

Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета, 2020

ISSN 1814-3520 (print)  
ISSN 2500-1590 (online)

Том 24 № 3  
2020

# ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

12+



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



# ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета, 2020



Том 24 № 3

2020

Издательство Иркутского  
национального исследовательского  
технического университета

Журнал основан в 1997 г.  
Периодичность издания –  
6 раз в год  
Журнал зарегистрирован Федеральной  
службой по надзору в сфере связи,  
информационных технологий  
и массовых коммуникаций  
(Роскомнадзор).  
Свидетельство ПИ № ФС77-62813  
от 18 августа 2015 г.  
Учредитель Иркутский национальный  
исследовательский технический  
университет

Подписной индекс в каталоге  
Агентства ЗАО ИД  
«Экономическая газета»  
«Объединенный каталог. Пресса  
России. Газеты и журналы» -  
41476 (ОК + ЭК)  
Адрес Агентства ЗАО ИД  
«Экономическая газета»:  
(499) 152-09-89; izdatcat@ideg.ru

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

Адрес редакции:  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,  
ауд. Д-215, e-mail: pgg@istu.edu

## Редакционная коллегия

**КОРНЯКОВ М.В.**, доктор технических наук, ректор Иркутского национального исследовательского технического университета, главный редактор (г. Иркутск, Россия)  
**НЕМЧИНОВА Н.В.**, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой металлургии цветных металлов Иркутского национального исследовательского технического университета, заместитель главного редактора (г. Иркутск, Россия)  
**БАЖИН В.Ю.**, доктор технических наук, декан факультета переработки минерального сырья Санкт-Петербургского горного университета (г. Санкт - Петербург, Россия)  
**БАЛИКОВ С.В.**, доктор технических наук, главный научный сотрудник Иркутского научно-исследовательского института благородных и редких металлов и алмазов (г. Иркутск, Россия)  
**БЛЮМЕНШТЕЙН В.Ю.**, доктор технических наук, профессор Кузбасского государственного технического университета (г. Кемерово, Россия)  
**БОЛДЫРЕВ А.И.**, доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения Воронежского государственного технического университета (г. Воронеж, Россия)  
**БОРОВИКОВ Ю.С.**, доктор технических наук, и.о. ректора Новгородского государственного университета имени Ярослава Мудрого (г. Великий Новгород, Россия)  
**ВОРОПАЙ Н.И.**, член-корреспондент РАН, научный руководитель Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)  
**ГАЛЕВСКИЙ Г.В.**, доктор технических наук, заведующий кафедрой металлургии цветных металлов и химической технологии Сибирского государственного индустриального университета (г. Новокузнецк, Россия)  
**ДАМБИЕВ Ц.Ц.**, доктор технических наук, профессор Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления (г. Улан-Удэ, Россия)  
**ЗАЙДЕС С.А.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой машиностроительных технологий и материалов Иркутского национального исследовательского технического университета (г. Иркутск, Россия)  
**ЗАКАРЮКИН В.П.**, доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетики транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения (г. Иркутск, Россия)  
**КАРПЕНКО Е.И.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой лаборатории плазменно-энергетических процессов и технологий Института физического материаловедения СО РАН (г. Улан-Удэ, Россия)  
**КЛЕР А.М.**, доктор технических наук, главный научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)  
**КОЛОСОК И.Н.**, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)  
**КРЮКОВ А.В.**, доктор технических наук, академик Российской академии транспорта, член-корр. АН ВШ РФ и Российской инженерной академии, заслуженный энергетик Республики Бурятия, профессор кафедры электроэнергетики транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения (г. Иркутск, Россия)  
**КУРБАЦКИЙ В.Г.**, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)  
**МАМЯЧЕНКОВ С.В.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой металлургии цветных металлов Уральского Федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург, Россия)  
**МАТЛИН М.М.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой деталей машин и подъемно-транспортных устройств Волгоградского государственного технического университета (г. Волгоград, Россия)  
**НОВИЦКИЙ Н.Н.**, доктор технических наук, главный научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)  
**ОГАР П.М.**, доктор технических наук, профессор Братского государственного университета (г. Братск, Россия)  
**ПАЗДЕРИН А.В.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизированных электрических систем Уральского Федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург, Россия)  
**ПАНТЕЛЕЕВ В.И.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электрических комплексов и систем Сибирского федерального университета (г. Красноярск, Россия)  
**РАХИМИЯНОВ Х.М.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии машиностроения Новосибирского государственного технического университета (г. Новосибирск, Россия)  
**СЕНДЕРОВ С.М.**, доктор технических наук, заместитель директора Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)  
**СТЕННИКОВ В.А.**, доктор технических наук, профессор, директор Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)  
**СТЫЧИНСКИ З.А.**, профессор Университета Отто-фон-Герике. (г. Магдебург, Германия)  
**ТАНУТРОВ И.Н.**, доктор технических наук, главный научный сотрудник Института металлургии УрО РАН (г. Екатеринбург, Россия)  
**ТЮРИНА Э.А.**, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)  
**ФЕДЯЕВ А.А.**, доктор технических наук, заведующий кафедрой промышленной теплоэнергетики Братского государственного университета (г. Братск, Россия)  
**ФИШОВ А.Г.**, доктор технических наук, профессор Новосибирского государственного технического университета (г. Новосибирск, Россия)  
**ШОЛЬТЕС Бертольд**, директор Института материаловедения Кассельского университета (г. Кассель, Германия)

# PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

Vol. 24 No. 3

2020

Publishers of Irkutsk National  
Research Technical University

## Editorial board

**KORNYAKOV M.V.**, Dr. Sci. (Eng.), Rector of Irkutsk National Research Technical University, Editor-in-Chief (Irkutsk, Russia)  
**NEMCHINOVA N.V.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Metallurgy of Nonferrous Metals, Irkutsk National Research Technical University, Deputy Editor-in-Chief (Irkutsk, Russia)  
**BAZHIN V.Yu.**, Dr. Sci. (Eng.), Dean of the Mineral Resources Processing Faculty, Saint Petersburg Mining University (Saint Petersburg, Russia)  
**BALIKOV S.V.**, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher of Irkutsk Scientific Research Institute of Noble and Rare Metals and Diamonds (Irkutsk, Russia)  
**BLUMENSTEIN V.Yu.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of Kuzbass State Technical University (Kemerovo, Russia)  
**BOLDYREV A.I.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia)  
**BOROVNIKOV Yu.S.**, Dr. Sci. (Eng.), Acting Rector of Novgorod State University n.a. Yaroslav-the-Wise (Veliky Novgorod, Russia)  
**VOROPAI N.I.**, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Head of the Energy Systems Institute n.a. L.A. Melentyev of the SB RAS (Irkutsk, Russia)  
**GALEVSKY G.V.**, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of Nonferrous Metallurgy and Chemical Technology of the Siberian State Industrial University (Novokuznetsk, Russia)  
**DAMBIEV Ts.TS.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the East Siberian State University of Technology and Management (Ulan-Ude, Russia)  
**ZAIDES S.A.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Machine Building Technologies and Materials, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)  
**ZAKARYUKIN V.P.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Transport Electricity of Irkutsk State Railway University (Irkutsk, Russia)  
**KARPENKO E.I.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of the Laboratory of Plasma Energy Processes and Technologies of the Institute of Physical Materials Science of the SB RAS (Ulan-Ude, Russia)  
**KLER A.M.**, Dr. Sci. (Eng.), Chief researcher of the Energy Systems Institute n.a. L.A. Melentyev of the SB RAS (Irkutsk, Russia)  
**KOLOSOK I.N.**, Dr. Sci. (Eng.), Leading researcher of the Energy Systems Institute n.a. L.A. Melentyev of the SB RAS (Irkutsk, Russia)  
**KRYUKOV A.V.**, Dr. Sci. (Eng.), Academician of the Russian Academy of Transport, Corresponding member of the Academy of Sciences of the Higher School of the Russian Federation and the Russian Academy of Engineering, Honored Power Engineer of the Republic of Buryatia, Professor of the Department of Transport Electric Power Industry of Irkutsk State Railway University (Irkutsk, Russia)  
**KURBATSKY V.G.**, Dr. Sci. (Eng.), Leading researcher of the Energy Systems Institute n.a. L.A. Melentyev of the SB RAS (Irkutsk, Russia)  
**MAMYACHENKOV S.V.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Metallurgy of Nonferrous Metals of the Ural Federal University n.a. the first President of Russia B.N. Yeltsin (Ekaterinburg, Russia)  
**MATLIN M.M.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Machine Parts and Hoisting-and-Transport Devices, Volgograd State Technical University (Volgograd, Russia)  
**NOVITSKY N.N.**, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher of the Energy Systems Institute n.a. L.A. Melentyev of the SB RAS (Irkutsk, Russia)  
**OGAR P.M.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of Bratsk State University (Bratsk, Russia)  
**PAZDERIN A.V.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Automated Electric Systems of the Ural Federal University n.a. the first President of Russia B.N. Yeltsin (Ekaterinburg, Russia)  
**PANTELEEV V.I.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Electrical Complexes and Systems of the Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia)  
**RAKHIMYANOV Kh.M.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Mechanical Engineering Technology, Novosibirsk State Technical University (Novosibirsk, Russia)  
**SENDEROV S.M.**, Dr. Sci. (Eng.), Deputy Director of the Energy Systems Institute n.a. L.A. Melentyev of the SB RAS (Irkutsk, Russia)  
**STENNIKOV V.A.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of the Energy Systems Institute n.a. L.A. Melentyev of the SB RAS (Irkutsk, Russia)  
**STYCYNSKI S.A.**, Professor of the Otto-von-Guericke University (Magdeburg, Germany)  
**TANUTROV I.N.**, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Ekaterinburg, Russia)  
**TYURINA E.A.**, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher of the Energy Systems Institute n.a. L.A. Melentyev of the SB RAS (Irkutsk, Russia)  
**FEDYAEV A.A.**, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of Industrial Heat and Power Engineering of Bratsk State University (Bratsk, Russia)  
**FISHOV A.G.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor Новосибирского государственного технического университета (Novosibirsk, Russia)  
**SCHOLTES B.**, Director of the Institute of Metal Science of the University of Kassel (Kassel, Germany)

The Journal was founded in 1997  
 Frequency of publication – 6 times a year  
 The journal is registered with the Federal Agency for Supervision of Communications, Information Technologies and Mass Media (Roskomnadzor).  
 Certificate of registration  
 № ПИ № ФС77-62813  
 of 18 August, 2015.  
 Founder: Irkutsk National Research Technical University

Subscription index in the catalog  
 of JSC «Economic Newspaper»  
 Publishing House  
 “The united catalog. Russian press.  
 Newspapers and journals”-  
 41476 (OK + EC)  
 Address of JSC  
 «Economic Newspaper»  
 Publishing House: (499) 152-09-89;  
 izdatcat@ideg.ru

Address of the founder, publisher:  
 83 Lermontov St., Irkutsk, 664074

Address of the editorial office:  
 83 Lermontov St., Irkutsk, 664074,  
 D-215, e-mail: pgp@istu.edu

## СОДЕРЖАНИЕ

Содержание ..... 480

### Машиностроение и машиноведение

- ☉ **Беляев М.А., Прилуцкий А.В., Таленфельд С.В.** Способ двухзонного регулирования скорости вентильного двигателя..... 484
- ☉ **Матлыгин Г.В., Савилов А.В., Зарак Т.В.** Анализ прогрессивных технологий механообработки осевых режущих инструментов..... 498
- ☉ **Нижегородов А.И.** Оценка эффективности по коэффициентам полезного действия энергетических блоков новой электрической модульно-пусковой печи..... 514
- ☉ **Портной А.Ю., Мельниченко О.В., Селедцов К.П., Линьков А.О., Яговкин Д.А., Шрамко С.Г., Грузин Г.Г.** О вибрации колесно-моторного блока вследствие взаимодействия колеса с рельсом и работы зубчатой передачи электровоза ЗЭС5К в условиях горно-перевального участка..... 527
- ☉ **Серебренникова А.Г., Гурылев В.Б.** Титановый сплав BT22: исследование зависимости выходных параметров токарной обработки от геометрии режущего инструмента..... 548
- ☉ **Фунг Суан Шон, Ву Тхи Хуэ.** Метод полирования поверхности стали SKD11 с покрытием Ni-P..... 561

### Энергетика

- ⚡ **Амер А.Э., Лебедев В.А.** Влияние термоциклирования на выбор рабочего тела с фазовым переходом для теплоаккумуляторов..... 570
- ⚡ **Бацева Н.Л., Сухоруков В.А.** Алгоритм поиска адаптивной траектории утяжеления для энергосистем большой размерности..... 582
- ⚡ **Герасимова Н.П.** Золовой износ поверхностей нагрева котлоагрегатов..... 596
- ⚡ **Зинуров В.Э., Дмитриев А.В., Петрова Т.С., Дмитриева О.С.** Оценка времени работы пылеуловителя со скругленными сепарационными элементами..... 606
- ⚡ **Кенден К.В., Кузнецов А.В.** Оптимизация структуры автономного энергетического комплекса с использованием солнечной энергии методом роя частиц..... 616
- ⚡ **Киевец А.В., Бай Ю.Д., Суворов А.А., Аскаров А.Б., Ким А.А.** Исследование влияния изменения температуры солнечных панелей на выходные характеристики солнечной электростанции в условиях частичной затененности..... 627
- ⚡ **Коваль Т.В., Кудряшов А.Н.** Оценка шлакоулавливающих и загрязняющих свойств углей, сжигаемых на ТЭЦ ПАО «Иркутскэнерго»..... 639
- ⚡ **Кузькина Я.И., Голуб И.И., Болоев Е.В.** Оценивание состояния трехфазной четырехпроводной вторичной распределительной сети..... 649

