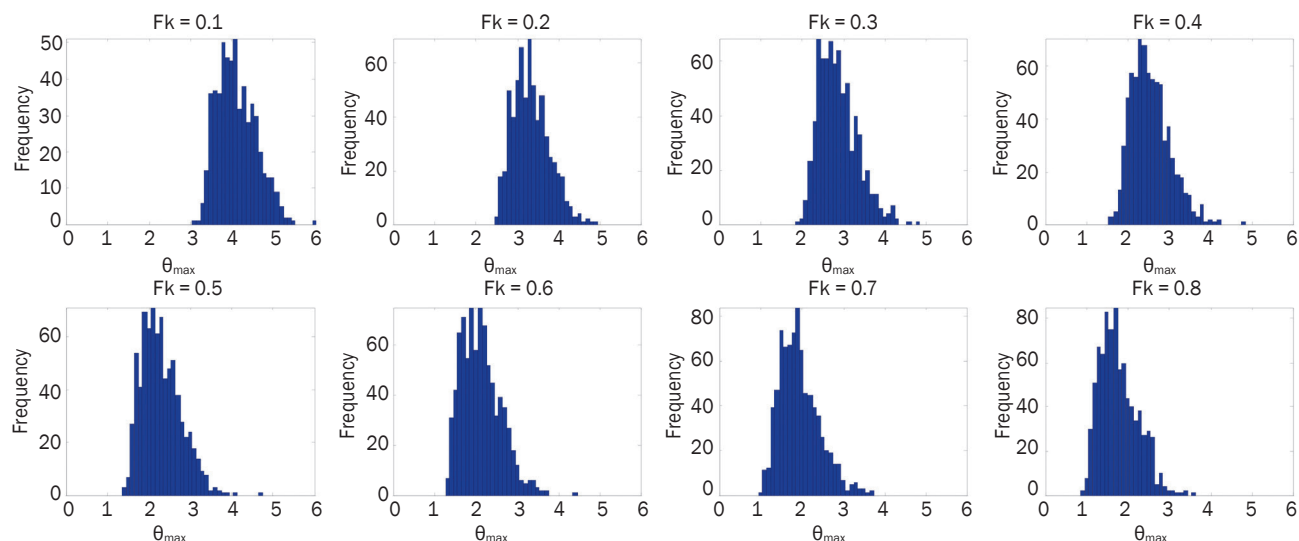
**Fig. 6.** Distribution of ignition time for  $Fk = 0.8$  and different  $\sigma$  values

**Рис. 6.** Распределение времени зажигания для  $Fk = 0.8$  и различных значений  $\sigma$

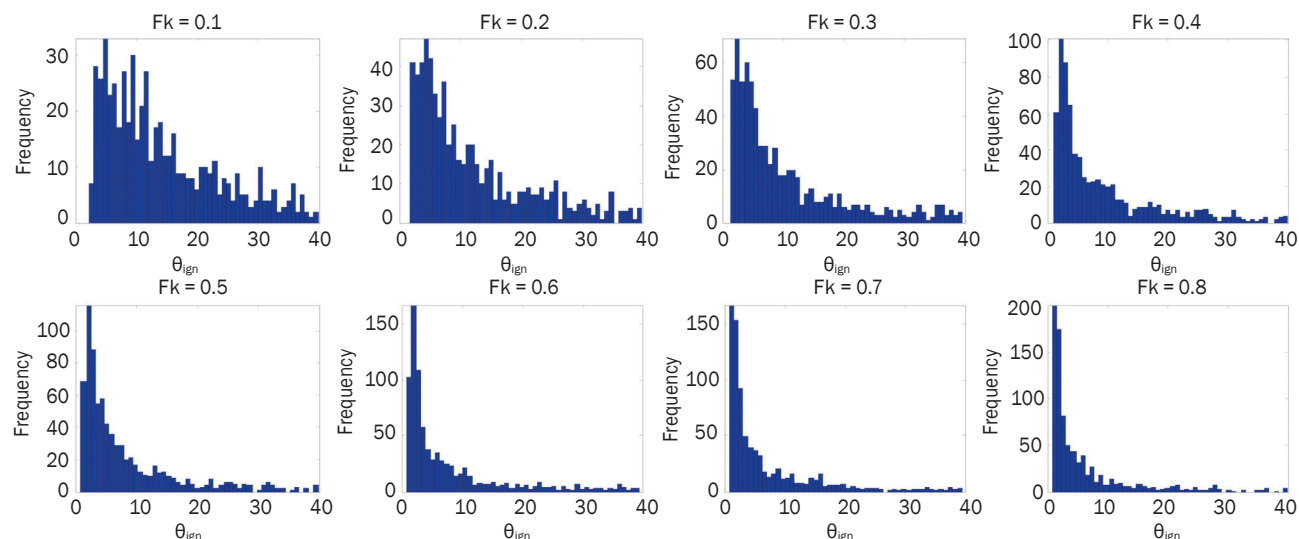


**Fig. 7.** Distribution at the environment temperature at the ignition moment for  $\sigma = 1$  and different  $Fk$  values

**Рис. 7.** Распределение температуры окружающей среды в момент воспламенения при  $\sigma = 1$  и различных значениях  $Fk$



**Fig. 8.** Distribution of the maximum environment temperature achieved during random walks for  $\sigma = 1$  and different  $Fk$  values  
**Рис. 8.** Распределение максимальной температуры окружающей среды, достигнутой при случайных блужданиях, для  $\sigma = 1$  и для различных значений  $Fk$

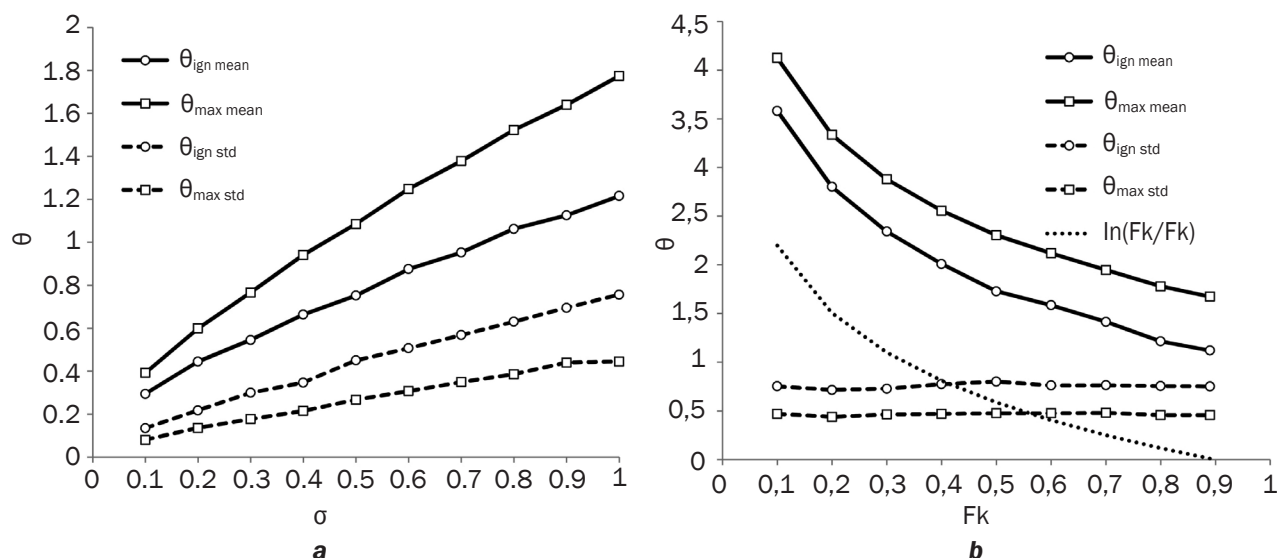


**Fig. 9.** Distribution of ignition times for  $\sigma = 1$  and different  $Fk$  values  
**Рис. 9.** Распределение времени зажигания для  $\sigma = 1$  и для различных значений  $Fk$

Figs. 10 and 11 show the changes in moments. As indicated earlier, with increasing noise intensity, the variance of the characteristic temperature increases, and this growth is approximately linear. With a constant noise intensity, the distribution temperature width changes slightly, while the dependences of critical temperatures on variance follow qualitatively eq. (6) but with a shift relative to the y-axis (1–2 temperature units). The variance of the ignition temperature distribution for all the cases is greater than the variance of the maximum temperature distribution. This difference may be explained by the difference in the time scales of heating and ignition. The

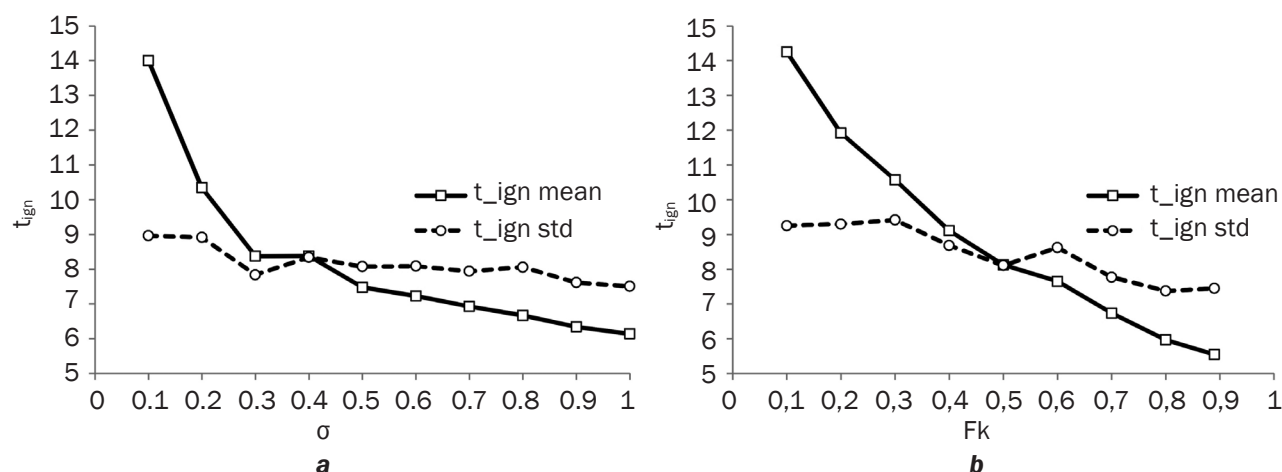
reaction rate is approximately constant along the curves in the graphs; therefore, for ignition to occur before the environmental temperature drops and the sample cools, a higher temperature is needed. The average reaction rate increases by 5–10 times compared to the reaction rate for quasi-stationary conditions, which ensures that the sample ignites within the thermal relaxation time.

Average ignition time decreases almost monotonically with an increase of reactivity and noise intensity (Fig. 11). Its variance does not significantly change. It should be noted that the values were calculated based on successful ignition cases only.



**Fig. 10.** Average values and variances of ignition temperature from the maximum temperature

**Рис. 10.** Средние значения и отклонения температуры воспламенения от максимальной температуры



**Fig. 11.** Average values and variances of ignition time values when changing parameters  $\sigma$  and  $F_k$

**Рис. 11.** Средние значения и отклонения значений времени зажигания при изменении параметров  $\sigma$  и  $F_k$

Thus, the influence of non-stationarity can be reduced, with some degree of approximation, to a change in the critical temperature. Indeed, the curve in Fig. 3 a, reduced to the critical temperature from eq. (6) with a constant additive term of 1.2 temperature units (the average difference for Fig. 10 b), agrees quite well with the results of the quasi-stationary analysis (4)–(8): this comparison is presented in Fig. 1 with circles.

The main result is the dependence of expected ignition time on reaction conditions: this dependence can be used for the control of reactive systems in stochastic environments (for example, to detect runaway or to select a method of extinguishing). This kind of problem

is of interest in energy storage systems design, taking into account fire safety issues. Other problems are also to be studied, including optimal control, collective effects in connected heat networks, the “inverse” problem of ensuring stable combustion, etc.

## CONCLUSION

The paper shows that the development of a thermal explosion in a stochastic environment differs significantly from the predictions of classical theory. A thermal explosion can occur for arbitrarily low levels of reactivity because there is a nonzero probability of reaching an arbitrarily high ambient temperature; on the other hand, even if a reactivity is higher than

the critical value, the onset of a thermal explosion is not guaranteed since there is a symmetric probability of achieving an arbitrarily low temperature.

Calculations carried out using the Monte Carlo method make it possible to estimate the ignition probability depending on the parameters of the problem (reactivity, noise intensity, observation time). As the noise intensity increases, the width of the characteristic temperature distribution increases; with increas-

ing reactivity, the variance in the characteristic temperatures practically does not change, while the average values change qualitatively in a way expected from quasi-stationary theory. The average ignition time decreases with increasing noise intensity and reactivity; the variance in the ignition time distribution is slightly reduced.

The results obtained can be applied to the analysis of critical phenomena in stochastic media.

### References

1. Mallick S., Gayen D. Thermal behaviour and thermal runaway propagation in lithium-ion battery systems – a critical review. *Journal of Energy Storage*. 2023;62:106894. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106894>. EDN: VDIKWS.
2. Fu Hui, Wang Junling, Li Lun, Gong Junhui, Wang Xuan. Numerical study of mini-channel liquid cooling for suppressing thermal runaway propagation in a lithium-ion battery pack. *Applied Thermal Engineering*. 2023;234:121349. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121349>. EDN: OAMIOZ.
3. Frank-Kamenetsky D.A. *Fundamentals of macrokinetics. Diffusion and heat transfer in chemical kinetics*. Moscow: Nauka; 2008, 407 p. (In Russ.). EDN: QKBWWN.
4. Baras F., Nicolis G., Mansour M.M., Turner J.W. Stochastic theory of adiabatic explosion. *Journal of Statistical Physics*. 1983;32:1-23. <https://doi.org/10.1007/BF01009416>.
5. De Pasquale F., Mecozzi A. Theory of chemical fluctuations in thermal explosions. *Physical Review A*. 1985;31:2454. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.31.2454>.
6. Fernandez A. Theory of scaling for fluctuations in thermal explosion conditions. *Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie*. 1987;91(2):159-163. <https://doi.org/10.1002/bbpc.19870910216>.
7. Frankowicz M., Nicolis G. Transient evolution towards a unique stable state: stochastic analysis of explosive behavior in a chemical system. *Journal of Statistical Physics*. 1983;33:595-609. <https://doi.org/10.1007/BF01018836>.
8. Frankowicz M., Mansour M.M., Nicolis G. Stochastic analysis of explosive behaviour: a qualitative approach. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 1984;125(1):237-246. [https://doi.org/10.1016/0378-4371\(84\)90011-6](https://doi.org/10.1016/0378-4371(84)90011-6).
9. Van Kampen N.G. Intrinsic fluctuations in explosive reactions. *Journal of Statistical Physics*. 1987;46(5):933-948. <https://doi.org/10.1007/BF01011150>. EDN: ECFYKX.
10. Vlad M.O., Ross J. A stochastic approach to nonequilibrium chain reactions in disordered systems: breakdown of eikonal approximation. *International Journal of Thermophysics*. 1997;18:957-975. <https://doi.org/10.1007/BF02575241>.
11. Gorecki J., Popielawski J. On the stochastic theory of adiabatic thermal explosion in small systems – numerical results. *Journal of Statistical Physics*. 1986;44:941-954. <https://doi.org/10.1007/BF01011916>.
12. Zheng Qiang, Ross J. Comparison of deterministic and stochastic kinetics for nonlinear systems. *Journal of Chemical Physics*. 1991;94(5):3644-3648. <https://doi.org/10.1063/1.459735>.
13. Chou Dong-Pao, Lackner T., Yip Sidney. Fluctuation effects in models of adiabatic explosion. *Journal of Statistical Physics*. 1992;69:193-215. <https://doi.org/10.1007/BF01053790>.
14. Nowakowski B., Lemarchand A. Thermal explosion near bifurcation: stochastic features of ignition. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2002;311(1-2):80-96. [https://doi.org/10.1016/S0378-4371\(02\)00824-5](https://doi.org/10.1016/S0378-4371(02)00824-5). EDN: AYCRJ.
15. Lemarchand A., Nowakowski B. Fluctuation-induced and nonequilibrium-induced bifurcations in a thermochemical system. *Molecular Simulation*. 2004;30(11-12):773-780. <http://dx.doi.org/10.1080/0892702042000270151>.
16. Buyevich Yu.A., Fedotov S.P. Formation of heterogeneous reaction modes under the influence of multiplicative noise. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 1987;53(5):802-807. (In Russ.).
17. Wei James. Irreversible thermodynamics in engineering. *Industrial and Engineering Chemistry*. 1966;50(10):55-60. <https://doi.org/10.1021/ie50682a010>.
18. Van der Broeck C., Parrondo J.M.R., Toral R., Kawai R. Nonequilibrium phase transitions induced by multiplicative noise. *Physical Review E*. 1997;55:4084. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.55.4084>.
19. Bedeaux D., Pagonabarraga I., De Zarate J.M.O., Sengers J.V., Kjelstrup S. Mesoscopic non-equilibrium thermodynamics of non-isothermal reaction-diffusion. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2010;12(39):12780-12793. <https://doi.org/10.1039/C0CP00289E>. EDN: OBNEQV.
20. Bochkov G.N., Orlov A.L., Kolpashchikov V.L. Fluctuation-dissipation models of mass transfer in systems with chemical reactions. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 1985;12(1):33-43. [https://doi.org/10.1016/0735-1933\(85\)90005-3](https://doi.org/10.1016/0735-1933(85)90005-3).



21. Schmiedl T., Seifert U. Stochastic thermodynamics of chemical reaction networks. *Journal of Chemical Physics*. 2007;126(4):044101. <https://doi.org/10.1063/1.2428297>.
22. Ge Hao, Qian Hong. Mathematical formalism of nonequilibrium thermodynamics for nonlinear chemical reaction systems with general rate law. *Journal of Statistical Physics*. 2017;166(1):190-209. <https://doi.org/10.1007/s10955-016-1678-6>. EDN: YAXFNJ.
23. Darvey I.G., Staff P.J. Stochastic approach to first-order chemical reaction kinetics. *Journal of Chemical Physics*. 1966;44(3):990-997. <https://doi.org/10.1063/1.1726855>.
24. Van Kampen N.G. The equilibrium distribution of a chemical mixture. *Physics Letters A*. 1976;59(5):333-334. [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(76\)90398-4](https://doi.org/10.1016/0375-9601(76)90398-4).
25. Gillespie D.T. Stochastic simulation of chemical kinetics. *Annual Reviews of Physical Chemistry*. 2007;58:35-55. <https://doi.org/10.1146/annurev.physchem.58.032806.104637>.
26. Higham D.J. Modeling and simulating chemical reactions. *SIAM review*. 2008;50(2):347-368. <https://doi.org/10.1137/060666457>.
27. Sandu A. A new look at the chemical master equation. *Numerical Algorithms*. 2014;65:485-498. <https://doi.org/10.1007/s11075-013-9758-z>.
28. Schlögl F. Stochastic measures in nonequilibrium thermodynamics. *Physics Reports*. 1980;62(4):267-380. [https://doi.org/10.1016/0370-1573\(80\)90019-8](https://doi.org/10.1016/0370-1573(80)90019-8). EDN: XSQZOA.
29. Öttinger H.C., Peletier M.A., Montefusco A. A framework of nonequilibrium statistical mechanics. I. Role and types of fluctuations. *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics*. 2020;46(10):1-13. <https://doi.org/10.1515/jnet-2020-0068>. EDN: UJNFDB.
30. Fernandez A., Rabitz H. The scaling of nonequilibrium fluctuations in gaseous thermal explosions. *Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie*. 1988;92(6):754-760. <https://doi.org/10.1002/bbpc.198800184>.
31. Baer M.R., Gartling D.K., Desjardin P.E. Probabilistic models for reactive behaviour in heterogeneous condensed phase media. *Combustion Theory and Modelling*. 2012;16(1):75-106. <https://doi.org/10.1080/13647830.2011.606916>.
32. Fedotov S.P. Stochastic analysis of the thermal ignition of a distributed explosive system. *Physics Letters A*. 1993;176(3-4):220-224. [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(93\)91038-7](https://doi.org/10.1016/0375-9601(93)91038-7). EDN: ZYVJQJ.
33. Derevich I.V. Effect of temperature fluctuations of fluid on thermal stability of particles with exothermic chemical reaction. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2010;53(25-26):5920-5932. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.07.031>. EDN: MXGOGN.
34. Derevich I., Galdina D. Simulation of thermal explosion of catalytic granule in fluctuating temperature field. *Journal of Applied Mathematics and Physics*. 2013;1(5):1-7. <http://doi.org/10.4236/jamp.2013.15001>.
35. Derevich I.V., Fokina A.Y., Ermolaev V.S., Mordkovich V.Z., Solomonik I.G. Heat and mass transfer in Fischer-Tropsch catalytic granule with localized cobalt microparticles. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018;121:1335-1349. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.01.077>. EDN: XXMULJ.
36. Donskoy I.G., Gross E.I. Numerical analysis of thermal ignition statistics in a stochastic reacting medium. *Information and mathematical technologies in science and management*. 2024;1:66-77. (In Russ.). <https://doi.org/10.25729/ESI.2024.33.1.006>. EDN: BWDPTW.
37. Derevich I.V., Klochkov A.K. Thermal explosion of single particles in a random temperature field of the medium. *High temperature*. 2023;61(1):108-117. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0040364423010039>. EDN: PYOCSJ.
38. Donskoy I.G. Steady-state equation of thermal explosion in a distributed activation energy medium: numerical solution and approximations. *iPolytech Journal*. 2022;26(4):626-639. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-626-639>. EDN: BNSPEZ.
39. Kloeden P.E., Platen E. *Numerical solution of stochastic differential equations*. Berlin: Springer; 1991, vol. 19, Iss. 11, 636 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-12616-5>.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Mallick S., Gayen D. Thermal behaviour and thermal runaway propagation in lithium-ion battery systems – a critical review // *Journal of Energy Storage*. 2023. Vol. 62. P. 106894. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106894>. EDN: VDIKWS.
2. Fu Hui, Wang Junling, Li Lun, Gong Junhui, Wang Xuan. Numerical study of mini-channel liquid cooling for suppressing thermal runaway propagation in a lithium-ion battery pack // *Applied Thermal Engineering*. 2023. Vol. 234. P. 121349. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121349>. EDN: OAMIOZ.
3. Франк-Каменецкий Д.А. Основы макрокинетики. Диффузия и теплопередача в химической кинетике: монография. 4-е изд. М.: Наука, 2008. 407 с. EDN: QKBWWN.
4. Baras F., Nicolis G., Mansour M.M., Turner J.W. Stochastic theory of adiabatic explosion // *Journal of Statistical Physics*. 1983. Vol. 32. P. 1–23. <https://doi.org/10.1007/BF01009416>.
5. De Pasquale F., Mecozzi A. Theory of chemical fluctuations in thermal explosions // *Physical Review A*. 1985. Vol. 31. P. 2454. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.31.2454>.
6. Fernandez A. Theory of scaling for fluctuations in thermal explosion conditions // *Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie*. 1987. Vol. 91. Iss. 2. P. 159–163. <https://doi.org/10.1002/bbpc.19870910216>.

7. Frankowicz M., Nicolis G. Transient evolution towards a unique stable state: stochastic analysis of explosive behavior in a chemical system // *Journal of Statistical Physics*. 1983. Vol. 33. P. 595–609. <https://doi.org/10.1007/BF01018836>.
8. Frankowicz M., Mansour M.M., Nicolis G. Stochastic analysis of explosive behaviour: a qualitative approach // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 1984. Vol. 125. Iss. 1. P. 237–246. [https://doi.org/10.1016/0378-4371\(84\)90011-6](https://doi.org/10.1016/0378-4371(84)90011-6).
9. Van Kampen N.G. Intrinsic fluctuations in explosive reactions // *Journal of Statistical Physics*. 1987. Vol. 46. No. 5. P. 933–948. <https://doi.org/10.1007/BF01011150>. EDN: ECFYKX.
10. Vlad M.O., Ross J. A stochastic approach to nonequilibrium chain reactions in disordered systems: breakdown of eikonal approximation // *International Journal of Thermophysics*. 1997. Vol. 18. P. 957–975. <https://doi.org/10.1007/BF02575241>.
11. Gorecki J., Popielawski J. On the stochastic theory of adiabatic thermal explosion in small systems — Numerical results // *Journal of Statistical Physics*. 1986. Vol. 44. P. 941–954. <https://doi.org/10.1007/BF01011916>.
12. Zheng Qiang, Ross J. Comparison of deterministic and stochastic kinetics for nonlinear systems // *Journal of Chemical Physics*. 1991. Vol. 94. Iss. 5. P. 3644–3648. <https://doi.org/10.1063/1.459735>.
13. Chou Dong-Pao, Lackner T., Yip Sidney. Fluctuation effects in models of adiabatic explosion // *Journal of Statistical Physics*. 1992. Vol. 69. P. 193–215. <https://doi.org/10.1007/BF01053790>.
14. Nowakowski B., Lemarchand A. Thermal explosion near bifurcation: stochastic features of ignition // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2002. Vol. 311. Iss. 1-2. P. 80–96. [https://doi.org/10.1016/S0378-4371\(02\)00824-5](https://doi.org/10.1016/S0378-4371(02)00824-5). EDN: AYCRRJ.
15. Lemarchand A., Nowakowski B. Fluctuation-induced and nonequilibrium-induced bifurcations in a thermochemical system // *Molecular Simulation*. 2004. Vol. 30. Iss. 11-12. P. 773–780. <http://dx.doi.org/10.1080/0892702042000270151>.
16. Буевич Ю.А., Федотов С.П. Формирование режимов гетерогенной реакции под воздействием мультипликативного шума // *Инженерно-физический журнал*. 1987. Т. 53. № 5. С. 802–807.
17. Wei James. Irreversible thermodynamics in engineering // *Industrial and Engineering Chemistry*. 1966. Vol. 50. Iss. 10. P. 55–60. <https://doi.org/10.1021/ie50682a010>.
18. Van der Broeck C., Parrondo J.M.R., Toral R., Kawai R. Nonequilibrium phase transitions induced by multiplicative noise // *Physical Review E*. 1997. Vol. 55. P. 4084. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.55.4084>.
19. Bedeaux D., Pagonabarraga I., De Zarate J.M.O., Sengers J.V., Kjelstrup S. Mesoscopic non-equilibrium thermodynamics of non-isothermal reaction-diffusion // *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2010. Vol. 12. Iss. 39. P. 12780–12793. <https://doi.org/10.1039/C0CP00289E>. EDN: OBNEQV.
20. Bochkov G.N., Orlov A.L., Kolpashchikov V.L. Fluctuation-dissipation models of mass transfer in systems with chemical reactions // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 1985. Vol. 12. Iss. 1. P. 33–43. [https://doi.org/10.1016/0735-1933\(85\)90005-3](https://doi.org/10.1016/0735-1933(85)90005-3).
21. Schmiedl T., Seifert U. Stochastic thermodynamics of chemical reaction networks // *Journal of Chemical Physics*. 2007. Vol. 126. Iss. 4. P. 044101. <https://doi.org/10.1063/1.2428297>.
22. Ge Hao, Qian Hong. Mathematical formalism of nonequilibrium thermodynamics for nonlinear chemical reaction systems with general rate law // *Journal of Statistical Physics*. 2017. Vol. 166. Iss. 1. P. 190–209. <https://doi.org/10.1007/s10955-016-1678-6>. EDN: YAXFNJ.
23. Darvey I.G., Staff P.J. Stochastic approach to first-order chemical reaction kinetics // *Journal of Chemical Physics*. 1966. Vol. 44. Iss. 3. P. 990–997. <https://doi.org/10.1063/1.1726855>.
24. Van Kampen N.G. The equilibrium distribution of a chemical mixture // *Physics Letters A*. 1976. Vol. 59. Iss. 5. P. 333–334. [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(76\)90398-4](https://doi.org/10.1016/0375-9601(76)90398-4).
25. Gillespie D.T. Stochastic simulation of chemical kinetics // *Annual Reviews of Physical Chemistry*. 2007. Vol. 58. P. 35–55. <https://doi.org/10.1146/annurev.physchem.58.032806.104637>.
26. Higham D.J. Modeling and simulating chemical reactions // *SIAM review*. 2008. Vol. 50. Iss. 2. P. 347–368. <https://doi.org/10.1137/060666457>.
27. Sandu A. A new look at the chemical master equation // *Numerical Algorithms*. 2014. Vol. 65. P. 485–498. <https://doi.org/10.1007/s11075-013-9758-z>.
28. Schlögl F. Stochastic measures in nonequilibrium thermodynamics // *Physics Reports*. 1980. Vol. 62. Iss. 4. P. 267–380. [https://doi.org/10.1016/0370-1573\(80\)90019-8](https://doi.org/10.1016/0370-1573(80)90019-8). EDN: XSQZOA.
29. Öttinger H.C., Peletier M.A., Montefusco A. A framework of nonequilibrium statistical mechanics. I. Role and types of fluctuations // *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics*. 2020. Vol. 46. Iss. 1. P. 1–13. <https://doi.org/10.1515/jnet-2020-0068>. EDN: UJNFDB.
30. Fernandez A., Rabitz H. The scaling of nonequilibrium fluctuations in gaseous thermal explosions // *Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie*. 1988. Vol. 92. Iss. 6. P. 754–760. <https://doi.org/10.1002/bbpc.198800184>.
31. Baer M.R., Gartling D.K., Desjardin P.E. Probabilistic models for reactive behaviour in heterogeneous condensed phase media // *Combustion Theory and Modelling*. 2012. Vol. 16. Iss. 1. P. 75–106. <https://doi.org/10.1080/13647830.2011.606916>.
32. Fedotov S.P. Stochastic analysis of the thermal ignition of a distributed explosive system // *Physics Letters A*. 1993. Vol. 176. Iss. 3-4. P. 220–224. [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(93\)91038-7](https://doi.org/10.1016/0375-9601(93)91038-7). EDN: ZYVJQJ.

33. Derevich I.V. Effect of temperature fluctuations of fluid on thermal stability of particles with exothermic chemical reaction // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2010. Vol. 53. Iss. 25-26. P. 5920–5932. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.07.031>. EDN: MXGOGN.
34. Derevich I., Galdina D. Simulation of thermal explosion of catalytic granule in fluctuating temperature field // Journal of Applied Mathematics and Physics. 2013. Vol. 1. No. 5. P. 1–7. <http://doi.org/10.4236/jamp.2013.15001>.
35. Derevich I.V., Fokina A.Y., Ermolaev V.S., Mordkovich V.Z., Solomonik I.G. Heat and mass transfer in Fischer–Tropsch catalytic granule with localized cobalt microparticles // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018. Vol. 121. P. 1335–1349. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.01.077>. EDN: XXMULJ.
36. Донской И.Г., Гросс Е.И. Численный анализ стохастических закономерностей теплового зажигания в стохастической среде // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2024. № 1. С. 66–77. <https://doi.org/10.25729/ESI.2024.33.1.006>. EDN: BWDPTW.
37. Деревич И.В., Клочков А.К. Тепловой взрыв одиночных частиц в случайном поле температуры среды // Теплофизика высоких температур. 2023. Т. 61. № 1. С. 108–117. <https://doi.org/10.31857/S0040364423010039>. EDN: PYOCSJ.
38. Донской И.Г. Стационарное уравнение теплового взрыва в среде с распределенной энергией активации: численное решение и приближения // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 4. С. 626–639. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-626-639>. EDN: BNSPEZ.
39. Kloeden P.E., Platen E. Numerical solution of stochastic differential equations. Berlin: Springer, 1991. Vol. 19. Iss. 11. 636 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-12616-5>.

**INFORMATION ABOUT THE AUTHOR****Igor G. Donskoy,**

Dr. Sci. (Eng.),

Leading Researcher of the

Thermodynamics Laboratory,

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,

130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia

✉ [donskoy.chem@mail.ru](mailto:donskoy.chem@mail.ru)<https://orcid.org/0000-0003-2309-8461>**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ****Донской Игорь Геннадьевич,**

д.т.н.,

ведущий научный сотрудник

лаборатории термодинамики,

Институт систем энергетики

им. Л.А. Мелентьева СО РАН,

664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия

✉ [donskoy.chem@mail.ru](mailto:donskoy.chem@mail.ru)<https://orcid.org/0000-0003-2309-8461>**Заявленный вклад автора**

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

**Author contribution**

The author performed a comprehensive analysis, made a generalization on the basis of the results obtained and prepared the manuscript 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 14.07.2025 г.; одобрена после рецензирования 02.09.2025 г.; принята к публикации 10.09.2025 г.

**Information about the article**

The article was submitted 14.07.2025; approved after reviewing 02.09.2025; accepted for publication 10.09.2025.

## ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 621.317.353

EDN: FXXGAU

DOI: 10.21285/1814-3520-2025-4-527-537



## Анализ высших гармоник напряжения на ранней стадии развития однофазных замыканий на землю в распределительных электрических сетях

И.Е. Кажекин<sup>1</sup>, Е.С. Старостин<sup>2</sup>✉<sup>1,2</sup>Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

**Резюме.** Цель – оценка возможности использования высших гармоник фазных напряжений в качестве средства для выявления однофазных замыканий на ранних стадиях их развития. В работе проведено исследование осциллограмм аварийных событий в распределительных сетях среднего напряжения Калининградской области. Осциллограммы получены с помощью автоматических пунктов секционирования воздушных линий (реклоузеров) за период с 2018 по 2023 г. Более чем из 2000 записанных осциллограмм были отобраны осциллограммы фазных напряжений, соответствующие постепенному развитию однофазного замыкания на землю. Данные осциллограммы были подвергнуты гармоническому анализу по алгоритму быстрого преобразования Фурье. На основе результатов анализа впервые показано, что устойчивый рост коэффициента третьей гармоники напряжения начинается за несколько периодов промышленной частоты до возникновения однофазного замыкания на землю. В ходе исследований выявлено, что уже за 200 мс до момента возникновения повреждения более чем в половине случаев происходит превышение коэффициентом третьей гармоники фазного напряжения значения, допустимого по стандарту качества электроэнергии. Начиная с 110 мс количество таких превышений достигает 75%. Выявленная закономерность может быть использована при совершенствовании защит от однофазных замыканий на землю и систем автоматического восстановления сети. Повышение третьей гармоники фазного напряжения может служить одним из ранних признаков формирования однофазного повреждения изоляции электросетевого оборудования и использоваться для превентивного запуска алгоритмов расчета локализации поврежденных участков сети в рамках построения адаптивных защит от однофазных замыканий на землю.

**Ключевые слова:** однофазные замыкания на землю, электрические сети, высшие гармоники, воздушные линии, среднее напряжение, осциллограммы, быстрое преобразование Фурье

**Для цитирования:** Кажекин И.Е., Старостин Е.С. Анализ высших гармоник напряжения на ранней стадии развития однофазных замыканий на землю в распределительных электрических сетях // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 4. С. 527–537. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-4-527-537>. EDN: FXXGAU.

## POWER ENGINEERING

## Original article

## Analysis of higher voltage harmonics at an early stages of single line-to-ground faults in electrical distribution grids

Ilya E. Kazhekin<sup>1</sup>, Egor S. Starostin<sup>2</sup>✉<sup>1,2</sup>Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

**Abstract.** The study aimed to assess the feasibility of using higher phase voltage harmonics as a means of detecting single-phase faults at an early stage of their development. An analysis of oscillograms obtained during emergency events was carried out for the medium-voltage distribution grids of Kaliningrad Oblast. The oscillograms were obtained using reclosers for the period from 2018 to 2023. Out of over 2,000 recorded oscillograms, the phase voltage oscillograms corresponding to the gradual development of a single line-to-ground fault were selected. These oscillograms were harmonically analyzed using the fast Fourier transform algorithm. The results of this analysis showed that the third voltage harmonic distortion begins to increase steadily several industrial frequency cycles before the occurrence of a single line-to-ground fault. The study revealed that in over half of the cases, the third phase voltage harmonic distortion exceeds the value permitted by the power quality standard as early as 200 ms before the fault occurs. Starting from 110 ms, the number of such exceedances reaches 75%. The identified regularity can be used to improve automatic grid restoration



systems and protection against single line-to-ground faults. An increase in the third phase voltage harmonic can serve as one of the early signs of a single-phase insulation fault in power grid equipment and can be used to preventively run algorithms for localizing faulty grid sections as part of developing adaptive protection against single line-to-ground faults.

**Keywords:** single-phase ground faults, power grids, higher harmonics, overhead lines, medium voltage, waveforms, fast Fourier transform

**For citation:** Kazhekin I.E., Starostin E.S. Analysis of higher voltage harmonics at an early stages of single line-to-ground faults in electrical distribution grids. *iPolytech Journal*. 2025;29(4):527-537. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-4-527-537>. EDN: FXXGAU.

## ВВЕДЕНИЕ

Распределительные сети среднего напряжения характеризуются большой протяженностью линий электропередачи и высокой степенью их повреждаемости [1, 2]. Происходящие в них аварии являются причиной 70% всех нарушений электроснабжения потребителей [3]. Статистические данные показывают, что значительную долю (70–80%) от общего числа повреждений в электрических сетях составляют однофазные замыкания на землю (ОЗЗ).

Опасность ОЗЗ заключается в их потенциальном развитии в двух- и трехфазные короткие замыкания (КЗ). По результатам длительного наблюдения за распределительными сетями среднего напряжения было установлено, что до 20% ОЗЗ в воздушных линиях среднего напряжения могут перейти в двухфазные КЗ, а примерно 8% – в трехфазные [4]. Этому способствует то, что в большинстве случаев ОЗЗ не отключаются защитой и могут существовать достаточно длительное время. Все это время через место повреждения протекает ток замыкания, а при неустойчивом характере замыкания на изоляцию неповрежденных фаз действуют перенапряжения. В ряде работ отмечается повышение уровня высших гармоник (ВГ) при однофазном повреждении изоляции [5–12]. Однако при этом рассматриваются процессы лишь после значительного ухудшения состояния изоляции, констатируя, что ВГ способствуют дальнейшему развитию ОЗЗ в более опасные повреждения. Появление ВГ на ранних стадиях формирования замыкания, как правило, во внимание не принимается.

Между тем возникновение ВГ в электрической сети может быть рассмотрено как один из признаков развивающегося однофазного повреждения изоляции. Известные на сегодняшний момент методы, использу-

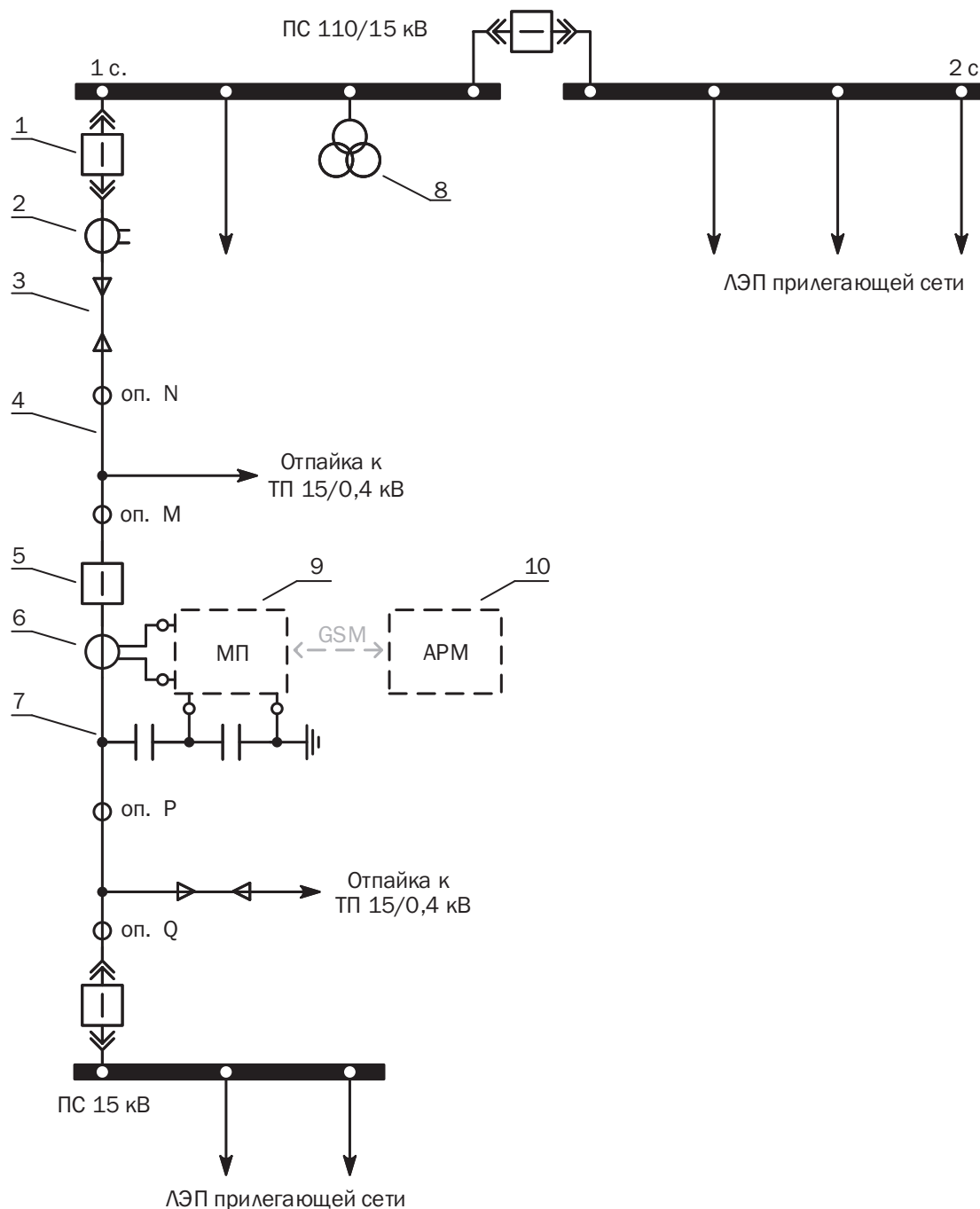
ющие ВГ в качестве диагностического признака ОЗЗ [13–17], способны решать лишь две задачи: оценку общего состояния изоляции электрической сети и поиск ее поврежденного участка. Развитие этих методов происходит по пути совершенствования как программно-аппаратных комплексов [17–21] для регистрации и анализа сигналов, так и самих методов обработки сигналов [22–26]. При этом практически не уделяется внимание процессам на ранней стадии развития повреждений, предшествующих ОЗЗ, во время которых также возможно возникновение ВГ.