### Металлургия и материаловедение

- 🔬 **Алаттар А.Л.А., Бажин В.Ю., Власов А.А.** Повышение механических свойств композиционных алюминиевых сплавов при вводе карбида бора..... 663
- 🔬 **Патрушов А.Е.** Оценка технико-экономической эффективности пирометаллургической технологии переработки пылей электросталеплавильного производства... 672
- 🔬 **Радионон Е.Ю.** Расчет магнитогидродинамических параметров работы электролизеров с различным типом катодного кожуха..... 684
- 🔬 **Шепелев И.И., Головных Н.В., Чудненко К.В., Сахачев А.Ю.** Применение оперативного метода контроля и управления на основе компьютерного физико-химического моделирования в процессах спекания глиноземной шихты..... 694

## CONTENTS

Contents.....	481
---------------	-----



### Mechanical Engineering and Machine Science



⊗ <b>Belyaev M.A., Prilutsky A.V., Talenfeld S.V.</b> Dual-zone speed control method for an inverted motor.....	484
⊗ <b>Matlygin G.V., Savilov A.V., Zarak T.V.</b> Analysis of progressive machining technologies for rotating cutting tools.....	498
⊗ <b>Nizhegorodov A.I.</b> Efficiency evaluation of a new electric modular descending furnace according to the performance factor for energy blocks.....	514
⊗ <b>Portnoy A.Yu., Melnichenko O.V., Seledtsov K.P., Linkov A.O., Yagovkin D.A., Shramko S.G., Gruzin G.G.</b> Study into vibration effects due to the wheel-rail interaction on the operation of an 3ES5K electric locomotive gear transmission under conditions of mountain pass traversal.....	527
⊗ <b>Serebrennikova A.G., Gurylyov V.B.</b> VT22 titanium alloy: study of the cutting tool geometry effect on output parameters of turning process.....	548
⊗ <b>Phung Xuan Son, Vu Thi Hue.</b> Method for polishing the surface of Ni-P-coated SKD11 steel.....	561



### Power Engineering



⚡ <b>Amer A.E., Lebedev V.A.</b> The effect of thermal cycling on the selection of a phase transition medium for thermal receivers of solar heat supply systems.....	570
⚡ <b>Batseva N.L., Sukhorukov V.A.</b> Search algorithm for adaptive weighting trajectory in large-scale power systems.....	582
⚡ <b>Gerasimova N.P.</b> Ash wear of boiler heating surfaces.....	596
⚡ <b>Zinurov V.E., Dmitriev A.V., Petrova T.S., Dmitrieva O.S.</b> Evaluation of operating time for the dust separator with rounded separation elements.....	606
⚡ <b>Kenden K.V., Kuznetsov A.V.</b> Particle swarm optimisation for the structure of an autonomous solar energy complex.....	616
⚡ <b>Kievets A.V., Bay I.D., Suvorov A.A., Askarov A.B., Kim A.A.</b> Study of the variation effect of solar panel temperature on the output characteristics of a solar power station under conditions of partial shadowing.....	627
⚡ <b>Koval T.V., Kudryashov A.N.</b> Assessment of slagging and polluting properties of coals burned at the Irkutskenergo Cogeneration Plant, JSC.....	639
⚡ <b>Kuzkina Ya.I., Golub I.I., Boloev E.V.</b> State estimation of a three-phase four-wire secondary distribution network.....	649



### Metallurgy and Materials Science



🧪 <b>Alattar A.L.A., Bazhin V.Yu., Vlasov A.A.</b> Investigation into the use of boron carbide to improve the mechanical properties of composite aluminium alloys.....	663
🧪 <b>Patrushov A.E.</b> Technical and economic efficiency evaluation of pyrometallurgical technology for processing dust from electric steel production.....	672
🧪 <b>Radionov E.Yu.</b> Calculation of magnetohydrodynamic electrolyser parameters with various types of cathode shell.....	684
🧪 <b>Shepelev I.I., Golovnykh N.V., Chudnenko K.V., Sakhachev A.Yu.</b> Application of an operational method for control and management based on computer physical and chemical modelling of alumina charge sintering.....	694



# ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

## Уважаемые читатели!

Предлагаем вашему вниманию очередной выпуск научного журнала «Вестник Иркутского государственного технического университета».

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 Минобрнауки России.

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

«Вестник ИргТУ» реферируется и рецензируется.

Приглашаем вас к активному творческому сотрудничеству по научным направлениям:

- Машиностроение и машиноведение
- Энергетика
- Металлургия и материаловедение

Редколлегия



# PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

## Dear Readers!

We would like to bring to your attention the next issue of the scientific journal "Proceedings of Irkutsk State Technical University". 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.

Proceedings of Irkutsk State Technical University ("Vestnik IrGTU") is included in the "UlrichsPeriodicals Directory", 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 "Proceedings of Irkutsk State Technical University" is abstracted and reviewed.

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

- Mechanical Engineering and Machine Science
- Power Engineering
- Metallurgy and Materials Science

**Editorial Board**





Оригинальная статья / Original article

УДК 321.313

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-484-497>

## Способ двухзонного регулирования скорости вентильного двигателя

© М.А. Беляев\*, А.В. Прилуцкий\*\*, С.В. Таленфельд\*\*\*

\*Военно-морской политехнический институт им. Н.Г. Кузнецова, г. Санкт-Петербург, Россия

\*\*ООО «НГ-Энерго», г. Санкт-Петербург, Россия

\*\*\*ОАО «Авангард», г. Санкт-Петербург, Россия

**Резюме:** Цель – разработка способа двухзонного регулирования скорости вентильного двигателя с магнитоэлектрическим возбуждением, применяемого для привода различных машин и механизмов циклического действия или позиционного типа. Применялись методы моделирования на основе современной теории электропривода (с использованием уравнений Горева-Парка) и методы классической теории управления. Разработан способ двухзонного регулирования скорости вентильного двигателя на основе ранее апробированной одноконтурной системы управления его скоростью ниже синхронной, с полной компенсацией тока статора по продольной оси  $d$ . Описан способ регулирования скорости выше синхронной за счет неполной компенсации (задаваемой коэффициентом) тока статора по продольной оси. Разработана нелинейная модель вентильного двигателя (на основе уравнений Горева-Парка), позволяющая исследовать режимы его функционирования при скоростях выше и ниже синхронной. Проведенное моделирование для двигателя с конкретными параметрами включало в себя пусковые и тормозные режимы, плавные переходы с одной скорости на другую (путем подбора скорости изменения уставки), скачкообразный сброс и наброс нагрузки. Для управления использовалась одноконтурная система управления с пропорционально-интегрально-дифференциальным регулятором. Разработанная модель позволяет подобрать необходимый закон изменения напряжения по поперечной оси  $q$  статора изучаемого двигателя с целью не допустить перегрузки по току преобразователя частоты при работе двигателя как выше, так и ниже синхронной скорости. Исследованы динамические режимы работы замкнутой системы «преобразователь частоты – вентильный двигатель» в среде имитационного моделирования Simulink пакета Matlab. Полученные уравнения статических режимов позволяют определить ограничения по скорости и моменту при двух вариантах работы привода. Таким образом, разработана более простая система управления вентильным двигателем, чем классическая двухконтурная, в которой не предполагается отключение преобразователя частоты при перегрузках.

**Ключевые слова:** вентильный двигатель, одноконтурная система управления, неполная компенсация тока статора по продольной оси, двухзонное регулирование скорости, преобразователь частоты, привод

**Информация о статье:** Дата поступления 19 ноября 2019 г.; дата принятия к печати 16 марта 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 июня 2020 г.

**Для цитирования:** Беляев М.А., Прилуцкий А.В., Таленфельд С.В. Способ двухзонного регулирования скорости вентильного двигателя. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 3. С. 484–497. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-484-497>

## Dual-zone speed control method for an inverted motor

Mikhail A. Belyaev\*, Alexander V. Prilutsky\*\*, Sergey V. Talenfeld\*\*\*

\*N.G. Kuznetsov Naval Polytechnic Institute, St. Petersburg, Russia

\*\*LLC “NG-Energo”, St. Petersburg, Russia

\*\*\*JSC “Avangard”, St. Petersburg, Russia

**Abstract:** The aim of the study involved the development of a dual-zone speed control method for a permanent magnet inverted motor applied as a drive for various machines and mechanisms of cyclic action or positional type. In the study, modelling methods were applied based on the contemporary theory of electric drives (using Gorev-Park equations) accompanied by methods derived from classic control theory. As a result, the dual-zone speed control method for an inverted motor was developed based on a previously tested single-circuit control system applicable for speed values below synchronous with full compensation of the stator current along the  $d$  longitudinal axis. A method is described for controlling the speed of the value of the stator current superior to synchronous due to incomplete compensation (specified by the coefficient) along the longitudinal axis. A nonlinear model of an inverted motor (based on the Gorev-Park equations)

was developed to support a study of its functioning modes at speeds both higher and lower than synchronous. For an engine with specified parameters, the modelling included starting and braking modes, smooth transitions from one speed to another (by selecting the setpoint changing speed), as well as abrupt drops and increases in the load. For the control, a single-circuit control system with a proportional integral differential controller was used. The developed model ensures the selection of the necessary pattern for voltage change along the  $q$  transverse axis of the studied motor stator, thus preventing the current overload of the frequency converter during the motor operation both above and below the synchronous speed. Dynamic modes of the "frequency converter – inverted motor" closed-loop system were investigated in the Simulink environment of the Matlab package. The obtained equations of static modes support a determination of the restrictions on speed and torque for two versions of the drive. Thus, the developed inverted motor control system is simpler than the classic dual-circuit system that lacks frequency converter disconnection during overloads.

**Keywords:** inverted motor, incomplete compensation of stator current along longitudinal axis, dual-zone speed control, frequency converter, drive

**Information about the article:** Received November 19, 2019; accepted for publication March 16, 2020; available online June 30, 2020.

**For citation:** Belyaev MA, Prilutsky AV, Talenfeld SV. Dual-zone speed control method for an inverted motor. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(3):484–497. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-484-497>

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Вентильный двигатель (ВД) находит все большее применение для привода различных машин и механизмов, в частности для нужд военно-морского флота. Однако остаются актуальными вопросы определения адекватной модели ВД с возможными ограничениями и получение рациональных или оптимальных законов управления ВД в динамических и статических режимах работы [1–4].

Одной из серьезных проблем остается нахождение способов двухзонного регулирования скорости ВД с магнитоэлектрическим возбуждением (как это делается в коллекторных машинах постоянного тока). На сегодняшний день есть два способа регулирования скорости ВД. Первый способ предполагает полную компенсацию тока по продольной оси статора (ось  $d$ ), при этом скорость регулируется изменением напряжения по поперечной оси статора (ось  $q$ ). Второй способ предполагает неполную компенсацию тока по продольной оси статора, что уменьшает магнитный поток машины и позволяет использовать привод на скоростях выше синхронной. Второй способ обычно реализуется в виде системы подчиненного регулирования [5], что усложняет расчет регуляторов скорости и момента, особенно с учетом ограничений по напряжению (или току) на выходе пре-

образователя частоты, и фактически требует решения оптимизационной задачи [6].

В данной работе предлагается способ двухзонного регулирования скорости ВД. Для регулирования скорости ниже синхронной используется способ векторного управления скоростью ВД (первый способ), предполагающий полную компенсацию тока статора по оси  $d$  [7, 8]. Для регулирования скорости выше синхронной используется второй способ, заключающийся в выборе коэффициента неполной компенсации тока статора по оси  $d$ , в зависимости от необходимого превышения скорости выше синхронной, и отличающийся от известных способов возможностью использования одноконтурной системы управления, разработанной для реализации первого способа. Последнее обстоятельство позволяет считать первый способ частным случаем второго и свидетельствует о способе двухзонного регулирования скорости ВД. Отметим, что термины «регулирование» и «управление» в данной работе не имеют четкой границы. На сегодняшний день в теории автоматического управления (ТАУ) термин «регулирование» принято использовать для систем стабилизации, а термин «управление», соответственно, для следящих систем. Причем к качеству переходных процессов последних предъявляются дополнительные требования по воспроизведению на выходе задающего воздействия. В рас-



смаатриваемых ниже системах их следящие свойства рассматриваются только с точки зрения заданных ограничений изменяющихся в них физических величин. В целом сочетание «способ регулирования» (используется в электроприводе) имеет более широкий смысл, чем «система управления» (используется в ТАУ).

## 2. ОДНОКОНТУРНАЯ СИСТЕМА ДВУХЗОННОГО УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Общеизвестно, что вентильный двигатель – это синхронная машина (СМ), питаемая от зависимого инвертора, управляемого датчиком положения ротора. Использование современных запираемых и управляемых элементов позволяет создавать двигатели мощностью до 300–500 кВт, отличающиеся широким и плавным регулированием, высоким КПД, большими пусковыми моментами и динамическими характеристиками, не менее приемлемыми, чем у коллекторных машин постоянного тока (МПТ). При этом контактные кольца могут быть исключены за счет магнитоэлектрического возбуждения. Новое поколение магнитов типа NdFeB обеспечивает магнитную индукцию  $B = 0,5 \div 1$  Тл, что позволяет создавать ВД с хорошими удельными массогабаритными показателями. Это обстоятельство определяет возможность широкого применения ВД для транспорта, в частности для нужд военно-морского флота. Как указано выше, есть два способа управления скоростью ВД. Рассмотрим первый способ, позволяющий считать ВД аналогом коллекторной МПТ. Для моделирования ВД и выбора закона регулирования напряжения на его зажимах рассмотрим два подхода:

1. С позиции коллекторных МПТ [9, 10].

2. С использованием теории СМ, которая наиболее часто используется в литературных источниках, поскольку основным ВД является синхронный двигатель (СД), а теория СМ обеспечивается хорошо проработанным методическим аппаратом

[11–15].

Для моделирования СМ обычно используются уравнения Горева – Парка. Без учета демпферных обмоток имеем следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_d^*}{d\tau} &= U_d + \omega \cdot \psi_q - i_d \cdot r_d; \psi_d^* = \psi_d - \psi_{d0} \\ \frac{d\psi_q}{d\tau} &= U_q - \omega \cdot \psi_d - i_q \cdot r_d \\ \frac{d\omega}{d\tau} &= (\psi_d \cdot i_q - \psi_q \cdot i_d - M_c) \cdot H_j^{-1} \\ i_d &= \frac{d\psi_d^*}{L_d}, i_q = \frac{\psi_q}{L_q} \end{aligned} \right\}, (1)$$

где  $\psi_0$  – потокосцепление ротора (постоянная величина);  $\psi_d^*$  – реакция якоря по оси  $d$ ;  $\psi_q$  – реакция якоря по оси  $q$ ;  $\psi_d$  – потокосцепление ВД по оси  $d$ ;  $H_j$  – момент инерции двигателя и рабочего механизма, о.е.;  $U_d$  – напряжение статора по оси  $d$ ;  $U_q$  – напряжение статора по оси  $q$ ;  $i_d$  – ток статора по оси  $d$ ;  $i_q$  – ток статора по оси  $q$ ;  $M_c$  – момент сопротивления рабочего механизма;  $\omega$  – скорость вращения ротора.

Для первого способа управления выбирают условие:  $i_d = 0$ . Оно соответствует равенству:  $U_d = -\omega \psi_q$ , которое используется для компенсации тока  $i_d$ . В этом случае  $\psi_d^* = \psi_0$  и достигается ортогональность векторов  $\psi_0$  и  $\psi_q$  (векторное управление), что, в свою очередь, позволяет при данных массогабаритных показателях двигателя (и прочих равных) иметь максимальный момент на его валу (как в машинах постоянного тока, когда щетки на геометрической нейтрали).

В случае, когда  $i_d = 0$ , векторная диаграмма ВД принимает вид, показанный на рис. 1.

Для установившихся режимов  $M_D$  и  $\omega$  ВД определяются по формулам:

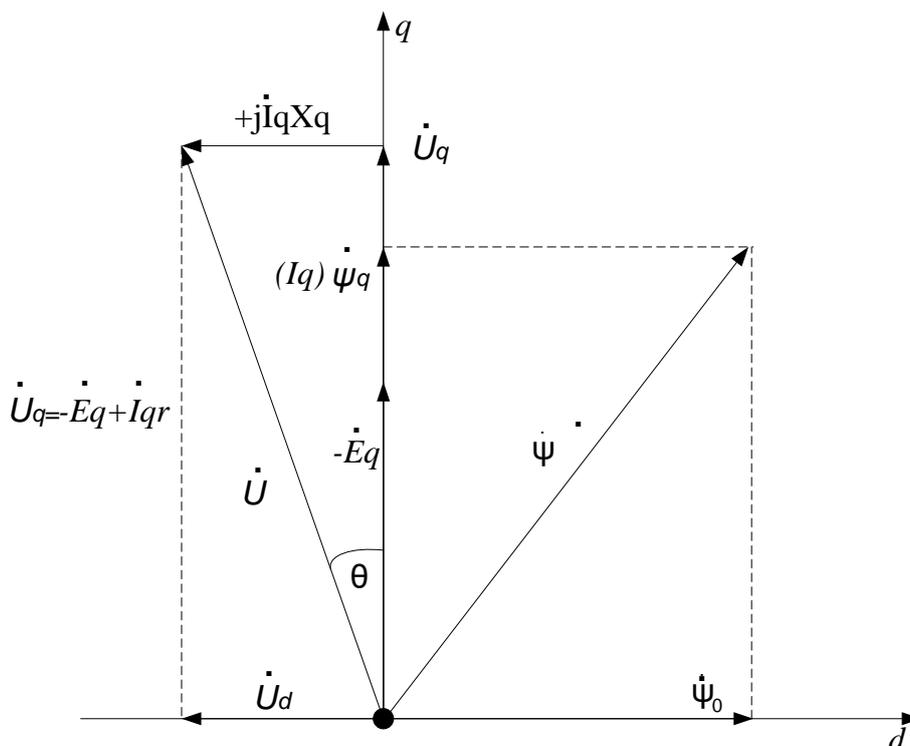


Рис. 1. Векторная диаграмма вентильного двигателя  
 Fig. 1. BLDC motor vector diagram

$$M_D = \psi_0 \cdot i_q; \quad (2)$$

$$\omega = \frac{U_q - i_q \cdot r}{\psi_0} = \frac{U_q}{\psi_0} - \frac{M_D \cdot r}{\psi_0^2}. \quad (3)$$

Таким образом, изменяя мгновенное значение  $U_q$  (и поддерживая  $U_d = -\omega \psi_q$ ), имеем возможность регулировать  $M_D$  и  $\omega$  по каналу напряжения, также как у машин постоянного тока [2, 15, 16].

### 3. ОДНОКОНТУРНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ НИЖЕ синхронНОЙ

В работе [8] предлагается следующий вариант векторного управления ВД:

$$U_d = -\psi_q \cdot \omega; \quad (4)$$

$$U_q = W_{pez}(p) \cdot (\omega_{зад} - \omega), \quad (5)$$

где  $\omega_{зад}$  – уставка (заданное значение) по скорости ВД.

Причем в качестве регулятора  $W_{pez}(p)$  выбран пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор.

Зачастую пропорционально-интегрально-дифференциальные регуляторы интегрированы в преобразователи частоты и имеют следующую структуру:

$$U_q = k_n \varepsilon + k_u \int \varepsilon dt + k_d \frac{d\varepsilon}{dt}, \quad (6)$$

где  $\varepsilon = \omega_{зад} - \omega$ .

В работе [7] рассматривались в первую очередь особенности пуска ВД, поскольку пусковой режим является одним из наиболее тяжелых режимов двигателя и пуск ВД с указанной выше системой управления имеет ряд особенностей:

1. Пуск ВД принципиально отличается от пуска синхронного двигателя.
2. Требования к пусковому режиму обычно определяется технологическим



пускового режима обеспечиваются временем пуска (режимом нарастания уставки по скорости  $\omega_{зад}$ ), которое подбирается путем моделирования соответствующей схемы в пакете Matlab.

Учитывая, что  $\psi_d = 1$  и заданные параметры реального ВД:  $L_q = 1$ ;  $L_d = 1,25$ ;  $r_q = r_d = 0,05$ , о.е. (приведены в работе [8]), относительно задающего воздействия  $\omega_{зад}$  имеем упрощенную структурную схему (рис. 4).

Параметры регулятора выбираются из условия динамической компенсации [15, 17]:

$$S^2 + \frac{k_n}{k_\partial} S + \frac{k_u}{k_\partial} = S^2 + \frac{1}{20} S + \frac{1}{H_j}; \quad (7)$$

$$\frac{k_n}{k_\partial} = \frac{1}{20} \left( k_n = \frac{k_\partial}{20} \right) \quad \frac{k_u}{k_\partial} = \frac{1}{H_j} \left( k_u = \frac{k_\partial}{H_j} \right). \quad (8)$$

Грубость или робастность системы в данном случае определяется тем, что передаточная функция объекта не имеет правых нулей и полюсов [18]. Заметим, что техническая реализация ПИД-регулятора (6) требует включения фильтра [4] (например, в виде инерционного звена с малой постоянной времени – не указан в схеме, т.к. не влияет на динамику системы).

Исходя из параметров регулятора, передаточная функция разомкнутой системы:

$$\frac{\omega(s)}{\varepsilon(s)} = W_{p.c.}(S) = \frac{k_\partial}{H_j S}. \quad (9)$$

Передаточная функция желаемой замкнутой системы:

$$\frac{\omega(s)}{\omega_{зад}(s)} = W_{p.c.}(S) = \frac{1}{\frac{H_j}{k_\partial} S + 1} \quad (10)$$

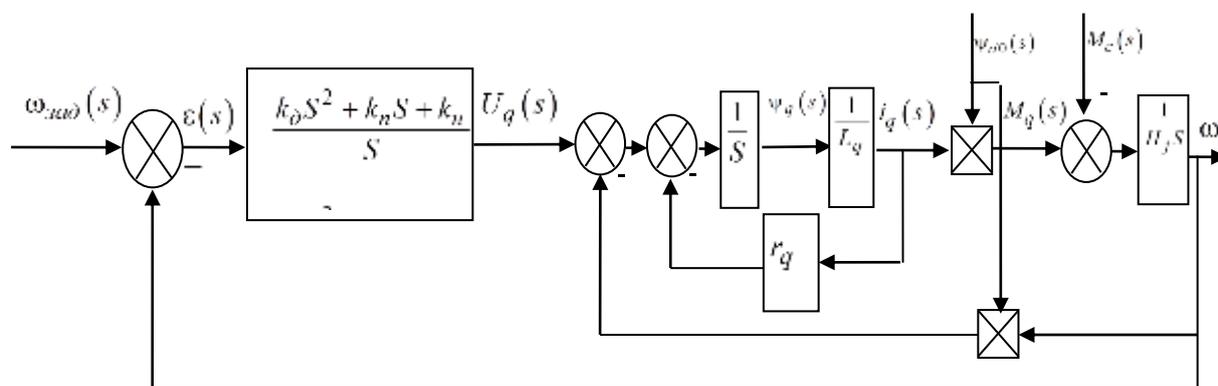


Рис. 3. Структурная схема управления скоростью вентиляльного двигателя по каналу  $U_q$

Fig. 3. Block diagram of BLDC motor speed control along the channel  $U_q$

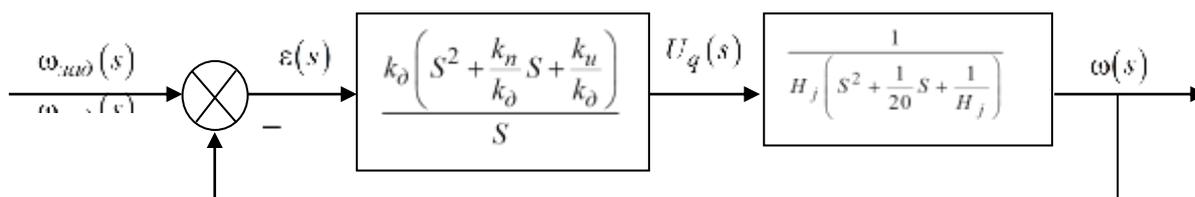


Рис. 4. Упрощенная структурная схема управления скоростью вентиляльного двигателя по каналу  $U_q$

Fig. 4. Simplified block diagram of BLDC motor speed control along the channel  $U_q$



Таким образом, постоянная времени желаемой замкнутой системы определяется как  $T_0 = \frac{H_j}{k_\delta}$  и, следовательно, время

переходного процесса при подаче единичного скачка  $\omega_{зад} = k_\omega 1(t)$  выражено  $3T_0 = 3 \frac{H_j}{k_\delta}$ .

Если предполагается, что в процессе работы системы параметры объекта могут меняться в широком диапазоне, то возможно использовать методы автонастройки ПИД-регулятора. Различные подходы автонастройки, которые могут быть реализованы на практике, достаточно подробно обсуждаются в работе [19]. Возможно также использовать аналитические подходы на этапе проектирования для сохранения робастности системы. Варианты таких методик рассмотрены в работах [20, 21].

Стоит отметить следующий важный момент: ограничение по напряжению и току приводит к ограничению скорости ВД в зависимости от момента двигателя. В установившемся режиме (левые части дифференциальных уравнений системы (1) приравниваются к 0) при полной компенсации ( $i_d = 0$ ) имеем следующие формулы:

$$\left. \begin{aligned} U_d &= -\omega \psi_q \\ U_q &= \omega \psi_{d0} + i_q r_q \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

При  $L_q = 1$ ,  $i_q = \psi_q$ ,  $M_c = M_d = \psi_{d0} \cdot i_q = i_q$  и, соответственно,

$$\left. \begin{aligned} U_d &= -\omega M_c \\ U_q &= \omega + M_c r \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Учитывая, что  $r_q = 0,05$  и, соответственно,  $U_q \approx \omega$ , можно принять следующие соотношения:

$$U = \sqrt{U_q^2 + U_d^2} \approx \omega \sqrt{1 + M_c^2}$$

или 
$$\omega \approx \frac{U}{\sqrt{1 + M_c^2}} \quad (13)$$

Таким образом, при  $M_c = 0,2$  (близкий к холостому ходу режим работы ВД)  $\omega \leq \frac{1}{\sqrt{1,04}} = 1$ ; при  $M_c = 0,8$  (номинальный момент)  $\omega \leq \frac{1}{\sqrt{1,64}} = 0,78$ ; при  $M_c = 1$  (перегрузка по моменту на 25%)  $\omega \leq \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,7$ .