Целью проведенной работы является оценка возможности использования ВГ как средства для выявления однофазных замыканий на ранних стадиях развития и прогнозирования состояния фазной изоляции электрической сети на основе данных, полученных в действующих электрических сетях.

## МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Для анализа динамики развития ВГ в режиме, предшествующем ОЗЗ, была использована база осциллограмм аварийных событий в распределительных сетях 15 кВ Калининградской области, работающих преимущественно в режиме резонансно-заземленной нейтрали с 2018 по 2023 г. [4]. Осциллограммы были получены с помощью автоматических пунктов секционирования воздушных линий (реклоузеров), установленных в распределительной сети среднего напряжения. На рис. 1 представлена обобщенная схема участка сети с установленным реклоузером.

На рис. 1 представлены следующие обозначения: 1 – линейный выключатель линии электропередачи (ЛЭП); 2 – трансформатор тока линейного выключателя, передающий данные в терминал релейной защиты и автоматики (РЗА) этого выключателя; 3 – кабельный участок ЛЭП; 4 – воздушный участок



**Рис. 1.** Обобщенная схема участка распределительной сети  
**Fig. 1.** Generalized diagram of the distribution network section

ЛЭП с отпайкой к потребительской трансформаторной подстанции (ТП); 5 – дистанционный выключатель; 6 – катушка Роговского; 7 – емкостной делитель напряжения; 8 – трансформатор напряжения; 9 – микропроцессорный терминал (МП); 10 – автоматизированное рабочее место (АРМ) работника электросетевой организации.

Алгоритмы терминала реклоузера позволяют при определенных возмущениях

в первичной цепи запускать процесс записи осциллограммы во внутреннюю память устройства. Длительность сохраняемых осциллограмм ограничена 1000 мс, а их количество – внутренней памятью устройства, при заполнении которой новые регистрации записываются вместо старых. В рассматриваемой электрической сети на 2018 г. было установлено 246 реклоузеров, к каждому из которых в ходе подготовки к

исследованию было осуществлено дистанционное подключение и проанализированы записанные на нем осциллограммы. В результате первичного анализа более чем из 2000 записанных осциллограмм была отобрана часть тех, на которых отображался процесс постепенного развития ОЗЗ. Общее описание исследуемых осциллограмм представлено в таблице.

Из таблицы видно, что не во всех случаях заметны значительные изменения среднеквадратичных значений фазных токов ЛЭП после возникновения ОЗЗ. Такая особенность связана с тем, что осциллограммы фазных токов в случае ОЗЗ между линейным выключателем ЛЭП и реклоузером (см. рис. 1) изменяются относительно нормального режима только на величину собственного емкостного тока ЛЭП, протекающего в сторону точки замыкания. Поэтому в анализе электрических параметров режима сети перед ОЗЗ в целях выявления признаков формирования таких повреждений на ранних стадиях были выбраны фазные напряжения как более надежный признак.

Длительность осциллограмм до момента ОЗЗ составляет от 6 до 40 периодов. Анализ производился путем выделения ВГ напряжения поврежденной фазы с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) [27].

Для применения БПФ осциллограммы были разбиты по периодам, каждый из которых соответствует 32 точкам. В таком случае результатом БПФ становятся значения

первых 15-ти гармоник. Каждый период от начала осциллограммы до момента ОЗЗ был разложен на гармоники с помощью БПФ. Тем самым обеспечена возможность анализа динамики изменения высших гармоник напряжений поврежденных фаз (до 15-й) во времени при приближении к моменту ОЗЗ.

С целью нормирования исследуемых гармоник их величины оценивались по коэффициенту гармонических составляющих:

$$K_{u(n)} = \frac{U_{(n)}}{U_{(1)}} 100,$$

где  $U_{(n)}$  – амплитуда  $n$ -й гармоники напряжения, В;  $U_{(1)}$  – амплитуда первой гармоники напряжения, В.

Для оценки значимости искажений полученные значения коэффициентов гармонических составляющих сопоставлены с требованиями ГОСТ 32144-2013<sup>3</sup>. Стоит отметить, что требования стандарта направлены на оценку качества электроэнергии и должны сопоставляться со значениями коэффициентов гармонических составляющих напряжения, вычисленных как усредненное значение в интервале времени 10 мин. В проводимом исследовании осуществлялся анализ осциллограмм длительностью до 1000 мс, что не позволяет расценивать превышение указанных в стандарте значений как определение ненадлежащего качества электроэнергии.

Описание исследуемых осциллограмм  
Description of the studied waveforms

№	Длительность осциллограммы, мс	Среднеквадратичное значение фазного тока по фазам, А						Среднеквадратичное значение фазного напряжения по фазам, кВ					
		до ОЗЗ			во время ОЗЗ			до ОЗЗ			во время ОЗЗ		
		А	В	С	А	В	С	А	В	С	А	В	С
1	555	31	20	23	175	12	23	13,8	4,7	3,3	1,1	10,7	13,2
2	600	4	4	4	8	4	7	12,2	6,5	6,7	15,6	0,3	15,7
3	1000	32	23	23	28	196	27	13,8	4,7	3,2	13,8	6,0	7,3
4	520	5	5	5	5	4	6	7,4	14,3	5,5	16,2	14,5	3,3
5	885	5	4	4	7	5	5	4,6	4,4	9,0	0,7	10,5	15,8
6	1000	35	33	66	51	48	67	4,4	3,8	8,0	5,1	1,1	10,8
7	1000	33	28	58	61	60	60	4,5	4,0	8,3	9,2	0,8	12,1
8	700	5	3	7	6	5	8	14,7	1,6	4,3	15,8	15,8	0,5
9	1000	15	7	11	9	6	7	9,4	4,7	6,3	11,2	1,7	8,8
10	1000	2	2	5	2	2	5	6,6	10,8	8,5	13,6	15,7	1,8
11	1000	13	8	19	13	10	18	5,1	4,2	9,2	13,0	11,4	2,7
12	1000	2	2	3	2	1,3	414	8,6	14,1	6,8	13,7	16,2	1,4

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 2–5 представлены результаты анализа изменения высших гармоник фазного напряжения поврежденных фаз до момента ОЗЗ. Момент времени равный 0 с соответствует периоду осциллограммы, в котором произошло ОЗЗ. Коэффициенты гармонических составляющих на каждом промежутке времени определены как среднее значение соответствующих коэффициентов всех исследуемых осциллограмм. Красным цветом и маркерами выделены участки превышения коэффициентов над нормальными значениями в соответствии с ГОСТ<sup>3</sup>.

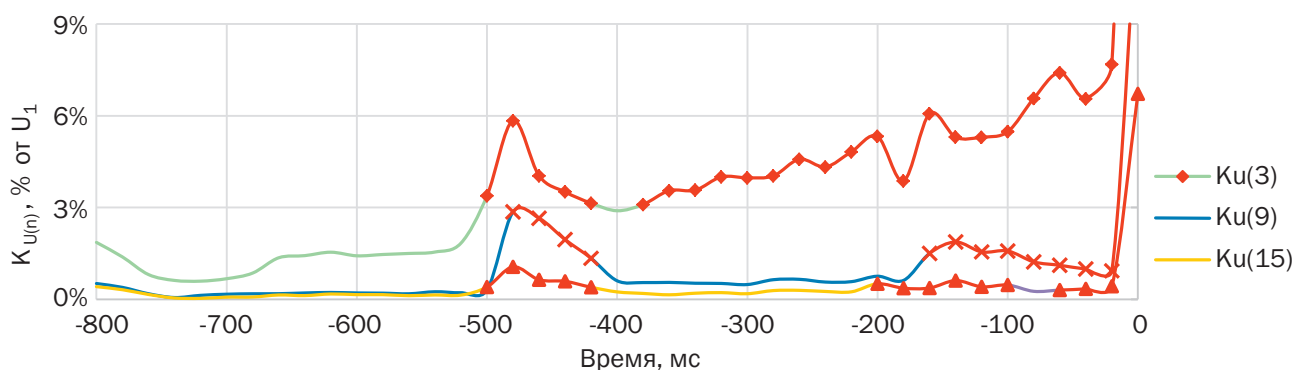
Как видно из рис. 2, наиболее информативным оказался коэффициент третьей гармоники. Его среднестатистическое значение превысило нормальное значение за 25 периодов до наступления момента ОЗЗ,

и вплоть до замыкания третья гармоника имела ярко выраженную тенденцию увеличения.

Из рис. 3 видно, что четные, кратные 3-м, гармоники не имели ярко выраженных трендов при приближении к моменту ОЗЗ. Однако для этих гармоник также характерно превышение уровней, допускаемых ГОСТ<sup>3</sup>.

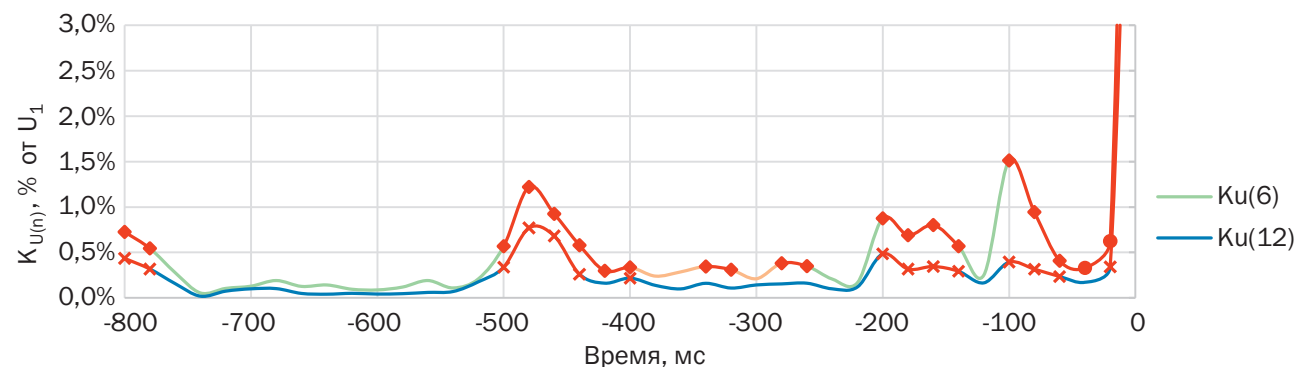
На рис. 4 продемонстрировано, что коэффициенты гармонических составляющих фазного напряжения нечетных, некратных 3-м, гармоник превысили нормальные значения только в момент непосредственно ОЗЗ.

Зависимости, приведенные на рис. 5, показывают, что изменения четных гармоник, некратных 3-м, не сопровождаются стабильным превышением уровней, установленных ГОСТ<sup>3</sup>. Однако заметные возмущения коэффициентов этих гармоник возникли за 25 пе-



**Рис. 2.** График изменения коэффициентов гармонических составляющих фазного напряжения до момента возникновения однофазных замыканий на землю для нечетных гармоник, кратных 3-м

**Fig. 2.** Graph of changes in harmonic component coefficients of line-to-ground voltage before the occurrence of single-phase ground faults for odd harmonics, multiples of 3

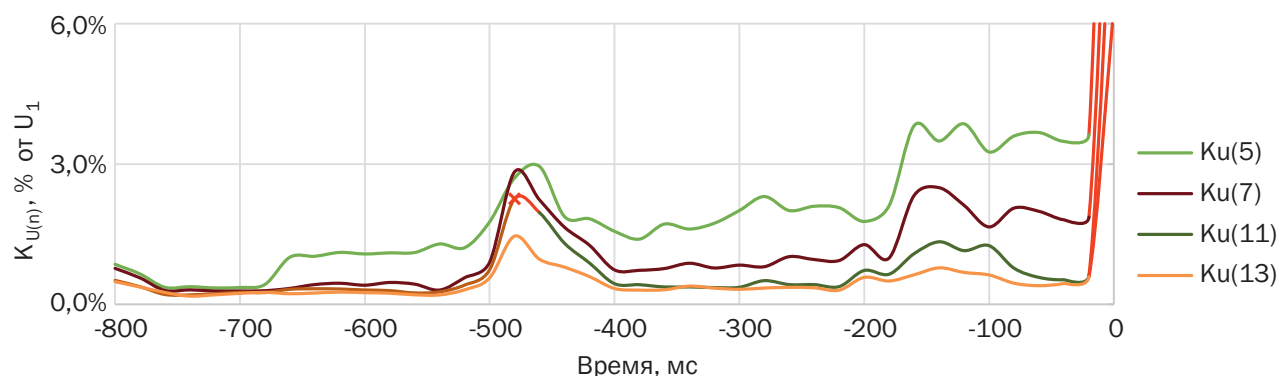


**Рис. 3.** График изменения коэффициентов гармонических составляющих фазного напряжения до момента возникновения однофазных замыканий на землю для четных гармоник, кратных 3-м

**Fig. 3.** Graph of changes in harmonic component coefficients of line-to-ground voltage before the occurrence of single-phase ground faults for even harmonics, multiples of 3

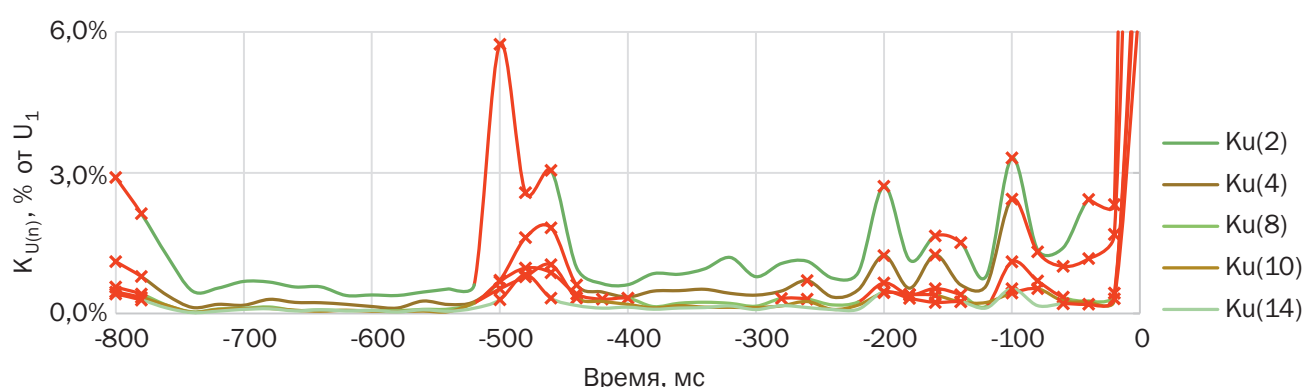
<sup>3</sup>ГОСТ 32144-2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 01.07.2014. М.: Стандартинформ, 2014.





**Рис. 4.** График изменения коэффициентов гармонических составляющих фазного напряжения до момента возникновения однофазных замыканий на землю для нечетных гармоник, некратных 3-м

**Fig. 4.** Graph of changes in harmonic component coefficients of line-to-ground voltage before the occurrence of single-phase ground faults for odd harmonics, not multiples of 3



**Рис. 5.** График изменения коэффициентов гармонических составляющих фазного напряжения до момента возникновения однофазных замыканий на землю для четных гармоник, некратных 3-м

**Fig. 5.** Graph of changes in harmonic component coefficients of line-to-ground voltage before the occurrence of single-phase ground faults for even harmonics, not multiples of 3

риодов до замыкания и участвовали к моменту его возникновения.

Наиболее информативным признаком наступающего пробоя изоляции является повышенный уровень третьей гармоники напряжения поврежденной фазы. В связи с этим важно оценить стабильность такого диагностического признака. На рис. 6 представлено сравнение графиков изменения третьей гармонической составляющей и нормы, определенной ГОСТ<sup>3</sup>, для каждой рассмотренной осциллограммы.

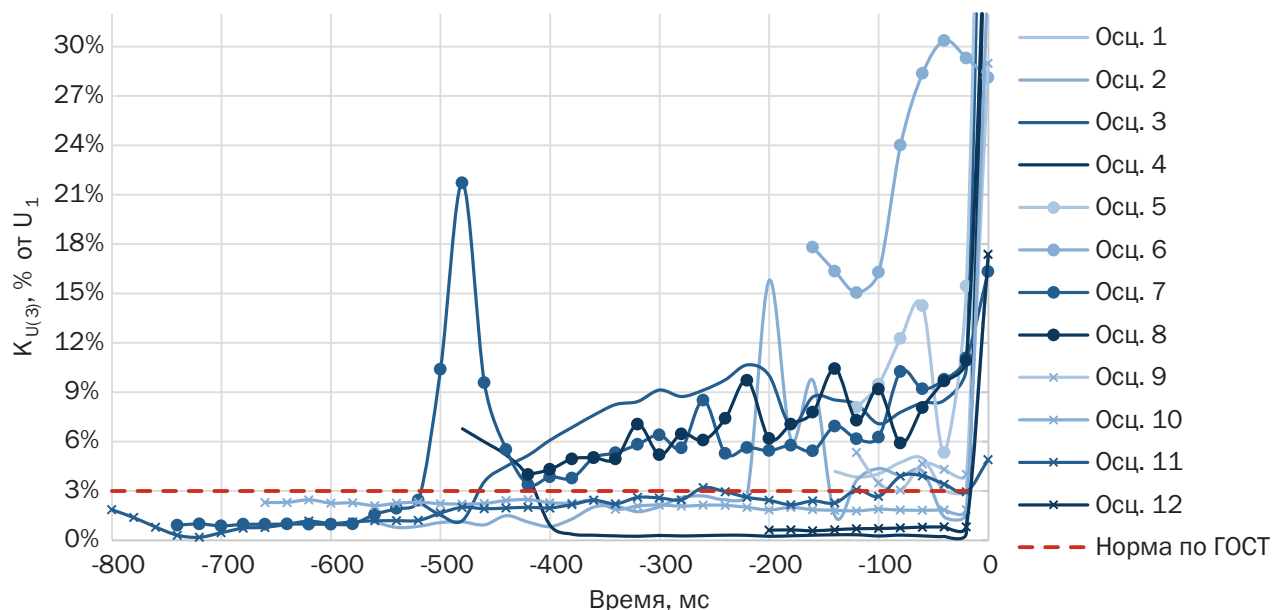
Из рис. 6 видно, что до момента наступления ОЗЗ в большинстве осциллограмм наблюдался стабильный рост коэффициента третьей гармонической составляющей фазного напряжения поврежденной фазы.

Начиная с 200 мс до момента возникновения замыкания, превышение 3-й гармоникой нормального значения происходит более чем в половине случаев, а со 110 мс количество превышений достигает 75%.

## ОБСУЖДЕНИЕ

В исследовании было проанализировано изменение ВГ напряжений поврежденных фаз в предшествующий ОЗЗ момент в достаточно ограниченном промежутке времени, что обусловлено техническими возможностями средств регистрации. В этом диапазоне времени отмечен постепенный рост 3-й гармоники напряжения поврежденной фазы. Среди возможных причин такой закономерности видится формирование контура нулевой последовательности и насыщение нелинейных элементов электрической сети при постепенном развитии дефекта. Следует отметить, что для описанной обработки не использовались осциллограммы с ОЗЗ, вызванные внезапными внешними повреждениями.

Помимо описанных возможных причин повышения несинусоидальности фазных напряжений в диапазон времени, предшествующий ОЗЗ, источником ВГ может являться



**Рис. 6.** Графики изменения коэффициента третьей гармонической составляющей фазных напряжений каждой осциллограммы до момента возникновения однофазных замыканий на землю

**Fig. 6.** Graphs of changes in the coefficient of the third harmonic component of line-to-ground voltages of each waveform before the occurrence of single-phase ground faults

также и нагрузка с преобладанием нелинейных элементов. В исследуемых электрических сетях достаточно высокие показатели качества электроэнергии, соответственно, фоновый уровень ВГ оказался низким и не повлиял на результаты исследования. Поэтому пороговые значения коэффициентов гармонических составляющих были выбраны с учетом ГОСТ<sup>3</sup>. В то же время известно, что в распределительных сетях промышленно развитых субъектов России суммарный коэффициент гармонических составляющих, связанных с током нагрузки, может достигать 20–30%.

Можно предположить, что на фоне имеющегося высокого уровня ВГ при постепенном развитии ОЗЗ в таких сетях будет наблюдаться еще большее искажение синусоидальности. Это следует учитывать при выборе пороговых значений реагирования защит, использующих выявленную закономерность. Пороговые значения должны быть адаптированы под специфику конкретной распределительной сети. Более длительное наблюдение за процессами в электрической сети до возникновения замыкания позволит не только установить значения ВГ, соответствующие началу процесса его формирования, но и оценить искажения синусоидальности фазных напряжений на ранних стадиях развития повреждения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые на основе анализа реальных осциллограмм показано, что за несколько периодов промышленной частоты до момента ОЗЗ начинается устойчивый рост коэффициента третьей гармоники напряжения поврежденной фазы, что может служить надежным диагностическим признаком для раннего обнаружения ОЗЗ.

Полученные результаты могут быть использованы при совершенствовании адаптивных защит и систем автоматического восстановления сети (САВС). Выявленные в результате проведенного исследования закономерности могут рассматриваться как один из признаков формирования однофазных повреждений изоляции электросетевого оборудования и использоваться при построении защит, направленных на определение неполных замыканий и ускорение работы САВС в целях превентивного запуска алгоритмов расчета локализации поврежденных участков сети. При этом для перестроения сети могут быть использованы дистанционные выключатели (реклоузеры). Для выбора пороговых значений с целью оценки роста коэффициента третьей гармонической составляющей фазного напряжения рекомендуется проводить анализ реальной сети, в которой планируется использовать результаты исследования.

## Список источников

1. Лебедев В.Д., Филатова Г.А., Петров А.Е. Исследование цифровых измерительных трансформаторов в условиях дуговых перемежающихся однофазных замыканий на землю с применением программно-аппаратного комплекса RTDS // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2024. Т. 24. № 2. С. 5–17. <https://doi.org/10.14529/power240201>. EDN: PUSOMM.
2. Коржов А.В., Сафонов В.И., Бабаев Р.М., Коростелев Я.Е. Оценка эффективности средств защиты от перенапряжений в кабельной распределительной сети 10 кВ // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2024. Т. 24. № 2. С. 18–26. <https://doi.org/10.14529/power240202>. EDN: JCFEGG.
3. Наумов И.В., Полковская М.Н. Аналитическая оценка функционирования распределительных электрических сетей ПАО «Россети Волга» – «Оренбургэнерго» // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2024. Т. 17. № 8. С. 988–1006. EDN: XTMYHD.
4. Starostin E., Kazhekin I. Methodology for early prediction of single-phase ground faults in distribution networks // International Ural Conference on Electrical Power Engineering. 2024. P. 72–76. <https://doi.org/10.1109/UralCon62137.2024.10718899>.
5. Шуин В.А., Винокурова Т.Ю., Шагурина Е.С. Математическая модель для оценки минимального уровня высших гармоник в токе однофазного замыкания на землю в компенсированных сетях 6–10 кВ // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2013. № 6. С. 35–41. EDN: RRYZSX.
6. Kazhekin I.E., Finko S.P. Influence of non-linear load on single-phase fault current in electrical networks with isolated neutral // International Ural Conference on Electrical Power Engineering (Magnitogorsk, 23–25 September 2022). Magnitogorsk: IEEE, 2022. P. 330–335. <https://doi.org/10.1109/UralCon54942.2022.9906778>.
7. Майоров А.В., Челазнов А.А., Ильиных М.В. Экспериментальные исследования переходных процессов при однофазных замыканиях в сети 20 кВ // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2015. № 6. С. 23–29. <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2015.6.023-029>. EDN: VBWLXL.
8. Shirkovets A.I. Modeling of transient processes at ground faults in the electrical network with a high content of harmonics // 2nd International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (Matsue, 20–23 October 2013). Matsue: IEEE Computer Society, 2013. P. 6804342. <https://doi.org/10.1109/ICEPE-ST.2013.6804342>. EDN: SLQEXH.
9. Тютиков В.В., Кутумов Ю.Д., Шадрикова Т.Ю., Шуин В.А. Условия полной компенсации токов однофазного замыкания на землю в кабельных сетях напряжением 6–10 кВ с заземлением нейтрали через дугогасящий реактор // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2022. № 5. С. 24–32. <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2022.5.024-032>. EDN: YTQCQE.
10. Бурянина Н.С., Королюк Ю.Ф., Лесных Е.В., Суслов К.В. Определение места короткого замыкания на линиях электропередачи // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 6. С. 129–136. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-6-129-136>.
11. Аюурзана Э., Петров М.И., Кузьмин А.А. Экспериментальное исследование эффективности работы дугогасящих реакторов в Улан-Баторских городских электрических сетях 6–10 кВ // Вестник Чувашского университета. 2016. № 1. С. 30–38. EDN: VPZXJB.
12. Крюков А.В., Овечкин И.С. Моделирование однофазных замыканий на землю в технологических ЛЭП железнодорожного транспорта // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2025. № 1. С. 53–67. <https://doi.org/10.25729/ESI.2025.37.1.006>. EDN: IWCJCG.
13. Holcsik P., Pálfi J., Čonka Z., Bence K. I. Fault point location method, based on harmonics analysis of a distribution system // Acta Polytechnica Hungarica. 2022. Vol. 19. No. 4. P. 147–164. <https://doi.org/10.12700/APH.19.4.2022.4.8>. EDN: FZMRWF.
14. Tong Ning, Liang Jihan, Li Hui, Lin Xiangning, Li Zhengtian. Single-phase earth fault location method based on harmonic analysis for the NUGS // Annual IEEE Systems Conference (Orlando, 18–21 April 2016). Orlando: IEEE, 2016. P. 7490539. <https://doi.org/10.1109/SYSCON.2016.7490539>.
15. Fedotov A., Abdullazyanov R., Vagapov G., Grackova L. Detection of places of single-phase ground fault by frequency of the resonance // 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (Riga, 13–14 October 2016). Riga: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2016. Vol. 57. P. 7763116. <https://doi.org/10.1109/RTUCON.2016.7763116>. EDN: WINDWJ.
16. Farshad M., Sadeh J. Accurate single-phase fault location method for transmission lines based on k-nearest neighbor algorithm using one-end voltage // IEEE Transactions on Power Delivery. 2012. Vol. 27. Iss. 4. P. 2360–2367. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2012.2211898>.
17. Ощепков В.А. Разработка метода селективного определения отходящей линии и расстояния до места возникновения однофазного замыкания на землю // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2023. № 3. С. 127–135. <https://doi.org/10.18822/byusu202303127-135>. EDN: RHKYBD.
18. Li Yuan, Gao Houlei, Du Qiang, Qi Xiaosheng, Pang Qingle, Zhu Guofang. A review of single-phase-to-ground fault location methods in distribution networks // 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (Weihai, 6–9 July 2011). Weihai: IEEE, 2011. P. 938–943. <https://doi.org/10.1109/DRPT.2011.5994028>.

19. Федотов А.И., Вагапов Г.В., Абдулмалыев А.Ф., Шаряпов А.М. Цифровая система мониторинга повреждений на линиях электропередачи // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 1. С. 146–155. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-1-146-155>. EDN: WOLXFG.
20. Chen Jiaquan, Li Haifeng, Deng Chengjiang, Wang Gang. Detection of single-phase to ground faults in low-resistance grounded MV systems // IEEE Transactions on Power Delivery. 2021. Vol. 36. Iss. 3. P. 1499–1508. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2020.3010165>.
21. Krasnykh A.A., Krivoshein I.L., Kozlov A.L. Research of single-phase faults in 6–35 kV branched overhead distribution network // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. 2017. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2017.8076252>.
22. Долгих Н.Н., Осипов Д.С., Парамзин А.О. Идентификация однофазных замыканий на землю в сетях 6–35 кВ на основе вейвлет-преобразования // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2023. Т. 19. № 1. С. 139–146. <https://doi.org/10.18822/byusu202301139-146>. EDN: KUWHGM.
23. Парамзин А.О. Разработка способа селективного определения линии с однофазным замыканием на землю для промышленных сетей 6–35 кВ с изолированной нейтралью при преобладании несинусоидальной нагрузки // Омский научный вестник. 2023. № 4. С. 100–108. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2023-188-100-108>. EDN: WIUEEM.
24. Солдатов А.В., Кудряшова М.Н., Антонов В.И., Иванов Н.Г., Иванов М.О. Методы распознавания высших гармоник на фоне доминирующего гармонического шума для целей защиты от однофазного замыкания на землю // Электрические станции. 2021. № 7. С. 27–34. EDN: DCFFXI.
25. Дмитриченко В.И., Ни Д.А., Джетписов М.А., Бауржан Б. Комбинированная релейная защита от замыканий на землю в электросетях 6–10 кВ // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 1. С. 53–69. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-53-69>.
26. Wang Yi Fei, Li Yun Wei. A grid fundamental and harmonic component detection method for single-phase systems // IEEE Transactions on Power Electronics. 2013. Vol. 28. Iss. 5. P. 2204–2213. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2214445>.
27. Коровкин Н.В., Грицуненко С.С. О применимости быстрого преобразования Фурье для гармонического анализа несинусоидальных токов и напряжений // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2017. № 2. С. 73–86. EDN: WFFWIZ.

## References

1. Lebedev V.D., Filatova G.A., Petrov A.E. The development of 6 kV network models for the study of digital instrument transformers with ARC intermittent single-phase ground faults. *Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2024;24(2):5-17. (In Russ.). <https://doi.org/10.14529/power240201>. EDN: PUSOMM.
2. Korzhov A.V., Safonov V.I., Babayev R.M., Korostelev I.E. An assessment of the effectiveness of surge protection in a 10 kV cable distribution network. *Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2024;24(2):18-26. (In Russ.). <https://doi.org/10.14529/power240202>. EDN: JCFEGG.
3. Naumov I.V., Polkovskaya M.N. Analytical assessment of the functioning of the distribution electric networks of PSJC Rosseti Volga – Orenburgenergo. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies*. 2024;17(8):988-1006. (In Russ.). EDN: XTMYHD.
4. Starostin E., Kazhekin I. Methodology for early prediction of single-phase ground faults in distribution networks. In: *International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*. 2024;72-76. <https://doi.org/10.1109/UralCon62137.2024.10718899>.
5. Shuin V.A., Vinokurova T.Yu., Shagurina E.S. Mathematical model of calculating the minimum level of higher harmonics in line-to-ground fault current in 6–10 kV resonant earthed systems. *Vestnik of the Ivanovo State Power Engineering University*. 2013;6:35-41. (In Russ.). EDN: RRYZSX.
6. Kazhekin I.E., Finko S.P. Influence of non-linear load on single-phase fault current in electrical networks with isolated neutral. In: *International Ural Conference on Electrical Power Engineering*. 23–25 September 2022, Magnitogorsk. Magnitogorsk: IEEE; 2022, p. 330-335. <https://doi.org/10.1109/UralCon54942.2022.9906778>.
7. Mayorov A.V., Chelaznov A.A., Ilyinykh M.V. Experimental study of transients under single-phase short circuits in the 20 kV network. *Vestnik of the Ivanovo State Power Engineering University*. 2015;6:23-29. (In Russ.). <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2015.6.023-029>. EDN: VBWLXL.
8. Shirkovets A.I. Modeling of transient processes at ground faults in the electrical network with a high content of harmonics. In: *2nd International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology*. 20–23 October 2013, Matsue. Matsue: IEEE Computer Society; 2013, p. 6804342. <https://doi.org/10.1109/ICEPE-ST.2013.6804342>. EDN: SLQEXH.
9. Tyutikov V.V., Kutumov Y.D., Shadriskova T.Y., Shuin V.A. Terms and conditions of single phase to earth fault current full compensation in 6–10 kV cable networks with neutral point grounded via Arc suppression coil. *Vestnik of the Ivanovo State Power Engineering University*. 2022;5:24-32. (In Russ.). <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2022.5.024-032>. EDN: YTQCQE.
10. Buryanina N.S., Korolyuk Y.F., Lesnykh E.V., Suslov K.V. Determination of failure location in power transmission lines. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(6):129-136. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-6-129-136>.



11. Ayurzana E., Petrov M.I., Kuzmin A.A. Experimental study of performance Arc suppression coils at the UlaanBaatar city electric networks of 6-10 kV. *Bulletin of the Chuvash University*. 2016;1:30-38. (In Russ.). EDN: VPZXJB.
12. Kryukov A.V., Ovechkin I.S. Modeling modes of single-phase ground faults in technological power lines of railway transport. *Information and mathematical Technologies in Science and Management*. 2025;1:53-67. (In Russ.). <https://doi.org/10.25729/ESI.2025.37.1.006>. EDN: IWCJCG.
13. Holcsik P., Pálfi J., Čonka Z., Bence K.I. Fault point location method, based on harmonics analysis of a distribution system. *Acta Polytechnica Hungarica*. 2022;19(4):147-164. <https://doi.org/10.12700/APH.19.4.2022.4.8>. EDN: FZMRWF.
14. Tong Ning, Liang Jihan, Li Hui, Lin Xiangning, Li Zhengtian. Single-phase earth fault location method based on harmonic analysis for the NUGS. In: *Annual IEEE Systems Conference*. 18–21 April 2016, Orlando. Orlando: IEEE; 2016, p. 7490539. <https://doi.org/10.1109/SYSCON.2016.7490539>.
15. Fedotov A., Abdullazyanov R., Vagapov G., Grackova L. Detection of places of single-phase ground fault by frequency of the resonance. In: *57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University*. 13–14 October 2016, Riga. Riga: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.; 2016, vol. 57, p. 7763116. <https://doi.org/10.1109/RTUCON.2016.7763116>. EDN: WINDWJ.
16. Farshad M., Sadeh J. Accurate single-phase fault-location method for transmission lines based on k-nearest neighbor algorithm using one-end voltage. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2012;27(4):2360-2367. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2012.2211898>.
17. Oshchepkov V.A. Development of a method for selective determination of the outgoing line and the distance to the place of occurrence of a single-phase earth fault. *Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2023;3:127-135. (In Russ.). <https://doi.org/10.18822/byusu202303127-135>. EDN: RHKYBD.
18. Li Yuan, Gao Houlei, Du Qiang, Qi Xiaosheng, Pang Qingle, Zhu Guofang. A review of single-phase-to-ground fault location methods in distribution networks. In: *4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*. 6–9 July 2011, Weihai. Weihai: IEEE; 2011, p. 938-943. <https://doi.org/10.1109/DRPT.2011.5994028>.
19. Fedotov A.I., Vagapov G.V., Abdullazyanov A.F., Sharyapov A.M. Digital power lines faults monitoring system. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2021;23(1):146-155. (In Russ.). <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-1-146-155>. EDN: WOLXFG.
20. Chen Jiaquan, Li Haifeng, Deng Chengjiang, Wang Gang. Detection of single-phase to ground faults in low-resistance grounded MV systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2021;36(3):1499-1508. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2020.3010165>.
21. Krasnykh A.A., Krivoshein I.L., Kozlov A.L. Research of single-phase faults in 6–35 kV branched overhead distribution network. In: *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*. 2017. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2017.8076252>.
22. Dolgikh N.N., Osipov D.S., Paramzin A.O. Identification of single-phase ground fault in networks 6-35 kV using the wavelet transform. *Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2023;19(1):139-146. (In Russ.). <https://doi.org/10.18822/byusu202301139-146>. EDN: KUWHGM.
23. Paramzin A.O. Development of selective line detection method with single-phase earth fault for industrial 6–35 kV networks with isolated neutral with non-sinusoidal load. *Omsk Scientific Bulletin*. 2023;4:100-108. (In Russ.). <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2023-188-100-108>. EDN: WIUEEM.
24. Soldatov A.V., Kudryashova M.N., Antonov V.I., Ivanov N.G., Ivanov M.O. Methods for detecting higher harmonics against a background of dominant harmonic noise for the purpose of protection against single-phase ground faults. *Power Technology and Engineering*. 2021;7:27-34. (In Russ.). EDN: DCFFXI.
25. Dmitrichenko V.I., Ni D.A., Dzhetspisov M.A., Baurzhan B. Combined ground-fault relay protection in 6–10 kV power grids. *iPolytech Journal*. 2022;26(1):53-69. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-53-69>.
26. Wang Yi Fei, Li Yun Wei. A grid fundamental and harmonic component detection method for single-phase systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2013;28(5):2204-2213. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2214445>.
27. Korovkin N.V., Gritsutenko S.S. About applicability of the fast Fourier transform for a harmonic analysis of non sinusoidal currents and voltages. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Energetics*. 2017;2:73-86. (In Russ.). EDN: WFFWIZ.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Кажекин Илья Евгеньевич**,  
к.т.н.,  
доцент кафедры энергетики,  
Калининградский государственный  
технический университет,  
236022, г. Калининград,  
Советский проспект, 1, Россия  
[kazhekin@mail.ru](mailto:kazhekin@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0001-9510-5275>

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Ilya E. Kazhekin**,  
Cand. Sc. (Eng.),  
Associate Professor of the  
Department of Power Engineering,  
Kaliningrad State Technical University,  
1 Sovetsky Prospekt, Kaliningrad 236022,  
Russia  
[kazhekin@mail.ru](mailto:kazhekin@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0001-9510-5275>

**Старостин Егор Сергеевич,**  
аспирант,  
Калининградский государственный  
технический университет,  
236022, г. Калининград,  
Советский проспект, 1, Россия  
✉ starostin-es@list.ru  
<https://orcid.org/0009-0000-8439-514X>

**Egor S. Starostin,**  
Postgraduate Student,  
Kaliningrad State Technical University,  
1 Sovetsky Prospekt, Kaliningrad 236022,  
Russia  
✉ starostin-es@list.ru  
<https://orcid.org/0009-0000-8439-514X>

#### **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 26.08.2025 г.; одобрена после рецензирования 03.10.2025 г.; принята к публикации 13.10.2025 г.

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

The article was submitted 26.08.2025; approved after reviewing 03.10.2025; accepted for publication 13.10.2025.

## ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 621.311

EDN: AWGPMB

DOI: 10.21285/1814-3520-2025-4-538-549



## Моделирование сложных повреждений в электрических сетях, примыкающих к тяговым подстанциям

А.В. Крюков<sup>1✉</sup>, И.С. Овечкин<sup>2</sup><sup>1,2</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия

**Резюме.** Цель исследований заключалась в разработке цифровых моделей, позволяющих корректно определять параметры режимов работы электрических сетей, примыкающих к тяговым подстанциям, при сложных повреждениях. Для достижения поставленной цели использовался подход, основанный на мультифазном представлении элементов электроэнергетических систем в фазных координатах и реализованный в программном комплексе Fazonord AC–DC. Были рассмотрены следующие виды сложных повреждений: обрыв провода с падением его на грунт, соединение двух фаз с землей в разных точках линии электропередачи, подключенной к трансформатору с изолированной нейтралью, и два одновременных коротких замыкания в сети. Результаты моделирования подтвердили необходимость корректного учета тяговой сети при определении режимов сложных повреждений. Для сравнения были выполнены аналогичные расчеты при ее отсутствии. Для режима обрыва провода и соединения его с грунтом отличия между результатами расчетов с учетом тяговой сети и при ее отключении составили 11%. В ситуации двойного замыкания на землю различие по токам линий электропередач достигало 13%. При одновременных коротких замыканиях в сети с изолированной нейтралью аналогичный параметр равнялся 22%. Разработаны цифровые модели электроэнергетических систем, которые позволяют корректно определять параметры режима при сложных повреждениях с учетом влияния тяговой сети. Их применение при проектировании и эксплуатации высоковольтных электрических сетей позволит осуществлять точную настройку устройств релейной защиты и автоматики, что приведет, в свою очередь, к снижению ущербов от аварий и сокращению времени перерывов в электрообеспечении потребителей электроэнергии.

**Ключевые слова:** сложные повреждения, влияние тяговой сети, электрические сети, моделирование

**Для цитирования:** Крюков А.В., Овечкин И.С. Моделирование сложных повреждений в электрических сетях, примыкающих к тяговым подстанциям // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 4. С. 538–549. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-4-538-549>. EDN: AWGPMB.