Время пуска подбирается таким образом, чтобы были соблюдены указанные ниже условия:

$$I_{II} \leq 1,5 I_n; \quad (14)$$

$$M_n \leq \frac{1,5}{0,8} \approx 1,9. \quad (15)$$

Соотношения (14) и (15) будем считать условиями плавного пуска (или плавного перехода на более высокую скорость в общем случае). В определенных случаях данные соотношения могут быть и больше.

Выберем  $T_0 = 1$  рад ( $1с = 314$  рад). Соответственно, при  $H_j = 100$  имеем  $k_\delta = 100$ ,  $k_n = 5$ ,  $k_u = 1$ . В этом случае период квантования широтно-импульсной модуляции (ШИМ) и процессора ПЧ будет как минимум на порядок меньше  $T_0$  и систему можно рассматривать как аналоговую.

Результаты моделирования, приведенные в работе [7], показывают, что при фиксированных коэффициентах регулятора, в зависимости от момента сопротивления  $M_c$ , на валу двигателя можно подобрать скорость изменения уставки  $\omega_{зад}$ , обеспечивающую плавное изменение скорости ВД при заданных ограничениях по напряжению  $U$  и току  $i$ .

В этом случае выбранный ПИД-регулятор не требует перенастройки коэффициентов для обеспечения хорошего качества процессов управления в режиме

наброса (или сброса) нагрузки и торможения двигателя. При этом значения напряжения и токов находятся в допустимых пределах, если использовать отключение интегральной составляющей от входа ПИД-регулятора при достижении ею значения 0,75 (ограничение по  $U_q$ ). Заметим, что данный прием используется также в двухконтурной системе управления скоростью ВД [15].

### 3. ОДНОКОНТУРНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ ВЫШЕ СИНХРОННОЙ

Как указано выше, для использования рассматриваемого привода на скоростях выше синхронной необходимо уменьшить магнитный поток машины.

Для ВД с магнитоэлектрическим возбуждением это возможно только за счет неполной компенсации тока по продольной оси статора. Очевидно, что это должно вытекать из системы (1) для установившихся режимов, но при этом необходимо сохранение ограничения по току и напряжению ПЧ и, соответственно, ограничения по моменту  $M_d$  в зависимости от скорости.

Следует отметить, что в работе [4] предлагается также одноконтурная система управления, но к регулятору скорости добавляется позиционный регулятор для коррекции работы ШИМ. При этом для линеаризации объекта управления используется компенсация перекрестных связей по осям  $d$  и  $q$ . Этот прием давно известен [11] и главным образом является одним из способов векторного управления, поскольку формально позволяет отдельно регулировать момент и скорость двигателя как в машине постоянного тока. Однако в машине постоянного тока нет таких жестких ограничений по току (точнее – по напряжению), которые есть в ВД из-за наличия ПЧ.

Проиллюстрируем этот факт примером: пусть неполная компенсация выражается следующим образом:

$$U_d = -(\psi_q \cdot \omega + \alpha), \quad (16)$$

где  $\alpha$  – постоянное число, которое можно ввести в закон управления в виде коэффициента неполной компенсации.

Предполагая работу двигателя с угловой скоростью вращения  $\omega = 1,5$  при  $M_d = 0,5$ , имеем следующие соотношения:

$$\psi_q = i_q (L_q = 1); \quad (17)$$

$$\psi_d^* = 1,25 i_d (L_d = 1,25); \quad (18)$$

$$\psi_d = \psi_{d0} + \psi_d^* = 1 + 1,25 \cdot i_d. \quad (19)$$

Тогда

$$U_d = -(i_q \omega + \alpha);$$

$$M_d = \psi_d \cdot i_q - \psi_q \cdot i_d = (1 + 1,25 \cdot i_d) \cdot i_q - i_q \cdot i_d = i_q (1 + 0,25 \cdot i_d). \quad (20)$$

Из уравнений установившегося режима имеем следующее:

$$0 = U_d + \omega \psi_d - i_d \cdot r_d; \quad (21)$$

$$0 = U_q - \omega \cdot \psi_d - i_q \cdot r_q. \quad (22)$$

Причем  $M_d = M_c = M$ .

Подстановка (16) и (17) в (21) дает

$$0 = -(i_q \cdot \omega + \alpha) + \omega \psi_q - i_d \cdot r_d \Rightarrow i_d = -\frac{\alpha}{r_d} = -\frac{\alpha}{0,05}. \quad (23)$$

Подставив выражение (23) в формулу (20), имеем следующее:

$$M = i_q \cdot (1 - 5 \cdot \alpha) \text{ или}$$

$$i_q = \frac{M}{1 - 5 \cdot \alpha}. \quad (24)$$



Тогда

$$U_d = -\left(\frac{M}{1-5 \cdot \alpha} \cdot \omega + \alpha\right); \quad (25)$$

$$U_q = \omega \cdot (1-25\alpha) + \frac{0,05 \cdot M}{1-5 \cdot \alpha}. \quad (26)$$

При  $M = 0,5$  и  $\omega = 1,5$  имеем выражение:

$$U_d^2 + U_q^2 = \left(\frac{0,75}{1-5 \cdot \alpha}\right)^2 + \left[1,5 \cdot (1-25 \cdot \alpha) + \frac{0,025}{1-5 \cdot \alpha}\right]^2 = 1, \quad (27)$$

откуда  $\alpha = 0,03$ .

При этом

$$i_d = -\frac{0,03}{0,05} = -0,6; \\ i_q = -\frac{0,5}{0,85} \approx -0,6 \Rightarrow \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \approx 0,84. \quad (28)$$

Используя вышеприведенные формулы, можно установить, что при  $\alpha = 0,03$  и  $\omega = 1$  ограничение по току  $\sqrt{i_d^2 + i_q^2} = 1$  приводит к ограничению по моменту двигателя  $M_d \leq 0,7$ .

Очевидно, что предлагаемый подход может быть преобразован в любую удобную методику, связывающую коэффициент  $\alpha$  с заданными диапазонами изменения скорости и момента ВД, с учетом ограничений по току и напряжению ПЧ.

Более подробное исследование по построению статических характеристик ВД переменного тока при реализации стандартной системы подчиненного регулирования приведено в работе [22]. По большому счету в данной работе можно было провести аналогичное (более подробное) исследование по построению статических характеристик, но поскольку предлагаемый метод привязан к определенному технологическому узконаправленному процессу, то

такого рода исследования требуют больше информации по особенностям предполагаемого технологического процесса. К тому же неполная компенсация приводит к увеличению массогабаритных показателей двигателя, ограничению на них, и, соответственно, на коэффициент неполной компенсации, который желательно задать при разработке конкретного ВД для определенного технологического процесса.

Однако данная работа не рассматривает проблему в полной мере в связи с тем, что задача привязана к определенному узконаправленному технологическому процессу.

Предлагаемый метод может быть технически реализован с помощью выше рассмотренного первого способа управления скоростью ВД с полной компенсацией тока  $i_d$  (4) и (5) для вывода ВД на синхронную скорость при моменте холостого хода с дальнейшим изменением коэффициента  $\alpha$  от 0 до рассчитанного значения. Далее регулирование скорости при фиксированном  $M_c$  производится путем изменения уставки по скорости. Темп изменения значения уставки по скорости вращения может устанавливаться путем моделирования на соответствующей динамической модели (рис. 2) с учетом кратковременных перегрузок по току ПЧ. Изменение  $M_c$  (в пределах допустимых значений) при фиксированной скорости не требует никаких специальных действий, регулирование скорости производится за счет изменения  $U_q(i_q)$ , ток ( $i_d$ ) и потокосцепление ( $\psi_d$ ) при этом не изменяются. Таким же образом возможен возврат к первому способу управления.

Пример результатов моделирования представлен на рис. 5.

Пояснения к рис. 5:

- 1) 0–300 рад – пуск ВД до синхронной скорости при  $M_c = 0,2$  (исходный режим);
- 2) 500 рад – коэффициент  $\alpha$  изменяется скачком от 0 до 0,03;
- 3) 800–1100 рад – изменение скорости от 1 до 1,5;

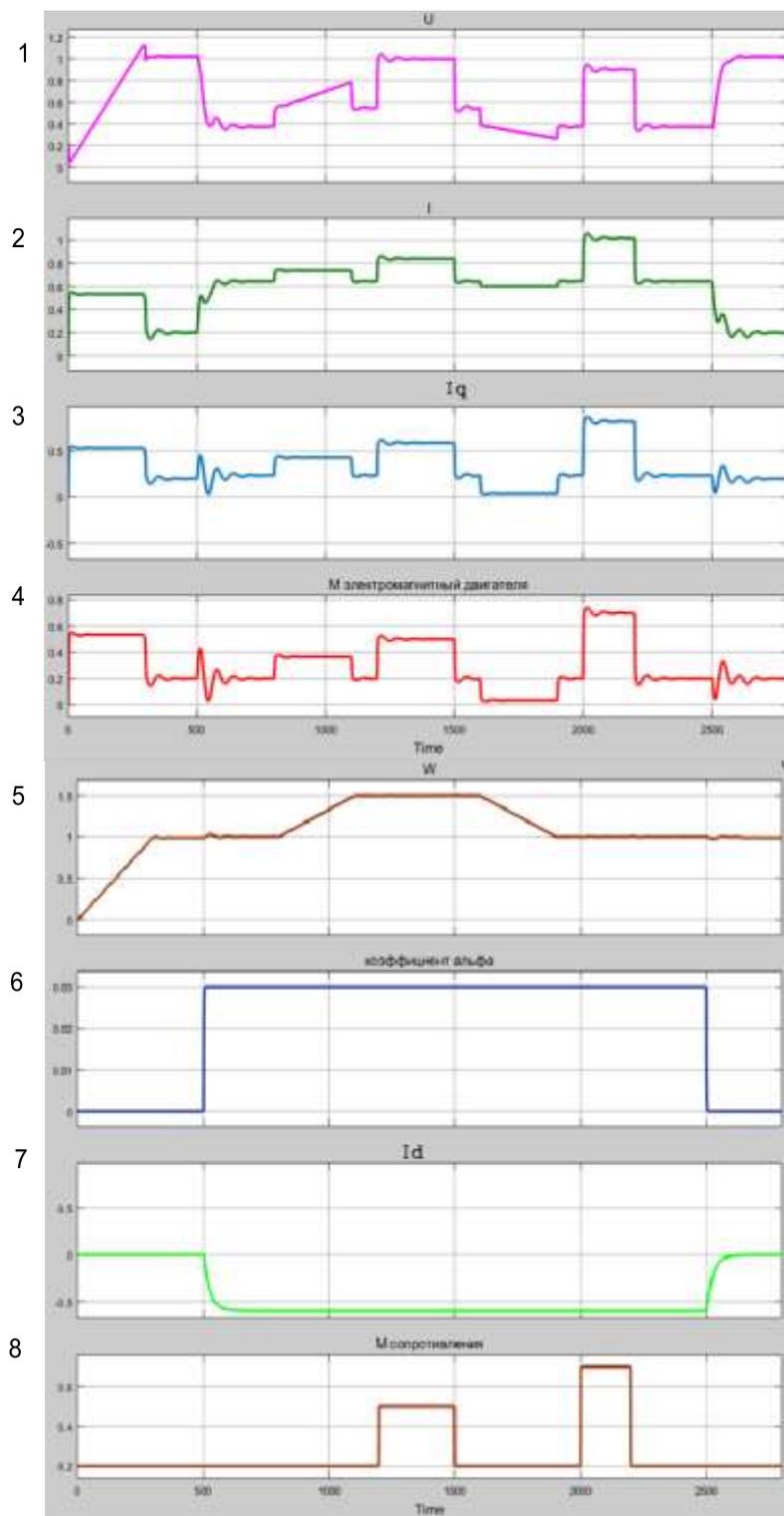


Рис. 5. Возможные режимы работы вентиляционного двигателя при использовании двухзонного управления его скоростью: 1 – график переходного процесса напряжения  $U$ ; 2 – график переходного процесса тока  $I$ ; 3 – график переходного процесса тока по оси  $q$ ; 4 – график изменения электромагнитного момента ВД; 5 – график изменения оборотов ВД; 6 – график изменения коэффициента альфа; 7 – график переходного процесса тока по оси  $d$ ; 8 – график изменения момента сопротивления

Fig. 5. Possible operation modes of BLDC motor when using dual-zone control of its speed: 1 – graph of the transient voltage  $U$ ; 2 – graph of the transient current  $I$ ; 3 – graph of the transient current along the axis  $q$ ; 4 – curve of BLDC motor torque; 5 – curve of BLDC motor RPM; 6 – alpha coefficient curve; 7 – graph of the transient current along the axis  $d$ ; 8 – resistive torque curve



4) 1200–1500 рад – наброс (сброс) нагрузки ( $M_c$  изменяется скачком от 0,2 до 0,5 и обратно);

5) 1600–1900 рад – изменение скорости от 1,5 до 1;

6) 2000–2200 рад – наброс (сброс) нагрузки ( $M_c$  изменяется скачком от 0,2 до 0,7 и обратно);

7) 2500 рад – коэффициент  $\alpha$  изменяется скачком от 0,03 до 0. (возвращение в исходный режим).

Анализ предлагаемого способа двухзонного регулирования скорости ВД показывает, что:

1. Основным достоинством предлагаемого способа регулирования является относительная простота и, соответственно, методическая наглядность.

2. При регулировании не используется регулятор тока, подчиненный регулятору скорости, что позволяет использовать одноконтурную систему управления и в целом упрощает техническую реализацию предлагаемого способа двухзонного регулирования скорости ВД с магнитоэлектрическим возбуждением.