## POWER ENGINEERING

Original article

## Modeling of complex faults in electrical grids connected to traction substations

Andrey V. Kryukov<sup>1✉</sup>, Ilya S. Ovechkin<sup>2</sup><sup>1,2</sup>Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

**Abstract.** The study was aimed at developing digital models that would provide a means to accurately determine the operating parameters of electrical grids connected to traction substations in the event of complex faults. To this end, an approach was used based on a multiphase phase-coordinate representation of elements comprising the electric power system; this approach was implemented using the Fazonord AC–DC software. The following types of complex faults were considered: downed power line; double line-to-ground fault at different points of the power line connected to a transformer with an isolated neutral point; two simultaneous short circuits in the grid. The modeling confirmed the need to factor in the traction network when determining operating parameters in the event of complex faults. For comparison, similar calculations were performed for the case of its disconnection. For a downed power line, the difference between the calculation results obtained with the traction network taken into account and for the case of its disconnection amounted to 11%. In the case of a double line-to-ground fault, the difference in power line currents reached 13%. For simultaneous short circuits in the grid with an isolated neutral point, the corresponding parameter was equal to 22%. Digital models of electric power systems were developed; these models enable the correct determination of operating parameters in the event of complex faults, taking the

traction network into account. Their use in the design and operation of high-voltage electrical grids will enable the accurate setting of relay protection and automation devices, which, in turn, can reduce accident damage and power outage time for electricity consumers.

**Keywords:** complex faults, traction network influence, electrical networks, modeling

**For citation:** Kryukov A.V., Ovechkin I.S. Modeling of complex faults in electrical grids connected to traction substations. *iPolytech Journal*. 2025;29(4):538-549. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-4-538-549>. EDN: AWGPMB.

## ВВЕДЕНИЕ

Аварии в электрической сети приводят к значительным отклонениям параметров режима от допустимых значений и, как следствие, к отказам и повреждению дорогостоящего оборудования [1, 2]. В трехфазных электрических сетях могут возникать различные виды аварийных ситуаций, которые принято разделять на две группы: простые и сложные. К первой относятся однократные короткие замыкания (КЗ) и обрывы одной или двух фаз. Во вторую входят следующие виды повреждений: КЗ с одновременным обрывом фазы, двойные замыкания на землю, два одновременных КЗ в сети с изолированной нейтралью и др. Уровни негативных последствий, вызванных воздействием аварийных режимов на оборудование электроэнергетических систем (сложных), зависят от длительности протекания значительных токов, которые могут достигать нескольких килоампер. Поэтому для надежной работы электроэнергетической системы (ЭСС) необходимо в кратчайшее время выявлять аварийные режимы, идентифицировать поврежденный элемент и селективно отключать его. Для решения этой задачи в современных условиях необходимо использовать средства компьютерного моделирования [3], что требует разработки адекватных методов и быстродействующих алгоритмов.

Решению задач моделирования аварийных режимов посвящено большое число публикаций. Так, например, вопросы расчета сложных повреждений (СП) в распределительных сетях с применением метода симметричных составляющих (МСС) и принципа наложения рассмотрены в [4]. Обобщенная методология определения токов и напряжений при СП на основе МСС описана в [5]. Анализ несимметричных КЗ и обрывов проводов в ЭЭС с нетранспонированными линиями электропередачи (ЛЭП) выполнен в [6]. Методика моделирования неисправностей с использованием обобщенного метода предложена в [7]. Она позволяет обрабатывать

различные неисправности без каких-либо ограничений по их типу, общему количеству или месту возникновения. Принципиальное различие между предлагаемым подходом и традиционным МСС заключается в том, что повреждения моделируются на основе мультифазной сети; при этом достигается гибкость при анализе повреждений на разных фазах. Анализ переходных электромагнитных процессов в высоковольтных ЛЭП при двухфазных КЗ выполнен в [8]. Авторами разработана математическая модель электрической сети, в состав которой входили следующие элементы: дальняя ЛЭП с распределенными параметрами и эквивалентная трехфазная активно-индуктивная нагрузка.

Аналитический алгоритм для анализа многократных КЗ в двухцепной ЛЭП с учетом взаимоиндуктивных связей предложен в [9]. Этот алгоритм включает следующие этапы:

- представление сети с поврежденными точками и полными сопротивлениями компонентов;
- построение эквивалентных схем замещения с виртуальными фазосдвигающими трансформаторами;
- объединение эквивалентов друг с другом;
- расчет токов в точках повреждения путем решения системы линейных уравнений.

Новый метод анализа несимметричных повреждений для распределительных микросетей рассмотрен в [10]. Он использует трехфазные модели для моделирования аварийных режимов. На основе топологических характеристик распределительных сетей формируются две матрицы, которые затем объединяются с предлагаемым методом гибридной компенсации. На этой основе может быть получена модель несимметричного повреждения с соответствующими граничными условиями. Предлагаемый метод можно использовать для анализа различных типов аварийных режимов. Вопросы моделирования несимметричных повреждений с использованием эквивалентной схемы



Л.С. Тевенена рассмотрены в [11]. Традиционно такая схема состоит из двух терминалов, предназначенных для расчета тока в элементе, подключенном между ними. Во многих практических случаях используются элементы, у которых третий терминал соединен с землей. В статье предлагается систематический подход к применению трехтерминальной эквивалентной схемы.

Важные аспекты анализа таких сложных повреждений, как двойные замыкания на землю (ДЗЗ), рассмотрены в [12–15]. Воспроизведение КЗ «две фазы – земля» с использованием данных реального осциллографирования и программного обеспечения ATP-EMTP (Alternative Transient Program – Electro Magnetic Transient Program) выполнено в [12]. Метод воспроизведения основан на расчете параметров режима КЗ по измерениям тока нейтрали. Результаты показали, что сигналы тока, полученные при моделировании, соответствуют измеренным значениям, что подтверждает эффективность предлагаемого подхода. Способы защиты от замыканий на землю рассмотрены в [13]. Представлена новая защита, совместимая с принципом обнаружения КЗ, основанном на сравнении полярностей начального напряжения и бегущих волн тока. Показано, что предлагаемая технология способна быстро и точно отключить участок линии однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) с обоих концов. Способ защиты от ДЗЗ, основанный на их автоматическом переводе в ОЗЗ, описан в [14]. Решение проблемы, касающейся термической стойкости металлической оболочки кабелей при ДЗЗ, предложено в [15]. Разработана методика испытаний термостойкости существующих кабелей со свинцовыми оболочками, которая может быть рекомендована к широкому применению.

Немаловажным вопросом является достоверное определение места повреждения (ОМП), что позволит многократно сократить время на поиск и устранение неисправности. Методы ОМП рассмотрены в [16–19]. Обзор методов локализации неисправностей в распределительных сетях на основе искусственного интеллекта (ИИ) представлен в [16]. Он состоит из нескольких разделов, охватывающих различные аспекты предлагаемых методов, основанных на нейронных сетях, нечеткой логике и обучении с под-

креплением. Рассматриваются их преимущества и недостатки. Сравниваются типы входных и выходных данных, генерируемых этими алгоритмами. Анализируются системы сбора данных, включая датчики и измерительное оборудование. Рассматриваются типы неисправностей и особенности распределительной сети, которые определяют область применимости алгоритмов ИИ. Новый алгоритм локализации замыканий фазы на землю предложен в [17]. Показано, что бегущие волны, возникающие в результате КЗ, распространяются по распределительным линиям в обоих направлениях от места замыкания и отражаются от нагрузки линии, соединений между фидерами, ответвлений и места замыкания.

В зависимости от путей, по которым они распространяются, переходный сигнал в каждом узле содержит характеристические частоты. Энергетический спектр переходного сигнала имеет высокую плотность вблизи них. На этой основе переходное напряжение можно разложить с помощью вейвлет-фильтра. В зависимости от полосы его пропускания и характеристических частот разложенный сигнал на каждом уровне содержит определенный процент энергии. На этой основе предлагается методология, основанная на нейронной сети, для определения места замыкания.

Подход, базирующийся на использовании искусственных нейронных сетей и опорных векторных машин для локализации неисправностей в радиальных распределительных сетях предложен в [18]. В отличие от традиционных методов ОМП, предлагаемый подход использует измерения, доступные на подстанции, а также данные о состоянии выключателей и реле. Эта информация анализируется с использованием метода главных компонент, а неисправности классифицируются с применением комбинации классификаторов опорных векторов и нейронных сетей прямого распространения. Полученные результаты демонстрируют возможность применения предлагаемого метода для практической диагностики неисправностей распределительных систем. Новый подход к локализации неисправностей в подземной кабельной сети с использованием комбинации вейвлет-анализа с искусственными нейронными сетями описан в [19].

Представлены результаты его исследования с использованием программного обеспечения ЕМТР. Полученные в результате моделирования данные анализировались с применением технологии обработки сигналов, основанной на вейвлет-анализе. Искусственная нейронная сеть и система нечеткой логики использовалась для определения типа и местоположения замыканий на землю. Результаты показали, что метод обладает приемлемой точностью (погрешность менее 1,5%) во всем многообразии условий.

Технология обнаружения неисправностей на основе вейвлет-алгоритма представлена в [20]. Показано, что точное и быстрое определение места КЗ в распределительной сети имеет большое значение для повышения надежности электроснабжения. Для решения этой задачи требуется высокое качество данных, поступающих от линейных терминалов. Кроме того, существуют проблемы плохой отказоустойчивости и низкой точности определения места КЗ. Для их решения предлагается технология ОМП с помощью взаимодействия распределительного оконечного устройства и индикаторов КЗ. Экспериментальные данные и результаты анализа показывают эффективность этого метода. Подход к локализации неисправностей на основе вейвлетов с использованием форм сигналов переходных процессов напряжения предложен в [21].

Способы определения мест неисправности с использованием информации о топологии сети и бегущих волн рассмотрены в [22, 23]. В статье [22] доказано, что на основе топологии можно проанализировать замыкание, генерирующее бегущие волны, которые содержат информацию о его расположении. Приведенные в [23] результаты показывают, что предлагаемый метод обладает высокой точностью определения местоположения повреждения и не требует установки регистраторов бегущей волны на всех концах линий. Способ, предложенный в [24], позволяет повысить точность определения места ДЗЗ в сетях 6-35 кВ.

Он основан на использовании моделирования, накопления статистической информации и компенсации ошибок в расчетах. Новый метод определения местоположения двухфазных замыканий на землю, основан-

ный на модели ЛЭП с учетом распределенности параметров, рассмотрен в [25]. Для его реализации используются только напряжение и ток одного конца линии. С помощью поиска минимальной разности фазовых углов между фазным напряжением вдоль линии передачи и током неисправности, измеренным защитой, можно определить расстояние до места повреждения. Существующая релейная защита и автоматика (РЗА) не всегда способна эффективно обеспечить тепловую защиту кабельных линий, особенно в электрических сетях, нейтрали которых не заземлены. Универсальная РЗА от межфазных замыканий, обеспечивающая решение этой проблемы, описана в [26].

Анализ представленных выше работ позволяет сформулировать следующие выводы:

- задача моделирования аварийных режимов имеет несомненную актуальность и является основой для разработки методов оптимальной настройки устройств РЗА, а также определения мест повреждений в электрических сетях;
- авторами рассмотренных в обзоре публикаций предложены эффективные методы определения режимов ЭЭС при различных видах повреждений в электрических сетях;
- значительная часть разработанных алгоритмов базируется на методе симметричных составляющих, имеющем ряд недостатков, подробно описанных в [27].

Кроме того, значительная часть электрических сетей России, особенно в регионах Сибири и Дальнего Востока, примыкает к тяговым подстанциям (ТП) магистральных железных дорог; при этом однофазные тяговые сети (ТС) оказывают значительное влияние на их режимы. Однако вопросы учета этого фактора в описанных выше публикациях не рассмотрены. Для решения данной задачи можно использовать подход, основанный на мультифазном представлении элементов ЭЭС, предложенный в [27, 28] и реализованный в промышленном программном комплексе (ПК) Fazonord AC-DC. Этот ПК предназначен для решения следующих задач:

- определение сложно-несимметричных, несинусоидальных и аварийных режимов ЭЭС и систем электроснабжения железных дорог переменного и постоянного токов;
- выполнение расчетов напряженностей электромагнитных полей ЛЭП;

– проведение параметрической идентификации линий электропередачи, трансформаторов и тяговых сетей (вычисление температур токоведущих частей и трансформаторов);

– моделирование процессов плавки гололеда [27, 28].

Адекватность использования данного подхода для расчета сложных повреждений подтверждена в [29], где производилось сравнение результатов расчетов по аналитическим формулам, представленным в [4], и компьютерного моделирования. Однако вопросы учета влияния ТС в [4] не рассматривались. Ниже представлены результаты разработки компьютерных моделей, позволяющих учитывать влияние тяговых сетей при моделировании режимов сложных повреждений.

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассматривались три разновидности сложных повреждений: однофазное замыкание с одновременным обрывом провода, двойное замыкание на землю и два одновременных КЗ в сети с изолированной нейтралью.

Для схемы, приведенной на рис. 1, моделировался первый вид повреждений; при этом КЗ происходило в конце линии ЛЭП 2 длиной 50 км. Перед его возникновением система С поддерживала уровень напряжения 115 кВ. Сеть, представленная на рис. 1, включала следующие элементы: питающие ЛЭП 220 кВ, выполненные проводами марки АС-300; повышающий трансформатор (Т) марки ТДЦ-250000/11/220; автотрансформатор (АТ) 240000-220/121/11; тяговые трансформаторы марки ТДНЖ-40000/220/27,5; двухпутный участок тяговой сети протяженностью 50 км с контактными подвесками ПБСМ-95+МФ-100 и рельсовыми нитями Р-65.

На рис. 2 представлены векторные диаграммы токов в месте замыкания, построенные на основании моделирования в ПК Fazonord AC-DC, выполненного с учетом и без учета влияния тяговой сети.

Анализ результатов моделирования, итоговые данные которого приведены на рис. 2 и в табл. 1, показал, что при учете ТС по сравнению с режимом, в котором она не учиты-

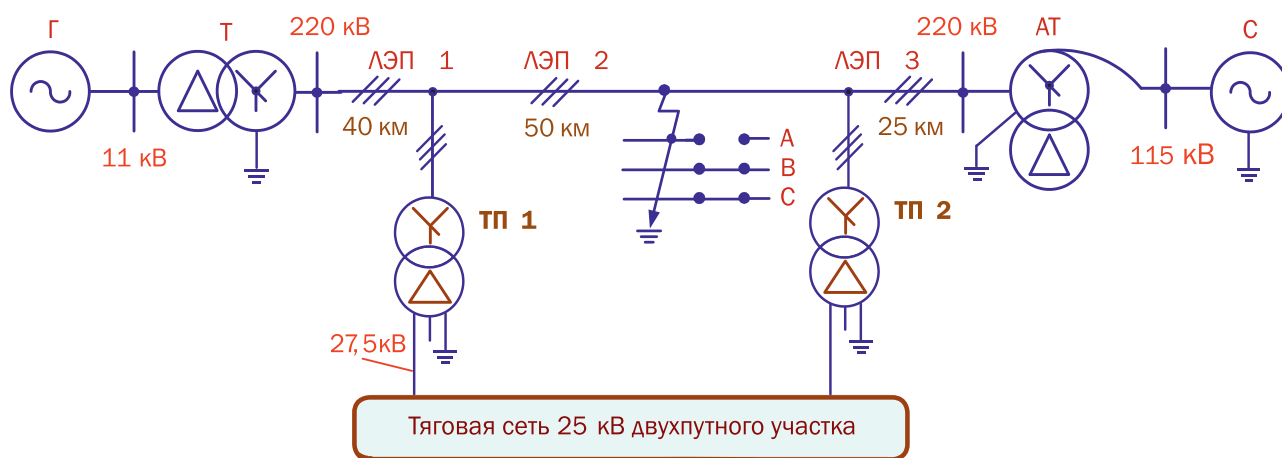


Рис. 1. Схема системы электроснабжения

Fig. 1. Power supply system diagram



Рис. 2. Векторные диаграммы токов в месте повреждения: а – без учета тяговой сети; б – с учетом тяговой сети

Fig. 2. Vector diagrams of currents at the fault location: а – without taking into account the traction network; б – taking into account the traction network

валась, имеет место существенное различие результатов. Максимальная разница для модуля тока в месте повреждения равна 11%. Для неповрежденных фаз эта величина достигала 3,8%. Напряжения в месте повреждения отличались на 4%.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о необходимости учета тяговой сети при моделировании режимов обрыва провода с одновременным замыканием его на землю. Это позволит более обоснованно подходить к решению задач проектирования и выбора уставок устройств релейной защиты, обеспечивающих селективное отключение поврежденного элемента.

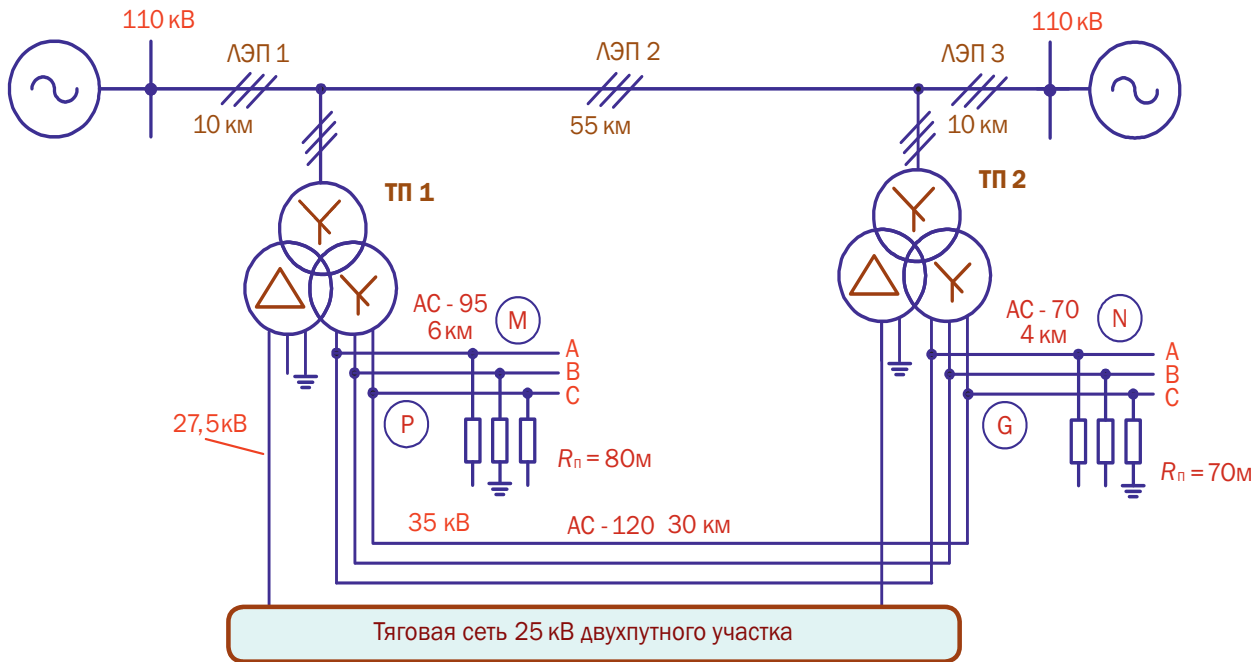
Еще одной разновидностью сложного повреждения является двойное замыкание на землю. На рис. 3 представлена схема электрической сети, на которой рассматриваются ОЗЗ фаз В и С на линиях Р-М и G-N 35 кВ.

Схема, показанная на рис. 3, включала следующие элементы: одноцепные ЛЭП 110 кВ, выполненные проводами марки АС-150; две ТП, на которых установлены трехфазные трехобмоточные трансформаторы марки ТДТНЖ-40000/115/37,5/27,5; электрическая сеть 35 кВ, выполненная проводами марки АС-70, 95, 120; двухпутный участок ТС переменного тока протяженностью 50 км с контактными подвесками ПБСМ-95+МФ-100 и рельсовыми нитями Р-65. На основе моделирования в ПК Fazonord AC-DC построены векторные диаграммы токов, показанные на рис. 4, 5. Различия в результатах расчетов при учете ТС и ее отключении приведены в табл. 2.

Полученные результаты дают возможность сделать вывод о том, что токи повреждения при включенной и отключенной ТС различаются небольшой величиной в 5 А. Однако разница в токе неповрежденной фазы ЛЭП достигает 13%, что свидетельствует

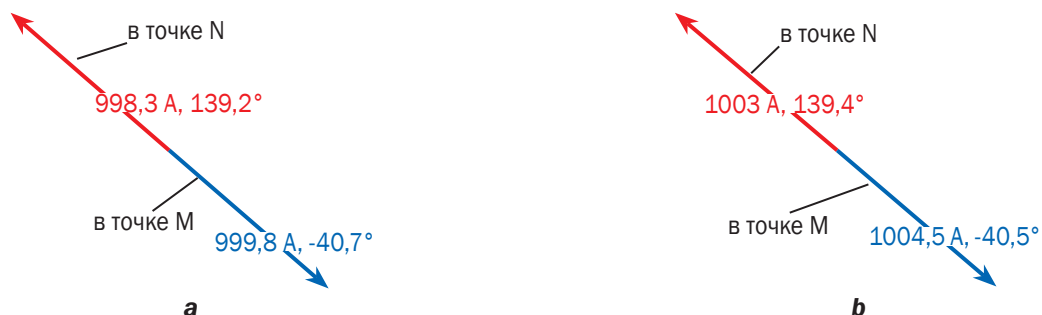
**Таблица 1.** Токи в месте повреждения  
**Table 1.** Currents at the fault site

Фаза	Токи, А		Различие, %
	без ТС	с ТС	
А	1217,4	1351,7	-11
В	555,5	576,6	-3,8
С	673,6	649,4	3,6



**Рис. 3.** Схема системы электроснабжения  
**Fig. 3.** Power supply system diagram





**Рис. 4.** Векторные диаграммы токов в месте повреждения: а – без тяговой сети; б – с учетом тяговой сети

**Fig. 4.** Vector diagrams of currents at the fault location: а – with a de-energized traction network; б – taking into account a traction network

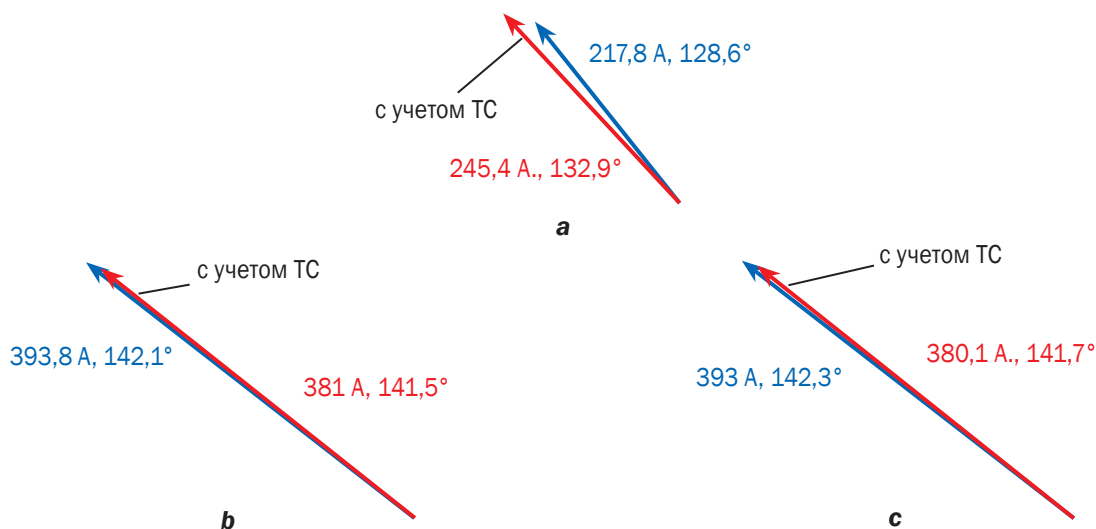
о необходимости учета ТС при моделировании данного вида повреждений. Различие в токах ЛЭП поврежденных фаз равняется 3,3%.

В табл. 2 представлены значения модуля и фазы тока в месте повреждения и в ЛЭП 35 кВ без и с учетом ТС.

Еще одной разновидностью сложного повреждения является режим двух одновременных коротких замыканий в сети с изолированной нейтралью. Схема моделируемой электрической сети показана на рис. 6. Рассматривался режим двухфазного КЗ на стороне 10 кВ трансформатора Т, приводя-

щего к срабатыванию короткозамыкателя 35 кВ.

Схема сети включала следующие элементы: одноцепные ЛЭП 110 кВ, выполненные проводами марки АС-150; две ТП, на которых были установлены трехфазные трехобмоточные трансформаторы марки ТДНЖ-40000/115/37,5/27,5. На линии 35 кВ был установлен понижающий Т марки ТМН-16000/35/11. Векторные диаграммы, построенные средствами ПК Fazonord AC-DC, приведены на рис. 7, 8. Токи ЛЭП 35 кВ сведены в табл. 3.



**Рис. 5.** Векторные диаграммы тока в линиях электропередачи: а – фаза А; б – фаза В; с – фаза С

**Fig. 5.** Vector diagrams of current in power transmission lines: а – phase А; б – phase В; с – phase С

**Таблица 2.** Токи в линиях электропередачи 35 кВ

**Table 2.** Currents in 35 kV transmission lines

Фаза	Токи, А		Различие, %
	без ТС	с ТС	
А	217,8	245,4	-13
В	393,8	381	3,3
С	393	380,1	3,3

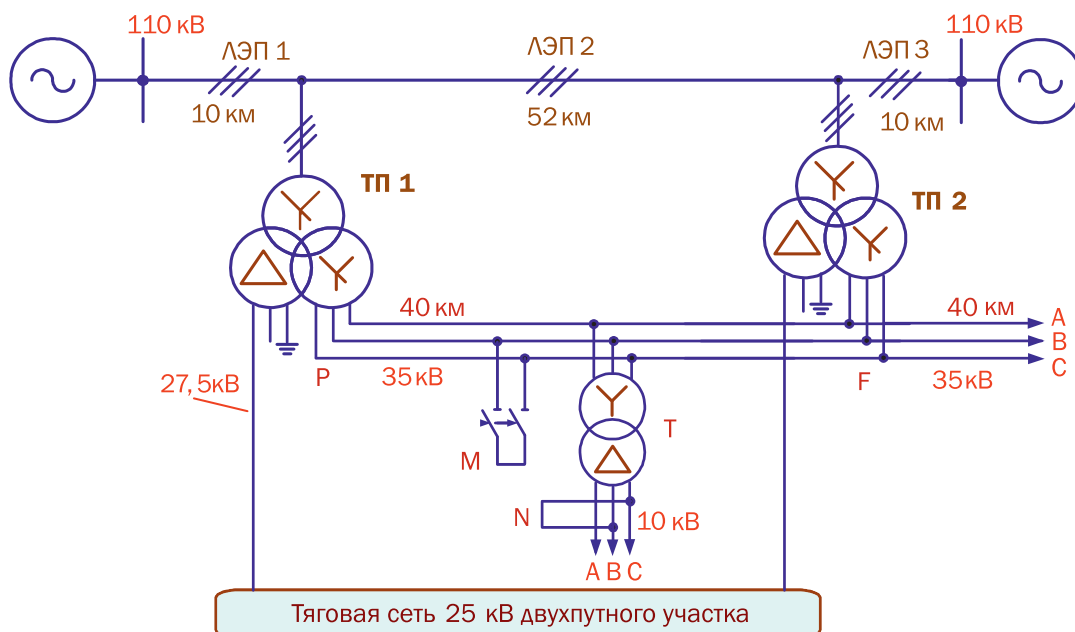


Рис. 6. Схема системы электроснабжения  
 Fig. 6. Power supply system diagram

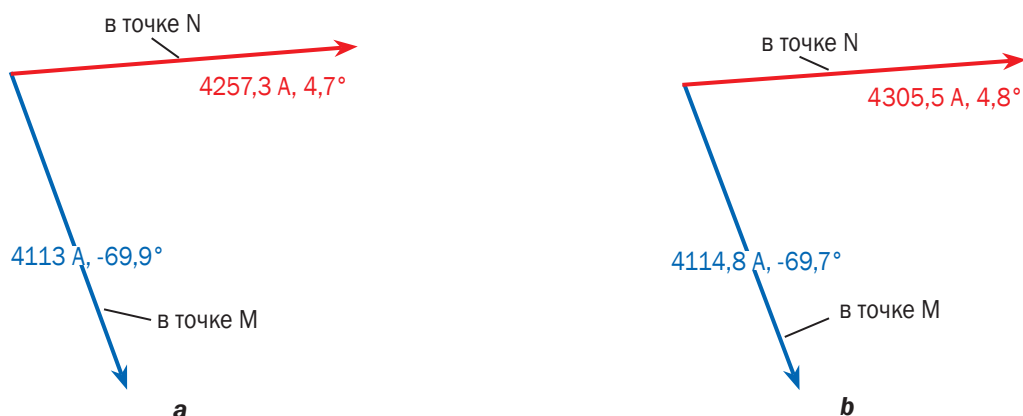


Рис. 7. Векторные диаграммы токов в месте короткого замыкания: а – без учета тяговой сети; б – с учетом тяговой сети  
 Fig. 7. Vector diagrams of currents at the short-circuit location: a – without taking into account the traction network; b – with taking into account the traction network

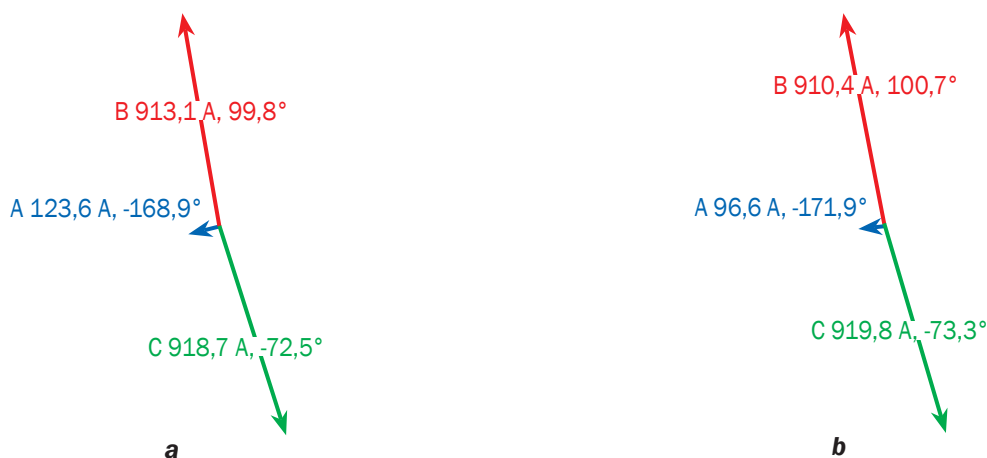


Рис. 8. Векторные диаграммы токов в линиях электропередачи: а – без учета тяговой сети; б – с учетом тяговой сети  
 Fig. 8. Vector diagrams of currents in power transmission lines: a – without taking into account the traction network; b – with taking into account the traction network

Таблица 3. Токи в линиях электропередачи 35 кВ

Table 3. 35 kV transmission line currents

Фаза	Токи, А		Различие, %
	без ТС	с ТС	
A	123,6	96,6	22
B	913,1	910,4	0,3
C	918,7	919,8	-0,12

Анализ результатов моделирования показал, что токи в местах повреждений М и N при включенной и отключенной КЗ различаются незначительно. Однако имеют место заметные различия в токах ЛЭП 35 кВ, достигающие для неповрежденной фазы 22%. Поэтому при моделировании данного вида повреждений следует учитывать влияние тяговой сети.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уточнена методика моделирования режимов сложных повреждений в электрических сетях 220, 35 и 10 кВ, примыкающих к тяговым подстанциям. Моделирование осуществлялось в промышленном программном комплексе Fazonord AC-DC, предназначенном для решения следующих задач:

- определение режимов электрических систем переменного и постоянного тока, включающих в свой состав воздушные и кабельные линии различных конфигураций, трехфазные и однофазные трансформаторы, выпрямители и инверторы, шинопроводы и асинхронные нагрузки;
- расчеты коэффициентов несимметрии по нулевой и обратной последовательностям в динамике движения поездов;
- вычисление коэффициентов гармоник и суммарного коэффициента гармонических

составляющих напряжения и тока;

- расчеты токов коротких замыканий при простых и сложных повреждениях при совместном учете систем тягового и внешнего электроснабжения;

- определение соответствующих режиму электромагнитных полей, создаваемых воздушными и кабельными линиями электропередачи и тяговыми сетями переменного и постоянного тока;

- вычисление нагревов проводов и трансформаторов;

- выполнение параметрической идентификации силовых элементов электроэнергетических систем.

Разработаны цифровые модели электроэнергетических систем, которые дают возможность корректно определять параметры режима работы сети при сложных повреждениях с учетом влияния ТС. Полученные результаты показали необходимость учета тяговой сети при моделировании рассмотренных аварийных режимов.

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности их использования при проектировании ЭЭС, разработке мероприятий по повышению надежности электроснабжения, а также для настройки устройств релейной защиты и автоматики.

## Список источников

1. Жданов П.С. Вопросы устойчивости энергетических систем. М.: Энергия, 1979. 456 с.
2. Shi Xiu Feng, Mu Shi Guang. Research on measures to improve stability of the power system // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 742. P. 648–652. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.742.648>.
3. Guliyev H.B., Tomin N.V., Ibrahimov F.S. Methods of intelligent protection from asymmetrical conditions in electric networks // Sustainable Development and Smart Management, ENERGY-21E3S: Web of Conferences (Irkutsk, 7–11 September 2020). Irkutsk: EDP Sciences, 2020. Vol. 209. Iss. 13. P. 07004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020907004>. EDN: ZGGGCU.
4. Авербух А.М. Примеры расчетов неполнофазных режимов и коротких замыканий. Л.: Энергия, 1979. 184 с.
5. Bermúdez J., Leanez F., Alvarez M., Khodr H.M. A generalized methodology based on symmetrical components for multiple-fault calculation in power systems // Electric Power Components and Systems. 2009. Vol. 37. Iss. 10. P. 1081–1101. <https://doi.org/10.1080/15325000902954003>.
6. Youssef K.H., Abouelenin F.M. Analysis of simultaneous unbalanced short circuit and open conductor faults in power systems with untransposed lines and six-phase sections // Alexandria Engineering Journal. 2016. Vol. 55. Iss. 1. P. 369–377. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.01.020>.

7. Etezadi-Amoli M. Simultaneous fault simulation using the generalized method of fault analysis // The Proceedings of the Twenty-First Annual North American Power Symposium (Rolla, 9 October 1989). Rolla, 1989. P. 188–191. <https://doi.org/10.1109/NAPS.1989.7709>.
8. Perzyński T., Levoniuk V., Figura R. Transient electromagnetic processes analysis in high voltage transmission lines during two-phase short circuits // Sensors. 2023. Vol. 23. Iss. 1. P. 298. <https://doi.org/10.3390/s23010298>. EDN: QYKTTN.
9. Kai T., Funabashi T. A new method for the analysis of cross-country multifaults in a double-circuit transmission line // Electrical Engineering in Japan. 1993. Vol. 113. Iss. 6. P. 48–60. <https://doi.org/10.1002/eej.4391130605>.
10. Ou Ting-Chia. A novel unsymmetrical faults analysis for microgrid distribution systems // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2012. Vol. 43. Iss. 1. P. 1017–1024. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.05.012>.
11. Talaq J. Fault calculations using three terminal Thevenin's equivalent circuit // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2011. Vol. 33. Iss. 8. P. 1462–1469. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2011.06.027>.
12. Heringer W.R., Cordeiro M.A.M., Paye J.C.H., Sousa A.L., Leão A.P., Vieira J.P.A., et al. Reproduction of a high impedance double line-to-ground fault using real oscillography data // IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition - Latin America. 2020. <https://doi.org/10.1109/TDLA47668.2020.9326209>.
13. Jia Qi, Dong Xinzhou, Shi Shenxing, He Xin. Non-communication protection for single-phase-to-ground fault feeder in neutral non-effectively grounded distribution system // IEEE Power and Energy Society General Meeting. 2018. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2018.8586136>.
14. Качанов А.Н., Чернышов В.А., Королева Т.Г. Автоматический перевод двойных замыканий на землю в однофазные как способ повышения эффективности функционирования сетей 6–10 кВ // Электрические сети: надежность, безопасность, энергосбережение и экономические аспекты: матер. III Междунар. науч.-практ. конф. (г. Казань, 19 апреля 2023 г.). Казань: КГЭУ, 2023. С. 23–30. EDN: KMUKVZ.
15. Budahs M., Rozenkrons J., Staltmanis A. Thermal stability of cables metallic covers in the case of double earth faults in middle voltage networks // IEEE Russia Power Technology: Conference. 2005. <https://doi.org/10.1109/PTC.2005.4524581>.
16. Rezapour H., Jamali S., Bahmanyar A. Review on artificial intelligence-based fault location methods in power distribution networks // Energies. 2023. Vol. 16. Iss. 12. P. 4636. <https://doi.org/10.3390/en16124636>.
17. Pourahmadi-Nakhli M., Safavi A.A. Path characteristic frequency-based fault locating in radial distribution systems using wavelets and neural networks // IEEE Transactions on Power Delivery. 2011. Vol. 26. Iss. 2. P. 772–781. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2050218>.
18. Thukaram D., Khincha H.P., Vijaynarasimha H.P. Artificial neural network and support vector machine approach for locating faults in radial distribution systems // IEEE Transactions on Power Delivery. 2005. Vol. 20. Iss. 2. P. 710–721. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2005.844307>.
19. Rafinia A., Moshtagh J. A new approach to fault location in three-phase underground distribution system using combination of wavelet analysis with ANN and FLS // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2014. Vol. 55. P. 261–274. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.09.011>.
20. Huang Lei, Zhang Xianwen, Yan Peng, Han Lu, Long Xiaohui. Design and optimization of distribution network short circuit fault location algorithm based on DTU and FPI // International Conference on Power, Electrical Engineering, Electronics and Control. 2023. P. 886–890. <https://doi.org/10.1109/PEEEEC60561.2023.00173>.
21. Goudarzi M., Vahidi B., Naghizadeh R.A., Hosseini S.H. Improved fault location algorithm for radial distribution systems with discrete and continuous wavelet analysis // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2015. Vol. 67. Iss. 4. P. 423–430. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.12.014>.
22. Shi Shenxing, Zhu Beier, Lei Aoyu, Dong Xinzhou. Fault location for radial distribution network via topology and reclosure-generating traveling waves // IEEE Transactions on Smart Grid. 2019. Vol. 10. Iss. 6. P. 6404–6413. <https://doi.org/10.1109/TSG.2019.2904210>.
23. Xie Liwei, Luo Longfu, Li Yong, Zhang Yu, Cao Yijia. A traveling wave-based fault location method employing VMD-TEO for distribution network // IEEE Transactions on Power Delivery. 2020. Vol. 35. Iss. 4. P. 1987–1998. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2019.2959188>.
24. Kulikov A.L., Osokin V.J., Obalin M.D. Improving accuracy the fault location on transmission line 6–35 kV for double earth fault // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (Moscow, 15–18 May 2018). Moscow: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. P. 8728607. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2018.8728607>. EDN: PGYMCG.
25. Zheng Rong-jin, Lin Xiangning, Zhao Feng, Bo Zhiqian. A novel single-ended fault location method for locating double-phase to earth faults // IEEE Power and Energy Society General Meeting. 2011. <https://doi.org/10.1109/PES.2011.6039005>.
26. Rozenkrons J., Staltmanis A. Middle voltage cable power lines relay protection against double ground faults influence to power supply reliability // Electric Power Quality and Supply Reliability. 2012. <https://doi.org/10.1109/PQ.2012.6256224>.
27. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем: монография. Иркутск: ИрГУПС, 2005. 273 с. EDN: PTVITA.
28. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование систем тягового электроснабжения постоянного тока на основе фазных координат: монография. М.: Директ-Медиа, 2023. 156 с. EDN: LIJPRI.



29. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование сложных повреждений в электрических сетях на основе фазных координат // Системы. Методы. Технологии. 2010. № 2. С. 46–52. EDN: NEAKFR.

### References

1. Zhdanov P.S. *Energy systems stability issues*. Moscow: Energy; 1979, 456 p. (In Russ.).
2. Shi Xiu Feng, Mu Shi Guang. Research on measures to improve stability of the power system. *Applied Mechanics and Materials*. 2015;742:648-652. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.742.648>.
3. Guliyev H.B., Tomin N.V., Ibrahimov F.S. Methods of intelligent protection from asymmetrical conditions in electric networks. In: *Sustainable Development and Smart Management, ENERGY-21E3S: Web of Conferences*. 7–11 September 2020, Irkutsk. Irkutsk: EDP Sciences; 2020, vol. 209, iss. 13, p. 07004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020907004>. EDN: ZGGGCU.
4. Averbukh A.M. *Calculation examples of open-phase modes and short circuits*. Leningrad: Energy; 1979, 184 p. (In Russ.).
5. Bermúdez J., Leanez F., Alvarez M., Khodr H.M. A generalized methodology based on symmetrical components for multiple-fault calculation in power systems. *Electric Power Components and Systems*. 2009;37(10):1081-1101. <https://doi.org/10.1080/15325000902954003>.
6. Youssef K.H., Abouelenin F.M. Analysis of simultaneous unbalanced short circuit and open conductor faults in power systems with untransposed lines and six-phase sections. *Alexandria Engineering Journal*. 2016;55(1):369-377. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.01.020>.
7. Etezadi-Amoli M. Simultaneous fault simulation using the generalized method of fault analysis. In: *The Proceedings of the Twenty-First Annual North American Power Symposium*. 9 October 1989, Rolla. Rolla; 1989, p. 188-191. <https://doi.org/10.1109/NAPS.1989.7709>.
8. Perzyński T., Levoniuk V., Figura R. Transient electromagnetic processes analysis in high voltage transmission lines during two-phase short circuits. *Sensors*. 2023;23(1):298. <https://doi.org/10.3390/s23010298>. EDN: QYKTTN.
9. Kai T., Funabashi T. A new method for the analysis of cross-country multifaults in a double-circuit transmission line. *Electrical Engineering in Japan*. 1993;113(6):48-60. <https://doi.org/10.1002/eej.4391130605>.
10. Ou Ting-Chia. A novel unsymmetrical faults analysis for microgrid distribution systems. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2012;43(1):1017-1024. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.05.012>.
11. Talaq J. Fault calculations using three terminal Thevenin's equivalent circuit. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2011;33(8):1462-1469. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2011.06.027>.
12. Heringer W.R., Cordeiro M.A.M., Paye J.C.H., Sousa A.L., Leão A.P., Vieira J.P.A., et al. Reproduction of a high impedance double line-to-ground fault using real oscillography data. In: *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition - Latin America*. 2020. <https://doi.org/10.1109/TDLA47668.2020.9326209>.
13. Jia Qi, Dong Xinzhou, Shi Shenxing, He Xin. Non-communication protection for single-phase-to-ground fault feeder in neutral non-effectively grounded distribution system. In: *IEEE Power and Energy Society General Meeting*. 2018. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2018.8586136>.
14. Kachanov A.N., Chernyshov V.A., Koroleva T.G. Automatic conversion of double earth fault into single-phase as a way to increase the efficiency of the functioning of 6-10 kV networks. In: *Elektricheskie seti: nadezhnost', bezopasnost', energosberezhenie i ekonomicheskie aspekty: materialy III Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Electric networks: reliability, safety, energy saving and economic aspects: Proceedings of 3d International scientific and practical conference*. 19 April 2023, Kazan'. Kazan': Kazan State Power Engineering University; 2023, p. 23-30. (In Russ.). EDN: KMUKVZ.
15. Budahs M., Rozenkrons J., Staltmanis A. Thermal stability of cables metallic covers in the case of double earth faults in middle voltage networks. In: *IEEE Russia Power Technology: Conference*. 2005. <https://doi.org/10.1109/PTC.2005.4524581>.
16. Rezapour H., Jamali S., Bahmanyar A. Review on artificial intelligence-based fault location methods in power distribution networks. *Energies*. 2023;16(12):4636. <https://doi.org/10.3390/en16124636>.
17. Pourahmadi-Nakhli M., Safavi A.A. Path characteristic frequency-based fault locating in radial distribution systems using wavelets and neural networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2011;26(2):772-781. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2050218>.
18. Thukaram D., Khincha H.P., Vijaynarasimha H.P. Artificial neural network and support vector machine approach for locating faults in radial distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2005;20(2):710-721. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2005.844307>.
19. Rafinia A., Moshtagh J. A new approach to fault location in three-phase underground distribution system using combination of wavelet analysis with ANN and FLS. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2014;55:261-274. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.09.011>.
20. Huang Lei, Zhang Xianwen, Yan Peng, Han Lu, Long Xiaohui. Design and optimization of distribution network short circuit fault location algorithm based on DTU and FPI. In: *International Conference on Power, Electrical Engineering, Electronics and Control*. 2023;886-890. <https://doi.org/10.1109/PEEEEC60561.2023.00173>.
21. Goudarzi M., Vahidi B., Naghizadeh R.A., Hosseinian S.H. Improved fault location algorithm for radial distribution systems with discrete and continuous wavelet analysis. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2015;67(4):423-430. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.12.014>.

22. Shi Shenxing, Zhu Beier, Lei Aoyu, Dong Xinzhou. Fault location for radial distribution network via topology and reclosure-generating traveling waves. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2019;10(6):6404-6413. <https://doi.org/10.1109/TSG.2019.2904210>.
23. Xie Liwei, Luo Longfu, Li Yong, Zhang Yu, Cao Yijia. A traveling wave-based fault location method employing VMD-TEO for distribution network. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2020;35(4):1987-1998. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2019.2959188>.
24. Kulikov A.L., Osokin V.J., Obalin M.D. Improving accuracy the fault location on transmission line 6–35 kV for double earth fault. In: *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*. 15–18 May 2018, Moscow. Moscow: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.; 2018, p. 8728607. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2018.8728607>. EDN: PGYMCG.
25. Zheng Rong-jin, Lin Xiangning, Zhao Feng, Bo Zhiqian. A novel single-ended fault location method for locating double-phase to earth faults. In: *IEEE Power and Energy Society General Meeting*. 2011. <https://doi.org/10.1109/PES.2011.6039005>.
26. Rozenkrons J., Staltmanis A. Middle voltage cable power lines relay protection against double ground faults influence to power supply reliability. In: *Electric Power Quality and Supply Reliability*. 2012. <https://doi.org/10.1109/PQ.2012.6256224>.
27. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. *Multiasymmetric modes of electric systems*. Irkutsk: Irkutsk State Transport University; 2005, 273 p. (In Russ.). EDN: PTVITA.
28. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. *Modeling of DC traction power supply systems based on phase coordinates*. Moscow: Direct-Media; 2023, 156 p. (In Russ.). EDN: LIJPRI.
29. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modelling of difficult damages in electric networks on the basis of phase coordinates. *Systems. Methods. Technologies*. 2010;2:46-52. (In Russ.). EDN: NEAKFR.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

##### Крюков Андрей Васильевич,

д.т.н., профессор,  
профессор кафедры электроэнергетики транспорта,  
Иркутский государственный университет  
путей сообщения,  
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия  
✉ and\_kryukov@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>

##### Andrey V. Kryukov,

Dr. Sci (Eng.), Professor,  
Professor of the Department of Transport  
Electrical Engineering,  
Irkutsk State Transport University,  
15, Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia  
✉ and\_kryukov@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>

##### Овечкин Илья Сергеевич,

аспирант,  
Иркутский государственный университет  
путей сообщения,  
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия  
iliaov2015@mail.ru

##### Ilya S. Ovechkin,

Postgraduate Student,  
Irkutsk State Transport University,  
15, Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia  
iliaov2015@mail.ru

#### Заявленный вклад авторов

#### Authors' contribution

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

#### Конфликт интересов

#### Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

#### Information about the article

Статья поступила в редакцию 23.09.2025 г.; одобрена после рецензирования 30.10.2025 г.; принята к публикации 08.11.2025 г.

The article was submitted 23.09.2025; approved after reviewing 30.10.2025; accepted for publication 08.11.2025.

## ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 621.311

EDN: MULHFH

DOI: 10.21285/1814-3520-2025-4-550-566



## Определение оптимальных мест строительства ветровых и солнечных электростанций в электроэнергетической системе

О.Ю. Сигитов<sup>1✉</sup>, К.В. Суслов<sup>2</sup><sup>1</sup>Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», Москва, Россия

**Резюме.** Цель – разработка однокритериальной математической модели выбора оптимальных мест строительства ветровых и солнечных электростанций в составе электроэнергетической системы с учетом нестабильности их генерации и экономической эффективности. В качестве целевых функций рассмотрены максимизация суммарной выработки электрической энергии, минимизация суммарной скорости изменения мощности, минимизация суммарного приращения мощности и максимизация базисной мощности при ограничениях на установленную мощность и число единиц оборудования на площадках. Тестовая система для апробации модели включала шесть возможных площадок под ветровые электростанции и две площадки под солнечные электростанции суммарной установленной мощностью 600 МВт. Разработан алгоритм, объединяющий моделирование суточных графиков мощности одной ветроэнергетической установки и группы фотоэлектрических модулей для набора потенциальных площадок с различной орографией и продолжительностью светового дня. Далее была проведена оптимизация распределения установленной мощности между площадками. Апробация модели на тестовой системе показала, что выбор целевой функции существенно изменяет конфигурацию оптимальной системы и распределение мощности между площадками. Переход от критерия максимальной выработки электрической энергии к критериям, связанным с динамикой мощности, снижает выработку на 6-7%, но позволяет уменьшить суммарную скорость изменения мощности и суммарное приращение мощности до 19–39%, а также увеличить базисную мощность до 38%. Предложенный алгоритм оптимизации позволяет систематизировать принятие решений при выборе конфигурации систем возобновляемых источников с наименьшей внутренней волатильностью генерации. Рекомендации по выбору целевой функции зависят от характеристик маневренности конкретной энергосистемы и могут использоваться на ранних этапах планирования строительства объектов возобновляемой энергетики.

**Ключевые слова:** энергосистемы, возобновляемые источники энергии, ветровые электростанции, солнечные электростанции, коэффициент использования установленной мощности, скорость изменения мощности, базисная мощность, оптимизация, однокритериальная задача, маневренность

**Для цитирования:** Сигитов О.Ю., Суслов К.В. Определение оптимальных мест строительства ветровых и солнечных электростанций в электроэнергетической системе // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 4. С. 550–566. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-4-550-566>. EDN: MULHFH.

## POWER ENGINEERING

Original article

## Optimal siting of wind and solar power plants in an electric power system

Oleg Yu. Sigitov<sup>1✉</sup>, Konstantin V. Suslov<sup>2</sup><sup>1</sup>Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia<sup>2</sup>National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia

**Abstract.** This study developed a single-criterion mathematical model for selecting optimal sites for wind and solar power plants within an electric power system, taking into account renewable generation variability and economic efficiency. The objective functions included maximizing total electricity output, minimizing the overall rate of power change, minimizing total power increments, and maximizing base power, subject to constraints on installed capacity and the number of units per site. A test system was designed with six potential sites for wind power plants and two sites for solar power plants, with a combined installed capacity of 600 MW. The study proposed an algorithm integrating daily power profile simulations for a single wind turbine and a photovoltaic module group across candidate sites with vary-

ing topography and daylight duration. Optimization of installed capacity distribution among sites was then performed. Application of the model to the test system showed that the type of objective function significantly affects the configuration of the optimal system and the allocation of capacity among sites. Transitioning from the criterion of maximum electricity output to criteria related to power dynamics reduces generation by 6–7%, while decreasing the total rate of power change and total power increments by 19–39% and increasing base power by up to 38%. The proposed optimization algorithm provides a systematic framework for decision-making in the design of renewable energy systems with minimal internal volatility of generation. The selection of the objective function depends on the flexibility characteristics of a given power system and can be applied at early stages of planning renewable energy facilities.

**Keywords:** power systems, renewable energy sources, wind farms, solar power plants, capacity factor, rate of power change, base power, optimization, single-criterion problem, flexibility

**For citation:** Sigítov O.Yu., Suslov K.V. Optimal siting of wind and solar power plants in an electric power system. *iPolytech Journal*. 2025;29(4):550-566. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-4-550-566>. EDN: MULHFH.

## ВВЕДЕНИЕ

В 2025 г. установленная мощность возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в энергосистеме России составила 6,64 ГВт. В структуре установленной мощности ветровые электростанции составляют 2,57 ГВт, солнечные электростанции – 2,55 ГВт, и малые гидроэлектростанции мощностью до 50 МВт – 1,32 ГВт. Помимо этого, введены электростанции, функционирующие на основе биомассы, биогаза, свалочного газа, твердых бытовых отходов и геотермальной энергии совокупной мощностью более 200 МВт. Средний коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) электростанций в 2023 г. составил для солнечных электростанций (СЭС) 14,4%, ветровых электростанций (ВЭС) – 31,1%, малых гидроэлектростанций (ГЭС) – 49,8%. При этом для СЭС и малых ГЭС наиболее высокие показатели КИУМ были достигнуты в летние месяцы: с мая по август КИУМ СЭС находился в диапазоне 20,0–20,7%, КИУМ малых ГЭС – 67,8–90,8%. Для ВЭС наибольшие значения КИУМ зафиксированы<sup>3</sup> в январе и декабре – 51,7 и 42,6%.

Активное развитие ВИЭ в энергосистеме России и в мире связано со многими факторами – техническими, экономическими и экологическими [1, 2].

Ветровые электростанции в настоящее время демонстрируют высокие темпы роста. В период с 2005 по 2023 г. установленная мощность ВЭС в мире выросла почти в 17 раз<sup>4</sup>, с 59 ГВт до 1021 ГВт. За период 2009–2025 гг. мировая приведенная стоимость (LCOE от англ. Levelized Cost of Energy [3]) наземных ВЭС снизилась<sup>5</sup> в 2,2 раза – с 0,135 до 0,061 долл США/кВт·ч. Повышение эффективности ветроэлектрических установок (ВЭУ) напрямую связано с габаритными характеристиками. Чем больше ометаемая площадь ротора ВЭУ, тем больше энергии ветрового потока можно преобразовать в электрическую энергию и тем ниже себестоимость производства электрической энергии. Номинальная мощность<sup>6,7</sup> современных ВЭУ достигает 12–15 МВт при диаметре ротора 211–236 м [4].

Солнечные электростанции за сопоставимый период с 2005 по 2023 г. увеличили установленную мощность<sup>8</sup> в мире в 325 раз, с 5 ГВт до 1624 ГВт. За аналогичный период мировая приведенная стоимость новых модулей СЭС снизилась в 6,2 раза – с 0,359 до 0,058 долл США/кВт·ч. Основное направление увеличения эффективности солнечных электростанций – повышение коэффициента полезного действия (КПД) солнечных моду-

<sup>3</sup>Рынок возобновляемой энергетики России: текущий статус и перспективы развития // Ассоциации развития возобновляемой энергетики. Режим доступа: <https://rreda.ru/> (дата обращения: 10.09.2025).

<sup>4</sup>Global wind report 2025 // Global Wind Energy Council. Режим доступа: <https://www.gwec.net/reports> (дата обращения: 10.09.2025).

<sup>5</sup>Lazard's Levelized Cost of Energy+ (LCOE+) // Lazard. Режим доступа: <https://www.lazard.com/research-insights/levelized-cost-of-energyplus-lcoeplus/> (дата обращения: 10.09.2025).

<sup>6</sup>Vestas. V236-15.0 MW™ offshore wind turbine. Режим доступа: <https://www.vestas.com/en/products/offshore/V236-15MW> (дата обращения: 10.09.2025).

<sup>7</sup>GE Vernova. Haliade-X offshore wind turbine. Режим доступа: <https://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/offshore-wind/haliade-x-offshore-turbine> (дата обращения: 10.09.2025).

<sup>8</sup>IEA PVPS. Task 1. Strategic PV analysis and outreach – 2023. Snapshot of global PV markets. Режим доступа: <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2024/04/Snapshot-of-Global-PV-Markets-1.pdf> (дата обращения: 10.09.2025).



лей. В 2006 г. средний КПД солнечных электростанций составлял 13,2% для мультикристаллических фотоэлектрических модулей и 14,7% для монокристаллических фотоэлектрических модулей. В 2018 г. значения КПД выросли до 17 и 18%, соответственно, и продолжают расти<sup>9</sup>.

Учитывая положительные тенденции всестороннего развития ВИЭ, новые источники генерации становятся конкурентными в сравнении с традиционными источниками энергии (теплоэлектростанций, ГЭС, атомных электростанций) [5, 6]. В результате этого при формировании «Генеральной схемы размещения объектов электроэнергетики до 2042 г.» предусмотрено строительство 17,2 ГВт ВИЭ (ВЭС и СЭС)<sup>10</sup>. Поэтому задача оптимального размещения ветровых и солнечных электростанций в электроэнергетической системе России является актуальной на долгосрочную перспективу.

Очевидно, что ветровые и солнечные электростанции имеют свои характерные режимы работы. Ветровые электростанции имеют нестабильный график генерации, обусловленный изменениями скорости и направления ветра [7]. Отдельно на мощность ветрового потока и его повторяемость влияют местные особенности, связанные с местными циркуляциями атмосферы (например, бризовые и горно-долинные циркуляции) [8, 9]. Отличительной особенностью солнечных электростанций являются ночной минимум нагрузки, дневной максимум нагрузки и зависимость от погодных условий и продолжительности светового дня [10]. На примере суточных графиков нагрузки ВЭС и СЭС в энергосистеме Австралии можно увидеть режимы работы как отдельных ВЭС и СЭС, так и результирующие графики нагрузки<sup>10</sup> по всем источникам – рис. 1.

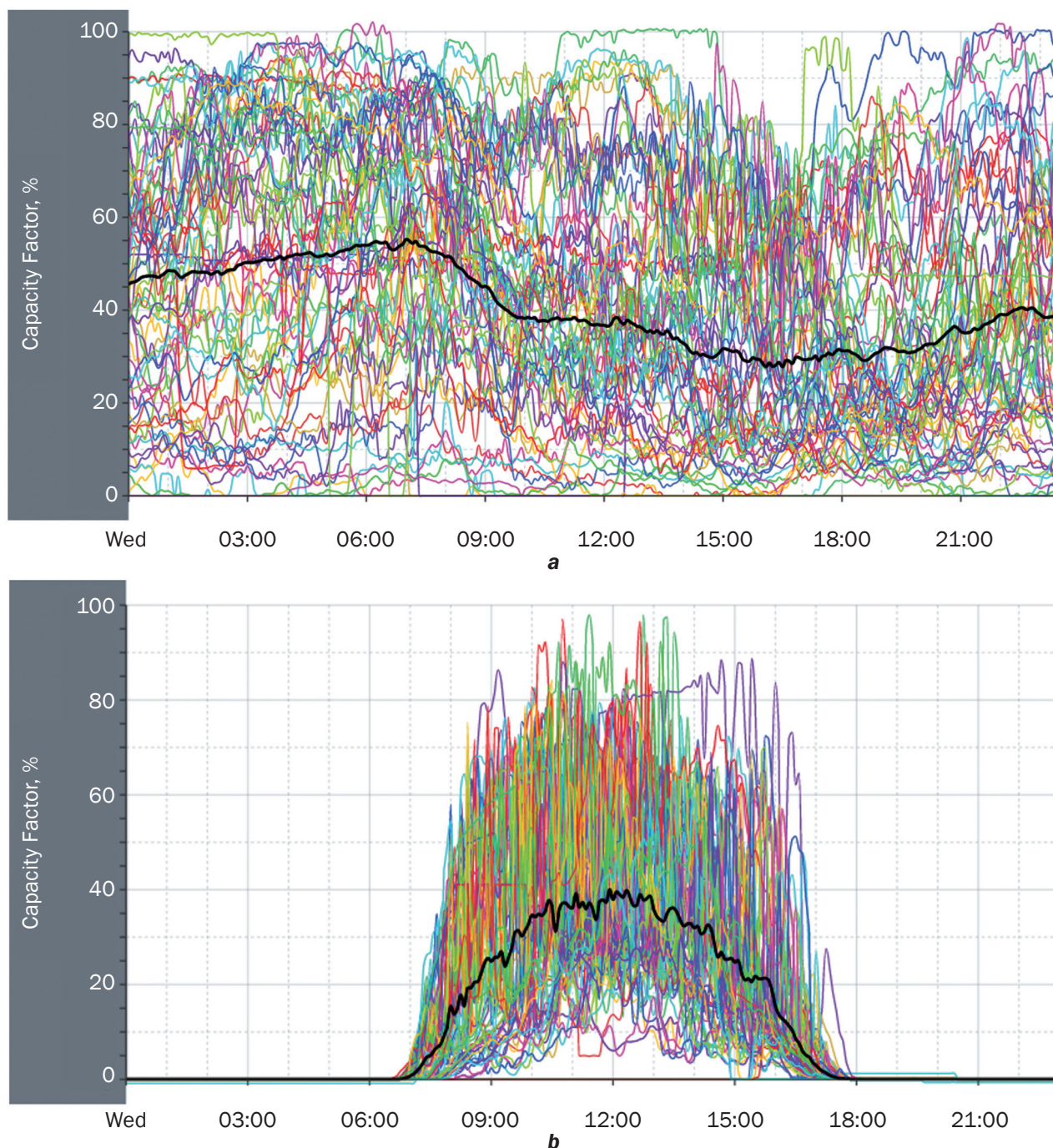
В составе ЭЭС работают 69 СЭС с установленной мощностью от 5 до 324 МВт и суммарной установленной мощностью 5,9 ГВт, а также 69 ВЭС с установленной мощностью от 20 до 452 МВт и суммарной установленной мощностью 8,5 ГВт. Нагрузка энерго-

системы составляет около 27 ГВт. Суточные графики нагрузки ВЭС и СЭС показывают, что колебания мощности отдельных электростанций накладываются друг на друга и, таким образом, общая интенсивность колебаний мощности всех объектов ВИЭ снижается. Поэтому оптимальное распределение ВЭС и СЭС позволяет получить оптимальный результирующий график выдачи мощности и может повысить надежность управления электроэнергетическим режимом с точки зрения сохранения баланса мощности. Положительный эффект результирующего графика выдачи мощности ВИЭ подтверждается различными исследованиями<sup>11</sup> [11–13]. В связи с этим целью исследования является разработка математических моделей определения оптимальных мест строительства ветровых и солнечных электростанций в электроэнергетической системе. Для ее решения используются разработанные ранее методы однокритериальной оптимизации мест строительства ВЭС [14], позволяющие формализовать выбор целевой функции при решении задачи эффективного размещения ВЭС и СЭС. Соответственно, научная новизна заключается в расширении однокритериальной модели на комбинированную систему ВЭС и СЭС и усовершенствовании набора показателей, характеризующих нестабильный характер генерации систем, состоящих из возобновляемых источников энергии. Необходимо подчеркнуть, что при решении задач интеграции ВИЭ в энергосистему ключевое значение имеют не только экономические показатели ВИЭ (например, выработка электрической энергии, коэффициент использования установленной мощности), но и режимные характеристики ВИЭ, определяющие их совместимость с традиционной генерацией (например, интенсивность колебаний мощности и базисная мощность, которые особенно критичны для оценки необходимости резервирования мощности ВИЭ традиционными электростанциями или системами накопления электрической энергии).

<sup>9</sup>О Генеральной схеме размещения объектов электроэнергетики до 2042 года: распоряжение Правительства Российской Федерации от 30.12.2024 № 4153-р.

<sup>10</sup>Australian Energy Market // Aneroid Energy. Режим доступа: <https://anero.id/energy> (дата обращения: 10.09.2025).

<sup>11</sup>Winds V. Encyclopedia of Atmospheric Sciences (Third Edition). 2026. Vol. 1. P. 921–942. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-96026-7.00213-7>.



**Рис. 1.** Изменение коэффициента использования установленной мощности ветровых (а) и солнечных электростанций (b) в течение суток 25.05.2022. Цветные линии показывают изменение коэффициента использования установленной мощности каждой электростанции, а черная линия показывает результирующий коэффициент использования установленной мощности всех ветровых/солнечных электростанций

**Fig. 1.** Daily changes of the capacity factor of wind farms (a) and solar power plants (b) during May 25, 2022. Colored lines show the variations of the capacity factor of each power plant, and the black line shows the resulting capacity factor of all wind farms and solar power plants

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящее время исследованиям, посвященным вопросам выбора оптимальных мест строительства объектов возобновляемой энергетики, в таких регионах мира, как Европа, Азия, Северная и Южная Америка,

уделяется большое внимание. В России данное направление также получило свое развитие, и результаты таких исследований особенно актуальны в задачах создания гибридных энергокомплексов. Речь идет о системах, комбинирующих дизельную генерацию, ве-



троэнергетические и солнечные электростанции, накопители энергии и малые гидроэлектростанции, предназначенных для энергообеспечения изолированных территорий [15]. Обзор современных методик выбора мест размещения ВИЭ был систематизирован в рамках предыдущих исследований [14].

Оптимизацию размещения объектов ВИЭ в энергосистеме можно рассматривать как подзадачу более общей задачи по оптимизации структуры генерирующих мощностей, целью которой является покрытие прогнозируемого спроса на мощность и электроэнергию [16]. Если решение данной задачи свидетельствует о необходимости ввода мощностей ветровой и солнечной генерации, то возникает задача определения их оптимального местоположения. Методологической основой для решения этой задачи в рамках настоящего исследования служит однокритериальная оптимизационная модель выбора площадок для строительства ВИЭ (рис. 2).

В качестве критериев оптимизации рассматривается показатель, характеризующий максимальную экономическую эффективность ВЭС и СЭС через максимизацию выработки электрической энергии, а также показатели, отражающие маневренные свойства совокупной генерации ВЭС и СЭС: минимальная скорость изменения мощности, минимальное приращение мощности и максимальная базисная мощность.

Приращение мощности – это абсолютное изменение выходной мощности электростанции (ВЭС, СЭС) между двумя моментами времени, выражаемое в единицах мощности (МВт, кВт). Положительное приращение мощности свидетельствует об увеличении мощности электростанции, отрицательное – о снижении мощности.

Скорость изменения мощности – это величина изменения мощности электростанции (ВЭС, СЭС) в единицу времени, выражаемая в МВт/ч или МВт/мин. Положительная скорость изменения мощности соответствует нагружению электростанции, отрицательная – разгрузке электростанции.

Базисная мощность – это минимальное значение суммарной мощности всех электростанций (ВЭС, СЭС), сохраняющееся непрерывно не менее заданного числа шагов дискретизации (например, каждый час в течение суток), и по физическому смыслу соответству-

ет минимальному гарантированному уровню генерации, выражаемому в единицах мощности (МВт, кВт). Следует подчеркнуть, что для отдельных ВЭС и СЭС без накопителей на суточном горизонте базисная мощность во многих случаях приближается к нулю, поэтому данный критерий используется преимущественно при анализе агрегированных систем ВИЭ или при наличии высокоманевренных источников и систем накопления энергии.

Интегрирование перечисленных показателей по временным интервалам (от минутных до часовых) за рассматриваемый период времени (от суток до года) позволяет оценить временную изменчивость режимов работы ВЭС и СЭС. Указанные интегральные показатели критичны для оценки влияния ВИЭ на режимы работы традиционных электростанций и определяют требования к маневренным характеристикам генерирующего оборудования.

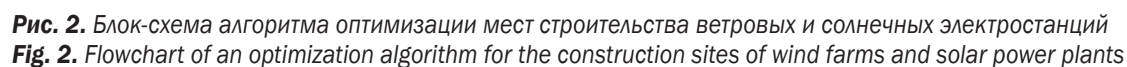
В соответствии с разработанным алгоритмом оптимизации, на первом этапе выбираются потенциальные площадки для строительства источников генерации на базе ВИЭ. Для каждой из этих площадок анализируются ветровой потенциал  $V(j, m)$  и солнечная инсоляция  $G(j, s)$ , на основании которых моделируется график генерации одной ВЭУ и одной группы фотоэлектрических модулей (ФЭМ). Данная процедура производится для каждой потенциальной точки размещения.

Далее проводится оптимизация для максимизации совокупной выработки ( $N_{ВИЭ}$ ), в результате чего формируется ранжированный список приоритетных мест для размещения ВИЭ. При этом учитываются ограничения по размещению максимального количества ВЭУ и групп ФЭМ в потенциальных местах. В этом случае целевая функция формулируется следующим образом:

$$N_{ВИЭ} \rightarrow \max; \quad (1)$$

$$\begin{aligned} N_{ВИЭ} &= N_{ВЭС} + N_{СЭС} = \\ &= \sum_{m=1}^l \sum_{j=1}^T P_{jm} \cdot t_j \cdot N_m + \sum_{s=1}^d \sum_{j=1}^T P_{js} \cdot t_j \cdot M_s, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $N_m$  – количество ветроэнергетических установок в составе ветроэлектростанции  $m$ ;  $l$  – количество ВЭС;  $P_{jm}$  – значение мощности



Полученные данные служат входными параметрами для модели однокритериальной оптимизации размещения ВИЭ. В рамках этой модели производится перераспределение ВЭУ и ФЭМ между электростанциями, обеспечивающими наибольшую выработку

Если по критерию максимальной выработки оптимальной признана только одна площадка ВЭС/СЭС, то перераспределение проводится среди локаций с приемлемым КИУМ. Критерии приемлемости определены на основе анализа статистики. КИУМ ВЭС в энергосистеме России изменяется в среднем от 16% (в летний период) до 40% (в зим-



ний период). Средняя величина КИУМ современных континентальных ВЭС в мире<sup>11</sup> составляет около 30–35%, а офшорных<sup>12</sup> ВЭС – около 35–55%. Учитывая российский и зарубежный опыт, приемлемое значение КИУМ для ВЭС можно установить от 30% и выше, в зависимости от рассматриваемого места строительства. У СЭС среднее значение КИУМ в энергосистеме России составляет от 4% (зимой) до 21% (летом). Среднее значение КИУМ в мире составило около 17% в 2022 г. [17]. Таким образом, на основании анализа российского и международного опыта, значение КИУМ для СЭС в зависимости от локальных условий можно установить на уровне от 10%.

Целевые функции по критерию минимальной интенсивности колебаний мощности системы ВИЭ представляются в виде минимума суммы модулей скоростей изменения мощности ( $dP_{ВИЭ}/dt$ ) и минимума суммы модулей приращения мощности ( $\Delta P_{ВИЭ}$ ):

$$\frac{dP_{ВИЭ}}{dt} \rightarrow \min; \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{dP_{ВИЭ}}{dt} &= \frac{dP_{ВЭС}}{dt} + \frac{dP_{СЭС}}{dt} = \\ &= \sum_{m=1}^l \sum_{j=1}^T \frac{(P_{jm} - P_{j+k,m}) \cdot N_m}{t_j - t_{j+k}} + \\ &+ \sum_{s=1}^d \sum_{j=1}^T \frac{(P_{js} - P_{j+k,s}) \cdot M_s}{t_i - t_{i+k}}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $dP_{ВЭС}/dt$  – скорость изменения выходной мощности ветроэлектростанции, МВт/мин;  $dP_{СЭС}/dt$  – скорость изменения мощности СЭС, МВт/мин;  $k$  – шаг измерения мощности ВЭС/СЭС, мин или ч.

$dP_{ВИЭ}/dt > 0$  соответствует нагружению ВЭС/СЭС с полученной скоростью,  $dP_{ВИЭ}/dt < 0$  соответствует разгрузке ВЭС/СЭС с полученной скоростью. При  $dP_{ВИЭ}/dt = 0$  мощность ВЭС/СЭС не изменяется.

$$\Delta P_{ВИЭ} \rightarrow \min; \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{ВИЭ} &= \Delta P_{ВЭС} + \Delta P_{СЭС} = \\ &= \sum_{m=1}^l \sum_{j=1}^T (P_{jm} - P_{j+k,m}) \cdot N_m + \\ &+ \sum_{s=1}^d \sum_{j=1}^T (P_{js} - P_{j+k,s}) \cdot M_s, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\Delta P_{ВЭС}$  – приращение мощности ВЭС, МВт;  $\Delta P_{СЭС}$  – приращение мощности СЭС, МВт.

$\Delta P_{ВИЭ} > 0$  соответствует нагружению ВЭС/СЭС,  $\Delta P_{ВИЭ} < 0$  соответствует разгрузке ВЭС/СЭС. При  $\Delta P_{ВИЭ} = 0$  мощность ВЭС/СЭС не изменяется.

Целевая функция, соответствующая критерию максимальной базисной мощности, имеет следующий вид:

$$P^{\text{баз}} \rightarrow \max; \quad (7)$$

$$P^{\text{баз}} = \sum_{m=1}^l \sum_{j=1}^T \sum_{s=1}^d \min(P_{jm} \cdot N_m + P_{js} \cdot M_s), \quad (8)$$

где  $P^{\text{баз}}$  – минимальная непрерывная мощность, которую может обеспечивать ветроэнергетическая установка и группа ФЭМ в течение заданного периода, МВт. Присутствие нулевых значений скорости ветра и солнечной инсоляции в массиве исходных данных является основанием для определения нулевого уровня базисной мощности в течение заданного периода.

Ограничениями для каждой целевой функции является максимальное количество ВЭУ, групп ФЭМ и максимальная установленная мощность ВЭС и СЭС, предусмотренных к строительству:

$$\sum_{m=1}^l N_m \leq N_{\text{max}}; \quad (9)$$

<sup>11</sup>Wind energy in Europe – 2020. Statistics and the outlook for 2021–2025. Brussels // WindEurope. Режим доступа: <https://windeurope.org/intelligence-platform/product/wind-energy-in-europe-2020-statistics-and-the-outlook-for-2021-2025/> (дата обращения: 10.09.2025).

<sup>12</sup>WindEurope. Wind energy in Europe in 2019 – trends and statistics. Brussels // WindEurope. Режим доступа: <https://windeurope.org/data/products/wind-energy-in-europe-in-2019-trends-and-statistics/> (дата обращения: 10.09.2025).

$$\sum_{s=1}^d M_s \leq M_{max}; \quad (10)$$

$$P_{вэс}^{уст} + P_{сэс}^{уст} = P_{виэ}^{макс}. \quad (11)$$

Согласно представленной методике, результатом оптимизации является оптимальная конфигурация системы ВИЭ, определяемая эффективным пространственным распределением ВЭУ и ФЭМ между электростанциями в соответствии с заданным критерием оптимизации.

Необходимо отметить, что в настоящей постановке задачи профиль электрической нагрузки и требования к резервам мощности явным образом не учитываются. Предполагается, что покрытие нагрузки и обеспечение резервов осуществляются другими источниками энергосистемы. Такая постановка позволяет определить конфигурации комплексов с наименьшей внутренней волатильностью генерации. Учет суточного и сезонного графиков потребления представляет собой отдельную и более сложную задачу, требующую моделирования режимов всей ЭЭС, и является предметом планируемых дальнейших исследований. Таким образом, предлагаемый алгоритм следует рассматривать как подзадачу более общей оптимизационной модели развития генерирующих мощностей, выполняющую предварительную фильтрацию конфигураций ВИЭ по их режимной совместимости. Практическое применение полученных результатов должно сопровождаться последующей проверкой отобранных конфигураций в рамках полной модели, включающей ретроспективный график нагрузки, ограничения по резервам мощности, а также сетевые ограничения.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Тестовая модель, состоящая из шести потенциальных мест строительства ветровых электростанций (ВЭС 1, ВЭС 2, ВЭС 3, ВЭС 4, ВЭС 5 и ВЭС 6) и двух потенциальных мест строительства солнечных электростанций (СЭС 1 и СЭС 2), предусматривает ввод ВЭС и СЭС с общей установленной мощностью 600 МВт. Ограничение по установленной мощности для каждого места принято 300 МВт.

В качестве базовой для проектируемой ВЭС принята ВЭУ мощностью 2,5 МВт – ти-

повой для наземных станций класс, предлагаемый различными производителями, в частности, Росатом L-100 2.5, Vestas V117-3.45, General Electric GE 3.4-137, Goldwind GW 100/2500. Ключевыми параметрами установок данного класса являются высота башни в интервале 100–150 м и диаметр ротора, составляющий порядка 100 м. Ключевым технологическим преимуществом по сравнению с высокомошными ВЭУ (7 МВт и более) является гибкость в выборе схемы генератора, допускающая использование как редукторной, так и безредукторной (прямой привод) технологии.

Для строительства СЭС выбраны гетероструктурные фотоэлектрические модули номинальной мощностью 445 Вт. Данные модули превосходят классические кремниевые по энергоэффективности, обеспечивая прирост выработки электроэнергии на протяжении всего жизненного цикла электростанции до 25%. Этот результат достигается благодаря их способности сохранять высокую производительность в широком диапазоне условий, включая облачную погоду и повышенные температуры окружающей среды. Для дальнейшего моделирования фотоэлектрические модули объединены в группу ФЭМ номинальной мощностью 0,1 МВт.

Суточные графики выдачи мощности ВЭУ и группы ФЭМ получены на основе индивидуальных для каждого пункта моделей суточной динамики скорости ветра и солнечной инсоляции. Модели выдачи мощности ВЭС сгруппированы по типу орографии (от греч. ὄρος – гора, ὑράφω – пишу, описываю): равнинные (ВЭС 1, 2, 3, 4, 6), прибрежные и горно-долинные (ВЭС 5). Модели солнечной инсоляции основаны на минимальной продолжительности светового дня (СЭС 1) и максимальной (СЭС 2) в условиях 43-й широты. Необходимо отметить, что данные модели являются идеализированными. Реальные графики выдачи мощности ВЭС и СЭС определяются целым комплексом факторов. Помимо рельефа местности, сезонного перераспределения тепла на поверхности и в атмосфере, перемещения циклонов и антициклонов, облачности, сезонных осадков, особенностей подстилающей поверхности, атмосферной динамики и уровня солнечной активности, существенную роль играют системные и эксплуатационные факторы ВЭС и

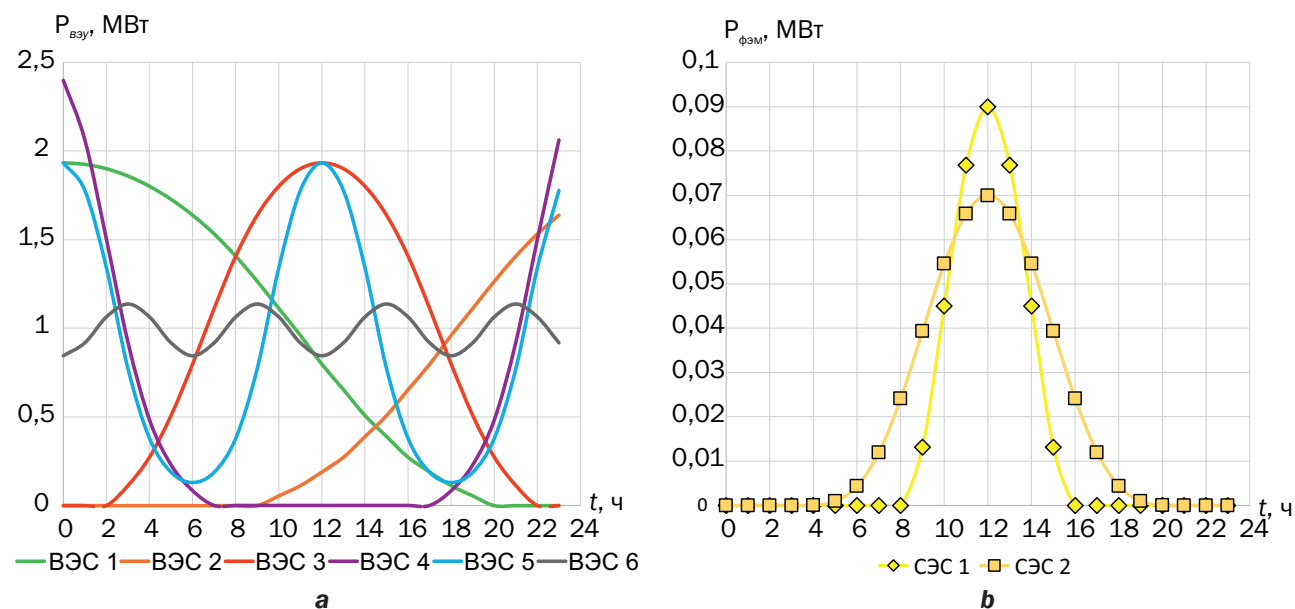
СЭС: ориентация ступицы, оптимальная расстановка ВЭУ внутри ВЭС, оптимальная работа системы управления (yaw/pitch control), обледенение и загрязнение лопастей, остановки ВЭУ, ориентация и угол наклона ФЭМ, температурный коэффициент ФЭМ, запыленность и отложение снега/льда, деградация ФЭМ, а также сетевые ограничения на выдачу мощности и потери в электрических сетях.

Несмотря на упрощения, данные модели применимы для решения оптимизационной задачи по локации ВЭС и СЭС, позволяя качественно оценить и продемонстрировать ожидаемые эффекты.

В табл. 1 приведены результаты моделирования суточной генерации одной ВЭУ и

одной группы ФЭМ для всех потенциальных вариантов размещения. На рис. 4 представлены интегральные суточные показатели для каждого потенциального места строительства ВЭС и СЭС при размещении максимального количества ВЭУ и групп ФЭМ в каждом месте: КИУМ, скорость изменения мощности и приращение мощности, а также базисная мощность.

На основании алгоритма решения однокритериальной задачи сначала оптимизация проводилась по критерию максимизации выработки электроэнергии. Результатом решения является ранжированный список перспективных мест размещения ВЭС и СЭС, представленный в табл. 1.