3. На наш взгляд также важно, что коэффициенты регулятора скорости можно не изменять в процессе эксплуатации ВД, и выбранный регулятор позволяет обеспечить хорошие показатели качества переходных процессов во всех предполагаемых режимах работы привода. Заметим только, что последнее условие может потребовать введения дополнительной связи для отключения интегрирующей части регулятора, когда значение напряжения на выходе ПЧ достигает уровня ограничения. Адекватность используемой в исследованиях модели подтверждается ее апробацией в работе [8], в которой также рассмотрен вопрос синтеза ПИД-регулятора скорости ВД, но он не получил четко сформулированного подхода.

Несмотря на вышеуказанные достоинства, данный способ регулирования имеет некоторые недостатки:

1. Данный вид регулирования применим только в случае, если алгоритм работы привода во времени носит вполне

определенный характер, поскольку выполнение ограничений на ток и напряжение ПЧ – результат правильного выбора темпа изменения уставки по скорости и фактически является априорной информацией.

2. В установившихся режимах (при регулировании скорости выше синхронной) невозможно минимизировать ток статора, как в работе [2], или получить максимальный КПД ВД, как в работе [3]. С энергетической точки зрения последние две задачи соответствуют друг другу, но надо заметить, что в любом случае наличие тока ( $i_d$ ) предполагает увеличение массогабаритных показателей двигателя.

3. Предлагаемый вид регулирования может быть реализован применительно к двигателям малой и средней мощности, однако использование алгоритма управления двигателем средней мощности налагает определенные требования по выбору преобразователя частоты [23].

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Особенностью регулирования скорости ВД ниже синхронной, при полной компенсации тока статора по продольной оси, является ограничение скорости в зависимости от момента двигателя. Эта зависимость выводится из уравнений установившегося ВД при учете ограничений на ток и напряжение преобразователя частоты. В предлагаемом способе регулирования скорости ВД используется одноконтурная система управления, позволяющая не выходить за указанные ограничения, а также выбирать необходимый темп изменения уставки по скорости во всех предполагаемых режимах работы привода при заданных кратковременных перегрузках по току преобразователя частоты и моменту ВД. Основной особенностью регулирования скорости ВД выше синхронной (при магнитоэлектрическом возбуждении) является необходимость неполной компенсации тока статора по продольной оси. Предложен метод вычисления коэффициента неполной скорости тока статора, в зависимости от диапазона регулирования скорости ВД вы-

ше номинальной при ограничении на ток и напряжение преобразователя частоты, позволяющий определять зависимость максимально допустимого момента ВД от его заданной скорости. Техническая реализация соответствующего алгоритма управления предполагает применение одноконтурной системы управления скоростью ВД ниже синхронной, которая не требует использования методов построения систем подчиненного регулирования. Такой подход отличается относительной простотой, но не позволяет оптимизировать энергетические показатели ВД.

Однако предлагаемый способ может использоваться на практике, если хорошо известен алгоритм работы соответствующего привода во времени и применение его на скоростях выше синхронной предполагается в достаточно редких случаях.

Следует также отметить, что возможен реверс ВД после его полной остановки с сохранением всех показателей качества переходных процессов при работе привода в противоположном направлении. Для этого достаточно изменить в модели знаки всех величин, определяющих момент ВД и его скорость.

### **Библиографический список**

1. Шымчак П. Дисковые синхронные машины с постоянными магнитами: современное состояние и тенденции развития // *Электричество*. 2009. № 8. С. 37–46.
2. Громышева А.Д., Овчинников И.Е., Егоров А.В. Управление скоростью и моментом вентильного двигателя в приводе транспортного средства // *Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики*. 2011. № 3. С. 47–52.
3. Ильина А.Г., Маматов А.Г. Синтез оптимального наблюдателя состояний для системы управления вентильного электропривода // *Вестник Ивановского государственного энергетического университета*. 2015. № 4. С. 33–38. <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2015.4.033-038>
4. Иванов В.М. Одноконтурный вентильный электропривод с векторной широтно-импульсной модуляцией // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. 2018. Т. 61. № 2. С. 77–85. <http://doi.org/10.17213/0136-3360-2018-2-77-85>
5. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. Иваново: Изд-во ИГЭУ, 2008. 298 с.
6. Воронин С.Г., Курносков Д.А. Регулирование механических координат вентильного электропривода методом векторного управления // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика*. 2015. Т. 15. № 3. С. 52–58. <http://doi.org/10.14529/power150307>
7. Паньков К.Ю., Беляев М.А., Прилуцкий А.В., Поташов А.И. Выбор рационального способа управления пуском вентильного двигателя // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2017. Т. 21. № 1. С. 129–140. <http://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-1-129-140>
8. Сидельников Б.В. Синхронная машина с магнитоэлектрическим возбуждением в программном комплексе MATLAB/SIMULINK // *Проблемы создания и эксплуатации новых типов электроэнергетического оборудования: сб. тр. Отдела электроэнергетических проблем Российской академии наук*. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. Вып. 5. С. 152–162.
9. А. с. № 283373, СССР, МПК H02K 29/02. Бесконтактная электрическая машина / Лебедев Н.И., Овчинников И.Е. Заявл. 03.06.1969; опубл. 06.10.1970. Бюл. № 31.
10. Макаров Д.В., Сапсалева А.В., Харитонов С.А. Электромагнитная сила вентильного двигателя с немагнитным якорем // *Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации*. 2015. № 4. С. 84–93. <http://doi.org/10.17212/1727-2769-2015-4-84-93>
11. Вейнгер А.М. Регулируемый синхронный электропривод. М.: Энергоатомиздат, 1985. 224 с.
12. Герман-Галкин С.Г., Кузнецов В.А. Оптимизация энергетических характеристик в электроприводе с вентильным двигателем // *Вестник Уральского государственного университета путей сообщения*. 2017. № 4. С. 77–84. <http://doi.org/10.20291/2079-0392-2017-4-77-84>
13. Беляев М.А., Гуков Д.В., Прилуцкий А.В. Выбор способа управления напряжением на зажимах бесконтактной машины постоянного тока (вентильного двигателя) // *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. Серия: Механизация и электрификация*. 2016. № 42. С. 319–326.
14. Герман-Галкин С.Г., Гаврилов Р.С., Мустафаев Ю.Н. Структурные и имитационные модели в модельно-ориентированном проектировании вентильного электропривода для опорно-поворотного устройства // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2017. Т. 18. № 1. С. 56–63. <https://doi.org/10.17587/mau.18.56-63>
15. Костыгов А.М., Солодкий Е.М., Даденков Д.А. Синтез регуляторов тока и скорости в системе векторного управления вентильным электроприводом // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 11. Ч. 7. С. 1490–1495.
16. Ушков В.А., Лологаев М.Б. Векторное управление вентильным двигателем постоянного тока // *Наука России: цели и задачи: сб. тр. по материалам XV Междунар. науч. конф.* 2019. С. 81–84. [Элек-



тронный ресурс]. URL: <http://journal.ru/article/sr-10-06-2019-23.pdf> (17.02.2019). <http://doi.org/10.18411/sr-10-06-2019-23>

17. Шпиганович А.Н., Мамонтов А.Н. О применимости метода динамической компенсации в синтезе инвариантной системы управления с обратной связью // Вести высших учебных заведений Черного моря. Серия: Математическое моделирование. 2011. № 2. С. 56–62.

18. Ким Д.П. Синтез оптимальных по быстродействию непрерывных линейных регуляторов // Автоматика и телемеханика. 2009. № 3. С. 5–14.

19. Александров А.Г., Паленов М.В. Состояние и перспективы развития адаптивных ПИД-регуляторов // Автоматика и телемеханика. 2014. № 2. С. 16–30.

20. Ишматов З.Ш., Федосеев А.А. Анализ робастности типовых систем управления электроприводом // Электротехника. 2014. № 9. С. 29–35.

21. Земцов Н.С., Французова Г.А. Синтез ПИД регулятора для систем управления прямоточным котлом // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16. № 9. С. 631–636.

22. Балковой А.Н. Характеристики вентильного двигателя переменного тока // Электротехника. 2015. № 1. С. 53–58.

23. Абрамов Б.И., Дацковский Л.Х., Кузьмин И.К., Шевырев Ю.В. Электропривод вентиляторов шахтных установок // Электротехника. 2017. № 3. С. 67–74.

### References

1. Shymchak P. Permanent-magnet disk synchronous machines: Current State and Development Trends. *Elektrichestvo*. 2009;8:37–46. (In Russ.)

2. Gromysheva AD, Ovchinnikov IE, Egorov AV. Control of Inverter Motor Speed and Torque in a Vehicle Drive Gear. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki* = Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2011;3:47–52. (In Russ.)

3. Ilyina AG, Mamatov AG. Synthesis of Optimal State Estimator for Permanent Magnet Synchronous Motor Drive. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* = Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University. 2015;4:33–38. (In Russ.)

4. Ivanov VM. Single-Loop Valve Electric Drive with Vector Pulse Width Modulation. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Elektromekhanika* = Scientific and Technical Journal Russian Electromechanics. 2018;61(2):77–85. (In Russ.) <http://doi.org/10.17213/0136-3360-2018-2-77-85>

5. Vinogradov AB. *Vector control of AC Electric Drives*. Ivanovo: Ivanovo State Power Engineering University; 2008, 298 p. (In Russ.)

6. Voronin SG, Kurnosov DA. Regulation of Mechanical Coordinates of the Switching Control Synchronous Motor by Method of Vector Control. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* = Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering. 2015;15(3):52–58. (In Russ.)

7. Pankov KYu, Belyaev MA, Prilutsky AV, Potashov AI. Choosing a Rational Method to Control Brushless Motor Starting. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2017;21(1):129–140. (In Russ.) <http://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-1-129-140>

8. Sidel'nikov BV. A Synchronous Machine with Magneto-electric Excitation in MATLAB/SIMULINK. In: *Problemy sozdaniya i ekspluatatsii novyh tipov elektroenergeticheskogo oborudovaniya* = Development and Operation Problems of New Types of Electric Power Equipment. Saint-Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; 2003, issue 5, p. 152–162. (In Russ.)

9. Lebedev NI, Ovchinnikov IE. *Noncontact electric ma-*

*chine*. Copyright certificate SSSR, no. 283373; 1969. (In Russ.)

10. Makarov DV, Sapsalev AV, Kharitonov SA. Electromagnetic Force of BLDC with Nonmagnetic Armature. *Doklady Akademii nauk vysshej shkoly Rossijskoj Federacii* = Proceedings of the Russian Higher School Academy of Science. 2015;4:84–93. (In Russ.) <http://doi.org/10.17212/1727-2769-2015-4-84-93>

11. Vejnger AM. *Controlled Synchronous Electric Drive*. Moscow: Energoatomizdat; 1985, 224 p. (In Russ.)

12. Herman-Galkin SG, Kuznetsov VA. Optimization of Power Descriptions in Electromechanics with Valve Engine. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya* = Herald of the Ural State University of Railway Transport. 2017;4:77–84. (In Russ.) <http://doi.org/10.20291/2079-0392-2017-4-77-84>

13. Belyaev MA, Gukov DV, Prilutskij AV. Selection of a Voltage Control Method on Brushless DC Machine (Inverter Motor) Terminals. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. Seriya: Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya* = *izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University. Series: Mechanization and Electrification* 2016;42:319–326. (In Russ.)

14. Herman-Galkin SG, Gavrilov RS, Mustafaev YuN. Structural and Simulation Models in the Model-oriented Designing of the Electric Valve Actuator for a Rotary Support Device. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2017;18(1):56–63. (In Russ.) <https://doi.org/10.17587/mau.18.56-63>

15. Kostygov AM, Solodkiy EM, Dadenkov DA. Synthesis of the Current and Speed Regulators in the Vector Control System for Permanent Magnet Synchronous Machine Drive. *Fundamental Research*. 2014;11-7:1490–1495. (In Russ.)

16. Ushkov VA, Lologaev MB. Vector Control of a DC Brushless Motor. In: *Nauka Rossii: Celi i zadachi: sbornik trudov po materialam XV Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii* = Science of Russia: Goals and Objectives: Proceedings of XV International Scientific Conference. 2019:81–84. Available from: <http://journal.ru/article/sr-10-06-2019-23.pdf> [Accessed 17th February 2019]. (In Russ.) <http://doi.org/10.18411/sr-10-06-2019-23>

17. Shpiganovich AN, Mamontov AN. The Applicability

of Dynamic Compensation Method in the Synthesis of Invariant Control Systems with Feedback. *Vesti vysshih uchebnyh zavedenij Chernozem'ya. Seriya: Matematicheskoe modelirovanie*. 2011;2:56–62. (In Russ.)  
18. Kim DP. Design of Speed-Optimal Continuous Linear Controllers. *Avtomatika i Telemekhanika = Automation and Remote Control*. 2009;3:5–14. (In Russ.)  
19. Alexandrov AG, Palenov MV. Adaptive PID Controllers: State of the Art and Development Prospects. *Avtomatika i Telemekhanika = Automation and Remote Control*. 2014;2:16–30. (In Russ.)  
20. Ishmatov ZSh, Fedoseev AA. Robustness Analysis

#### **Критерии авторства**

Беляев М.А., Прилуцкий А.В., Таленфельд С.В. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Беляев Михаил Алексеевич**,  
кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры корабельных систем управления,  
Военно-морской политехнический институт  
им. Н.Г. Кузнецова,  
196609, г. Санкт-Петербург, Кадетский б-р, 1,  
Россия;  
✉ e-mail: bel.mih@bk.ru

**Прилуцкий Александр Владимирович**,  
главный специалист,  
ООО «НГ-Энерго»,  
192012, г. Санкт-Петербург, пр. Обуховской  
обороны, 271/А, Россия;  
e-mail: bobkins@mail.ru

**Таленфельд Сергей Валерьевич**,  
кандидат технических наук,  
заместитель начальника отдела,  
ОАО «Авангард»,  
195271, г. Санкт-Петербург, Кондратьевский пр., 72,  
Россия;  
e-mail: talik72@mail.ru

of Typical Electric Drive Control Systems. *Elektrotehnika*. 2014;9:29–35. (In Russ.)  
21. Zemtsov NS, Frantsuzova GA. Design of PID-Controller for a Once-Through Boiler. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2015;16(9):631–636. (In Russ.) <https://doi.org/10.17587/mau.16.631-636>  
22. Balkovoj AN. Characteristics of an AC Inverter Motor. *Elektrotehnika*. 2015;1:53–58. (In Russ.)  
23. Abramov BI, Dackovskij LH, Kuz'min IK, Shevyrev YuV. Electric Drive for Mine Installation Fans. *Elektrotehnika*. 2017;3:67–74. (In Russ.)