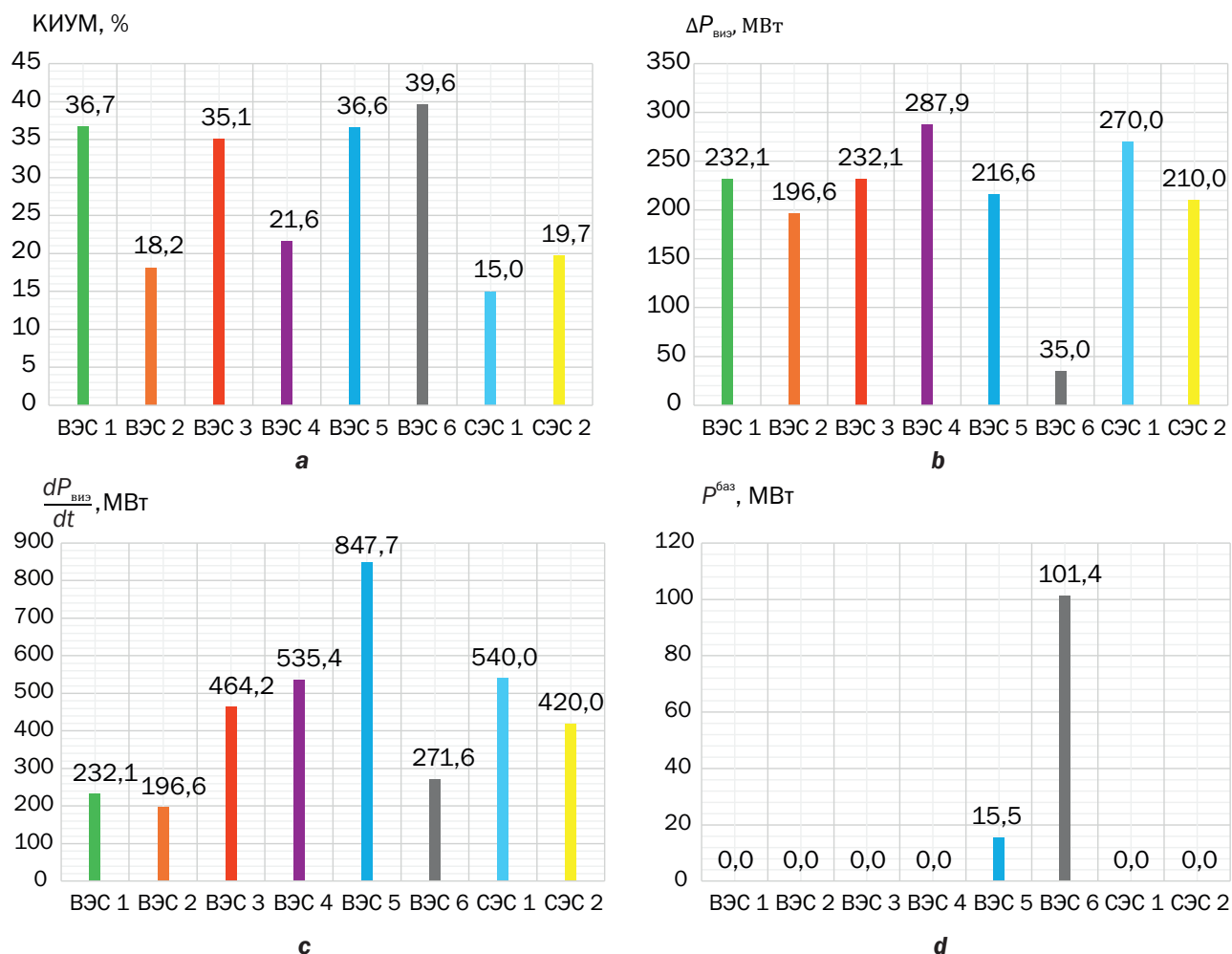
**Рис. 3.** Графики генерации ветроэлектрических установок (а) и группы фотоэлектрических модулей (б) в потенциальных местах строительства ветровых электростанций и солнечных электростанций в течение суток

**Fig. 3.** Generation graphs of wind turbines (a) and a group of photovoltaic modules (b) at potential wind and solar power plant construction sites during the day

**Таблица 1.** Ранжированный список потенциальных мест строительства ветровых и солнечных электростанций по критерию максимальной выработки электрической энергии

**Table 1.** A ranked list of potential sites for the construction of wind and solar power plants based on maximum electric energy generation

Название ветровых электростанций	$N_{вэу},$ тыс. кВт·ч	$N_m$	$N_{max}$	$M_s$	$M_{max}$
ВЭС 6	2854,1	120	120	–	–
ВЭС 1	2646,0	120	120	–	–
ВЭС 5	2634,2	0	120	–	–
ВЭС 3	2524,8	0	120	–	–
ВЭС 4	1555,4	0	120	–	–
СЭС 2	1417,5	–	–	0	3000
ВЭС 2	1308,0	0	120	–	–
СЭС 1	1080,0	–	–	0	3000



**Рис. 4.** Характеристики потенциальных мест строительства ветровых и солнечных электростанций в течение суток: а – коэффициент использования установленной мощности; б – приращение мощности;

с – скорость изменения мощности; д – базисная мощность

**Fig. 4.** Characteristics of potential construction sites of wind and solar power plants during a day: а – capacity factor, б – power increment, с – rate of power change, д – base power

В соответствии с предложенным алгоритмом решение, полученное по критерию максимальной экономической эффективности, считается окончательным. Оптимальными местами являются ВЭС 6 и ВЭС 1. В случае использования иных критериев (минимальная скорость изменения мощности, минимальное приращение мощности или максимальная базисная мощность) из рассмотрения исключаются ВЭС 4 и ВЭС 2, т.к. их коэффициент использования установленной мощности составляет менее 30% (рис. 4). В этом случае перераспределение генерирующих мощностей (ВЭУ и групп ФЭМ) осуществляется между оставшимися площадками: ВЭС 6, ВЭС 1, ВЭС 5, ВЭС 3, СЭС 2 и СЭС 1.

Результаты расчетов по рассматриваемым критериям оптимизации представлены в табл. 2. Количество ВЭУ в составе каждой ВЭС

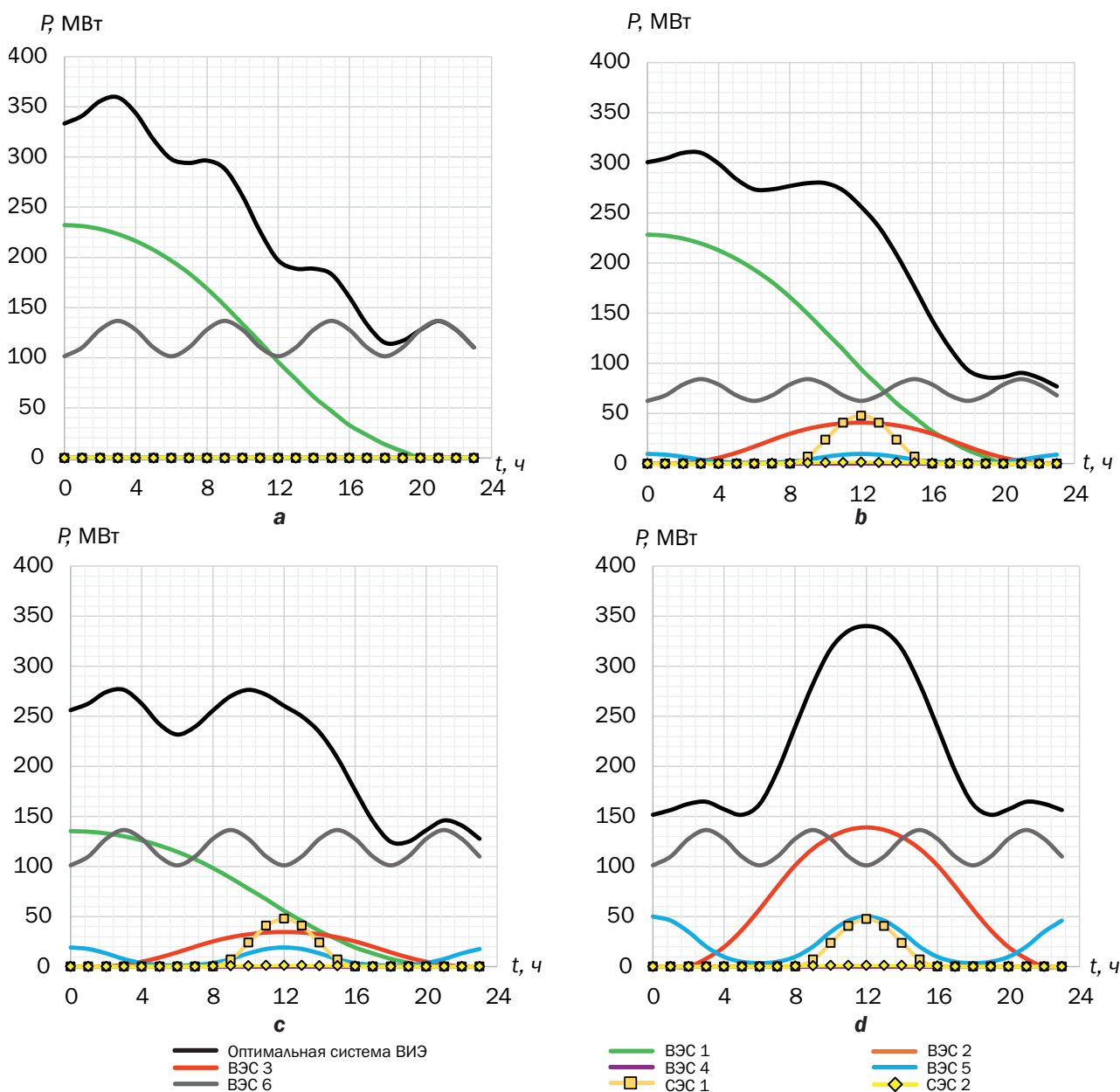
и групп ФЭМ в каждой СЭС варьируется в зависимости от выбранной целевой функции. Соответствующие суточные графики генерации для полученных оптимальных конфигураций систем представлены на рис. 5. Выбор класса напряжения для технологического присоединения к электрической сети обусловлен установленной мощностью станции и пропускной способностью ЛЭП, с учетом их двухцепного исполнения: до 10 МВт – 10 кВ, 10–40 МВт – 35 кВ, 40–200 МВт – 110 кВ, свыше 200 МВт – 220 кВ. Следует отметить, что для электростанций с минимальной расчетной мощностью целесообразно рассмотреть возможность перераспределения их мощности в пользу соседних площадок. В частности, в рамках данного исследования мощность, первоначально выделенная для СЭС 2, может быть размещена на площадке СЭС 1.



**Таблица 2.** Распределение ветроэлектрических установок и групп фотоэлектрических модулей в потенциальных местах строительства ветровых и солнечных электростанций при различных целевых функциях

**Table 2.** Distribution of wind turbines and photovoltaic module groups in potential construction sites of wind and solar power plants under different target functions

Название ветровых электростанций	$N_{ВИЭ} \rightarrow \max$		$\frac{dP_{ВИЭ}}{dt} \rightarrow \min$		$\Delta P_{ВИЭ} \rightarrow \min$		$P_{баз} \rightarrow \max$	
	$N_m / M_s$	$P_{уст}, \text{МВт}$	$N_m / M_s$	$P_{уст}, \text{МВт}$	$N_m / M_s$	$P_{уст}, \text{МВт}$	$N_m / M_s$	$P_{уст}, \text{МВт}$
ВЭС 1	120	300	118	295	70	175	0	0
ВЭС 3	0	0	22	55	18	45	72	180
ВЭС 5	0	0	5	12,5	10	25	26	65
ВЭС 6	120	300	73	182,5	120	300	120	300
СЭС 1	0	0	534	53,4	531	53,1	530	53
СЭС 2	0	0	16	1,6	19	1,9	20	2



**Рис. 5.** Графики генерации возобновляемых источников энергии и солнечных электростанций при различных целевых функциях: а – максимальной выработке электрической энергии; б – минимальной скорости изменения мощности; с – минимальном приращении мощности; d – максимальной базисной мощности

**Fig. 5.** Generation graphs of renewable energy sources and solar power plants at various target functions: a – maximum electric power generation; b – minimum rate of power change; c – minimum of power increment; d – maximum base power

Проведенное исследование демонстрирует существенное влияние выбора целевой функции на результирующие показатели оптимальной системы ВИЭ. Как и следует из постановки однокритериальной задачи, достижение экстремума по одному показателю (например, максимуму выработки) закономерно приводит к ухудшению других характеристик системы. В качестве базового и наименее трудоемкого метода, не требующего применения сложных оптимизационных процедур, может быть использован критерий максимума выработки электроэнергии. Алгоритм предполагает последовательное размещение ВЭУ и групп ФЭМ на площадках в порядке убывания их энергетического потенциала (ВЭС 6, далее ВЭС 1, ВЭС 5, ВЭС 3, ВЭС 4, СЭС 2, ВЭС 2 и СЭС 1) до момента наступления ограничения по месту размещения. В отличие от выработки, такие параметры, как скорость изменения мощности, приращение мощности, а также базисная мощность, являются производными от результирующего графика генерации. Их прогнозирование без применения специализированных оптимизационных моделей представляется затруднительным.

Табл. 3 отражает зависимость параметров оптимальной системы ВИЭ от выбранной целевой функции в тестовой модели. По диагонали матрицы расположены экстремальные значения соответствующих оптимизируемых параметров.

Максимальная выработка электрической энергии при соответствующей целевой функции составляет 5500 тыс. кВт·ч, что на 8% выше, чем при целевой функции по минимуму скорости изменения мощности, на 6% выше, чем при целевой функции по мини-

муму приращения мощности и на 7% выше, чем при целевой функции по максимуму базисной мощности.

Минимальная суммарная скорость изменения мощности при соответствующей целевой функции составляет 263,4 МВт, что на 23% ниже, чем при целевой функции по выработке электрической энергии, на 14% ниже, чем при целевой функции по минимуму приращения мощности и на 61% ниже, чем при целевой функции по максимуму базисной мощности.

Минимальное приращение мощности при соответствующей целевой функции составляет 151,3 МВт, что на 65% ниже, чем при целевой функции по выработке электрической энергии, на 54% ниже, чем при целевой функции по минимуму скорости изменения мощности и на 25% ниже, чем при целевой функции по максимуму базисной мощности.

Максимальная базисная мощность при соответствующей целевой функции составляет 151,6 МВт, что на 38% выше, чем при целевой функции по выработке электрической энергии, на 100% выше, чем при целевой функции по минимуму скорости изменения мощности и на 21% выше, чем при целевой функции по минимуму приращения мощности.

Для сравнения полученных результатов в табл. 4 показано изменение параметров оптимальной системы ВИЭ целевых функций ( $dP_{\text{ВИЭ}}/dt \rightarrow \min, \Delta P_{\text{ВИЭ}} \rightarrow \min, P^{\text{баз}} \rightarrow \max$ ) относительно целевой функции по критерию максимальной выработки электрической энергии, где  $N_{\text{ВИЭ}} \rightarrow \max$ . Можно сделать вывод, что при незначительном снижении выработки электрической энергии (на 6%) целевая функция по критерию минимума

**Таблица 3.** Параметры оптимальной системы возобновляемых источников энергии в зависимости от целевой функции

**Table 3.** Parameters of the optimal renewable energy system depending on the target function

Параметр	Оптимальная система возобновляемых источников энергии			
	$N_{\text{ВИЭ}} \rightarrow \max$	$\frac{dP_{\text{ВИЭ}}}{dt} \rightarrow \min$	$\Delta P_{\text{ВИЭ}} \rightarrow \min$	$P^{\text{баз}} \rightarrow \max$
$N_{\text{ВИЭ}}$ , тыс. кВт·ч	5500,0	5110,5	5195,9	5140,0
$\frac{dP_{\text{ВИЭ}}}{dt}$ , МВт	323,3	263,4	300,0	424,0
$\Delta P_{\text{ВИЭ}}$ , МВт	249,4	232,9	151,3	188,4
$P^{\text{баз}}$ , МВт	110,2	75,9	125,0	151,6

приращения мощности позволяет значительно снизить интенсивность колебаний мощности результирующего графика генерации ВЭС и СЭС с одновременным обеспечением базисной мощности.

В условиях, когда критерий максимальной экономической эффективности не является приоритетным, выбор целевой функции сводится к компромиссу между обеспечением маневренности энергосистемы и максимальной выработкой ВИЭ. Экспертная оценка в этом случае заключается в сравнительном анализе: что экономически целесообразнее – нести затраты на повышение маневренности (например, через ввод новых генерирующих мощностей) или допустить упущенную выгоду от ограничения выработки ВИЭ.

К числу ключевых характеристик маневренности энергосистемы, определяющих ее совместимость с ВИЭ, относятся резервы мощности, включая резервы на загрузку и разгрузку [18, 19].

Под резервом мощности электростанции на загрузку понимается величина регулировочного диапазона генерирующего оборудования электростанции, определяемая как разница между его фактической (планируемой) нагрузкой и рабочей мощностью. Также к резерву мощности на загрузку относится рабочая мощность отключенного от сети генерирующего оборудования, готового к включению в сеть (горячий резерв). Под резервом мощности на разгрузку понимается величина регулировочного диапазона генерирующего оборудования электростанции от его фактической (планируемой) нагрузки до технологического или технического минимума. При этом использование резервов мощности как на загрузку, так и на разгрузку должно обеспечиваться со

скоростью изменения мощности, сопоставимой с колебаниями мощности ВИЭ и нагрузкой потребителей.

В качестве примера можно рассмотреть характеристики тепловых электростанций. Для паросиловых энергоблоков верхний предел регулировочного диапазона активной мощности составляет 100–110% от номинальной мощности. Нижний предел (технологический минимум) варьируется в зависимости от типа топлива: для газомазутных котлов он находится в диапазоне 30–40%, а для пылеугольных – 60–70%. Скорость изменения мощности для таких блоков обычно составляет около 1% от установленной мощности в минуту, однако в зоне скользящего давления может достигать и 6%. Наиболее высокими показателями маневренности среди тепловых установок обладают парогазовые энергоблоки (ПГУ) [20, 21]. Для ПГУ с котлами-утилизаторами скорость изменения мощности может достигать 9% в минуту, технологический минимум нагрузки составляет около 50%, а технический минимум, зависящий от конфигурации блока, может снижаться до 17% [22].

Таким образом, при ограничении характеристик маневренности энергосистемы или сравнительно высоких затратах на их улучшение (при вводе новых высокоманевренных источников энергии), целевой функцией следует выбирать минимум интенсивности колебаний мощности ВЭС ( $dP_{ВЭС}/dt$  и  $\Delta P_{ВЭС}$ ).

Существенной характеристикой маневренности является также способность генерирующего оборудования к пускам и остановам [23]. Для ПГУ с котлами-утилизаторами нормативы предусматривают за весь срок службы суммарно около 10000 циклов «пуск-останов»: 100 – из холодного со-

**Таблица 4.** Анализ изменения параметров оптимальной системы возобновляемых источников энергии относительно целевой функции по критерию максимальной выработки электрической энергии

**Table 4.** Analysis of optimal renewable energy system parameter variation relative to the target function based on maximum electrical energy generation criterion

Параметр	$\frac{dP_{ВИЭ}}{dt} \rightarrow \min$	$\Delta P_{ВИЭ} \rightarrow \min$	$P^{баз} \rightarrow \max$
$N_{ВИЭ}, \%$	-7	-6	-7
$\frac{dP_{ВИЭ}}{dt}, \%$	-19	-7	31
$\Delta P_{ВИЭ}, \%$	-7	-39	-24
$P^{баз}, \%$	-31	13	38

стояния, 1900 – из теплого (неостывшего) и 8000 – из горячего, что соответствует требованиям к полупиковым энергоблокам. На расход эквивалентного ресурса особенно сильно влияют режимы сброса нагрузки: они вызывают повреждаемость оборудования более чем в восемь раз выше, чем пусковые режимы. Согласно техническим требованиям, ПГУ должны за срок службы обеспечить не менее 200 циклов сброса до уровня собственных нужд и не менее 150 циклов сброса с отключением генератора от сети с последующим удержанием режима холостого хода. В целях снижения темпов деградации генерирующего оборудования, обусловленной динамическими режимами (частые пуски и остановки) в условиях нестабильной работы ВИЭ, в качестве целевой функции целесообразно использовать критерий максимизации базисной мощности.

В условиях гарантированного наличия достаточного маневренного резерва традиционной генерации целевая функция должна быть направлена на достижение экономической эффективности, что реализуется через максимизацию объема выработки электроэнергии.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящее исследование посвящено решению задачи оптимизации мест строительства ветровых и солнечных электростанций с учетом их влияния на маневренность ЭЭС. В отличие от ранее опубликованных работ, в которых рассматривалась оптимизация только ветровых электростанций, в данной статье разработана и исследована однокритериальная модель для комбинированной системы ВЭС и СЭС. Разработанная математическая модель учитывает комплекс показателей, характеризующих как экономическую эффективность ВИЭ, так и их влияние на режимные параметры энергосистемы вследствие стохастичности генерации. К числу таких показателей относятся выработка электроэнергии, скорость изменения мощности, приращение мощности, а также базисная мощность.

Учет разнонаправленного влияния рассматриваемых показателей в оптимизационной модели обусловил необходимость системного подхода к выбору критерия. В связи с этим был разработан алгоритм оптими-

зации размещения ВЭУ и групп ФЭМ между потенциальными площадками строительства ВЭС и СЭС. Апробация алгоритма на тестовой модели, включающей ввод шести ВЭС и двух СЭС, позволила сформулировать следующие выводы.

1. Выбор целевой функции оказывает влияние на результирующие показатели оптимизируемой системы ВИЭ. В случае применения однокритериального подхода наблюдается существенное снижение прочих ключевых характеристик системы, не включенных в формализованный критерий оптимизации:

- максимальная выработка электрической энергии при соответствующей целевой функции выше на 6–8% в сравнении с другими целевыми функциями;

- минимальная суммарная скорость изменения мощности при соответствующей целевой функции ниже на 14–61% в сравнении с другими целевыми функциями;

- минимальное приращение мощности при соответствующей целевой функции ниже на 25–65% в сравнении с другими целевыми функциями;

- максимальная базисная мощность при соответствующей целевой функции выше на 21–100% в сравнении с другими целевыми функциями.

2. В результате анализа изменения параметров оптимальной системы ВИЭ относительно целевой функции по критерию максимальной выработки электрической энергии установлено, что при незначительном снижении выработки электрической энергии (на 6%) целевая функция по критерию минимума приращения мощности позволяет значительно снизить интенсивность колебаний мощности результирующего графика генерации ВЭС и СЭС с одновременным обеспечением базисной мощности.

3. Так как в предложенной постановке задачи необходимо выбирать только одну целевую функцию, в заключении были рассмотрены рекомендации по ее выбору. Рекомендации основаны на экспертной оценке с учетом характеристик маневренности энергосистемы, в которой планируется строительство ВЭС и СЭС.

4. Полученные оптимальные конфигурации ВИЭ представляют собой рекомендации по размещению, минимизирующие неста-



бильность результирующего графика генерации в изоляции от сетевых ограничений и графика потребления. На следующем этапе необходимо проверить чувствительность модели к суточному и сезонному профилям потребления ЭЭС, что может привести к корректировкам выбора оптимальных площадок. Сетевые ограничения по пропускной способности ЛЭП и потери при передаче электроэнергии могут также существенно влиять на оптимальный выбор мест размещения ВИЭ.

5. В качестве дальнейших этапов исследования планируется:

- интеграция графика нагрузки энергосистемы в оптимизационную модель;
- учет существующей инфраструктуры – ранее построенных объектов ВИЭ и сетевых ограничений;
- разработка многокритериальной оптимизационной задачи, объединяющей в едином критерии экономическую эффективность, маневренные характеристики и график нагрузки ЭЭС.

#### Список источников

1. Solomon B.D., Pasqualetti M.J., Nelson E. Global disparities in renewable energy development: where they exist and why // *Applied Geography*. 2026. Vol. 186. P. 103825. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2025.103825>.
2. Akusta E., Cergibozan R. The role of renewable energy sources on the path to sustainable development for OECD countries: Considering the three pillars of sustainability // *Renewable Energy*. 2026. Vol. 256. Part D. P. 124101. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.124101>.
3. Abdelhady S. Performance and cost evaluation of solar dish power plant: sensitivity analysis of levelized cost of electricity (LCOE) and net present value (NPV) // *Renewable Energy*. 2021. Vol. 168. P. 332–342. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.074>. EDN: ABXYHP.
4. Durakovic A. DEC rolls out 13 MW offshore wind turbine // *Offshorewind.biz*. Режим доступа: <https://www.offshorewind.biz/2022/02/23/dec-rolls-out-13-mw-offshore-wind-turbine/> (дата обращения: 10.09.2025).
5. Moon Hee Seung, Baik Sunhee, Park Won Young. Assessing the levelized cost of energy in South Korea // *Energy Strategy Reviews*. 2025. Vol. 62. P. 101897. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2025.101897>.
6. Kabeyi M.J.B., Olanrewaju O.A. The levelized cost of energy and modifications for use in electricity generation planning // *Energy Reports*. 2023. Vol. 9. Supplement 9. P. 495–534. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.06.036>.
7. Zhang Yu, Zhang Yongkang, Wu Tiezhou. Integrated strategy for real-time wind power fluctuation mitigation and energy storage system control // *Global Energy Interconnection*. 2024. Vol. 7. Iss. 1. P. 71–81. <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2024.01.007>. EDN: MZNSFG.
8. Assireu A.T., Fisch G., Carvalho V.S.O., Pimenta F.M., De Freitas R.M., Saavedra O.R., et al. Sea breeze-driven effects on wind down-ramps: Their implications for wind farms along the north-east coast of Brazil // *Energy*. 2024. Vol. 294. P. 130804. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130804>. EDN: OIKOBM.
9. Артемьев А.Ю., Шакиров В.А., Яковкина Т.Н. Многокритериальный выбор районов для размещения ветровых электрических станций // *Системы. Методы. Технологии*. 2016. № 3. С. 116–122. <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2016-3-116-122>. EDN: XQSOBH.
10. Wang Han, Zhang Ning, Du Ershun, Yan Jie, Han Shuang, Liu Yongqian. A comprehensive review for wind, solar, and electrical load forecasting methods // *Global Energy Interconnection*. 2022. Vol. 5. Iss. 1. P. 9–30. <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2022.04.002>. EDN: VYPUDU.
11. Сигитов О.Ю. Сравнительный анализ динамического коэффициента неравномерности ветровых электростанций в различных энергосистемах // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2025. Т. 26. № 1. С. 28–38. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-1-28-38>. EDN: JWTYWJ.
12. Álvarez-García F.J., Fresno-Schmolk G., OrtizBevia M.J., Cabos W., RuizdeElvira A. Reduction of aggregate wind power variability using empirical orthogonal teleconnections: an application in the Iberian Peninsula // *Renewable Energy*. 2020. Vol. 159. P. 151–161. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.153>.
13. Shahriari M., Blumsack S. Scaling of wind energy variability over space and time // *Applied Energy*. 2017. Vol. 195. P. 572–585. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.073>.
14. Сигитов О.Ю. Однокритериальная задача оптимизации мест строительства ветровых электростанций // *Известия российской академии наук. Энергетика*. 2025. № 3. С. 92–112. <https://doi.org/10.31857/S0002331025030067>. EDN: KPZLJP.
15. Сулов К.В. Развитие систем электроснабжения изолированных территорий России с использованием возобновляемых источников энергии // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2017. Т. 21. № 5. С. 131–142. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-5-131-142>. EDN: YPLMUH.
16. Воропай Н.И., Подковальников С.В., Труфанов В.В., Беляев Л.С., Гальперова Е.В., Домышев А.В. [и др.]. Обоснование развития электроэнергетических систем. Методология, модели, методы, их использование: монография. Новосибирск: Наука, 2015. 448 с. EDN: ULMZZB.
17. Poursi H.H., Barenji R.V., Khojastehnezhad V.M. Solar energy status in the world: a comprehensive review // *Energy Reports*. 2023. Vol. 10. P. 3474–3493. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.10.022>. EDN: IDZWRD.

18. Ольховский Г.Г., Радин Ю.А., Макаров О.Н., Осыка А.С., Трушечкин В.П. Расширение регулировочного диапазона парогазовых установок ПГУ-450 // *Электрические станции*. 2015. № 3. С. 2–9. EDN: TQCIМH.
19. Радин Ю.А., Ленёв С.Н. Некоторые особенности эксплуатации ПГУ. Проблемы и перспективы // *Газотурбинные технологии*. 2024. № 1. С. 2–6. EDN: DSQFAZ.
20. Костюк Р.И., Писковацков И.Н., Чугин А.В., Коцюк Н.Н., Радин Ю.А., Березинец П.А. Некоторые особенности режимов эксплуатации головного энергоблока ПГУ-450Т // *Теплоэнергетика*. 2002. № 9. С. 6–11. EDN: XROORT.
21. Теплов Б.Д., Радин Ю.А., Филин А.А., Руденко Д.В. Тепловые испытания газотурбинной установки SGT5-4000F энергоблока ПГУ-420Т ТЭЦ-16 Мосэнерго // *Теплоэнергетика*. 2016. № 8. С. 10–17. <https://doi.org/10.1134/S0040363616080117>. EDN: WDOUHD.
22. Радин Ю.А., Сигитов О.Ю., Зорченко Н.В. Требования к маневренности тепловых электростанций в энергосистемах с ветровыми электростанциями // *Электрические станции*. 2025. № 1. С. 17–25. <https://doi.org/10.71841/EP.ELST.2025.1122.1.02>. EDN: LGYQHG.
23. Теплов Б.Д., Радин Ю.А. Повышение маневренности и экономической эффективности эксплуатации ПГУ в условиях оптового рынка электроэнергии и мощности // *Теплоэнергетика*. 2019. № 5. С. 39–47. <https://doi.org/10.1134/S0040363619050096>. EDN: ZBGRFB.

### References

1. Solomon B.D., Pasqualetti M.J., Nelson E. Global disparities in renewable energy development: where they exist and why. *Applied Geography*. 2026;186:103825. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2025.103825>.
2. Akusta E., Cergibozan R. The role of renewable energy sources on the path to sustainable development for OECD countries: Considering the three pillars of sustainability. *Renewable Energy*. 2026;256(D):124101. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.124101>.
3. Abdelhady S. Performance and cost evaluation of solar dish power plant: sensitivity analysis of levelized cost of electricity (LCOE) and net present value (NPV). *Renewable Energy*. 2021;168:332-342. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.074>. EDN: ABXYHP.
4. Durakovic A. DEC rolls out 13 MW offshore wind turbine. *Offshorewind.biz*. Available from: <https://www.offshorewind.biz/2022/02/23/dec-rolls-out-13-mw-offshore-wind-turbine/> [Accessed 10th September 2025].
5. Moon Hee Seung, Baik Sunhee, Park Won Young. Assessing the levelized cost of energy in South Korea. *Energy Strategy Reviews*. 2025;62:101897. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2025.101897>.
6. Kabeyi M.J.B., Olanrewaju O.A. The levelized cost of energy and modifications for use in electricity generation planning. *Energy Reports*. 2023;9(9):495-534. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.06.036>.
7. Zhang Yu, Zhang Yongkang, Wu Tiezhou. Integrated strategy for real-time wind power fluctuation mitigation and energy storage system control. *Global Energy Interconnection*. 2024;7(1):71-81. <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2024.01.007>. EDN: MZNSFG.
8. Assireu A.T., Fisch G., Carvalho V.S.O., Pimenta F.M., De Freitas R.M., Saavedra O.R., et al. Sea breeze-driven effects on wind down-ramps: Their implications for wind farms along the north-east coast of Brazil. *Energy*. 2024;294:130804. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130804>. EDN: OIKOBM.
9. Artemyev A.Yu., Shakirov V.A., Yakovkina T.N. Criteria-based choice of areas for siting the wind power plants. *Systems. Methods. Technologies*. 2016;3:116-122. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2016-3-116-122>. EDN: XQSOBH.
10. Wang Han, Zhang Ning, Du Ershun, Yan Jie, Han Shuang, Liu Yongqian. A comprehensive review for wind, solar, and electrical load forecasting methods. *Global Energy Interconnection*. 2022;5(1):9-30. <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2022.04.002>. EDN: VYPUDU.
11. Sigitov O.Yu. Comparative analysis of wind farms dynamic coefficient of unevenness in various energy systems. *RUDN Journal of Engineering Research. Seriya: Inzhenernye issledovaniya*. 2025;26(1):28-38. (In Russ.). <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-1-28-38>. EDN: JWTYWJ.
12. Alvarez-García F.J., Fresno-Schmolck G., OrtizBevia M.J., Cabos W., RuizdeElvira A. Reduction of aggregate wind power variability using empirical orthogonal teleconnections: an application in the Iberian Peninsula. *Renewable Energy*. 2020;159:151-161. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.153>.
13. Shahriari M., Blumsack S. Scaling of wind energy variability over space and time. *Applied Energy*. 2017;195:572-585. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.073>.
14. Sigitov O.Yu. A single-criteria optimization of wind farms construction sites. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Energetics*. 2025;3:92-112. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0002331025030067>. EDN: KPZLJP.
15. Suslov K.V. Development of power supply systems of Russian isolated territories using renewable energy sources. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2017;21(5):131-142. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-5-131-142>. EDN: YPLMUH.
16. Voropai N.I., Podkovalnikov S.V., Trufanov V.V., Belyaev L.S., Galperova E.V., Domyshev A.V., et al. *Substantiation of electric power system development. Methodology, models, methods, and their use: a monograph*. Novosibirsk: Nauka; 2015, 448 p. (In Russ.). EDN: ULMZZB.
17. Pourasl H.H., Barenji R.V., Khojastehnezhad V.M. Solar energy status in the world: a comprehensive review. *Energy Reports*. 2023;10:3474-3493. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.10.022>. EDN: IDZWRD.

18. Olkhovsky G., Radin Yu., Makarow O., Osika A., Trushechkin V. Expansion of operational load range of the CCPP 450 Mw. *Power Technology and Engineering*. 2015;3:2-9. (In Russ.). EDN: TQCI MH.
19. Radin Yu.A., Lenev S.N. Some features of combined-cycle gas turbine unit operation. Problems and prospects. *Gazoturbinnye tekhnologii*. 2024;1:2-6. (In Russ.). EDN: DSQFAZ.
20. Kostyuk R.I., Piskovatskov I.N., Chugin A.V., Koshok N.N., Radin Yu.A., Berezinets P.A. Several features of the operating conditions of the pilot PGU-450T power-generating unit. *Thermal Engineering*. 2002;9:6-11. (In Russ.). EDN: XROORT.
21. Teplov B.D., Radin Yu.A., Filin A.A., Rudenko D.V. Thermal tests of the SGT5-4000F gas-turbine plant of the PGU-420T power-generating unit at Combined Heat and Power Plant 16 of Mosenergo. *Thermal Engineering*. 2016;8:10-17. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0040363616080117>. EDN: WDOUHD.
22. Radin Yu.A., Sigitov O.Yu., Zorchenko N.V. Thermal power plant flexibility in energy systems with wind farms. *Power Technology and Engineering*. (In Russ.). EDN: LGYQHG.
23. Teplov B.D., Radin Yu.A. Improving flexibility and economic efficiency of CCGT units' operation in the conditions of the wholesale electricity market. *Thermal Engineering*. 2019;5:39-47. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0040363619050096>. EDN: ZBGRFB.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

#### Сигитов Олег Юрьевич,

к.т.н.,  
старший преподаватель кафедры  
энергетического машиностроения,  
Российский университет  
дружбы народов имени Патриса Лумумбы,  
117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6, Россия  
✉ olegsigitov@gmail.com  
<https://orcid.org/0009-0007-8541-4542>

#### Суслов Константин Витальевич,

д.т.н., доцент,  
профессор кафедры гидроэнергетики и  
возобновляемых источников энергии,  
Национальный исследовательский университет  
«Московский энергетический институт»,  
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная,  
д. 14, стр. 1, Россия  
dr.souslov@yandex.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-0484-2857>

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

#### Oleg Yu. Sigitov,

Cand. Sci. (Eng.),  
Senior Lecturer of the Department of Power Engineering,  
Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of  
Russia,  
6, Miklukho-Maklaya St., Moscow 117198, Russia  
✉ olegsigitov@gmail.com  
<https://orcid.org/0009-0007-8541-4542>

#### Konstantin V. Suslov,

Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Professor of the Department of Hydropower  
Engineering and Renewable Energy,  
National Research University "Moscow Power Engineering  
Institute",  
14, Krasnokazarmennaya St., Moscow 111250, Russia  
dr.souslov@yandex.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-0484-2857>

### Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

### Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

### Конфликт интересов

Суслов К.В. является членом редакционной коллегии журнала «iPolytech Journal» с 2015 года, но не имеет отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах авторы не заявляли.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

### Conflict of interests

Konstantin V. Suslov has been a member of the iPolytech Journal Editorial Board since 2015, but he was not involved in making decision about accepting the present article for publication. The article was subjected the Journal's review procedure. The authors do not report any other conflicts of interest.

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

### Информация о статье

Статья поступила в редакцию 10.09.2025 г.; одобрена после рецензирования 03.11.2025 г.; принята к публикации 12.11. 2025 г.

### Information about the article

The article was submitted 10.09.2025; approved after reviewing 03.11.2025; accepted for publication 12.11. 2025.

## МЕТАЛЛУРГИЯ

Научная статья

УДК 669.2/.8+60-7

EDN: IAAFZR

DOI: 10.21285/1814-3520-2025-4-567-579



## Переработка медноцианистых растворов с использованием сульфатредуцирующих бактерий

С.Д. Гринько<sup>1</sup>, А.А. Файберг<sup>2</sup>, А.В. Епифоров<sup>3✉</sup>, С.В. Баликов<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ООО «Управляющая компания «Южуралзолото Групп Компаний», Пласт, Россия

<sup>2-4</sup>Иркутский научно-исследовательский институт благородных и редких металлов и алмазов, Иркутск, Россия

**Резюме.** Цель – разработка технологии регенерации цианида и осаждения меди из медноцианистых растворов с использованием процесса сульфатредукции. Для исследований использовали смесь штаммов анаэробных сульфатредуцирующих бактерий *Desulfonatronum zhilinae*, *Desulfonatronum cooperativum*, *Desulfonatronobacter acetoxidans*, полученных в институте микробиологии им. С.Н. Виноградского РАН (Москва). Сульфатредукция проводилась при температурах 20–40 °С при pH>9,5. В качестве донора электронов использовали этанол, в качестве акцептора – сульфат-ионы. Для определения лимитирующего субстрата (этанола или сульфата) и оптимальных концентраций акцептора и донора электронов использовали математическую модель роста микроорганизмов – уравнение Моно. Результаты расчетов указывают на конкуренцию между субстратами за право лимитировать процесс. Так, при концентрациях <0,3 г/дм<sup>3</sup> сульфат является лимитирующим субстратом. А при концентрациях сульфата 0,5–1,0 г/дм<sup>3</sup> и этанола 0,1–0,3 г/дм<sup>3</sup> лимитирующий субстрат – этанол. Определена точка ко-лимитирования процесса, в которой концентрации сульфата и этанола составляют 0,8 и 0,3 г/дм<sup>3</sup> соответственно. Для определения гидравлического времени удерживания жидкой фазы в биореакторе применяли уравнение Моно с учетом ингибирования сероводородом. Определено, что наличие 0,1–0,5 г/дм<sup>3</sup> сероводорода в бактериальном растворе приводит к снижению скорости роста бактерий на 27–65%. Гидравлическое время удерживания жидкой фазы в биореакторе в точке ко-лимитирования с учетом ингибирования процесса сероводородом должно составлять около 90 ч. Лабораторные тесты показали, что выбранного расчетным путем гидравлического времени удерживания достаточно для получения 0,25–0,27 г/дм<sup>3</sup> сероводорода для осаждения 99% меди и регенерации более 99% цианида. Полученные медные осадки содержали медь и серу – 65 и 35% соответственно. Таким образом, исследуемые микроорганизмы позволяют получать сероводород непосредственно в медноцианидных растворах с различной концентрацией меди, что позволит исключить из технологической цепочки биореактор и все вспомогательные коммуникации для транспортировки сероводорода.

**Ключевые слова:** медь, цианид, сульфатредукция, биогенный сероводород, регенерация цианида, золото-медная руда, извлечение золота

**Для цитирования:** Гринько С.Д., Файберг А.А., Епифоров А.В., Баликов С.В. Переработка медноцианистых растворов с использованием сульфатредуцирующих бактерий // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 4. С. 567–579. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-4-567-579>. EDN: IAAFZR.

## METALLURGY

## Original article

## Treatment of copper cyanide solutions with the use of sulfate-reducing bacteria

Semyon D. Grinko<sup>1</sup>, Anna A. Faiberg<sup>2</sup>, Alexander V. Epiforov<sup>3✉</sup>,  
Stanislav V. Balikov<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Limited Liability Company “Management Company UGC”, Plast, Russia

<sup>2-4</sup>Irkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and Diamonds, Irkutsk, Russia

**Abstract.** The study was aimed at developing a technology for regenerating cyanide and precipitating copper from copper cyanide solutions through the sulfate reduction process. To this end, a mixture of strains of anaerobic sulfate-reducing bacteria was used: *Desulfonatronum zhilinae*, *Desulfonatronum cooperativum*, and *Desulfonatronobacter acetoxidans* from the S.N. Vinogradsky Institute of Microbiology of the Russian Academy of Sciences (Moscow). The sulfate reduction was carried out at temperatures of 20–40 °C and at pH>9.5. Ethanol was used as the electron donor, and



sulfate ions were used as the acceptor. In order to ascertain the limiting substrate (ethanol or sulfate) and establish the optimal concentrations of the acceptor and the electron donor, a mathematical microbial growth model was used—the Monod equation. The calculation results indicate substrate competition for the right to limit the process. Thus, at concentrations of  $<0.3 \text{ g/dm}^3$ , the limiting substrate is sulfate, whereas at sulfate concentrations of  $0.5\text{--}1.0 \text{ g/dm}^3$  and ethanol concentrations of  $0.1\text{--}0.3 \text{ g/dm}^3$ , the limiting substrate is ethanol. The co-limitation point of the process was determined; at this point, the concentrations of sulfate and ethanol are  $0.8$  and  $0.3 \text{ g/dm}^3$ , respectively. In order to ascertain the hydraulic retention time of the liquid phase in a bioreactor, the Monod equation was used, taking inhibition by hydrogen sulfide into account. The presence of  $0.1\text{--}0.5 \text{ g/dm}^3$  hydrogen sulfide in bacterial solution was found to reduce the bacterial growth rate by  $27\text{--}65\%$ . The hydraulic retention time of the liquid phase in the bioreactor at the co-limitation point, taking the inhibition by hydrogen sulfide into account, should be equal to approximately 90 hours. Laboratory tests show the calculated hydraulic retention time to be sufficient to obtain  $0.25\text{--}0.27 \text{ g/dm}^3$  hydrogen sulfide for  $99\%$  copper precipitation and over  $99\%$  cyanide regeneration. The obtained copper precipitates contained copper and sulfur ( $65\%$  and  $35\%$ , respectively). Thus, the examined microorganisms allow hydrogen sulfide to be obtained directly in copper cyanide solutions with different copper concentrations, which eliminates the need for a bioreactor and all auxiliary communications for transporting hydrogen sulfide.

**Keywords:** copper, cyanide, sulfate reduction, biogenic hydrogen sulfide, cyanide regeneration, gold-copper ore, gold recovery

**For citation:** Grinko S.D., Faiberg A.A., Epiforov A.V., Balikov S.V. Treatment of copper cyanide solutions with the use of sulfate-reducing bacteria. *iPolytech Journal*. 2025;29(4):567-579. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-4-567-579>. EDN: IAAFZR.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мировой практике существует ряд технологий, позволяющих извлечь медь из растворов цианирования золотомедных руд. Многие известные технологии имеют недостатки. Например, при обработке цианидных растворов окислителями происходит полное разрушение всех цианидных соединений, что требует большого расхода окислителя и исключает повторное использование цианида в обороте. Цементация меди цинком приводит к растворению цинка, пассивации золота и снижает его извлечение, а электролиз меди из цианидных растворов сопровождается низким выходом по току и высокими энергозатратами. Ионообменные технологии весьма эффективны, однако их селективность по отношению к ионам меди не всегда допускает их реализацию. При обработке цианидных растворов минеральными кислотами ARV (процесс, от англ. Acidification, Volatilization, and Regeneration) образуется осадок цианида меди, который имеет ограниченный спрос [1].

Наиболее оптимальным решением проблемы переработки медноцианидных растворов являются технологии, позволяющие извлекать медь в виде товарного осадка  $\text{Cu}_2\text{S}/\text{CuS}$  с одновременным рециклингом, пригодного для извлечения золота цианида (процессы MNR, от англ. Metal-Cyanide Neutralization Recovery/Recycle, и SART от англ. Sulfidization, Acidification, Recycling, and Thickening [1–3], технология АО «Иргиредмет» [4, 5]). Также данные технологии яв-

ляются наиболее простыми в аппаратном оформлении.

Выделение меди в виде товарного осадка и рециклинг цианида в процессе переработки золотомедных руд обеспечивают значительный экономический эффект. При этом улучшается качество катодного осадка, а режим замкнутого водооборота исключает необходимость обезвреживания сточных вод.

Для осаждения меди в виде сульфида обычно используют сульфид или гидросульфид натрия, реже сероводород. При этом использование сероводорода имеет ряд преимуществ: снижаются затраты на реагенты (покупка, транспортировка, хранение и т.д.); исключается накопление катионов Na в оборотных растворах.

Перспективным способом получения сероводорода является восстановление серы/сульфат-иона с использованием сульфат- и сероредуцирующих микроорганизмов. С этой целью компаниями Paques и BioteQ разработаны технологии Thioteq, Sulfateq, Bio-Sulphide [6, 7].

Известна технология АО «Иргиредмет», которая предусматривает извлечение металлов из растворов биогенным сероводородом, полученным из элементной серы в биореакторе, с использованием анаэробных штаммов *Desulfurella acetivorans* и *Desulfurella kamchatkensis* [8].

Однако существенное экономическое препятствие кроется в самой технологической схеме. Современные биологические

сульфидогенные системы для извлечения металлов разделяют процессы сульфидогенеза и осаждения металлов на две стадии. Первая – биологическая, где микробный сульфидогенез происходит в контролируемых условиях без прямого контакта с металлургическим потоком. Вторая – химико-металлургическая, представляет собой контакторный блок, где сульфид растворяется и вступает в реакцию с металлами в металлургическом потоке. Для контакта сероводорода с растворами сероводорода извлекается из биологического отделения путем продувки газа-носителя, обычно азота, и переносится в металлургическое отделение. Хотя эта технологическая схема обеспечивает оптимальный контроль над биологическим и металлургическим отделениями, транспортировка биосероводорода является очень энергозатратным процессом, который значительно увеличивает стоимость технологии.

Основной причиной разделения биологической и металлургической стадий в первую очередь является токсичность высоких концентраций меди, а также цинка, никеля и других тяжелых металлов для бактерий. Это является одним из основных недостатков подобного рода технологий. Вместе с тем возникает необходимость поиска новых технологических решений, основанных на использовании высокопродуктивных, устойчивых к высоким концентрациям тяжелых металлов штаммов и/или консорциумов микроорганизмов. Это позволит одновременно вести процесс производства биогенного сероводорода и взаимодействие его с технологическим раствором в одном реакторе [9–11].

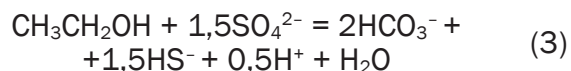
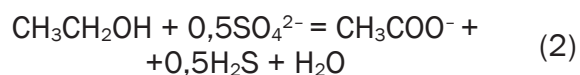
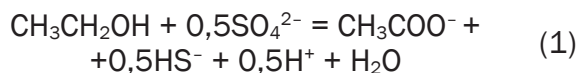
Цианидные щелочные растворы являются губительными для аэробных микроорганизмов. При этом использование серы в качестве акцептора электронов не представляется возможным ввиду взаимодействия элементарной серы со свободным цианидом с образованием тиоцианата, что приведет к потерям цианида. Таким образом, совмещение процессов регенерации цианида и получения биогенного сероводорода в одном реакторе возможно с использованием анаэробных

сульфатредуцирующих микроорганизмов. Сульфатредуцирующие бактерии (СРБ) имеют резистентность к цианиду за счет отсутствия кислородного дыхания, так как осуществляют диссимиляционную сульфатредукцию, представляющую собой анаэробное дыхание, при котором сульфат служит конечным акцептором электронов (вместо кислорода). Поэтому энергетический тип обмена у СРБ часто называют сульфатным дыханием. Тем не менее представители этой группы микроорганизмов могут существовать в присутствии кислорода, несмотря на догмат о своих строгих анаэробных условиях жизни [12–15].

В сравнении с сероредуцирующими микроорганизмами сульфатредукторы являются более устойчивыми к тяжелым цветным металлам, в частности к меди, т.к. дренажные стоки, содержащие сульфаты металлов, являются их естественной средой обитания. Сульфатредукторы как активные участники процесса межвидового переноса водорода способны выживать в гиперсоленых средах, при отрицательных температурах, экстремальных pH [16–19]. При этом отсутствие необходимости использовать элементарную серу исключает возможность потерь цианида в форме тиоцианата.

В качестве донора электронов сульфатредукторы используют большое разнообразие низкомолекулярных органических соединений, таких как монокарбоновые жирные кислоты (ацетат, пропионат, лактат, пируват), дикарбоновые кислоты (яблочная, янтарная, фумарат), спирты (этанол, метанол, пропанол, бутанол), моносахариды (глюкоза, фруктоза), а также аминокислоты<sup>5</sup> [20–22].

Одним из наиболее доступных электронодоноров для сульфатредукции является этанол. Образование сероводорода при использовании этанола протекает по уравнениям (1)–(3):



<sup>5</sup>Михайлова А.Н. Исследование и разработка технологии осаждения цветных металлов из технологических растворов биогенным сероводородом: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.02. Иркутск, 2016. 120 с. EDN: ZQHJMF.

Осаждение меди сульфид- и гидросульфид-ионом осуществляется в соответствии с уравнениями (4) и (5):



Таким образом, целью настоящих исследований является разработка технологии регенерации цианида и осаждения меди из медноцианистых растворов с использованием процесса сульфатредукции, при котором одновременно происходит образование биосероводорода и его взаимодействие с технологическим потоком растворов.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследований использовали смесь штаммов анаэробных СРБ: *Desulfonatronum zhilinae*, *Desulfonatronum cooperativum*, *Desulfonatronobacter acetoxidans*, полученных в институте микробиологии им. С.Н. Виноградского РАН, г. Москва. Данные виды микроорганизмов обладают способностью к анаэробному дыханию. Смесь микроорганизмов подобрана в соответствии с возможностью их использования в промышленном технологическом процессе при температурах 20–40 °С, высоких значениях pH > 9,5 и в соответствии со сложным составом оборотных технологических растворов, содержащих медь и цианистые соединения [23].

В качестве донора электронов использовали этанол, в качестве акцептора – сульфат-ионы.

**Расчет уравнения Моно – математической модели роста микроорганизмов**, ограниченных питательным веществом, позволяющей рассчитать основной параметр биореактора, – гидравлическое время удерживания среды в биореакторе. По своей сути, гидравлическое время удерживания ( $\theta$ ) – это связующее звено между биологией (скоростью роста бактерий) и инженерией (объемом биореактора и режимом его эксплуатации).

Для стабильной работы биореактора необходимо обеспечить такое время удерживания, чтобы скорость роста микроорганизмов была не меньше скорости их вымывания из реактора.

*Desulfonatronum zhilinae* – это хорошо описанный вид СРБ, для него в литератур-

ных источниках имеются данные о времени удвоения, которое составляет 72 ч [24], следовательно, удельная скорость роста микроорганизма ( $\mu$ ) составляет  $\mu = \ln(2)/t = 0,693/72 = 0,01 \text{ ч}^{-1}$ . Его ключевая особенность – способность к синтрофной кооперации с другими бактериями.

Для *Desulfonatronum cooperativum* и *Desulfonatronobacter acetoxidans* в литературных источниках отсутствуют прямые данные о скорости роста этих видов, но можно провести аналогию с хорошо изученными видами. Например, *Desulfonatronum thiodismutans*, который демонстрирует время удвоения 12 ч и, следовательно, удельную скорость роста  $\mu = 0,05 \text{ ч}^{-1}$  в оптимальных условиях. *Desulfonatronum lacustre*, для которого  $\mu = 0,04 \text{ ч}^{-1}$ , а также *Desulfonatronum hydrogenovorans*, для которого  $\mu = 0,058 \text{ ч}^{-1}$  и другие *Desulfonatronum*, для которых  $\mu = 0,04–0,055 \text{ ч}^{-1}$  [25–29].

Учитывая вышеприведенные данные, для смеси штаммов *Desulfonatronum zhilinae*, *Desulfonatronum cooperativum*, *Desulfonatronobacter acetoxidans* следует ожидать максимальную  $\mu = 0,01–0,058 \text{ ч}^{-1}$  и соответствующее время удвоения ( $G$ ) = 12–72 ч. Для расчетов уравнения Моно принимаем среднее значение максимальной удельной скорости роста  $0,035 \text{ ч}^{-1}$  и среднее время удвоения 42 ч.

В наших исследованиях имеются два потенциальных лимитирующих субстрата: этанол (донор электронов) и сульфат (акцептор электронов). Необходимо установить, кто из них лимитирует рост. Обычно лимитирующим считают тот субстрат, который находится в большем дефиците относительно потребностей бактерий. Для этого необходимы константы полунасыщения ( $K_s$ ) для этанола и сульфата для штаммов *Desulfonatronum zhilinae*, *Desulfonatronum cooperativum*, *Desulfonatronobacter acetoxidans*.

Константа полунасыщения – это концентрация субстрата, при которой удельная скорость роста микроорганизмов составляет половину от максимальной ( $\mu_{\max}$ ). Таким образом,  $K_s$  показывает «аппетит» бактерий к данному субстрату.

Низкое значение  $K_s$ , например,  $0,01 \text{ г/дм}^3$ , указывает на то, что бактерии имеют высокое сродство к субстрату и активно его потребляют даже при очень низких концентрациях.

Высокое значение  $K_s$ , например, 0,5 г/дм<sup>3</sup>, указывает на то, что бактерии имеют низкое сродство к субстрату и для достижения высокой скорости роста им нужны его высокие концентрации.

Для расчетов были использованы данные близкородственных штаммов СРБ. Для этанола значение  $K_s$  составляет 0,05–0,1 г/дм<sup>3</sup> (среднее значение 0,075 г/дм<sup>3</sup>). Для сульфата значение  $K_s$  составляет 0,1–0,3 г/дм<sup>3</sup> (среднее значение 0,2 г/дм<sup>3</sup>).

$pH = 10,0$  – оптимальное для данных штаммов микроорганизмов значение, поэтому предполагаем, что это уже учтено для расчета  $\mu_{max}$ .

Таким образом, получаем следующие условия для расчета:  $pH = 10,0$ , максимальная удельная скорость роста бактерий – 0,035 ч<sup>-1</sup>, среднее значение  $K_s$  для этанола – 0,075 г/дм<sup>3</sup>, среднее значение  $K_s$  для сульфата – 0,2 г/дм<sup>3</sup>.

Расчеты проведены для концентраций субстратов (сульфат и этанол) 0,1–1,0 г/дм<sup>3</sup> с шагом 0,1 г/дм<sup>3</sup>.

Для биореактора с идеальным перемешиванием в равновесном состоянии удельная скорость роста микроорганизмов описывается уравнением Моно (6) для двух лимитирующих субстратов:

$$\mu = \mu_{max} \times \frac{S_{et}}{K_{s(et)} + S_{et}} \times \frac{S_{SO4}}{K_{s(SO4)} + S_{SO4}}, \quad (6)$$

где  $S_{et}$  и  $S_{SO4}$  – концентрации этанола и сульфата в биореакторе соответственно.

Лимитирующий субстрат определяется путем сравнения «степени насыщения» – множителя Моно ( $\eta$ ) для каждого субстрата, который рассчитывается как  $S_i / (K_{s_i} + S_i)$ . Субстрат с меньшим значением  $\eta$  будет лимитирующим. Если значения равны, то оба субстрата лимитируют одновременно.

Рассчитав множитель Моно и удельную скорость роста микроорганизмов для всех концентраций субстратов, определяли гидравлическое время удерживания как обратную величину от скорости роста микроорганизмов ( $1/\mu$ ).

**Расчет уравнения Моно с учетом ингибирования сероводородом** – это классический случай, когда продукт метаболизма подавляет активность микроорганизмов. В расчетах использовалась неконкурентная модель ингибирования по Холдейну [30, 31], которая подходит для ингибирования биохимического процесса продуктом реакции. Таким образом, общее уравнение (7) для скорости роста принимает следующий вид:

$$\mu = \mu_{max} \times \frac{S_{et}}{K_{s(et)} + S_{et}} \times \frac{S_{SO4}}{K_{s(SO4)} + S_{SO4}} \times \frac{K_i}{K_i + I}, \quad (7)$$

где  $I$  – концентрация ингибитора (сероводорода), г/дм<sup>3</sup>;  $K_i$  – константа ингибирования, то есть концентрация сероводорода, при которой скорость роста микроорганизмов снижается вдвое, г/дм<sup>3</sup>. Для сложных процессов типа сульфатредукции типичные значения  $K_i$  для сероводорода лежат в диапазоне 0,05–0,5 г/дм<sup>3</sup>. Для расчета принято среднее значение – 0,275 г/дм<sup>3</sup>.

Расчеты проведены для концентраций ингибитора (сероводорода) в растворе от 0,1 до 0,5 г/дм<sup>3</sup> с шагом 0,1 г/дм<sup>3</sup>.

**Тесты по получению биогенного сероводорода, регенерации цианида и осаждению меди.** Тестовые исследования проводились в анаэробных условиях в герметичных, стерилизованных емкостях с резиновыми пробками. Объем бактериального раствора в каждой пробе составлял 0,1 дм<sup>3</sup>.

В приготовленный бактериальный раствор добавляли раствор медноцианистого комплекса и раствор свободного цианида. Для проведения исследований были смоделированы растворы, содержащие медноцианистые комплексы меди с концентрацией меди в диапазоне 100–900 мг/дм<sup>3</sup>. Концентрация свободного цианида была постоянной во всех тестах и составляла 100 мг/дм<sup>3</sup>. Концентрация общего цианида при этом изменялась в диапазоне 200–1000 мг/дм<sup>3</sup>.

В каждую пробу добавляли реагенты: 0,7 г/дм<sup>3</sup> сульфата (в форме сульфата натрия марки ХЧ); 0,23 г/дм<sup>3</sup> этилового спирта (медицинский, 95%) – 100% от стехиометриче-



ского расхода по отношению к сульфату (в соответствии с уравнением (3)). Для определения pH бактериальной среды использовали специальные бумажные тест-полоски. pH поддерживали на уровне 10. Температуру среды поддерживали в термостатированных условиях (на водяной бане) на уровне  $25 \pm 0,5^\circ\text{C}$ .

Спустя 90 ч (что соответствует необходимому гидравлическому времени удерживания жидкой среды в биореакторе) в каждую пробу с помощью шприца добавляли концентрированную серную кислоту для снижения pH до уровня 3,5–4,0. При снижении pH в пробах происходило осаждение осадка сульфида меди. Полученные осадки отделяли от раствора фильтрацией и анализировали на содержание меди и серы.

Полученные фильтраты подщелачивали гидроксидом натрия до pH = 10,0–10,5 и определяли концентрацию меди (атомно-абсорбционным анализом) и свободного цианида (титрованием), при этом оценивали степень регенерации цианида ( $\epsilon_{\text{CN}}$ ) и осаждения меди из раствора ( $\epsilon_{\text{Cu}}$ ).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

**Расчет уравнения Моно – математической модели роста микроорганизмов.** Приведен пример расчета первого значения для множителей Моно ( $\eta_i$ ) для лимитирующих субстратов (этанол и сульфат) при  $S_{\text{et}}$  и  $S_{\text{SO}_4}$ , равных  $0,1 \text{ г/дм}^3$ :

$$\eta_{\text{et}} = 0,1 : (0,075 + 0,1) = 0,5714;$$

$$\eta_{\text{SO}_4} = 0,1 : (0,2 + 0,1) = 0,3333.$$

В данной точке  $\eta_{\text{et}} > \eta_{\text{SO}_4}$ , следовательно, лимитирующим субстратом является сульфат.

Далее рассчитаем удельную скорость роста бактерий и гидравлическое время удерживания для данной точки:

$$\mu = 0,035 \cdot 0,5714 \cdot 0,3333 = 0,00667 \text{ ч}^{-1};$$

$$\theta = 1 : \mu = 1 : 0,00667 = 150 \text{ ч}.$$

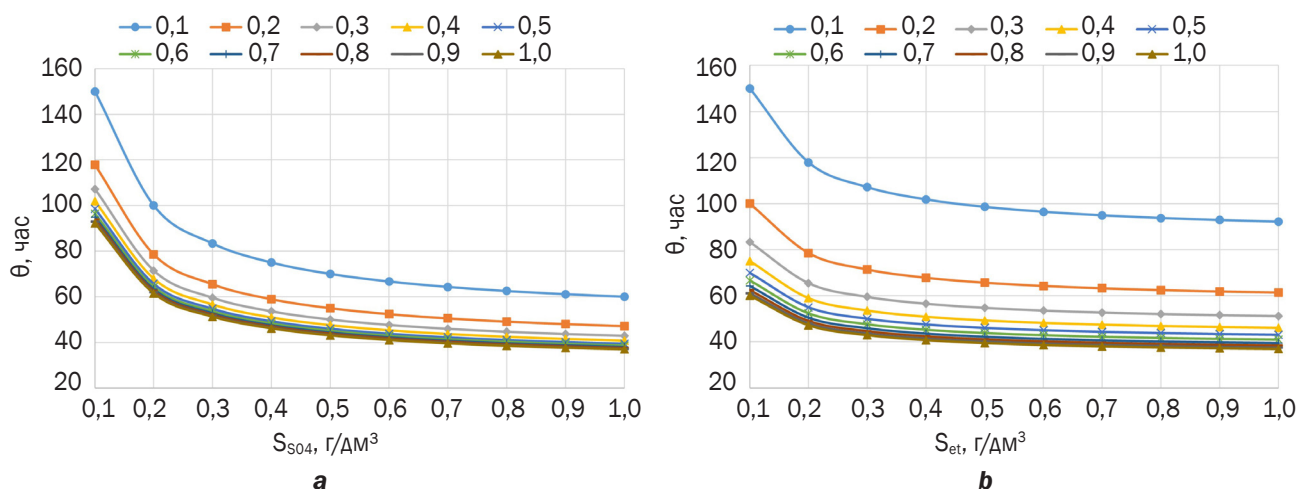
Аналогичные расчеты проведены для всех остальных комбинаций  $S_i$ . Результаты расчетов для исследуемых концентраций  $S_i$  представлены на рис. 1.

Результаты расчетов наглядно демонстрируют конкуренцию между субстратами за право лимитировать процесс. При низких и средних концентрациях сульфата ( $< 0,3 \text{ г/дм}^3$ ) сульфат всегда является лимитирующим субстратом, даже если концентрация этанола также крайне мала. Это происходит из-за его более высокой константы полунасыщения. Микроорганизмам всегда не хватает сульфата в большей степени.

При концентрациях сульфата  $0,3$ – $0,5 \text{ г/дм}^3$  и низких концентрациях этанола  $0,1 \text{ г/дм}^3$  происходит смена лимитирующего субстрата на этанол.

При концентрациях сульфата  $0,5$ – $1,0 \text{ г/дм}^3$  и концентрациях этанола  $0,1$ – $0,3 \text{ г/дм}^3$  лимитирующий субстрат – этанол.

Таким образом, в зоне концентраций сульфата  $0,3$ – $1,0 \text{ г/дм}^3$  лимитирующий субстрат зависит от соотношения концентраций. Это наиболее гибкая и управляемая зона работы биореактора.



**Рис. 1.** Зависимость гидравлического времени удерживания жидкой фазы от  $S_i$ : а – от концентрации сульфата при различных концентрациях этанола; б – от концентрации этанола при различных концентрациях сульфата

**Fig. 1.** Hydraulic retention time of the liquid phase vs  $S_i$ : a – sulfate concentration at different ethanol concentrations ; b – ethanol concentration at different sulfate concentrations

Также показано, при концентрациях субстратов  $0,1 \text{ г/дм}^3$  скорость роста крайне мала, что означает медленный процесс. При концентрациях субстратов  $1,0 \text{ г/дм}^3$  скорость роста достигает своего максимального для данных условий значения –  $0,0271 \text{ ч}^{-1}$ , но тем не менее это лишь 77% от теоретического  $0,035 \text{ ч}^{-1}$ . Это наглядно показывает, что даже при высоких концентрациях влияние лимитирования (в данном случае сульфатом) полностью не устраняется. Наибольший прирост скорости роста наблюдается при увеличении концентраций с  $0,1$  до  $0,4 \text{ г/дм}^3$ . Дальнейшее увеличение дает все меньший эффект.

На рис. 2 приведены результаты расчета множителей Моно – зависимости  $\eta_i$  от концентрации субстрата  $S_i$ .

Горизонтальная линия на рис. 2 указывает на точку ко-лимитирования, уникальную точку, где множители Моно обоих субстратов равны и соответствуют величине  $0,8$ . В точке ко-лимитирования концентрации сульфата и этанола составляют  $0,8$  и  $0,3 \text{ г/дм}^3$  соответственно. Это означает, что оба субстрата в одинаковой степени ограничивают рост. С точки зрения эффективности процесса это может быть оптимальной точкой работы, так как оба субстрата будут полностью потребляться без избытка. С точки зрения стехиометрии эта точка соответствует реакции сульфатредукции, протекающей при участии этанола с образованием гидросульфида и гидрокарбоната, по уравнению (3).

Таким образом, посредством расчетов показано, что в зоне низких концентраций сульфата ( $0,1 \text{ г/дм}^3$ ) гидравлическое время удерживания составляет 92–150 ч. В зоне высоких концентраций сульфата ( $0,7$ – $1,0 \text{ г/дм}^3$ ) значение  $\theta$  снижается до 37–64 ч. Объем биореактора, соответственно, можно уменьшить в 2,5 раза. Ввиду вышесказанного целесообразно работать в зоне ко-лимитирования, где оба субстрата потребляются почти полностью с максимальной эффективностью.

**Расчет уравнения Моно с учетом ингибирования сероводородом.** Пример расчета ингибирующего множителя для первой точки ( $I = 0,1 \text{ г/дм}^3$ ) выглядит следующим образом:  $K_i : (K_i + I) = 0,275 : (0,275 + 0,1) = 0,7333$ . Остальные точки для заданных концентраций сероводорода рассчитывали аналогичным образом.

На рис. 3 представлены результаты расчетов гидравлического времени удерживания жидкой фазы в биореакторе с учетом ингибирования сероводородом в заданном диапазоне его концентраций для ранее определенной точки ко-лимитирования ( $S_{et} = 0,3 \text{ г/дм}^3$ ,  $S_{SO_4} = 0,8 \text{ г/дм}^3$ ).

Расчеты показали, что наличие сероводорода в бактериальном растворе в количестве от  $0,1$  до  $0,5 \text{ г/дм}^3$  может привести к снижению удельной скорости роста бактерий в среднем на 27–65%. Это означает, что объем биореактора должен быть увеличен в 1,4–2,8 раза, так как гидравлическое время

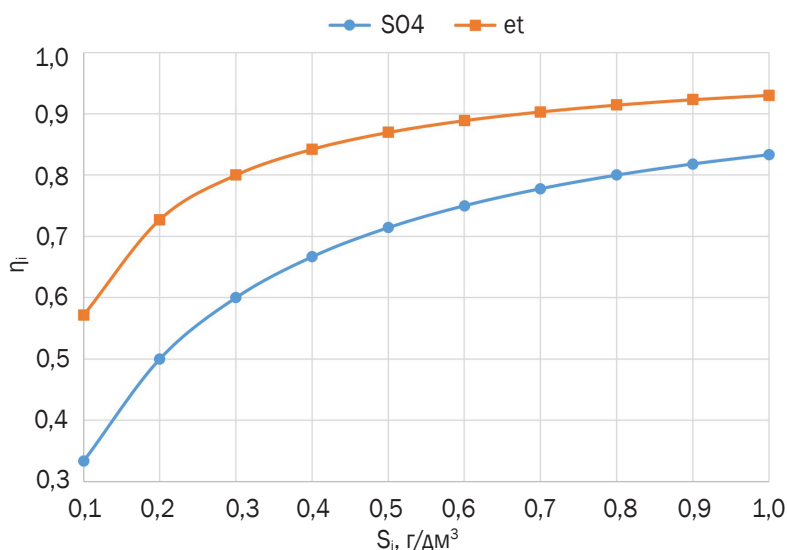
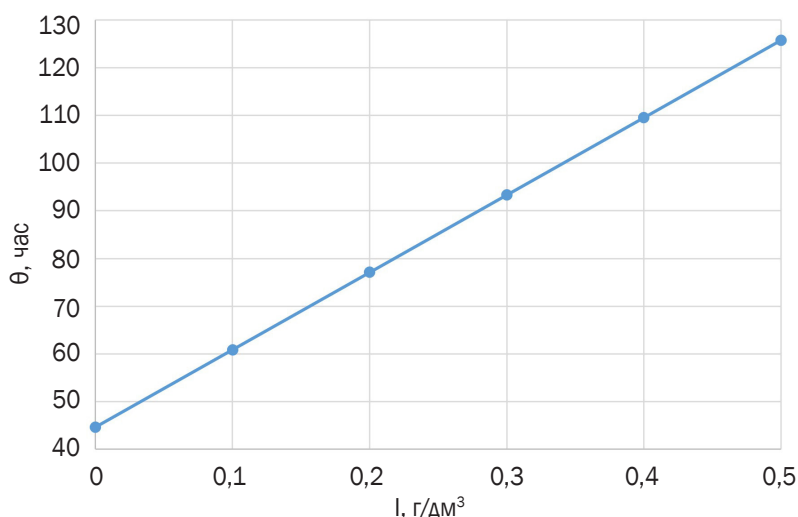


Рис. 2. Зависимость множителя Моно от концентрации субстрата  
 Fig. 2. Monod multiplier vs substrate concentration



**Рис. 3.** Зависимость концентрации сероводорода от гидравлического времени удерживания жидкой фазы

**Fig. 3.** Hydrogen sulfide concentration vs hydraulic retention time of the liquid phase

Результаты тестов по получению биогенного сероводорода, регенерации цианида и осаждению меди

Test results for biogenic hydrogen sulfide production, cyanide regeneration and copper precipitation

№ пробы	$C(\text{Cu})_{\text{исх.}}$ мг/дм³	$C(\text{Cu})_{\text{конеч.}}$ мг/дм³	$\varepsilon_{\text{Cu}}$ , %	$C(\text{CN}_{\text{общ.}})_{\text{исх.}}$ мг/дм³	$C(\text{CN}_{\text{общ.}})_{\text{конеч.}}$ мг/дм³	$C(\text{CN}_{\text{своб.}})_{\text{конеч.}}$ мг/дм³	$\varepsilon_{\text{CN}}$ , %
1	107,4	0,05	99,95	209,8	209,5	208,2	99,95
2	206,1	0,05	99,98	313,3	314,2	313,1	99,98
3	411,9	0,05	99,99	508,3	500,2	500,1	99,99
4	615,7	0,05	99,99	712,5	709,8	705,2	99,99
5	809,4	0,05	99,99	903,6	900,1	899,1	99,99
6	911,5	0,05	99,99	1011,2	1010,3	1009,8	99,99

удерживания увеличивается с 44,6 (без ингибитора) до 125,8 ( $I = 0,5$  г/дм³) ч.

В соответствии со стехиометрией, для осаждения 1 г/дм³ меди из технологического раствора потребуется получить 0,27 г/дм³ сероводорода, что соответствует гидравлическому времени удерживания жидкой фазы в биореакторе около 90 ч (3,75 сут).

**Результаты лабораторных тестов по получению биогенного сероводорода, регенерации цианида и осаждению меди** представлены в таблице.

Тесты показали, что выбранного расчетным путем гидравлического времени удерживания достаточно для биогенного получения необходимого для осаждения меди количества сероводорода. В процессе сульфатредукции образовалось около 0,25–0,27 г/дм³  $\text{H}_2\text{S}$ . При этом извлечение меди в сульфидный концентрат составило более 99%. После регенерации более 99% цианида находится в свободном виде, пригодном для последующего использования в цикле выщелачивания золота.

По данным анализа полученные осадки представляют собой сульфид меди с содержанием меди и серы на уровне 65 и 35% соответственно.

Результаты, полученные в процессе осаждения меди и регенерации цианида, по исследуемому методу сопоставимы со стандартными способами (AVR, SART, MNR и др.) [32–37].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что смесь штаммов анаэробных сульфидогенных микроорганизмов *Desulfonatronum zhilinae*, *Desulfonatronum cooperativum*, *Desulfonatronobacter acetoxidans* позволяет осуществлять получение биогенного сероводорода непосредственно в медноцианидных растворах с различной концентрацией меди, что дает возможность исключить из технологической цепочки биореактор, как отдельный агрегат, и все вспомогательные коммуникации (насосы, трубопроводы и т.д.) для транспортировки сероводорода.

Для расчета необходимого гидравлического времени удерживания жидкой фазы в реакторе (объема биореактора) можно использовать уравнение Моно. Также данные расчёты позволяют определить оптимальный расход реагентов для сульфатредукции (определить точку ко-лимитирования).

Процесс осаждения меди биогенным сероводородом с регенерацией свободного цианида имеет эффективность более 99% и сопоставим с аналогичными технологиями.

По результатам исследований подана заявка на изобретение для получения биогенного сероводорода с использованием анаэробных сульфатредуцирующих ми-

кроорганизмов *Desulfonatronum zhilinae*, *Desulfonatronum cooperativum*, *Desulfonatronobacter acetoxidans*, в качестве донора электронов может быть использован этиловый спирт.

Дальнейшие исследования по данной тематике будут посвящены практическим испытаниям предлагаемой технологии на технологических растворах, полученных при цианировании золотомедных руд, содержащих цианидные комплексы меди и другие примеси. Также будет проведена экономическая оценка предлагаемой технологии, а также ее сравнение со стандартными схемами переработки медно-цианидных растворов и регенерации цианида.

#### Список источников

1. Fleming C.A. Cyanide recovery // Gold Ore Processing / eds. M.D. Adams. Ontario, 2016. Chapt. 36. P. 647–661.
2. Patent no. 4587110, United States of America, A. Process of recovering copper and of optionally recovering silver and gold by a leaching of oxide- and sulfide-containing materials with water-soluble cyanides / G.M. Potter, A. Bergmann, U. Haidlen. Publ. 1986.
3. Pat. 1050303, United States of America, A. Recovery of Copper from Cyanide Solutions / B. Schwerin; American Cyanamid Company. Publ. 1965.
4. Гринько С.Д., Файберг А.А., Епифоров А.В. Исследования по регенерации цианида в оборотных медноцианистых растворах // Инновационные процессы обогащения и глубокой переработки редкометаллического и горнохимического сырья и комплексных руд цветных и черных металлов (Плаксинские чтения – 2024): матер. Междунар. конф. (г. Апатиты, 23–27 сентября 2024 г.). Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2024. С. 531–535.
5. Пат. № 2443791, Российская Федерация, С1. Способ кондиционирования цианидсодержащих оборотных растворов переработки золотомедистых руд с извлечением золота и меди и регенерацией цианида / В.Ф. Петров, А.А. Файберг, С.В. Петров, Г.И. Войлошников; заявитель и патентообладатель ОАО «Иркутский научно-исследовательский институт благородных и редких металлов и алмазов» ОАО «Иргиредмет». № 2010129019/02. Заявл. 13.07.2010; опубл. 27.02.2012. EDN: RLERP.
6. Lawrence R.W., Fleming C.A. Developments and new applications for biogenic sulphide reagent in hydrometallurgy and mineral processing // SGS Minerals services. Technical paper. 2007-02. Режим доступа: <https://www.sgs.com/-/media/global/documents/technical-documents/sgs-technical-papers/sgs-min-tp2007-02-biogenic-sulphide-reagent-use-in-hydrometallurgy.pdf> (дата обращения: 05.09.2025).
7. Lopez O., Sanguinetti D., Bratty M., Kratochvil D. Green technologies for sulphate and metal removal in mining and metallurgical effluents. 2009. Режим доступа: <https://silo.tips/download/green-technologies-for-sulphate-and-metal-removal-in-mining-and-metallurgical-ef> (дата обращения: 05.09.2025).
8. Михайлова А.Н., Файберг А.А., Дементьев В.Е., Минеев Г.Г., Бонч-Осмоловская Е.А. Получение биогенного сероводорода // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. Вып. 96. С. 124–128.
9. Гринько С.Д., Файберг А.А., Епифоров А.В. Получение биогенного сероводорода с использованием анаэробных сульфидогенных микроорганизмов в цианистых средах // Перспективы развития, совершенствования и автоматизации высокотехнологичных производств: матер. XV Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Иркутск, 24–26 апреля 2024 г.). Иркутск: ИРНТУ, 2025. С. 29–32. EDN: STHFQG.
10. Bratty M., Lawrence R., Kratochvil D., Marchant B. Applications of biological H<sub>2</sub>S production from elemental sulphur in the treatment of heavy metal pollution including acid rock drainage // Processing International Symposium on Acid Rock Drainage (Saint-Louis, 26–29 March 2006.). Saint-Louis, 2006. P. 271–281.
11. Robertson A.M., Everett D.J., Plessis N.J.Du. Sulfates removal by the Gyp-Cix process following lime treatment // Hazardous Materials Control Resources Institute: Proceedings Superfund XIV Conference and Exhibition (Washington, 30 November – 2 December 1993). Washington, 1993. Vol. 2. P. 1037–1044.
12. Jonkers H.M., Koh I.-O., Behrend P., Muyzer G., De Beer D. Aerobic organic carbon mineralization by sulfate-reducing bacteria in the oxygen-saturated photic zone of a hypersaline microbial mat // Microbial Ecology. 2005. Vol. 49. Iss. 2. P. 291–300. <https://doi.org/10.1007/s00248-004-0260-y>.
13. Sigalevich P., Meshorer E., Helman Ya., Cohen Ye. Transition from anaerobic to aerobic growth conditions for the sulfate-reducing bacterium *Desulfovibrio oxyclineae* results in flocculation // Applied and Environmental Microbiology. 2000. Vol. 66. Iss. 11. P. 5005–5012. <https://doi.org/10.1128/aem.66.11.5005-5012.2000>.



14. Dannenberg S., Kroder M., Dilling W., Cypionka H. Oxidation of H<sub>2</sub>, organic compounds and inorganic sulfur compounds coupled to reduction of O<sub>2</sub> or nitrate by sulfate-reducing bacteria // Archives of Microbiology. 1992. Vol. 158. P. 93–99. <https://doi.org/10.1007/BF00245211>.
15. Cypionka H. Oxygen respiration by Desulfovibrio species // Annual Review of Microbiology. 2000. Vol. 54. P. 827–848. <https://doi.org/10.1146/annurev.micro.54.1.827>.
16. Wendt-Potthoff K., Koschorreck M. Functional groups and activities of bacteria in a highly acidic volcanic mountain stream and lake in Patagonia, Argentina // Microbial Ecology. 2002. Vol. 43. Iss. 1. P. 92–106. <https://doi.org/10.1007/s00248-001-1030-8>.
17. Minz D., Flax J.L., Green S.J., Muyzer G., Cohen Y., Wagner M., et al. Diversity of sulfate-reducing bacteria in oxic and anoxic regions of a microbial mat characterized by comparative analysis of dissimilatory sulfite reductase genes // Applied and Environmental Microbiology. 1999. Vol. 65. Iss. 10. P. 4666–4671. <https://doi.org/10.1128/AEM.65.10.4666-4671.1999>.
18. Schramm A., Santegoeds C.M., Nielsen H.K., Ploug H., Wagner M., Pribyl M., et al. On the occurrence of anoxic microniches, denitrification, and sulfate reduction in aerated activated sludge // Applied and Environmental Microbiology. 1999. Vol. 65. Iss. 9. P. 4189–4196. <https://doi.org/10.1128/AEM.65.9.4189-4196.1999>.
19. Risatti J.B., Capman W.C., Stahl D.A. Community structure of a microbial mat: the phylogenetic dimension // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 1994. Vol. 91. Iss. 21. P. 10173–10177. <https://doi.org/10.1073/pnas.91.21.10173>.
20. Rabus R., Nordhaus R., Ludwig W., Widdel F. Complete oxidation of toluene under strictly anoxic conditions by a new sulfate-reducing bacterium // Applied and Environmental Microbiology. 1993. Vol. 59. Iss. 5. P. 1444–1451. <https://doi.org/10.1128/aem.59.5.1444-1451.1993>.
21. Harms G., Zengler K., Rabus R., Aeckersberg F., Minz D., Rossello-Mora R., et al. Anaerobic oxidation of o-xylene, m-xylene, and homologous alkylbenzenes by new types of sulfate-reducing bacteria // Applied and Environmental Microbiology. 1999. Vol. 65. Iss. 3. P. 999–1004. <https://doi.org/10.1128/AEM.65.3.999-1004.1999>.
22. Widdel F., Pfennig N., Krieg N.R., Holt J.G. Dissimilatory sulphate- or sulphur-reducing bacteria // Bergey's manual of systematic bacteriology. 1984. Iss. 1. P. 663–679.
23. Гринько С.Д., Файберг А.А., Епифоров А.В., Гудков С.С. Получение биогенного сероводорода с использованием сульфатредуцирующих бактерий // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: матер. XXIX Междунар. науч.-техн. конф., проводимой в рамках XXII Уральской горнопромышленной декады 1–10 апреля (г. Екатеринбург, 4–5 апреля 2024 г.). Екатеринбург: УГГУ, 2024. С. 222–226. EDN: BEBRRY.
24. Zakharyuk A.G., Kozyreva L., Khijniak T.V., Namsaraev B.B., Sherbakova V.A. Desulfonatronum zhilinae sp. nov., a novel haloalkaliphilic sulfate-reducing bacterium from Lake Alginskoe, Trans-Baikal Region, Russia // Extremophiles. 2015. Vol. 19. Iss. 3. P. 673–680. <https://doi.org/10.1007/s00792-015-0747-0>.
25. Sorokin D.Y., Tourova T.P., Kolganova T.V., Detkova E.N., Galinski E.A., Muyzer G. Culturable diversity of lithotrophic haloalkaliphilic sulfate-reducing bacteria in soda lakes and the description of Desulfonatronum thioautotrophicum sp. nov., Desulfonatronum thiosulfatophilum sp. nov., Desulfonatronovibrio thiodismutans sp. nov., and Desulfonatronovibrio magnus sp. nov. // Extremophiles. 2011. Vol. 15. Iss. 3. P. 391–401. <https://doi.org/10.1007/s00792-011-0370-7>.
26. Pikuta E.V., Hoover R.B., Bej A.K., Marsic D., Whitman W.B., Cleland D., et al. Desulfonatronum thiodismutans sp. nov., a novel alkaliphilic, sulfate-reducing bacterium capable of lithoautotrophic growth // Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 2003. Vol. 53. Pt 5. P. 1327–1332. <https://doi.org/10.1099/ijs.0.02598-0>.
27. Pikuta E.V., Zhilina T.N., Zavarzin G.A., Kostrikin N.A., Osipov G.A., Rainey F.A. Desulfonatronum Lacustre gen. nov. sp. nov.: a new alkaliphilic sulfate – reducing bacterium utilizing ethanol // Microbiology. 1998. Vol. 67. Iss. 1. P. 123–131. EDN: MPABPV.
28. Sorokin D.Y., Chernyh N.A., Poroshina M.N. Desulfonatronobacter acetoxydans sp. nov.: a first acetate-oxidizing, extremely salt-tolerant alkaliphilic SRB from a hypersaline soda lake // Extremophiles. 2015. Vol. 19. Iss. 5. P. 899–907. <https://doi.org/10.1007/s00792-015-0765-y>.
29. Zhilina T.N., Zavarzina D.G., Kuever J., Lysenko A.M., Zavarzin G.A. Desulfonatronum cooperativum sp. nov., a novel hydrogenotrophic, alkaliphilic, sulfate-reducing bacterium, from a syntrophic culture growing on acetate // International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 2005. Vol. 55. Pt 3. P. 1001–1006. <https://doi.org/10.1099/ijs.0.63490-0>.
30. Dada O.I., Abeysinghe S., Rahat S.M.H.S., Liyanage T.U.H., Xiong Xiaochao, Zhu Kuang, et al. Kinetic modeling of sulfate inhibition effects on growth dynamics of novel Thioalkalivibrio sp. isolates from Soap Lake, Washington // Green Chemical Engineering. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.gce.2025.08.004>.
31. Sonnad J.R., Goudar C.T. Solution of the Haldane equation for substrate inhibition enzyme kinetics using the decomposition method // Mathematical and Computer Modelling. 2004. Vol. 40. Iss. 5-6. P. 573–582. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2003.10.051>.
32. Ращенко А.Ф., Файберг А.А., Епифоров А.В., Хвойнов В.Н., Гудков С.С., Елшин В.В. Технология регенерации цианида в оборотных растворах сорбционного цианирования флотоконцентрата руды Березняковского месторождения // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2014. № 1. С. 45–51. EDN: SCWXFJ.
33. Estay H. Designing the SART process – A review // Hydrometallurgy. 2018. Vol. 176. P. 147–165. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2018.01.011>.