#### **Authorship criteria**

Belyaev M.A., Prilutsky A.V., Talenfeld S.V. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

#### **Conflict of interests**

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

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

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Mikhail A. Belyaev**,  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department  
of Ship Control Systems,  
N.G. Kuznetsov Naval Polytechnic Institute,  
1, Kadetsky Blvd, Saint-Petersburg 196609, Russia;  
✉ e-mail: bel.mih@bk.ru

**Alexander V. Prilutsky**,  
Chief Specialist,  
LLC “NG-Energo”,  
271/A, Obukhovskoy Oborony pr.,  
Saint-Petersburg 192012, Russia;  
e-mail: bobkins@mail.ru

**Sergey V. Talenfeld**,  
Cand. Sci. (Eng.),  
Deputy Head of Department,  
JSC “Avangard”,  
72, Kondratievsky pr., Saint-Petersburg 195271,  
Russia;  
e-mail: talik72@mail.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.7.012

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-498-513>

## Анализ прогрессивных технологий механообработки осевых режущих инструментов

© Г.В. Матлыгин, А.В. Савилов, Т.В. Зарак

*Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия*

**Резюме:** Цель – повышение эффективности процессов механической обработки осевых режущих инструментов из быстрорежущей стали на высокопроизводительном оборудовании на основе выбора прогрессивных технологических подходов, аналитический обзор современных технологий изготовления осевого режущего инструмента на станках с программным управлением типа обрабатывающего центра. В качестве критериев оценки эффективности использовались производительность процесса, выраженная в скорости удаления материала, и качество обработки инструментов (шероховатость поверхности, геометрическая точность, механические свойства). Установлено, что многооперационные станки, выполняющие токарные, фрезерные и другие типы операций за один установ, относятся к оборудованию, в наибольшей степени отвечающему требованиям высокопроизводительной обработки осевого режущего инструмента. Определены прогрессивные технологические процессы, применяемые при изготовлении режущих инструментов на многооперационных станках: точение фрезерованием, ротационное и полигональное точение. Показано, что применение метода точения фрезерованием позволяет исключить из технологического процесса обработки операцию шлифования, что приводит к снижению себестоимости изделия на 77%. Установлено, что точение фрезерованием подразделяется на ортогональную и тангенциальную обработки, каждая из которых имеет свою особенность определения скоростей резания, которая должна учитываться при назначении оптимальных режимов обработки. Выявлено, что получение заданной формы обрабатываемого изделия является при точении проблемным фрезерованием. Установлено, что соотношение скоростей вращения инструмента и заготовки и глубина резания являются наиболее значимыми факторами, влияющими на отклонение круглости, которое может достигать 2 мм. Показана связь шероховатости с шириной фрезерования. На основании проведенного анализа рекомендовано при изготовлении осевых режущих инструментов вместо классического точения применение технологии точения фрезерованием, обеспечивающей увеличение производительности процесса обработки осевого режущего инструмента в 2–5 раз без потери качества обрабатываемого изделия, и снизить шероховатость поверхности до 10 раз; при этом снижаются силы резания, температура в зоне резания, а также увеличивается стойкость инструмента и устраняется образование сливной стружки.

**Ключевые слова:** режущий инструмент, быстрорежущая сталь, многооперационные станки, точение фрезерованием

**Информация о статье:** Дата поступления 08 апреля 2020 г.; дата принятия к печати 14 мая 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 июня 2020 г.

**Для цитирования:** Матлыгин Г.В., Савилов А.В., Зарак Т.В. Анализ прогрессивных технологий механообработки осевых режущих инструментов. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 3. С. 498–513. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-498-513>

## Analysis of progressive machining technologies for rotating cutting tools

Georgy V. Matlygin, Andrey V. Savilov, Tatiana V. Zarak

*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

**Abstract:** The study is aimed at increasing the machining efficiency of cutting tools made of high-speed steel using high-performance equipment. The study is based on the choice of progressive technological approaches and an analytical review of contemporary technologies for manufacturing rotating cutting tools using machines having computer numerical control (CNC) of machining center type. The process efficiency expressed in the rate of material removal and the quality of tool processing (surface roughness, geometric accuracy, mechanical properties) were used as criteria for evaluating effectiveness. Multi-tasking machines, performing turning, milling and other types of operations in one cycle, were categorized as equipment meeting the requirements for optimal high-performance machining of a rotating cutting tool. Progressive technological processes used in the manufacture of cutting tools on multi-tasking machines include milling turn-

ing, rotary and polygonal turning. The application of combined milling-turning was demonstrated to eliminate the grinding operation from the technological process with a reduction in the product cost by 77%. Milling is subdivided into orthogonal and tangential machining processes characterized by their own characteristics for the determination of optimal cutting speeds when assigning cutting data. When obtaining a given workpiece shape, turning combined with milling was revealed to be problematic. Along with depth of cut, the ratio of tool and workpiece rotation speeds was established to be the most significant factor affecting roundness deviation, which reached a maximum of 2 mm. The relation between roughness and milling width is demonstrated. Based on the performed analysis, the application of combined milling-turning technology is recommended in the manufacture of rotating cutting tools, due to providing an increase in the productivity of the machining for a rotating cutting tool by 2–5 times without workpiece quality loss, as well as reducing surface roughness by 10 times. In this case, the cutting force and the temperature in the cutting zone are reduced along with increased tool life and elimination of flow chip formation.

**Keywords:** cutting tools, high speed steel, multi-tasking machine-tools, turn-milling

**Information about the article:** Received April 08, 2020; accepted for publication May 14, 2020; available online June 30, 2020.

**For citation:** Matlygin GV, Savilov AV, Zarak TV. Analysis of progressive machining technologies for rotating cutting tools. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(3):498–513. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-498-513>

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Состояние рынка режущего инструмента имеет стратегическое значение и оказывает серьезное влияние на современное машиностроительное производство. Затраты на инструмент – это существенная статья расходов в себестоимости машиностроительной продукции. Качество инструмента напрямую влияет на производительность и, таким образом, является одной из важнейших составляющих конкурентоспособности современных предприятий.

Мировой инструментальный рынок постоянно развивается. Одним из направлений развития инструмента является совершенствование инструментальных материалов и технологий их изготовления. Можно выделить следующие основные тенденции в развитии материалов для инструментального производства:

- 1) узкая специализация материалов по назначению (группа обрабатываемости по ISO и условия обработки);
- 2) разработка новых инструментальных сталей и сплавов для высокопроизводительной механообработки;
- 3) совершенствование технологии производства порошковых быстрорежущих сталей.

Следует отметить, что, несмотря на многообразие инструментальных материа-

лов, способов их производства и упрочнения, быстрорежущие стали по-прежнему остаются одним из основных инструментальных материалов. Это объясняется хорошим или удовлетворительным сочетанием основных и технологических свойств. По основным свойствам быстрорежущие стали занимают промежуточное положение между нетеплостойкими легированными инструментальными сталями и твердыми сплавами.

Быстрорежущие стали могут работать в более тяжелых условиях резания, по сравнению с нетеплостойкими сталями, т.к. у них разогрев режущих кромок инструмента может достигать 600...650°C, к тому же они имеют преимущества в технологических свойствах, по сравнению с твердыми сплавами. Это свойство позволяет изготавливать из них разнообразный металлорежущий инструмент сложной конструкции и широкой номенклатуры, например: сверла, метчики, развертки, фрезы, протяжки и др. Для этих инструментов характерны фасонно-зубчатая форма поперечного сечения рабочей части, фасонные винтовые поверхности в продольном направлении, поверхности специальных форм (образующие режущие кромки), затюкованные поверхности, поверхности, образованные спиралью Архимеда, логарифмической спиралью, эвольвентами и другими кривыми. Наличие таких поверхностей и в особенности их со-



четание в одном инструменте определяли в прошлом необходимость применения специальных станков: затылочных, специальных зубошлифовальных, резьбошлифовальных и заточных станков.

Низкая обрабатываемость быстрорежущей стали требует применения специальных методов и режимов обработки. В свою очередь, реализация этих методов и режимов возможна на современном высокопроизводительном оборудовании, в первую очередь на многооперационных станках или токарно-фрезерных обрабатывающих центрах с фрезерным шпинделем.

Качество инструментов определяется не только точностью геометрических форм и шероховатостью поверхностей, но и их физико-механическими характеристиками (отсутствием обезуглероженного или вторичного закаленного слоя, структурой, значительными остаточными напряжениями и пр.). Оптимальное качество инструментов обеспечивается применением специальных методов контроля исходных материалов, методами и режимами механической, термической и термохимической обработки и построениями технологического процесса изготовления инструмента.

Анализ современной технологии изготовления осевого инструмента из быстрорежущих сталей показывает, что применение многооперационных станков позволяет добиться концентрации операций на одном рабочем месте, в отличие от традиционных подходов, предполагающих использование токарных, фрезерных, сверлильных и упомянутых выше специальных станков. Это также позволяет значительно сократить широкий парк оборудования с ЧПУ с одновременным сокращением производственных площадей и штатов.

Дополнительным преимуществом многооперационных станков является возможность реализации прогрессивных стратегий обработки, таких как точение фрезерованием, ротационное точение и полигональное точение. Наиболее прогрессивной из перечисленных следует полагать точение фрезерованием. Оно позволяет повысить производительность обработки, уве-

личить стойкость инструмента с одновременным снижением температуры в зоне резания. Указанная стратегия является предметом научных исследований, основной целью которых является построение адекватной модели процесса резания. Для достижения указанной цели необходимо решить ряд научных задач, в частности – установить влияние геометрии режущей части на динамику процесса, спрогнозировать силы резания, построить модель как для ортогонального, так и для тангенциального резания, определить термодинамику процесса.

Одним из ключевых преимуществ точения фрезерованием перед стандартным точением является достижение более высокого качества обработанной поверхности. Ряд авторов указывают на возможность получения шероховатости поверхности лучше, чем при обычном точении до 10 раз. Однако эти результаты получены при обработке конструкционных сталей, имеющих лучшую обрабатываемость резанием, чем быстрорежущие стали. Соответственно, исследование точения фрезерованием быстрорежущих сталей, в первую очередь порошковых, является актуальной задачей.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНООБРАБОТКИ

**Современные марки быстрорежущих сталей.** Быстрорежущие стали отечественного производства (ГОСТ 19265-73<sup>1</sup>) по свойствам подразделяют на две основные группы:

1) стали умеренной теплостойкости для режущего инструмента нормальной производительности для обработки углеродистых и низколегированных сталей перлитного класса (P6M5, P6M3, P8M3, P18, P12, P9);

2) стали повышенной теплостойкости для режущего инструмента повышенной производительности (с повышенным содержанием кобальта – P6M5K5, P9K5, P9M4K8, P2M9K5, P8M8K6C; с повышенным содержанием ванадия).

Производимый отечественный ме-

таллообрабатывающий инструмент из быстрорежущих сталей не всегда соответствует требованиям стандарта в силу объективных причин:

– отсутствие комплексного контроля качества сталей в состоянии поставки и после упрочняющей термической обработки (по ГОСТ 19265-73<sup>1</sup>);

– несовершенство термической обработки инструмента, базирующейся на устаревшем оборудовании, которое в свою очередь не обеспечивает заданные производителем сталей узкие температурные диапазоны режимов термообработки.

В России имеется опыт производства инструмента из порошковых быстрорежущих сталей импортного производства [1, 2].

Зарубежные фирмы-производители [3, 4] поставляют на рынок широкий ассортимент порошковых быстрорежущих сталей (таблица). Некоторые из них предлагают большое количество марок быстрорежущих, причем примерно 20 из них являются аналогами отечественных марок быстрорежущих сталей по ГОСТ 19265-73<sup>1</sup>. При этом актуальность производства и внедрения быстрорежущих сталей повышенной теплостойкости, особенно порошковых инструментальных сталей, возрастает в связи с использованием высокопроизводительного станочного оборудования с программным управлением.

Анализ химического состава показывает, что порошковые быстрорежущие стали – это высоколегированные стали, близкие по составу к стандартным быстрорежущим сталям, но содержащие повышенное количество углерода, карбидообразующих элементов, особенно ванадия, а также кобальт. По традиционной технологии многие марки порошковых сталей изготовить практически невозможно, т.к. они не коуются и не шлифуются.