34. Simons A., Breuer P.L. The impact of residence time on copper recovery in Telfer gold mine's cyanide recycling process // 5th World Gold 2013: Conference Proceedings (Melbourne, 26–29 September 2013). Melbourne: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2013. P. 189–196.
35. Littlejohn P., Kratochvil D., Hall A. Sulfidisation-acidification-recycling-thickening (SART) for complex gold ores // 5th World Gold 2013: Conference Proceedings (Melbourne, 26–29 September 2013). Melbourne: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2013. P. 149–155.
36. Lawrence R., Lopez O. Improving the economics of gold–copper ore projects using SART technology // World Gold 2011: Conference Proceedings (Calgary, 2–5 October 2011). Calgary: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 2011. P. 255–263.
37. Baker B., Rodriguez F., Littlejohn P. SART implementation at gold mines in Latin America // World Gold 2017: Conference Proceedings (Vancouver, 27–30 August 2017). Vancouver: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 2017.

## References

1. Fleming C.A. Cyanide recovery. In: Adams M.D. (eds.). *Gold Ore Processing*. Ontario; 2016, chapt. 36, p. 647–661.
2. Potter G.M., Bergmann A., Haidlen U. *Process of recovering copper and of optionally recovering silver and gold by a leaching of oxide- and sulfide-containing materials with water-soluble cyanides*. Patent US, no. 4587110; 1986.
3. Schwerin B. *Recovery of copper from cyanide solutions*. Patent US, no. 1050303; 1965.
4. Grin'ko S.D., Faiberg A.A., Epiforov A.V. Studies on cyanide regeneration in recycled copper-cyanide solutions. In: *Innovacionnye processy obogashcheniya i glubokoj pererabotki redkometallichesкого i gornohimicheskogo syr'ya i kompleksnyh rud cvetnyh i chernyh metallov (Plaksinskie chteniya – 2024): materialy Mezhdunarodnoj konferencii = Innovative processes of concentration and deep processing of rare metal and mining-chemical raw materials and complex ores of non-ferrous and ferrous metals (Plaksin Readings - 2024): Proceedings of the international conference*. 23–27 September 2024, Apatity. Apatity: Federal Research Centre. Kola Sciences Centre RAS; 2024, p. 531–535. (In Russ.).
5. Petrov V.F., Faiberg A.A., Petrov S.V., Voiloshnikov G.I. Conditioning method of cyanide-containing reusable solutions for processing of gold-copper ores with extraction of gold and copper and regeneration of cyanide. Patent RF, no. 2443791; 2012. (In Russ.). EDN: RLERVP.
6. Lawrence R.W., Fleming C.A. Developments and new applications for biogenic sulphide reagent in hydrometallurgy and mineral processing. SGS Minerals services. *Technical paper*. 2007-02. Available from: <https://www.sgs.com/-/media/global/documents/technical-documents/sgs-technical-papers/sgs-min-tp2007-02-biogenic-sulphide-reagent-use-in-hydrometallurgy.pdf> [Accessed 5th September 2025].
7. Lopez O., Sanguinetti D., Bratty M., Kratochvil D. Green technologies for sulphate and metal removal in mining and metallurgical effluents. 2009. Available from: <https://silo.tips/download/green-technologies-for-sulphate-and-metal-removal-in-mining-and-metallurgical-ef> [Accessed 5th September 2025].
8. Mikhailova A.N., Faiberg A.A., Dementiev V.E., Mineev G.G., Bonch-Osmolovskaya E.A. Biogenic hydrogen sulfide production. *Vestnik Irkutsk State Technical University*. 2015;96:124–128. (In Russ.).
9. Grin'ko S.D., Faiberg A.A., Epiforov A.V. Production of biogenic hydrogen sulfide using anaerobic sulfidogenic microorganisms in cyanide environments. In: *Perspektivy razvitiya, sovershenstvovaniya i avtomatizacii vysokotekhnologichnyh proizvodstv: materialy XV Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem = Prospects for the development, improvement and automation of high-tech industries: Proceedings of 15th All-Russian scientific and practical conference with international participation*. 24–26 April 2024, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2025, p. 29–32. (In Russ.). EDN: STHFQG.
10. Bratty M., Lawrence R., Kratochvil D., Marchant B. Applications of biological H<sub>2</sub>S production from elemental sulphur in the treatment of heavy metal pollution including acid rock drainage. In: *Processing International Symposium on Acid Rock Drainage*. 26–29 March 2006, Saint-Louis. Saint-Louis; 2006, p. 271–281.
11. Robertson A.M., Everett D.J., Plessis N.J. Du. Sulfates removal by the Gyp-Cix process following lime treatment. In: *Hazardous Materials Control Resources Institute: Proceedings Superfund 14th Conference and Exhibition*. 30 November – 2 December 1993, Washington. Washington; 1993, vol. 2, p. 1037–1044.
12. Jonkers H.M., Koh I.-O., Behrend P., Muyzer G., De Beer D. Aerobic organic carbon mineralization by sulfate-reducing bacteria in the oxygen-saturated photic zone of a hypersaline microbial mat. *Microbial Ecology*. 2005;49(2):291–300. <https://doi.org/10.1007/s00248-004-0260-y>.
13. Sigalevich P., Meshorer E., Helman Ya., Cohen Ye. Transition from anaerobic to aerobic growth conditions for the sulfate-reducing bacterium *Desulfovibrio oxycliniae* results in flocculation. *Applied and Environmental Microbiology*. 2000;66(11):5005–5012. <https://doi.org/10.1128/aem.66.11.5005-5012.2000>.
14. Dannenberg S., Kroder M., Dilling W., Cypionka H. Oxidation of H<sub>2</sub>, organic compounds and inorganic sulfur compounds coupled to reduction of O<sub>2</sub> or nitrate by sulfate-reducing bacteria. *Archives of Microbiology*. 1992;158:93–99. <https://doi.org/10.1007/BF00245211>.
15. Cypionka H. Oxygen respiration by *Desulfovibrio* species. *Annual Review of Microbiology*. 2000;54:827–848. <https://doi.org/10.1146/annurev.micro.54.1.827>.
16. Wendt-Potthoff K., Koschorreck M. Functional groups and activities of bacteria in a highly acidic volcanic mountain stream and lake in Patagonia, Argentina. *Microbial Ecology*. 2002;43(1):92–106. <https://doi.org/10.1007/s00248-001-1030-8>.

17. Minz D., Flax J.L., Green S.J., Muyzer G., Cohen Y., Wagner M., et al. Diversity of sulfate-reducing bacteria in oxic and anoxic regions of a microbial mat characterized by comparative analysis of dissimilatory sulfite reductase genes. *Applied and Environmental Microbiology*. 1999;65(10):4666-4671. <https://doi.org/10.1128/AEM.65.10.4666-4671.1999>.
18. Schramm A., Santegoeds C.M., Nielsen H.K., Ploug H., Wagner M., Pribyl M., et al. On the occurrence of anoxic microniches, denitrification, and sulfate reduction in aerated activated sludge. *Applied and Environmental Microbiology*. 1999;65(9):4189-4196. <https://doi.org/10.1128/AEM.65.9.4189-4196.1999>.
19. Risatti J.B., Capman W.C., Stahl D.A. Community structure of a microbial mat: the phylogenetic dimension. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 1994;91(21):10173-10177. <https://doi.org/10.1073/pnas.91.21.10173>.
20. Rabus R., Nordhaus R., Ludwig W., Widdel F. Complete oxidation of toluene under strictly anoxic conditions by a new sulfate-reducing bacterium. *Applied and Environmental Microbiology*. 1993;59(5):1444-1451. <https://doi.org/10.1128/aem.59.5.1444-1451.1993>.
21. Harms G., Zengler K., Rabus R., Aeckersberg F., Minz D., Rossello-Mora R., et al. Anaerobic oxidation of o-xylene, m-xylene, and homologous alkylbenzenes by new types of sulfate-reducing bacteria. *Applied and Environmental Microbiology*. 1999;65(3):999-1004. <https://doi.org/10.1128/AEM.65.3.999-1004.1999>.
22. Widdel F., Pfennig N., Krieg N.R., Holt J.G. Dissimilatory sulphate- or sulphur-reducing bacteria. *Bergey's manual of systematic bacteriology*. 1984;1:663-679.
23. Grin'ko S.D., Fajberg A.A., Epiforov A.V., Gudkov S.S. Production of biogenic hydrogen sulfide using sulfate-reducing bacteria. In: *Nauchnye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogennogo syr'ya: materialy XXIX Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii, provodimoy v ramkah XXII Ural'skoj gornopromyshlennoj dekady 1–10 aprelya* = Scientific foundations and practice of processing ores and technogenic raw materials: Proceedings of 29th International scientific-technical conference held within the framework of 12th Ural Mining Decade. 4–5 April 2024, Ekaterinburg. Ekaterinburg: Ural State Mining University; 2024, p. 222-226. (In Russ.). EDN: BEBRRY.
24. Zakharyuk A.G., Kozyreva L., Khijniak T.V., Namsaraev B.B., Sherbakova V.A. Desulfonatronum zhilinae sp. nov., a novel haloalkaliphilic sulfate-reducing bacterium from Lake Alginskoe, Trans-Baikal Region, Russia. *Extremophiles*. 2015;19(3):673-680. <https://doi.org/10.1007/s00792-015-0747-0>.
25. Sorokin D.Y., Tourova T.P., Kolganova T.V., Detkova E.N., Galinski E.A., Muyzer G. Culturable diversity of lithotrophic haloalkaliphilic sulfate-reducing bacteria in soda lakes and the description of Desulfonatronum thioautotrophicum sp. nov., Desulfonatronum thiosulfatophilum sp. nov., Desulfonatronovibrio thiodismutans sp. nov., and Desulfonatronovibrio magnus sp. nov. *Extremophiles*. 2011;15(3):391-401. <https://doi.org/10.1007/s00792-011-0370-7>.
26. Pikuta E.V., Hoover R.B., Bej A.K., Marsic D., Whitman W.B., Cleland D., et al. Desulfonatronum thiodismutans sp. nov., a novel alkaliphilic, sulfate-reducing bacterium capable of lithoautotrophic growth. *Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*. 2003;53(Pt 5):1327-1332. <https://doi.org/10.1099/ijs.0.02598-0>.
27. Pikuta E.V., Zhilina T.N., Zavarzin G.A., Kostrikina N.A., Osipov G.A., Rainey F.A. Desulfonatronum Lacustre gen. nov. sp. nov.: a new alkaliphilic sulfate – reducing bacterium utilizing ethanol. *Microbiology*. 1998;67(1):123-131. EDN: MPABPV.
28. Sorokin D.Y., Chernyh N.A., Poroshina M.N. Desulfonatronobacter acetoxydans sp. nov.: a first acetate-oxidizing, extremely salt-tolerant alkaliphilic SRB from a hypersaline soda lake. *Extremophiles*. 2015;19(5):899-907. <https://doi.org/10.1007/s00792-015-0765-y>.
29. Zhilina T.N., Zavarzina D.G., Kuever J., Lysenko A.M., Zavarzin G.A. Desulfonatronum cooperativum sp. nov., a novel hydrogenotrophic, alkaliphilic, sulfate-reducing bacterium, from a syntrophic culture growing on acetate. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*. 2005;55(Pt 3):1001-1006. <https://doi.org/10.1099/ijs.0.63490-0>.
30. Dada O.I., Abeysinghe S., Rahat S.M.H.S., Liyanage T.U.H., Xiong Xiaochao, Zhu Kuang, et al. Kinetic modeling of sulfate inhibition effects on growth dynamics of novel Thioalkalivibrio sp. isolates from Soap Lake, Washington. *Green Chemical Engineering*. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.gce.2025.08.004>.
31. Sonnad J.R., Goudar C.T. Solution of the Haldane equation for substrate inhibition enzyme kinetics using the decomposition method. *Mathematical and Computer Modelling*. 2004;40(5-6):573-582. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2003.10.051>.
32. Rashchenko A.F., Faiberg A.A., Epiforov A.V., Khvoinov V.N., Gudkov S.S., Elshin V.V. Technology of cyanide recovery in recycled solutions of sorption cyanidation of flotation concentrate of ore from the Berezhnyakovskoye deposit. *Sukhoi State Technical University of Gomel*. 2014;1:45-51. (In Russ.). EDN: SCWXFJ.
33. Estay H. Designing the SART process – A review. *Hydrometallurgy*. 2018;176:147-165. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2018.01.011>.
34. Simons A., Breuer P.L. The impact of residence time on copper recovery in Telfer gold mine's cyanide recycling process. In: *5th World Gold 2013: Conference proceedings*. 26–29 September 2013, Melbourne. Melbourne: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy; 2013, p. 189-196.
35. Littlejohn P., Kratochvil D., Hall A. Sulfidisation-acidification-recycling-thickening (SART) for complex gold ores. In: *5th World Gold 2013: Conference proceedings*. 26–29 September 2013, Melbourne. Melbourne: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy; 2013, p. 149-155.
36. Lawrence R., Lopez O. Improving the economics of gold–copper ore projects using SART technology. In: *World Gold 2011: Conference proceedings*. 2–5 October 2011, Calgary. Calgary: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum; 2011, p. 255-263.



37. Baker B., Rodriguez F., Littlejohn P. SART implementation at gold mines in Latin America. In: *World Gold 2017: Conference proceedings*. 27–30 August 2017, Vancouver. Vancouver: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum; 2017.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Гринько Семён Дмитриевич**,  
президент,  
ООО «Управляющая компания ЮГК»,  
457021, г. Пласт, ул. Кооперативная,  
20/210, Россия  
grinko76@mail.ru

**Файберг Анна Александровна**,  
к.т.н.,  
ведущий научный сотрудник,  
Иркутский научно-исследовательский институт  
благородных и редких металлов и алмазов,  
664025, г. Иркутск,  
б-р Гагарина, 38, Россия  
Fayberg@irgiredmet.ru

**Епифоров Александр Владимирович**,  
к.т.н.,  
ведущий научный сотрудник,  
Иркутский научно-исследовательский институт  
благородных и редких металлов и алмазов,  
664025, г. Иркутск,  
б-р Гагарина, 38, Россия  
✉ epiforov@irgiredmet.ru

**Баликов Станислав Васильевич**,  
д.т.н.,  
главный научный сотрудник,  
Иркутский научно-исследовательский институт  
благородных и редких металлов и алмазов,  
664025, г. Иркутск,  
б-р Гагарина, 38, Россия  
balikov@irgiredmet.ru

#### Заявленный вклад авторов

Гринько С.А. определял цель работы, проводил эксперименты, писал статью. Файберг А.А., Епифоров А.В. определяли цель работы, участвовали в обсуждении результатов и в подготовке статьи. Баликов С.В. участвовал в обсуждении результатов и в подготовке статьи.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

#### Информация о статье

Статья поступила в редакцию 05.06.2025 г.; одобрена после рецензирования 23.07.2025 г.; принята к публикации 30.07.2025 г.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Semyon D. Grinko**,  
President of Limited Liability Company  
“Management Company UGC”,  
20/210 Kooperativnaya St., Plast,  
Chelyabinsk Region 457021, Russia  
E-mail: grinko76@mail.ru

**Anna A. Faiberg**,  
Cand. Sci. (Eng.),  
Leading Researcher,  
Irkutsk Research Institute of Precious and  
Rare Metals and Diamonds (IRGIREDMET),  
38 Gagarin Blvd, Irkutsk 664025, Russia  
fayberg@irgiredmet.ru

**Alexander V. Epiforov**,  
Cand. Sci. (Eng.),  
Leading Researcher,  
Irkutsk Research Institute of Precious  
and Rare Metals and Diamonds,  
38 Gagarin Blvd, Irkutsk 664025, Russia  
✉ epiforov@irgiredmet.ru

**Stanislav V. Balikov**,  
Dr. Sci. (Eng.),  
Chief Researcher,  
Irkutsk Research Institute  
of Precious and Rare Metals and Diamonds,  
38 Gagarin Blvd, Irkutsk 664025, Russia  
balikov@irgiredmet.ru

#### Authors' contribution

Semyon D. Grinko defined the purpose of the work, conducted the experiments, wrote the article. Anna A. Faiberg, Alexander V. Epiforov defined the purpose of the work, participated in result discussion and preparation of the article for publication. Stanislav V. Balikov participated in result discussion and preparation of the article for publication.

#### 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 05.06.2025; approved after reviewing 23.07.2025; accepted for publication 30.07.2025.





## Теплофизические особенности брикетов, предназначенных для использования в качестве искусственной донной постели при производстве окатышей

А.В. Ишимбаев<sup>1✉</sup>, И.С. Берсенов<sup>2</sup>, А.И. Груздев<sup>3</sup>, Н.А. Спирин<sup>4</sup>,  
В.И. Матюхин<sup>5</sup>, Б.О. Торобеков<sup>6</sup>, И.А. Мотыгулин<sup>7</sup>

<sup>1,2,4,5</sup>Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия  
<sup>1-3,6,7</sup>ООО «НПП Торэкс», Екатеринбург, Россия

**Резюме.** Цель – исследовать теплофизические свойства брикетов как альтернативы обожженным железорудным окатышам для формирования искусственной донной постели на конвейерных обжиговых машинах. Методология включала физическое моделирование сушки (продувка теплоносителем 150/300 °С), dilatометрический анализ, измерение температурных профилей в брикетах, а также математическое моделирование в ПО TOREX Sensible Indurating Machine. Брикеты изготавливались из концентрата окисленных железистых кварцитов с органическими и неорганическими связующими (цемент, бентонит) при давлении 15 т (цилиндры Ø35×35 мм). Установлено, что переувлажнение при сушке не снижает прочность брикетов (70,1 даН/брикет) благодаря низкой пористости (10% против 30% у окатышей), ограничивающей водопоглощение. Показано, что сушка брикетов протекает на 30–40% медленнее, что обусловлено уменьшенной удельной поверхностью и сниженной проницаемостью по сравнению с железорудными окатышами и требует корректировки режимов нагрева. Коэффициент теплопроводности составил 0,12 Вт/(м·К). Показано, что при обжиге спекание происходит исключительно в поверхностных слоях (глубина 2-3 мм), так как внутренние зоны не достигают температурного порога спекания (>1000 °С) из-за низкой теплопроводности материала. Целостность брикета обеспечивается прочностью обожженной корки и термостойкостью связующего в ядре. Математическое моделирование для конвейерной обжиговой машины № 3 АО «Михайловский горно-обогатительный комбинат» показало, что замена стандартной постели, представляющей собой обожженные окатыши с температурой 80 °С, на брикеты с температурой 15 °С увеличивает производительность данной машины на 25% (до 583 даН/окатыш) и снижает удельный расход природного газа при обжиге окатышей на 8,3% (до 8,8 м³/т) при сохранении качества основной продукции – показателя прочности. Полученные результаты подтверждают принципиальную возможность промышленного применения брикетов всех испытанных составов в качестве искусственной донной постели конвейерной обжиговой машины, демонстрируя их ключевое теплофизическое преимущество – снижение теплотеря в зоне колосников.

**Ключевые слова:** брикеты, донная постель, обжиг окатышей, теплопроводность, сушка, математическое моделирование, теплоперенос, нагрев

**Благодарность.** Выражаем благодарность за консультативное участие в выборе рецептуры брикетов Э.Р. Сабирову и А.М. Бижанову.

**Для цитирования:** Ишимбаев А.В., Берсенов И.С., Груздев А.И., Спирин Н.А., Матюхин В.И., Торобеков Б.О., Мотыгулин И.А. Теплофизические особенности брикетов, предназначенных для использования в качестве искусственной донной постели при производстве окатышей // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 4. С. 580–592. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-4-580-592>. EDN: ZLHKZZ.

## Thermophysical properties of briquettes intended for use as an artificial bottom bed in iron ore pelletizing

Aleksei V. Ishimbaev<sup>1✉</sup>, Ivan S. Bersenev<sup>2</sup>, Andrei I. Gruzdev<sup>3</sup>, Nikolai A. Spirin<sup>4</sup>,  
Vladimir I. Matyukhin<sup>5</sup>, Bektur O. Torobekov<sup>6</sup>, Il'yas A. Motygulin<sup>7</sup>

<sup>1,2,4,5</sup>Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

<sup>1-3,6,7</sup>Torex Research and Development Company, Yekaterinburg, Russia

**Abstract.** The study aimed to examine the thermophysical properties of briquettes as an alternative to indurated iron ore pellets in the formation of an artificial bottom bed in horizontal-grate machines. The methodology included physical simulation of the drying process (circulation of a heat transfer agent at 150/300°C), dilatometric analysis, measurement of temperature profiles in briquettes, and mathematical modeling with the use of TOREX Sensible Indurating Machine software. The briquettes were made from oxidized ferruginous quartzite concentrate with organic and inorganic binders (cement; bentonite) under a load of 15 t (cylinders measuring Ø35×35 mm). It was established that excessive moisture during drying does not reduce the strength of briquettes (70.1 daN/briquette) due to their low porosity (10% as compared to 30% in pellets) that limits water absorption. The drying of briquettes was shown to proceed 30–40% slower due to their reduced specific surface area and permeability compared to iron ore pellets, thus requiring adjustments to the heating conditions. The thermal conductivity coefficient amounted to 0.12 W/(m·K). During firing, sintering occurs exclusively in the surface layers (depth of 2–3 mm) since the inner zones do not reach the sintering temperature threshold (>1000°C) due to the low thermal conductivity of the material. The integrity of the briquette is ensured by the strength of the indurated surface and the thermal stability of the binder at its core. The mathematical simulation performed for the horizontal-grate machine No. 3 at the Mikhailovsky Mining and Processing Plant showed that the replacement of a standard bed comprising indurated iron ore pellets having a temperature of 80°C with briquettes having a temperature of 15°C increases the capacity of this machine by 25% (up to 583 daN/pellet) and reduces the specific consumption of natural gas during iron ore pellet firing by 8.3% (up to 8.8 m³/t) while maintaining the quality of the main product—the strength index. The obtained results confirm the feasibility of using briquettes of all tested compositions as an artificial bottom bed in horizontal-grate machines, demonstrating their key thermophysical advantage—heat loss reduction in the grate zone.

**Keywords:** briquettes, bottom bed, pellet firing, thermal conductivity, drying, mathematical simulation, heat transfer, heating

**Acknowledgments.** The authors thank E.R. Sabirov and A.M. Bizhanov for their advise in choosing the briquette recipe.

**For citation:** Ishimbaev A.V., Bersenev I.S., Gruzdev A.I., Spirin N.A., Matyukhin V.I., Torobekov B.O., Motygulin I.A. Thermophysical properties of briquettes intended for use as an artificial bottom bed in iron ore pelletizing. *iPolytech Journal*. 2025;29(4):580-592. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-4-580-592>. EDN: ZLHKZZ.

## ВВЕДЕНИЕ

Производство стали в настоящее время обеспечивается сырьем за счет окучкованных материалов (агломерат, окатыши, брикеты), формируемых из продуктов измельчения и обогащения руд<sup>8</sup> [1]. Крупнейшие производители стали из Китая, Индии, России, стран Евросоюза и Японии на фоне стабилизации темпов потребления металла все более акцентируют свое развитие в направлении снижения выбросов и эмиссий [2–5]. Агломерат, наиболее распространенный вид окучкованного железорудного сырья,

постепенно снижает свою долю в доменной шихте, а доля брикетов не превышает 5% от общего объема потребления. Вместе с тем производство железорудных окатышей при переработке железосодержащих руд и концентратов демонстрирует неуклонный рост, что связано с преимуществами окатышей перед агломератом и брикетами с точки зрения металлургических свойств и экологичности<sup>9</sup> [6, 7]. Например, эмиссия пыли, СО и парниковых газов при производстве окатышей существенно ниже, чем при агломерации, а содержание железа – выше, чем в

<sup>8</sup>Берсенов И.С., Бардавелидзе Г.Г., Бижанов А.М., Брагин В.В., Груздев А.И., Евстюгин С.Н. Технология окучкования железных руд и концентратов: учеб. пособ. М.: Металлургия, 2025. 406 с.

<sup>9</sup>World Steel in Figures 2024. Режим доступа: <https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures-2024/> (дата обращения: 28.02.2025).

брикетах<sup>10,11</sup> [8]. Такая тенденция повышения доли окатышей в структуре потребления металлургического сырья обуславливает требования к дальнейшей интенсификации производства.

В настоящий момент наиболее распространенной технологией производства окатышей являются их грануляция и обжиг на конвейерных обжиговых машинах [9]. Такая технология характеризуется высокой производительностью и умеренным расходом энергоресурсов, поскольку в ее основе лежит перекрестная схема движения газов при слоевом теплообмене<sup>12</sup> [10, 11]. Упрочнение окатышей до требуемого шахтными печами уровня (прочность на сжатие не менее 220...250 кг на окатыш [12–14]) достигается при температуре верха слоя не менее 1250 °С, а низа слоя – не менее 1200 °С. В таких условиях металлоконструкции обжиговых машин (тележки, колосники) имеют ограниченный ресурс, и для их защиты используется донная постель – слой уже обожженных окатышей. Донная постель играет роль инертного заполнителя, который аккумулирует тепло и обеспечивает ограничение температуры на поверхности колосников не более 1000 °С. Массовая доля донной постели составляет от 15 до 25% от массы обожженных окатышей. Если заменить этот оборотный продукт на искусственную донную постель – брикеты, возможно существенно повысить производительность обжиговых машин – пропорционально массе донной постели. В работах [15, 16] предлагается использование вместо донной постели брикетов, упрочнение которых достигается при более низких значениях температуры в сравнении с окатышами. Такое решение позволяет повысить объем отгружаемой товарной продукции без повышения площади обжиговых машин – только за счет снижения циркуляционной нагрузки. Именно в этом состоит главная идея изложенного техно-

логического решения. Подобная технология в настоящий момент находится в стадии разработки авторами, и для ее реализации требуется понимание теплофизических особенностей поведения брикетов в условиях термической обработки при обжиге на конвейерной машине. Цель исследования состоит в определении особенностей сушки и нагрева брикетов, а также оценке их влияния на технологические показатели обжиговой машины. Методами исследования были выбраны физическое и математическое моделирование процесса обжига железорудных окатышей, исходное сырье – брикеты из концентрата окисленных железистых кварцитов и связующего (неорганическое и органическое связующее – меласса<sup>13</sup> [17]), полученные при давлении 15 т и имеющие форму цилиндра с высотой и диаметром 35 мм.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СУШКИ БРИКЕТОВ

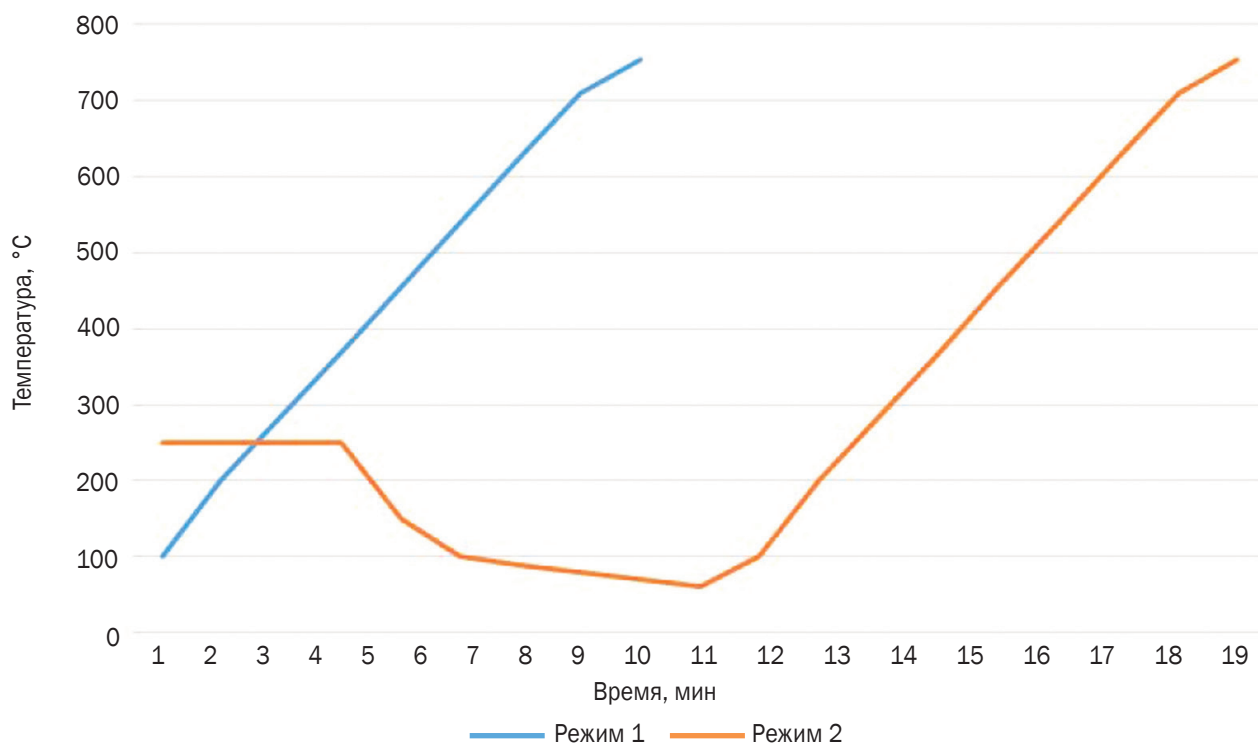
Первой стадией процесса термической обработки брикетов служит их сушка. Слойовой процесс сушки окатышей в настоящее время реализуется путем последовательного применения сушки продувом и прососом, когда газ движется снизу вверх и затем – сверху вниз. Особенности такой организации процесса является переувлажнение сырья в слое за счет конденсации воды, а задача реверса теплоносителя состоит в уменьшении абсолютной величины переувлажнения. Моделирование процесса термической обработки осуществлялось в двух режимах (рис. 1): режим 1 – постепенное повышение температуры без влияния переувлажнения, режим 2 – с учетом переувлажнения. Переувлажнение моделировали путем опрыскивания брикетов водой и выдержки в течение 2 мин. В качестве функции отклика была выбрана прочность брикетов на сжатие: необходимое условие – сохранение прочности на уровне не менее 1,1 кг/окатыш (1,1 даН).

<sup>10</sup>ИТС 26-2023. Информационно-технические справочники. Режим доступа: <https://burondt.ru/its> (дата обращения: 28.02.2025).

<sup>11</sup>ИТС 25-2022. Информационно-технические справочники. Режим доступа: <https://burondt.ru/its> (дата обращения: 28.02.2025).

<sup>12</sup>Ярошенко Ю.Г., Гордон Я.М., Ходоровская И.Ю. Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии черной металлургии: учеб. пособ. Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2012. 670 с.

<sup>13</sup>Бардавелидзе Г.Г. Научно обоснованные технические и технологические решения производства окатышей на обжиговых машинах из концентрата окисленных железистых кварцитов: дис. ... канд. техн. наук: 2.6.2. Екатеринбург, 2024. 144 с.



**Рис. 1.** Моделирование процесса термической обработки (режим 1 – постепенное повышение температуры без влияния переувлажнения, режим 2 – с учетом переувлажнения (с 1 по 4 мин – сушка; с 5 по 16 мин – опрыскивание водой, выдержка по 2 мин; с 17 по 25 мин – нагрев)

**Fig. 1.** Heat treatment process simulation (mode 1 – gradual temperature increase without the influence of overwetting, mode 2 – taking into account overwetting (from the 1st to 4th minutes – drying; from the 5th to 16th minutes – water spraying with 2 minute curing; from the 17th to 25th minutes – heating)

Результаты эксперимента свидетельствуют (табл. 1), что переувлажнение существенно влияет на прочность брикетов в процессе сушки. Это, вероятно, связано с существенным различием окатышей и брикетов в значении пористости (30% и 10% соответственно): брикеты физически не могут впитать воду.

С практической точки зрения переувлажнение не является препятствием для использования брикетов в качестве донной постели. Однако такая особенность структуры может осложнить удаление воды при сушке. Для выяснения характеристик процесса сушки были выполнены эксперименты, в которых

проба окатышей или брикетов продувалась теплоносителем с заданной температурой и оценивалась изменением массы пробы. Температура теплоносителя была выбрана 150 °C и 300 °C, что соответствует реальным значениям этого параметра в зонах сушки 1 и 2 на действующих обжиговых машинах. Результаты исследования приведены в табл. 2. Из полученных данных следует, что сушка брикетов происходит медленнее, чем сырых окатышей. Несмотря на меньший общий объем влаги, подлежащей удалению, ее скорость испарения оказывается ниже, это связано с различием в структуре: брикеты имеют меньшую пористость и, как следствие,

**Таблица 1.** Результаты эксперимента  
**Table 1.** Experiment results

Проба	Режим	Прочность на сжатие, даН/брикет
Концентрат (76,5%) + цемент (3%) + мелочь окатышей (13,5%) + бентонит (7%)	1	60,75
	2	70,10
Концентрат (83,3%) + известь (2%) + мелочь окатышей (14,7%) + органическое связующее (1%)	1	11,60
	2	12,28



сниженную проницаемость, что затрудняет диффузию паров влаги из внутренних областей. При этом следует учитывать, что физически брикеты содержат меньшую массовую долю воды в своей структуре. С технологической точки зрения такое различие показателей сушки приведет к снижению скорости нагрева слоя «постели» при термообработке, и это нужно учитывать при моделировании и реализации технологического процесса.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЖИГА БРИКЕТОВ

Поведение брикетов при высокотемпературной термической обработке исследовалось с использованием дилатометра (рис. 2). Были исследованы два варианта состава брикетов:

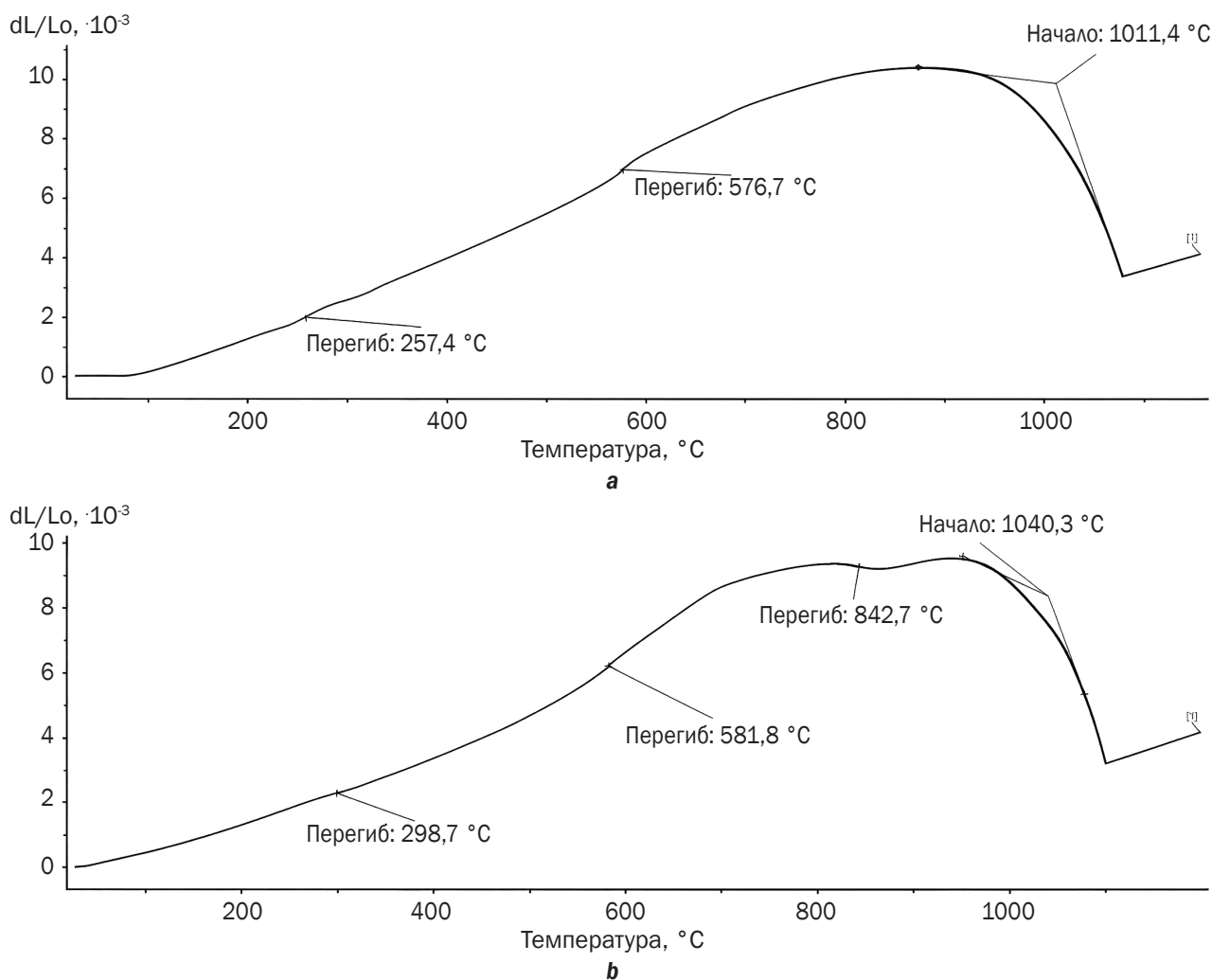
- а) на органическом связующем;
- б) бентонит + цемент.

Цель эксперимента состояла в том, чтобы выяснить качественные различия усадки проб в присутствии (рис. 2 а) органических составляющих, которые разлагаются при нагреве, и в отсутствии таких компонентов (рис. 2 б). Из полученных данных следует, что усадка, характеризующая начало спекания, начинается при температуре выше 1000 °С, при этом принципиальной разницы между связующими разного типа не отмечается.

Для оценки коэффициента теплопроводности был проведен эксперимент при следующих условиях. Были изготовлены брикеты и проведена их термическая обработка с нагревом до 1000 °С при скорости 50 °С/мин, выдержке при максимальной температуре 5 мин и затем охлаждение со скоростью 50 °С/мин. Такой режим в целом соответствует условиям донной постели. Для оценки коэффициента теплопроводности осуществляли контроль

**Таблица 2.** Показатели сушки брикетов и окатышей  
**Table 2.** Drying performances of briquettes and pellets

Температура теплоносителя	мин	Убыль массы, %	
		брикеты	окатыши
150 °С	0	0	0
	5	0,4	1,1
	10	0,9	2,6
	15	1,5	4,2
	20	2,4	6,0
	25	3,0	7,1
	30	3,7	7,5
	35	4,4	7,6
	40	4,9	7,6
	45	5,3	7,6
	50	5,7	7,6
	55	5,9	7,6
300 °С	0	0	0
	5	2	6,6
	10	5	7,8
	15	6	7,8
	20	6	7,8
	25	6	7,8
	30	6	7,9
	35	6	7,9
	40	6	7,9
	45	6	7,9
	50	6	7,9
	55	6	7,9



**Рис. 2.** Дилатограммы нагрева брикетов на: а – органическом связующем; б – связующем «бентонит-цемент»  
**Fig. 2.** Dilatograms of briquette heating using: а – organic binder; б – bentonite-cement binder

температуры снаружи брикетов и внутри. Измерения проводились термопарами градуировки ХА (хромель-алюмель), один спай – снаружи образца, второй – замурован в центре брикета. Общий вид брикетов в корзине для обжига и печи для обжига приведен на рис. 3, данные о прочности брикетов после обжига приведены в табл. 3. Видно, что прочность брикетов соответствует прочности окатышей низа слоя (не менее 150 даН/окатыш).