Россия располагает научным и практическим опытом в области порошко-

вых быстрорежущих сталей. Существуют предприятия, производящие порошки сплавов методом газоструйного распыления, в том числе из быстрорежущих сталей (например, завод порошковой металлургии АО «ПОЛЕМА»), и отдельно – предприятия, обладающие технологиями изостатического прессования и экструзии<sup>2</sup> [5, 6].

Применение порошковой технологии изготовления быстрорежущих сталей позволяет значительно улучшить основные и технологические свойства сталей, открывает перспективу для разработки новых марок материалов для высокопроизводительной механообработки. Стойкость инструмента из порошковых быстрорежущих сталей возрастает в несколько раз [7]. Однако следует иметь в виду, что улучшенные технологические показатели новых марок сталей сочетаются с их относительно низкой обрабатываемостью резанием. Данный факт стимулирует применение прогрессивных технологий механообработки для повышения производительности процесса производства режущего инструмента.

**Перспективные методы обработки осевых режущих инструментальных станках.** В настоящее время активно внедряются в производство следующие прогрессивные технологии: точение фрезерованием, ротационное точение, полигональное точение.

**Точение полигональное.** Метод полигонального точения (точение многогранников) основан на синхронизации, с определенным соотношением, угловых скоростей вращения детали и вращающегося инструмента, рис. 1. Количество сторон многогранника зависит от соотношения вращения заготовки и фрезы и количества зубьев фрезы.

В основном, полигональное точение используется для получения крепежа – квадратных и шестигранных головок болтов или гаек на автоматах продольного точения.

<sup>1</sup>ГОСТ 19265-73 Прутки и полосы из быстрорежущей стали. Технические условия. Введ. постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР № 2678 от 10.12.1973. М.: Изд-во стандартов, 2003.

<sup>2</sup>Короткова Л.П., Шатко Д.Б. Контроль качества инструментальных материалов: учеб. пособ. Кемерово: Изд-во КузГТУ, 2010. 164 с.



ния, поскольку при полигональном точении время обработки уменьшается в несколько раз, по сравнению с фрезерованием шестигранников обычным способом.

*Точение ротационное.* Отличительной особенностью ротационного резания, по сравнению с традиционным, является использование специального инструмента, режущий элемент которого в процессе обработки вращается вокруг своей оси рис. 2.

Для ротационного точения характерны соизмеримые по скорости вращения движения инструмента и заготовки. Суще-

ность способа заключается в следующем: резцу кроме поступательного движения вдоль оси заготовки придается вращение вокруг оси, не пересекающейся с осью вращения заготовки, при этом ось вращения резца перпендикулярна или наклонена под углом к оси заготовки [7].

При переходе от традиционного резания к ротационному, относительное скольжение в контакте рабочих поверхностей инструмента с обрабатываемым материалом, заменяется на качение с проскальзыванием.

**Химический состав быстрорежущих сталей и их твердость в состоянии поставки и технологические свойства быстрорежущих сталей**  
**Chemical composition of high-speed steels, their hardness at as-delivered state and processing properties of high-speed steels**

Марка стали	Массовая доля элемента, %						Твердость по Бринеллю при поставке Мягкоотожженная	Технологические свойства				
	C	W	Mo	V	Cr	Co		Прочность на сжатие	Шлифуемость	Прокаливаемость	Вязкость	Износостойкость
ASP 2005	1,5	2,5	2,5	4	4	–	250	4/5	4/5	2/5	4/5	3/5
ASP 2011	2,45	–	1,3	9,75	5,25	–	280	3/5	2/5	3/5	3/5	4/5
ASP 2017	0,8	3	3	1	4	8	260	5/5	4/5	3/5	2/5	2/5
ASP 2055	1,69	6,3	4,6	3,2	4	9	320	5/5	2/5	4/5	2/5	3/5
ASP 2060	2,3	6,5	7	6,5	4,2	10,5	345	2/5	2/5	5/5	2/5	5/5
BÖHLER S200	0,76	18	–	1,1	4,1	–	280	3/5	2/5	3/5	2/5	3/5
BÖHLER S500	1,1	1,4	9,2	1	3,9	7,8	220	4/5	3/5	4/5	2/5	2/5
BÖHLER S630	0,95	2	4	4	4	–	220	3/5	3/5	3/5	3/5	2/5
BÖHLER S705	0,92	6,2	5	1,9	4,1	4,8	220	4/5	3/5	3/5	3/5	2/5
BÖHLER S730	0,92	1,95	4,25	4,15	4,1	4,75	220	3/5	3/5	2/5	3/5	2/5
P6M3	0,9	6	3,3	2,25	3,3	0,5	255	3/5	1/5	3/5	3/5	3/5
P6M5	0,86	6	5,05	1,9	4,1	0,5	255	3/5	3/5	3/5	1/5	3/5
P9	0,9	9	1	2,5	4,1	2,5	255	3/5	1/5	3/5	2/5	3/5
P9M4K8	1,05	9	4,05	2,5	3,3	8	285	3/5	1/5	3/5	1/5	5/5
P12Ф3	1	12,5	1	2,75	4,05	0,5	269	3/5	5/5	3/5	3/5	3/5



Рис. 1. Процесс полигонального точения фрезой Paul Horn  
Fig. 1. Polygon turning using a Paul Horn mill

Преимуществом ротационных видов точения является возможность существенного увеличения стойкости режущего инструмента за счет постоянного обновления режущей кромки инструмента и увеличения производительности из-за возможности увеличения подачи без потери качества обрабатываемой поверхности  $R_z$ , снижение затрат до 77%, возможность замены операций шлифования, высокая длительная точность и стабильность процесса, компактный дизайн технического решения [8]. Образование сливной стружки можно устранить за счет разделения режущей кромки на отдельные сектора.

В качестве недостатков ротационного точения стоит отметить большие значения радиальной составляющей силы резания, что приводит к появлению больших прижимных сил по базовой посадочной поверхности отверстия в пластине, зачастую самовращения режущей чашки не происходит из-за заклинивания (или, по крайней мере, нарушается плавность вращения),

появляются вибрации технологической системы. Это приводит к локальному интенсивному износу на круговой режущей кромке, нарушению качества обработки.

Поскольку одним из основных критериев технико-экономической эффективности любого способа формообразования резанием является качество обработанной поверхности, то необходимо особое внимание уделять изучению процессов износа инструмента [7].

*Точение фрезерованием.* Точение фрезерованием представляет собой фрезерование криволинейных поверхностей при вращательном движении заготовки вокруг своей оси рис. 3. Обработка выполняется на симметричных или несимметричных вращающихся деталях. Комбинация точения и фрезерования может оказаться очень выигрышной, по-настоящему преимущества такого сочетания раскрылись благодаря многооперационным станкам относительно недавно.



Рис. 2. Процесс ротационного точения на токарном станке серии UNIVERTOR AC-1  
Fig. 2. Rotary turning on the UNIVERTOR AC-1 series lathe

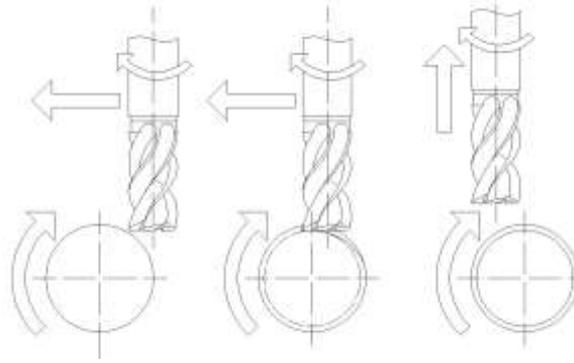


Рис. 3. Принципиальная схема точения фрезерованием  
Fig. 3. Schematic diagram of turn-milling

Эксцентрические профили и профили, которые трудно получить традиционными способами фрезерования или точения, можно обрабатывать путем фрезерования поверхностей тел вращения. Этот метод обеспечивает высокую скорость съема металла при надежном контроле над стружкодроблением. Цилиндрическая поверхность формируется при подаче фрезы только в радиальном направлении в процессе вращения заготовки. При одновременном перемещении фрезы в двух направлениях можно получать эксцентрические поверхности, например, кулачки на валах. Для подачи по более чем двум осям необходим инструмент с возможностью врезания под углом, а для обработки конической поверхности требуется 5 осей.

Поскольку это относительно новая стратегия обработки, в мире мало исследований по точению фрезерованием. Эти исследования были начаты большими усилиями Шульца и Шпора [9]. В их труде было проанализировано токарное фрезерование деталей роликовых подшипников, изготовленных из 100Cr6 (ШХ15). Авторы отметили, что возможно изготовление вращательно-симметричных деталей с повышенной точностью и качеством поверхности, а также они разделили токарно-фрезерные операции на две группы: ортогональные и коаксиальные. Утверждается, что коаксиальное фрезерование может использоваться как для внутренней, так и для внешней обработки вращательно-симметричных заготовок, тогда как ортогональное может использоваться только для внешней обработки.

Токарно-фрезерная обработка имеет несколько преимуществ. Прежде всего, благодаря вращательным движениям как инструмента, так и обрабатываемой детали, может быть достигнута высокая скорость резания в токарных фрезерных операциях. Кроме того, достигается высокое качество поверхности и низкие силы резания. Помимо этого, из-за прерывистого резания температура в зоне обработки снижается, что, в свою очередь, снижает износ режущей кромки и увеличивает срок службы инструмента. Хотя Шульц рассматривал только ортогональные и коаксиальные токарно-фрезерные операции, последние исследования в основном сосредоточены на ортогональных и тангенциальных процессах.

В статье Чоудхури и Баджапаи [10] изучали ортогональную токарную обработку и сравнивали значения шероховатости поверхности со значениями, полученными при стандартной токарной обработке. Они утверждают, что с помощью токарного фрезерования можно добиться в 10 раз лучшего качества поверхности, по сравнению с токарным, и что существуют оптимальные значения скорости заготовки для повышения технологичности обработки данным методом.

В другом своем исследовании Чоудхури и соавторы [10] исследовали шероховатость поверхности при ортогональной токарной обработке и смоделировали ее. С другой стороны, Чжу и соавторы [11] создали модель, которая может предсказать шероховатость поверхности на фрезерованных деталях с ортогональным поворо-

том, и проверили эти результаты экспериментально. Филхо [12] разработал модель силы резания для врезного ортогонального токарного фрезерования, в которой он использовал калиброванные коэффициенты резания для прогнозирования сил. Карагузел и соавторы [13] использовали аналитическую модель, в которой коэффициенты резания оцениваются из ортогональной базы данных, чтобы предсказать силы резания во время ортогонального точения фрезерованием. Они также определили отношение качества скорости обработки поверхности и предложили подход к выбору параметров резки для повышения производительности.

Цю и соавторы [14] скорректировали коэффициенты резания, выполняя врезное фрезерование, и получили коэффициенты силы резания боковой кромки и коэффициенты силы резания торцевой кромки по отдельности, чтобы использовать их в моделировании силы неэксцентрического ортогонального токарного фрезерования. Ронг и соавторы [15] исследовали проблему стабильности при фрезерной обработке с ортогональным поворотом и предложили модель, которая учитывает влияние переменной глубины резания и толщины стружки в процессе. Помимо механики и качества поверхности, температуры резания играют решающую роль в операциях обработки, поскольку они оказывают большое влияние на срок службы инструмента, целостность поверхности заготовки, механизм формирования стружки и термическую деформацию инструмента [16]. Следовательно, очень важно контролировать температуру резания с помощью моделирования. Есть несколько исследований, которые касаются температуры резания при непрерывной резке. Однако в литературе утверждается, что термические условия при прерывистой резке имеют иной характер, чем при непрерывном резании [17]. Прерывистое резание включает циклы нагрева и охлаждения, которые, в свою очередь, могут вызывать термические усталостные трещины на режущем инструменте, что отличается от непрерывной резки [18]. Циклы охла-

ждения при прерывистой резке позволяют режущему инструменту остывать во время операции резания, поэтому становится возможным применение более высоких скоростей резания. Пэнг [19] предложил температурную модель заготовки для неэксцентрической ортогональной фрезерной обработки и проверил ее путем измерения температуры с помощью термодатчиков. Савас и соавторы [20] проанализировали шероховатость поверхности при тангенциальном токарном фрезеровании и обнаружили, что с помощью тангенциального токарного фрезерования может быть достигнуто очень хорошее качество поверхности, сопоставимое с поверхностью шлифования. В дополнение к исследованиям шероховатости поверхности, Неагу и соавторы [21] исследовали кинематику ортогонального токарного фрезерования. В своем исследовании Неагу рассматривал отклонения от круглости, скорость резания и функциональную геометрию инструмента при ортогональном токарном фрезеровании. Кричинго Филхо [22] исследовал силы резания при ортогональной токарной фрезеровке, используя пятиосевой обрабатывающий центр. Цзян [23] смоделировал текстуру поверхности заготовки, обработанной тангенциальным токарным станком. Значительный вклад в изучение токарного фрезерования внесли Карагузел, Баккал, Будак, которые исследовали механику и термические аспекты токарно-фрезерной обработки. Они также разработали модели для проверки геометрии процесса, кинематики и механики, качества обрабатываемых деталей в ортогональных и тангенциальных токарно-фрезерных операциях [24].

Рассмотренные работы показывают, что в мире возрастает интерес к точению фрезерованием. В инструментальном производстве данный процесс обработки представляет особый интерес при изготовлении осевого режущего инструмента.