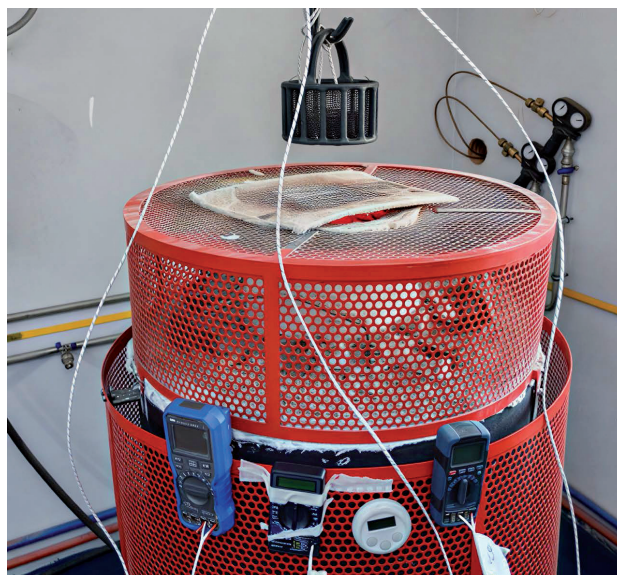
Определение на основании этих данных коэффициента теплопроводности было выполнено по аналогии с работой<sup>14</sup>. Значение коэффициента теплопроводности составило

0,12 Вт/(м·К) в области, в которой отсутствуют фазовые переходы. Данные об изменении температуры внутри брикета дают информацию не только для оценки теплофизических свойств, но также и позволяют уточнить требования к связующим веществам. В частности, из сопоставления рис. 2 и рис. 4 видно, что внутри брикета при термообработке процессы спекания не реализуются: температура внутри брикета низкая. Соответственно, целостность брикета определяется прочностью его поверхностных (обожженных) слоев и остаточной прочностью связующего внутри брикета. С точки зрения технологии изготовления брикетов для донной постели это

<sup>14</sup>Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024663929, Российская Федерация. TOREX Sensible Indurating Machine / В.В. Брагин, С.И. Поколенко, А.Ю. Поколенко, А.И. Груздев, А.В. Ишимбаев, И.С. Берсенов; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственное внедренческое предприятие ТОРЭКС». Заявка № 2024662902, заявл. 07.06.2024; опубли. 14.06.2024.



а



b

Рис. 3. Общий вид брикетов в корзинке для обжига (а) и печи для обжига (b)

Fig. 3. General view of briquettes in a firing basket (a) and a firing kiln (b)

Таблица 3. Данные о прочности брикетов после обжига

Table 3. Data on briquette strength after firing

Наименование опыта/добавки	Сырые, даН/окатыш	Сухие, даН/окатыш	Обожженные, даН/окатыш
Проба 1: концентрат + жидкое стекло (2%)	40,78	142,25	410,83
Проба 2: концентрат + органическое связующее (0,4%) + бентонит (2%)	12,77	36,89	174,19

означает, что брикеты должны иметь связку, которая сохраняет прочность при нагреве. То есть брикеты изначально должны быть достаточно прочными, и при обжиге их связующее должно способствовать упрочнению при на-

греве выше 400–500 °С, а при нагреве – до уровня ниже этих значений – как минимум не разупрочняться. Иными словами, спекание во всю глубину брикета не происходит и это должно быть учтено при выборе связующего.

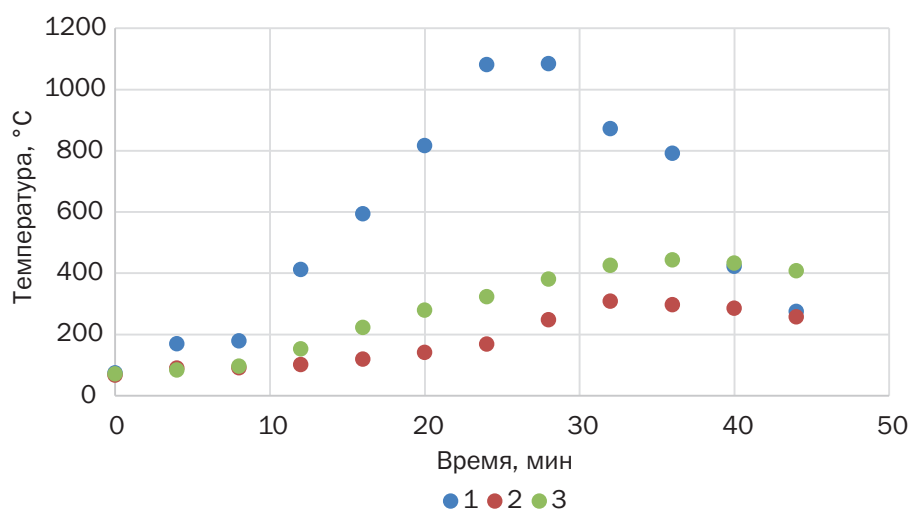


Рис. 4. Температура снаружи и внутри брикетов (1 – температура снаружи образца; 2 – температура внутри – проба 1; 3 – температура внутри – проба 2)

Fig. 4. Temperature outside and inside briquettes (1 – temperature outside the sample; 2 – inside temperature – sample 1; 3 – inside temperature – sample 2)

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЖИГА

Моделирование процесса обжига осуществляли с использованием программного обеспечения TOREX Sensible Indurating Machine [18, 19], в котором осуществляется оценка обжига окатышей с учетом теплофизических свойств, физико-химических превращений и фазовых переходов, характерных для обжига железорудных окатышей. В качестве объекта-аналога была выбрана обжиговая машина № 3 АО «Михайловский горно-обогатительный комбинат им. А.В. Варичева», тепловая схема которой приведена на рис. 5 [20]. В процессе исследования оценены замена донной постели на брикеты и изменение температуры брикетов. Такой выбор переменных осуществлен потому, что

замена теплофизически инертной постели из обожженных окатышей на влажные брикеты приведет к изменению теплового баланса обжига, а кроме того – обожженные окатыши имеют температуру на уровне 80...100 °С, в то время как брикеты будут иметь температуру, близкую к внешней температуре цеха или склада. При моделировании режим термической обработки окатышей и их прочность сохранялись на заданном уровне. Результаты моделирования представлены в табл. 4. Брикеты считаются как слой постели, объем производства обожженных окатышей и содержание FeO в них возросли. Изменения процесса обжига при корректировке температуры донной постели незначительны, что, вероятно, обусловлено природой постели как оборотного продукта.

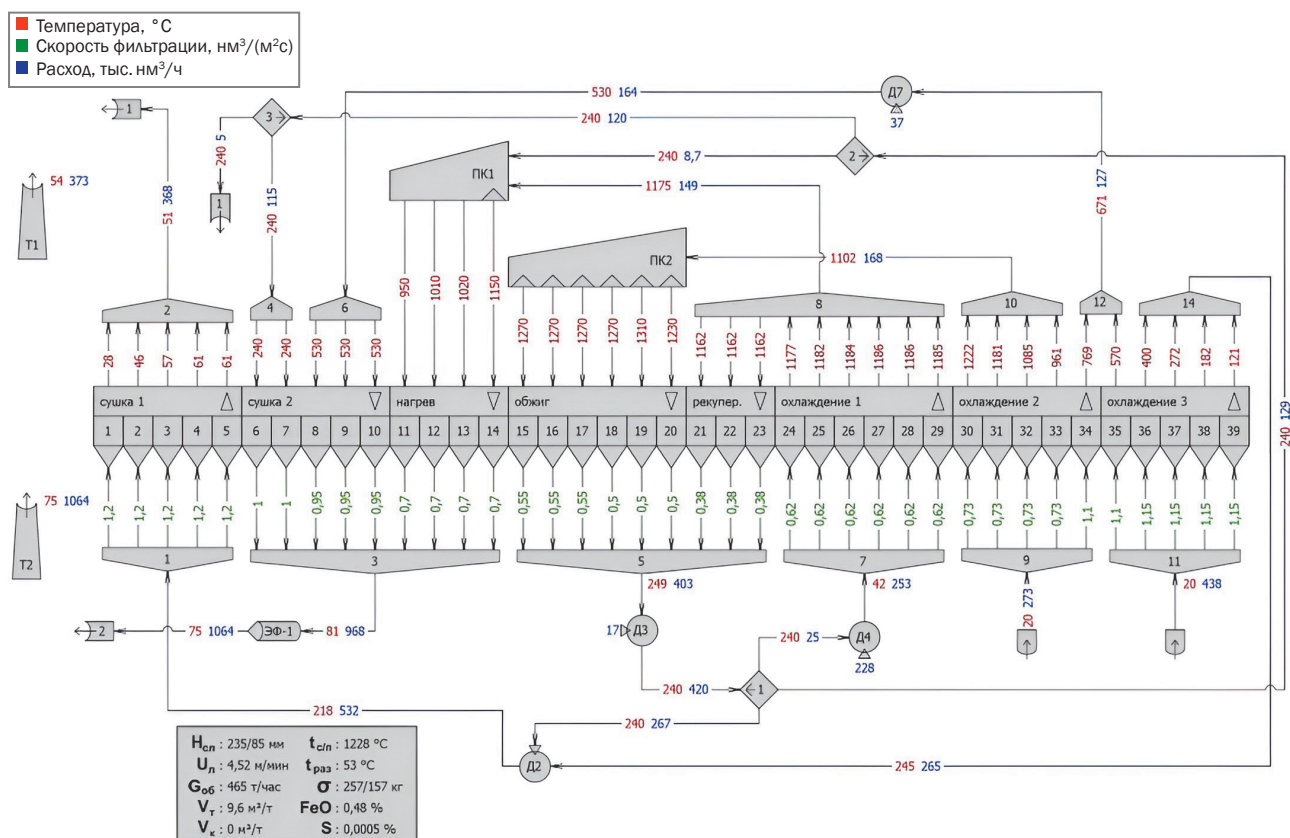


Рис. 5. Тепловая схема конвейерной обжиговой машины (базовый вариант)  
 Fig. 5. Thermal diagram of a conveyor firing machine (basic version)

Таблица 4. Результаты моделирования  
 Table 4. Simulation results

№	Вариант донной постели	Производительность средняя по слою, даН/окатыш	Содержание FeO в окатышах, %	Удельный расход природного газа, м³/т
1	Окатыши (80 °С)	465	0,48	9,6
2	Окатыши (15 °С)	465	0,48	9,6
3	Брикеты (15 °С)	583	3,71	8,8



На рис. 6 приведены термограммы процесса обжига в различных вариантах донной постели в разных участках печи. Видно, что использование брикетов приводит к незначительному ускорению нагрева слоя в зоне обжига, и при этом принципиальных отличий в режимах термической обработки нет.

Таким образом, результаты исследования показали принципиальную возможность использования брикетов в качестве искусственной донной постели для обжига железорудных окатышей на конвейерной обжиговой машине с позиции их теплофизических свойств. Полученные данные могут служить исходной информацией для:

- подбора оптимальных составов брикетов;
- разработки технических решений подачи их на обжиговую машину;
- технико-экономической оценки использования смеси окатышей и брикетов в металлургическом процессе.

Проработка этих задач планируется авторами в дальнейшем.

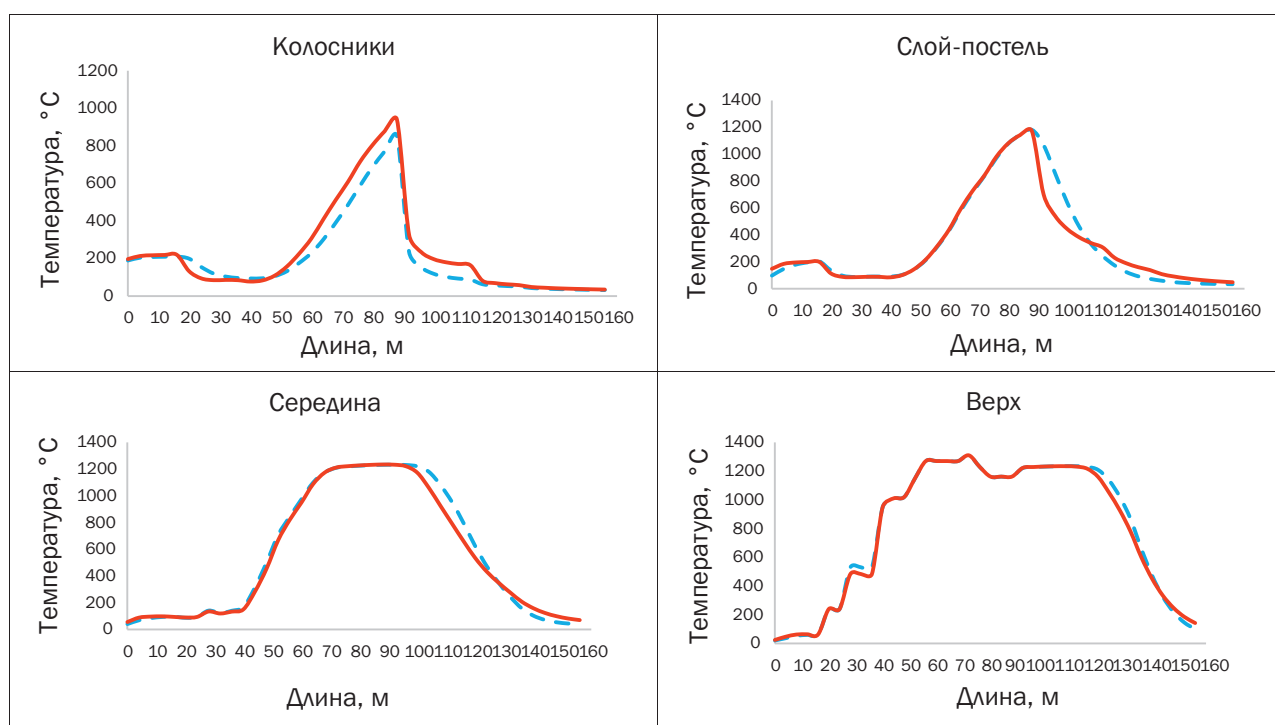
## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Сушка брикетов, предназначенных для использования в качестве искусственной дон-

ной постели, в условиях, характерных для обжиговой конвейерной машины (в том числе переувлажнение), не ухудшает их прочность. При этом удаление влаги из брикетов протекает медленнее, чем из окатышей. Это связано с различием в плотности и пористости кусков: окатыши имеют большую пористость.

2. Коэффициент теплопроводности брикетов, предназначенных для использования в качестве донной постели, составляет 0,12 Вт/(м·К).

3. Показано, что внутри брикета при термообработке процессы спекания не реализуются: температура внутри брикета низкая. Соответственно, целостность брикета определяется прочностью его поверхностных (обожженных) слоев и остаточной прочностью связующего внутри куска. С точки зрения технологии брикетов для донной постели это означает, что брикеты должны иметь связующее, которое сохраняет прочность при нагреве. То есть брикеты изначально должны быть достаточно прочными, и при обжиге их связующее должно способствовать упрочнению при нагреве выше 400...500 °С, а при нагреве до уровня ниже этих значений – не разупрочняться.



**Рис. 6.** Термограммы слоя на разных горизонтах при использовании обожженных окатышей и брикетов в качестве донной постели (сплошная линия – брикеты, пунктир – окатыши)

**Fig. 6.** Thermograms of the layer at different horizons when using fired pellets and briquettes as a bottom bed (solid line – briquettes, dotted line – pellets)

4. Изменения процесса обжига (при использовании брикетов) при корректировке температуры донной постели незначительны, а использование брикетов приводит к незначительному ускорению нагрева слоя в зоне

обжига и при этом принципиальных отличий в режимах термической обработки нет. Результаты исследования показали принципиальную возможность использования брикетов с позиции их теплофизических свойств.

#### Список источников

1. Ишимбаев А.В., Матюхин В.И., Берсенов И.С., Сабилов Э.Р., Бижанов А.М. Разработка технологии брикетов для искусственной постели // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сборник докладов XIII Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных с междунар. участием (г. Екатеринбург, 15–16 мая 2025 г.). Екатеринбург: УрФУ, 2025. С. 24–31.
2. Farjana S.H., Huda N., Mahmud M.A.P., Saidur R. A review on the impact of mining and mineral processing industries through life cycle assessment // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 231. P. 1200–1217. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.264>.
3. Li Qiuyu, Ma Ke, Su Zijian, Zhang Yuanbo, Jiang Tao. Insights into phase transformations of PM in high SO<sub>2</sub> and HF flue gas from iron ore pelletizing: implications for cleaner emission control strategy // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2025. Vol. 13. Iss. 5. P. 118557. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.118557>.
4. Yonghe Ma, Qian Li, Xuling Chen, Yan Zhang, Yongbin Yang, Qiang Zhong. Reducing bentonite usage in iron ore pelletization through a novel polymer-type binder: impact on pellet induration and metallurgical properties // Journal of Materials Research and Technology. 2024. Vol. 30. P. 8019–8029. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.05.175>. EDN: SBSGPM.
5. Буданов И.А. Макроэкономические перспективы производства металла // Сталь. 2024. № 6. С. 47–53. EDN: BIAHFI.
6. Kapelyushin Yu.E. Comparative review on the technologies of briquetting, sintering, pelletizing and direct use of fines in processing of ore and technogenic materials // CIS Iron and Steel Review. 2023. Vol. 26. Iss. 2. P. 4–11. <https://doi.org/10.17580/cisisr.2023.02.01>. EDN: TVDICQ.
7. Bizhanov A., Chizhikova V. Agglomeration in metallurgy. Cham: Springer, 2020. 454 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-26025-5>.
8. Буткарев А.А., Буткарева Е.А. Сравнительный анализ обжиговых конвейерных машин и комбинированных установок решетка – трубчатая печь – охладитель для выбора технологии производства окатышей // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2021. Т. 77. № 8. С. 957–968. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2021-8-957-968>. EDN: DGOQES.
9. Фролов Ю.А. Агломерация: технология, теплотехника, управление, экология: монография. М.: Металлургиздат, 2016. 672 с.
10. Азимова Л.Г. Теоретические основы новых энергосберегающих технологий производства железорудных окатышей // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2025. № 47. С. 71–76. <https://doi.org/10.26160/2474-5901-2025-47-71-76>. EDN: OBMXNO.
11. Гедеерс М., Ченьо Р., Курунов И., Лингарди О., Рикеттс Д. Современный доменный процесс. Введение / пер. с англ. и ред. И.Ф. Курунова. М.: Металлургиздат, 2016. 274 с.
12. Абзалов В.М., Горбачев В.А., Евстюгин С.Н., Клейн В.И., Леонтьев Л.И., Юрьев Б.П. Физико-химические и теплотехнические основы производства железорудных окатышей: монография. Екатеринбург: ООО «Научно-производственное внедренческое предприятие Торэкс», 2015. 335 с. EDN: YUMUCB.
13. Селезнев В.С., Мальцева В.Е., Чукин Д.М., Катаев А.П., Ложкин И.А. Сортировка и отгрузка окатышей. Экология фабрик окомкования. М.: Металлургиздат, 2024. 329 с.
14. Ishimbaev A.V., Bersenev I.S., Matyukhin V.I., Bragin V.V., Sabirov E.R. Increasing the productivity of conveyor machines by using an artificial bottom bed // Steel in Translation. 2024. Vol. 54. No. 4. P. 360–364. <https://doi.org/10.3103/S0967091224700761>. EDN: QZNCQS.
15. Пат. № 2824512, Российская Федерация, С1. Способ защиты колосникового поля с помощью постели из брикетов и его применение в конвейерной обжиговой или агломерационной машине / А.В. Ишимбаев, Э.Р. Сабилов, В.И. Матюхин, В.В. Брагин, С.П. Пигарев, А.И. Груздев, И.С. Берсенов; заявитель и патентообладатель ООО «НПВП Торэкс». Заявл. 27.11.2023; опубл. 08.08.2024. Бюл. № 22.
16. Bizhanov A., Kurunov I., Podgorodetskyi G., Dashevskiy V. Extruded briquettes – new charge component for the ferroalloys production // ISIJ International. 2014. Vol. 54. Iss. 10. P. 2206–2214. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.2206>.
17. Никишанин М.С., Сеначин П.К. Углеродосодержащие брикеты на разных связующих веществах, их теплофизические характеристики и использование в газогенераторах // Ползуновский вестник. 2009. № 1-2. С. 305–311. EDN: KZCPGV.
18. Павловец В.М. Особенности развития техники и технологии окомкования железорудной шихты в производстве окатышей // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2023. Т. 66. № 5. С. 529–537. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-5-529-537>. EDN: BGGSOY.
19. Zhang Yuan-bo, Chen Xi-jun, Su Zi-jian, Liu Shuo, Chen Fang, Wu Nan-yong, et al. Improving properties of fluxed iron ore pellets with high-silica by regulating liquid phase // Journal of Iron and Steel Research International. 2021. Vol. 29. P. 1381–1392. <https://doi.org/10.1007/s42243-021-00665-4>. EDN: YYKHPPF.

20. Мальцева В.Е., Селезнев В.С., Чукин Д.М. Термообработка сырых окатышей: технология и схемы обжиговых машин: монография. М.: Metallurgizdat, 2023. 719 с. EDN: KDEKOZ.

### References

1. Ishimbaev A.V., Matyuhin V.I., Bersenev I.S., Sabirov E.R., Bizhanov A.M. Development of briquette technology for artificial bedding. In: *Teplotekhnika i informatika v obrazovanii, nauke i proizvodstve: sbornik dokladov XIII Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchyonyh s mezhdunarodnym uchastiem = Heat Engineering and Information Science in Education, Science and Production: Proceedings of the 13th All-Russian Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists with International Participation*. 15–16 May 2025, Ekaterinburg. Ekaterinburg: Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin; 2025, p. 24-31. (In Russ.).
2. Farjana S.H., Huda N., Mahmud M.A.P., Saidur R. A review on the impact of mining and mineral processing industries through life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*. 2019;231:1200-1217. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.264>.
3. Li Qiuyu, Ma Ke, Su Zijian, Zhang Yuanbo, Jiang Tao. Insights into phase transformations of PM in high SO<sub>2</sub> and HF flue gas from iron ore pelletizing: implications for cleaner emission control strategy. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2025;13(5):118557. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.118557>.
4. Yonghe Ma, Qian Li, Xuling Chen, Yan Zhang, Yongbin Yang, Qiang Zhong. Reducing bentonite usage in iron ore pelletization through a novel polymer-type binder: impact on pellet induration and metallurgical properties. *Journal of Materials Research and Technology*. 2024;30:8019-8029. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.05.175>. EDN: SBSGPM.
5. Budanov I.A. Macroeconomic prospects for metal production. *Stal'*. 2024;6:47-53. (In Russ.). EDN: BIAHFI.
6. Kapelyushin Yu.E. Comparative review on the technologies of briquetting, sintering, pelletizing and direct use of fines in processing of ore and technogenic materials. *CIS Iron and Steel Review*. 2023;26(2):4-11. <https://doi.org/10.17580/cisirs.2023.02.01>. EDN: TVDICQ.
7. Bizhanov A., Chizhikova V. *Agglomeration in Metallurgy*. Cham: Springer; 2020, 454 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-26025-5>.
8. Butkarev A.A., Butkareva E.A. Comparative analysis of straight grate machines and combined facilities grate-tube-type kiln-cooler for selection technology of pellets production. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2021;77(8):957-968. (In Russ.). <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2021-8-957-968>. EDN: DGOQES.
9. Frolov Yu.A. *Agglomeration: technology, heat engineering, management, ecology: monograph*. Moscow: Metallurgizdat; 2016, 672 p. (In Russ.).
10. Azimova L.G. Theoretical foundations of new energy-saving technologies for the production of iron ore pellets. *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2025;47:71-76. (In Russ.). <https://doi.org/10.26160/2474-5901-2025-47-71-76>. EDN: OBMXNO.
11. Geerders M., Chaigneau R., Kurunov I., Lingardi O., Ricketts D. *Modern blast-furnace ironmaking. Introduction* / translated from English and edited by I.F. Kurunov. Moscow: Metallurgizdat; 2016, 274 p. (In Russ.).
12. Abzalov V.M., Gorbachev V.A., Evstyugin S.N., Klein V.I., Leontiev L.I., Yuriev B.P. *Physicochemical and thermal engineering principles of iron ore pellets production*. Ekaterinburg: Torex Research and Development Company LLC; 2015, 335 p. (In Russ.). EDN: YUMUCB.
13. Seleznev V.S., Maltseva V.E., Chukin D.M., Kataev A.P., Lozhkin I.A. *Sorting and loading of pellets. Ecology of pelletizing factories*. Moscow: Metallurgizdat; 2024, 329 p. (In Russ.).
14. Ishimbaev A.V., Bersenev I.S., Matyukhin V.I., Bragin V.V., Sabirov E.R. Increasing the productivity of conveyor machines by using an artificial bottom bed. *Steel in Translation*. 2024;54(4):360-364. <https://doi.org/10.3103/S0967091224700761>. EDN: QZNCQS.
15. Ishimbaev A.V., Sabirov E.R., Matyukhin V.I., Bragin V.V., Pigarev S.P., Gruzdev A.I., Bersenev I.S. *Protection method of a grate field using a briquette bed and its use in a conveyor calcining or sintering machine*. Patent RF, no. 2824512; 2024. (In Russ.).
16. Bizhanov A., Kurunov I., Podgorodetskyi G., Dashevskiy V. Extruded briquettes – new charge component for the ferroalloys production. *ISIJ International*. 2014;54(10):2206-2214. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.2206>.
17. Nikishanin M.S., Senachin P.K. Carbon-containing briquettes on different binders, their thermophysical characteristics and use in gas generators. *Polzunovskiy vestnik*. 2009;1-2:305-311. (In Russ.). EDN: KZCPGV.
18. Pavlovets V.M. Development of equipment and technology for pelletizing iron ore charge in production of pellets. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023;66(5):529-537. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-5-529-537>. EDN: BGGSOY.
19. Zhang Yuan-bo, Chen Xi-jun, Su Zi-jian, Liu Shuo, Chen Fang, Wu Nan-yong, et al. Improving properties of fluxed iron ore pellets with high-silica by regulating liquid phase. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2021;29:1381-1392. <https://doi.org/10.1007/s42243-021-00665-4>. EDN: YYKHFP.
20. Maltseva V.E., Seleznev V.S., Chukin D.M. *Heat treatment of green pellets: technology and schemes of firing machines*. Moscow: Metallurgizdat; 2023, 719 p. (In Russ.). EDN: KKODOZ.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Ишимбаев Алексей Владимирович,**  
аспирант,  
Уральский федеральный университет имени  
первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
620062, г. Екатеринбург,  
ул. Мира, 19, Россия;  
ведущий инженер-конструктор,  
ООО «Научно-производственное  
внедренческое предприятие Торэкс»,  
620902, г. Екатеринбург, пос. Полеводство,  
ул. Старожилов, 72, Россия  
✉ a.ishimbaev@torex-npvp.ru

**Берсенов Иван Сергеевич,**  
к.т.н., доцент,  
Уральский федеральный университет имени  
первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
620062, г. Екатеринбург,  
ул. Мира, 19, Россия;  
руководитель группы,  
ООО «Научно-производственное  
внедренческое предприятие Торэкс»,  
620902, г. Екатеринбург, пос. Полеводство,  
ул. Старожилов, 72, Россия  
i.bersenev@torex-npvp.ru  
<https://orcid.org/0009-0000-4270-6042>

**Груздев Андрей Игоревич,**  
руководитель группы,  
ООО «Научно-производственное  
внедренческое предприятие Торэкс»,  
620902, г. Екатеринбург, пос. Полеводство,  
ул. Старожилов, 72, Россия  
a.gruzdev@torex-npvp.ru

**Спирин Николай Александрович,**  
д.т.н., профессор,  
Уральский федеральный университет имени  
первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
620062, г. Екатеринбург,  
ул. Мира, 19, Россия  
n.a.spirin@urfu.ru

**Матюхин Владимир Ильич,**  
к.т.н., доцент,  
старший научный сотрудник,  
Уральский федеральный университет имени  
первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
620062, г. Екатеринбург,  
ул. Мира, 19, Россия  
matyhin53@mail.ru

**Торобеков Бектур Османович,**  
инженер,  
ООО «Научно-производственное  
внедренческое предприятие Торэкс»,  
620902, г. Екатеринбург, пос. Полеводство,  
ул. Старожилов, 72, Россия  
b.torobekov@torex-npvp.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Aleksei V. Ishimbaev,**  
Postgraduate Student,  
Ural Federal University  
named after the First President of Russia B.N. Yeltsin,  
19, Mira St., Yekaterinburg 620062, Russia,  
Leading Design Engineer,  
Torex Research and Development Company LLC,  
72, Starozhilov St., Polevodstvo cottage estate,  
Yekaterinburg 620902, Russia  
✉ a.ishimbaev@torex-npvp.ru

**Ivan S. Bersenev,**  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Ural Federal University  
named after the First President of Russia B.N. Yeltsin,  
19, Mira St., Yekaterinburg 620062, Russia,  
Leading Design Engineer,  
Team Supervisor of  
Torex Research and Development Company LLC,  
72, Starozhilov St., Polevodstvo cottage estate,  
Yekaterinburg 620902, Russia  
i.bersenev@torex-npvp.ru  
<https://orcid.org/0009-0000-4270-6042>

**Andrei I. Gruzdev,**  
Team Supervisor of  
Torex Research and Development Company LLC,  
72, Starozhilov St., Polevodstvo cottage estate,  
Yekaterinburg 620902, Russia  
a.gruzdev@torex-npvp.ru

**Nikolai A. Spirin,**  
Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Ural Federal University  
named after the First President of Russia B.N. Yeltsin,  
19, Mira St., Yekaterinburg 620062, Russia,  
n.a.spirin@urfu.ru

**Vladimir I. Matyukhin,**  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Senior Researcher,  
Ural Federal University  
named after the First President of Russia B.N. Yeltsin,  
19, Mira St., Yekaterinburg 620062, Russia,  
matyhin53@mail.ru

**Bektur O. Torobekov,**  
Engineer,  
Torex Research and Development Company LLC,  
72, Starozhilov St., Polevodstvo cottage estate,  
Yekaterinburg 620902, Russia  
b.torobekov@torex-npvp.ru



**Мотыгулин Ильяс Асядулович,**  
инженер,  
ООО «Научно-производственное  
внедренческое предприятие Торэкс»,  
620902, г. Екатеринбург, пос. Полеводство,  
ул. Старожилов, 72, Россия  
i.motygullin@torex-npvp.ru

**Il'yas A. Motygulin,**  
Engineer,  
Torex Research and Development Company LLC,  
72, Starozhilov St., Polevodstvo cottage estate,  
Yekaterinburg 620902, Russia  
i.motygullin@torex-npvp.ru

#### **Заявленный вклад авторов**

Берсенева И.С., Ишимбаев А.И., Матюхин В.И.,  
Спирин Н.А. – постановка задачи, участие в эксперименте, анализ и формулирование результатов и выводов. Груздев А.И. – математическое моделирование обжига окатышей. Торобеков Б.О., Мотыгулин И.А. – получение проб брикетов, выполнение экспериментов по сушке окатышей.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

#### **Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 09.08.2025 г.; одобрена после рецензирования 26.09.2025 г.; принята к публикации 02.10.2025 г.

#### **Authors' contribution**

Ivan S. Bersenev, Aleksei V. Ishimbaev, Vladimir I. Matyukhin, Nikolai A. Spirin – problem setting, participation in experiments, analysis and formulation of results and conclusions. Andrei I. Gruzdev – mathematical modeling of pellet firing. Bektur O. Torobekov, Il'yas A. Motygulin – briquette sampling and performing pellet drying experiments.

#### **Conflict of interests**

The authors declare no conflict of interests.

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

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

The article was submitted 09.08.2025; approved after reviewing 26.09.2025; accepted for publication 02.10.2025.

## ПЕРСОНАЛИЯ

### Учитель с большой буквы

**Димов Юрий Владимирович, доктор технических наук, профессор, почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, заслуженный профессор Иркутского национального исследовательского технического университета – Учитель с большой буквы!**

**В декабре 2025 года Юрий Владимирович отметил свой 95-летний юбилей!**



Родился Ю.В. Димов в 1930 году в поселке Усть-Карск Читинской области. После школы закончил Иркутский авиационный техникум. А в 1951 году Юрий Владимирович поступил в Иркутский горно-металлургический институт (ныне ИРНИТУ). Через пять лет получил квалификацию инженера-механика по специальности «Технология машиностроения», став выпускником первой десятки, а если точнее, то это был восьмой выпуск профессионалов своего дела, которые заложили фундамент технического образования в Сибири. Более 70 лет своей жизни Юрий Владимирович посвятил становлению и развитию машиностроительной отрасли.

После окончания института Юрий Владимирович начинает свой трудовой путь на Иркутском авиационном заводе и более 10 лет принимает участие в освоении технологии изготовления самолетов АН-12, АН-24 и ЯК-28.

В 1969 году Юрий Владимирович после окончания аспирантуры и защиты кандидатской диссертации на тему «Исследование производительности, точности и качества поверхности при виброабразивной обработке легких сплавов в связи с действующими силами» под руководством А.И. Промптова возвращается в Иркутский политехнический институт (ныне ИРНИТУ) на должность старшего преподавателя, а затем – доцента кафедры «Металлорежущие станки и инструменты», выбрав своим научным приоритетом исследования область абразивной обработки.

В 1988 году Ю.В. Димов защитил докторскую диссертацию на тему «Управление качеством поверхностного слоя детали при обработке абразивными гранулами», а в 1989 году ему присвоено ученое звание профессора.

За подготовку высококвалифицированных специалистов, разработку передовых идей для Иркутского авиационного завода – филиала корпорации «Иркут» – профессор неоднократно награждался Почетными грамотами и благодарностями от руководства предприятия.

Юрий Владимирович внес значительный вклад в развитие науки и практики обработки деталей свободным абразивом и эластичным абразивным инструментом. Результаты исследования внедрены на Иркутском авиазаводе, Иркутском релейном заводе, Улан-Удэнском приборостроительном, Ангарском электромеханическом заводах, Куйбышевском авиазаводе, Казанском заводе кинофотоматериалов, на ПО «Свема» (г. Шостка). Под его руковод-

ством разработаны и внедрены в производство установки для изготовления инструмента из полимерноабразивных нитей, предназначенных для полирования нержавеющей ленты на машинах, применяемых при производстве основы кинофотопленки.

С 1980 по 2000 годы Юрий Владимирович руководил кафедрой «Конструирование и стандартизация в машиностроении» института «Авиамашиностроения и транспорта» ИРНТУ. В этот период кафедра принимает участие в подготовке специалистов практически всех специальностей и направлений в университете. И это заслуга Димова Юрия Владимировича. Под руководством профессора Ю.В. Димова подготовлено три кандидатских и одна докторская диссертации. Он является членом-корреспондентом Сибирского отделения Академии наук высшей школы. Профессором Ю.В. Димовым подготовлено свыше 180 научных трудов и учебно-методических работ, получено 11 патентов и авторских свидетельств на изобретения. Издан справочник по абразивному инструменту, опубликованы монографии на основе его многолетнего научно-исследовательского труда. Юрий Владимирович был рецензентом сотен научных статей, десятков авторефератов кандидатских и докторских диссертаций. Авторитет его рецензирования не подлежит сомнению. Профессор Димов является автором десятка учебников по метрологии, стандартизации и сертификации, в том числе с грифом УМО. По его книгам учились и учатся миллионы студентов, как в нашем университете, так и за его пределами. Замечаешь большое удивление в глазах студентов, когда они узнают, что лекции им читает сам автор учебника, который они держат в руках. С этим удивлением приходит и глубокое уважение к профессору, который передает им свои знания из рук в руки. Под пристальным вниманием Юрия Владимировича до сих пор продолжает функционировать учебно-исследовательская лаборатория по техническим измерениям. Студенты отмечают большую практическую значимость занятий, организованных на базе этой лаборатории. Коллектив кафедры под руководством Юрия Владимировича всегда отличался сплоченностью, взаимовыручкой и огромной работоспособностью, которую руководитель поддерживал своим примером. Все двадцать лет сотрудники кафедры конструирования и стандартизации в машиностроении дорожили мнением своего наставника, и оно было руководством к повышению профессионализма каждого.

Трудовая и педагогическая деятельность профессора отмечена многими почетными званиями и наградами, в том числе Медалью ордена «За заслуги перед Отечеством» II степени, юбилейной медалью «За доблестный труд. В ознаменование 100-летия со дня рождения В.И. Ленина» – медалью «Ветеран труда».

В настоящее время Юрий Владимирович является членом диссертационного совета 24.2.307.01 в Иркутском национальном исследовательском техническом университете и научным руководителем госбюджетной темы 47/191 «Формирование поверхностного слоя при зачистке деталей», связанной с повышением производительности труда на производстве. Добиться этого, по его мнению, можно за счет механизации ручного труда. Профессор Димов активно занимается общественной работой, являясь председателем научного семинара по машиностроению, членом методического Совета университета, экспертной комиссии Совета Института авиамашиностроения и транспорта.

Заслуженное признание и авторитет среди студентов и преподавателей – это признание не только профессиональных качеств, но и человеческих, таких как отзывчивость, принципиальность, трудолюбие, требовательность к себе и окружающим. При всех этих качествах Юрий Владимирович всегда остается скромным человеком, предпочитающим не привлекать к себе особого внимания.

***Друзья, коллеги и ученики тепло поздравляют Юрия Владимировича со славным Юбилеем и желают крепкого здоровья, юношеского задора и творческого долголетия!***

## Уважаемые коллеги!

**Мы приглашаем Вас к участию в нашем журнале в качестве авторов, рекламодателей и читателей и сообщаем требования к статьям, принимаемым к публикации**

I. Рукопись статьи направляется в редакцию через online-форму (после предварительной регистрации авторов). Рекомендуемый объем статьи не менее 20 000 знаков.

К статье прилагаются:

1. Экспертное заключение от аффилированной организации о возможности публикации в открытой печати.
2. Лицензионный договор.
3. Название рубрики, в которой должна быть размещена Ваша статья; УДК; название статьи; реферат (аннотация), количество слов в реферате – не менее 200; ключевые слова (5–7); сведения об авторах: название учреждения, его адрес; фамилия, имя, отчество (полностью); ученая степень; звание и должность; контактный телефон, e-mail и ORCID (вся информация предоставляется одним файлом).

II. **Текст статьи, сведения об авторах, реферат, ключевые слова, адрес учреждения, контактный телефон и E-mail** должны быть также представлены по электронной почте: [pgp@istu.edu](mailto:pgp@istu.edu) **в виде файла с расширением \*.DOCX** – документа, построенного средствами Microsoft Word 97 или последующих версий.

При наборе статьи в Microsoft Word рекомендуются следующие установки:

- 1) параметры страницы и абзаца: отступы сверху и снизу – 2 см; слева и справа – 2 см; табуляция – 2 см; ориентация – книжная;
- 2) шрифт – **Times New Roman**, размер – **12**, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;
- 3) при вставке формул использовать **Microsoft Equation 3** при установках: элементы формулы выполняются курсивом; для греческих букв и символов назначать шрифт **Symbol**, для остальных элементов – **Times New Roman**. Размер символов: обычный – 12 пт, крупный индекс – 7 пт, мелкий индекс – 5 пт, крупный символ – 18 пт, мелкий символ – 12 пт. Все экспликации элементов формул необходимо также выполнять в виде формул;
- 4) рисунки, вставленные в текст, должны быть выполнены с разрешением 300 dpi, B&W – для черно-белых иллюстраций, Grayscale – для полутонов, максимальный размер рисунка с надписью: ширина 150 мм, высота 245 мм и представлены в виде файла с расширением \*.BMP, \*.TIFF, \*.JPG, должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. **Схемы, графики** выполняются во встроенной программе **MS Word** или в **MS Excel**, с приложением файлов (**представляемые иллюстрации должны быть четкими и ясными во всех элементах**);
- 5) библиографические ссылки должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ Р 7.05 2008.

Внимание! Публикация статьи является бесплатной.

Журнал включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, утвержденный ВАК Министерства науки и высшего образования РФ (**Категория К-1**), в Единый государственный перечень научных изданий «Белый список» (**Уровень 2**), в DOAJ, международный каталог периодических изданий «Ulrichs Periodicals Directory», EBSCO, Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU), представлен в Научной электронной библиотеке «Киберленинка» (CYBERLENINKA), рассылается в Российскую книжную палату, ВИНТИ РАН.

**Статьи, опубликованные в журнале «iPolytech Journal», реферируются и рецензируются. Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям.**

По вопросам публикации статей обращаться: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Д-215.

Телефон: **(3952) 40-57-56** – Привалова Галина Петровна, ответственный секретарь.

Факс: **(3952) 405-100**, e-mail: [pgp@istu.edu](mailto: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 30.12.2025 г.  
Формат 60х90/8.  
Бумага офсетная. Печать трафаретная.  
Усл. печ. л. 21,5.  
Тираж 500 экз. Номер по реестру 110/3н.

Издание распространяется бесплатно



**iPolytech Journal**

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