*Ортогональная токарно-фрезерная обработка.* При ортогональном токарном фрезеровании стружка образуется под действием боковой и нижней частей режущего инструмента [25]. На рис. 4 пока-



заны этапы получения необработанного припуска в случае ортогонального токарно-фрезерования.

Определение неразрезанной геометрии стружки является важным шагом для моделирования сил резания. Начальное и конечное положение инструмента можно использовать для определения толщины необработанного припуска [25].

На рис. 5 а показано изменение толщины стружки в зависимости от скоростного отношения  $r_n$ . Можно предположить, что толщина стружки увеличивается с уменьшением отношения  $r_n$ .

Тангенциальная токарная обра-

ботка. При тангенциальном токарном фрезеровании стружка формируется стороной режущего инструмента. Необработанный припуск может быть определен с помощью аналогичной процедуры, используемой в ортогональном случае. На рис. 6 показаны операции тангенциального токарного фрезерования.

На рис. 5 б показано изменение толщины стружки по отношению к  $r_d$ . Можно предположить, что толщина стружки увеличивается с уменьшением отношения  $r_d$ , где  $a_p = 0,6$  мм;  $n_w = 5$  об/мин;  $n_t = 500$  об/мин;  $f = 0,4$  мм/об.

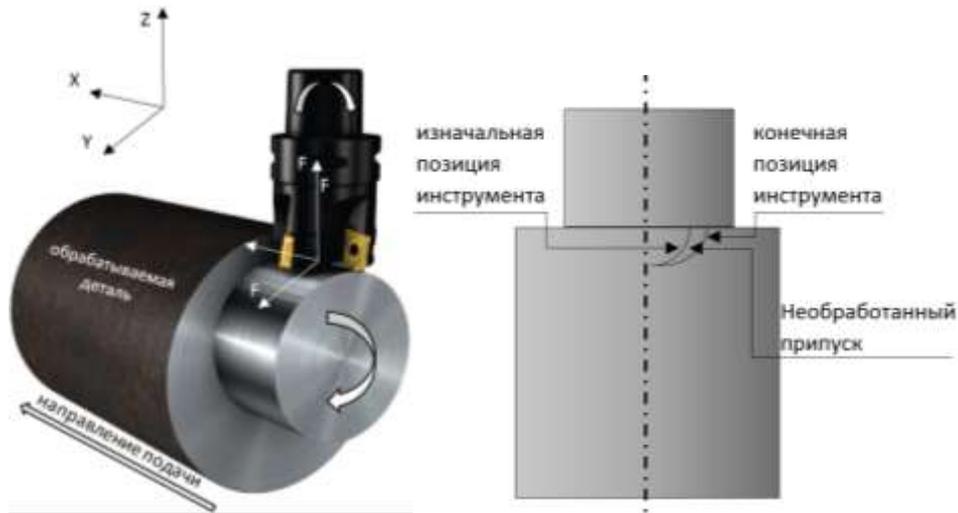


Рис. 4. Ортогональная токарно-фрезерная обработка  
Fig. 4. Orthogonal turn-milling

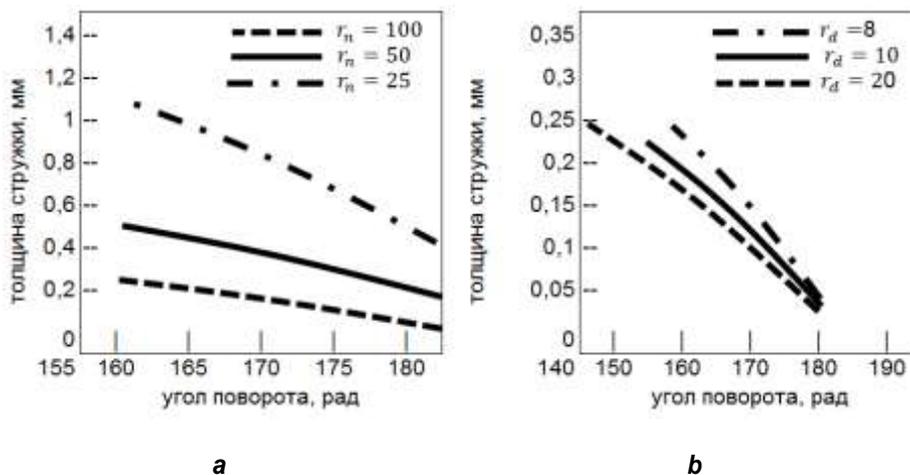


Рис. 5. Графики изменения толщины стружки: а – изменение толщины стружки в зависимости от скоростного отношения,  $r_n$ ; б – изменение толщины стружки в зависимости от диаметра,  $r_d$   
Fig. 5. Graphs of chip thickness variation : a –chip thickness vs speed ratio,  $r_n$ ;  
b –chip thickness vs diameter,  $r_d$

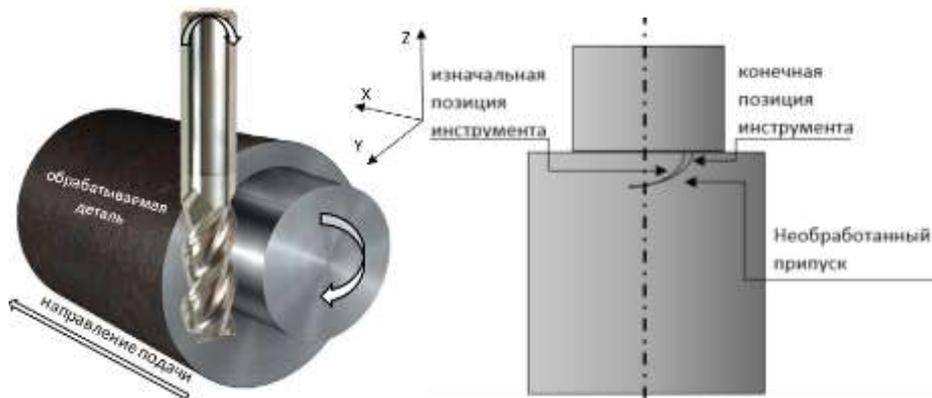


Рис. 6. Тангенциальная токарно-фрезерная обработка  
 Fig. 6. Tangential turn-milling

**Скорость резания при точении фрезерованием.** Как показали в этом исследовании Карагузел, Баккал и Будак, определение скоростей резания для двух видов обработки различны. На рис. 7 представлен анализ произвольного условия между ортогональным и тангенциальным методами с точки зрения скорости резания. Сплошная и пунктирные кривые представляют собой фрезерование с ортогональным поворотом, в случае для сплошной кривой заготовка вращается по часовой стрелке, а та, которая вращается против часовой стрелки, обозначена пунктирной линией. Видно, что скорость резания в тангенциальном случае постоянна. В ортогональном случае, с другой стороны, скорость резания изменяется в зависимости от угла вращения. Этот результат важен для температуры резания, поскольку скорость резания является наиболее важным фактором, влияющим на температуру резания и износ инструмента [25].

На рис. 8 приведены значения максимальной и средней скоростей резания для фрезерования ортогональным способом. Максимальные и средние значения скоростей резания в ортогональном случае уменьшаются с отношением  $r_d$ . Также видно, что глубина резания не оказывает существенного влияния на скорость резания.

**Скорость съема металла и качество обработанной поверхности.** Значения высокой скорости снятия материала MRR (от англ. Material Removal Rate – MRR) могут быть достигнуты с помощью фрезерной обработки. Однако высокая MRR создает проблему, а именно: качество поверхности детали после обработки может стать значительно хуже. Шероховатость поверхности может быть определена как необработанная часть заготовки из-за высокой подачи на оборот заготовки. Формирование шероховатости поверхности показано на рис. 9. На рис. 9 а представлено формирование шероховатости поверхности



Рис. 7. Сравнение скоростей резания  
 Fig. 7. Comparison of cutting speeds

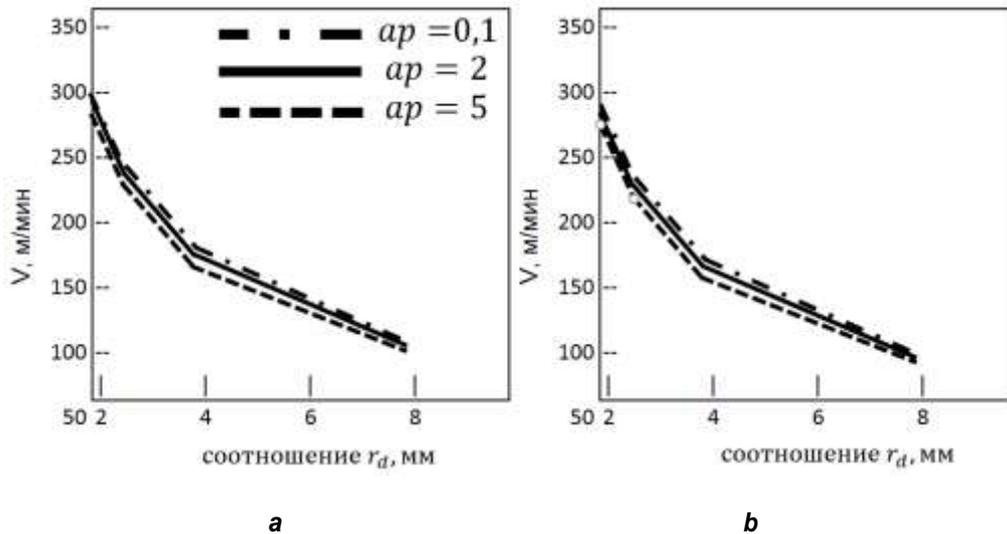


Рис. 8. Изменение максимальной (а) и средней (б) скоростей резания в зависимости от радиуса инструмента и заготовки ( $a_p$  – глубина фрезерования, мм)  
Fig. 8. Variation of maximum (a) and average (b) cutting speed variation depending on the tool and workpiece radii ( $a_p$  – milling depth, mm)

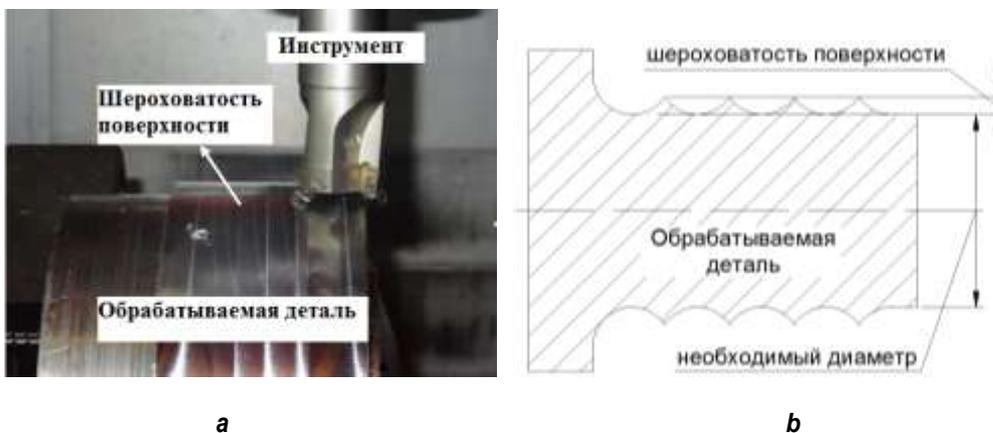


Рис. 9. Получение шероховатости поверхности: а – экспериментальное; б – схематическое  
Fig. 9. Experimental (a) and schematic (b) obtaining of surface roughness

во время эксперимента, тогда как схематическое представление формирования шероховатости поверхности дано на рис. 9 б.

Как указывалось выше, высокая шероховатость возникает из-за высокого значения  $a_e$ , также зависит от значения эксцентриситета [26].

**Отклонения формы.** Токарно-фрезерная операция (как ортогональная, так и тангенциальная) не дает идеального круга. Поскольку в токарном фрезеровании инструмент и обрабатываемая деталь вращаются одновременно, результирующее поперечное сечение обрабатываемой детали представляет собой многоугольник,

как показано на рис. 10.

Соотношение скоростей вращения инструмента и заготовки и глубина резания являются наиболее значимыми факторами, влияющими на отклонения круглости.

На рис. 11 показано влияние глубины резания и отношения скоростей  $r_n$  на круглость. Как хорошо видно, круговая зависимость сильно зависит от отношения скоростей, при котором эффект глубины резания невелик. Поперечное сечение готового изделия сходится к идеальному кругу при уменьшении отношения скоростей, т.е. инструмент вращается с гораздо большей скоростью.

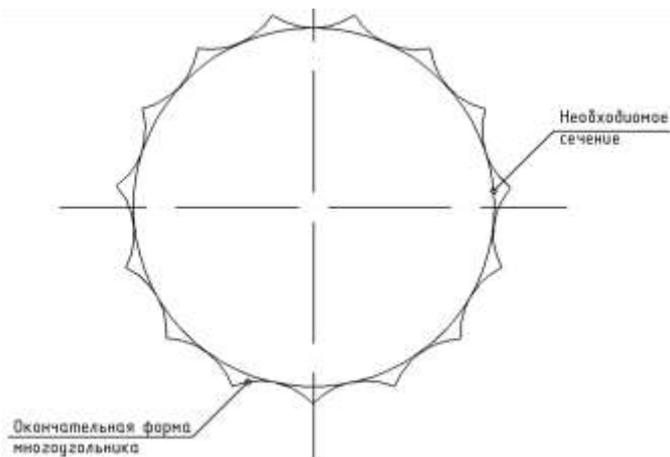


Рис. 10. Поперечное сечение заготовки, получаемой при фрезерной обработке  
Fig. 10. Cross section of the workpiece obtained by milling

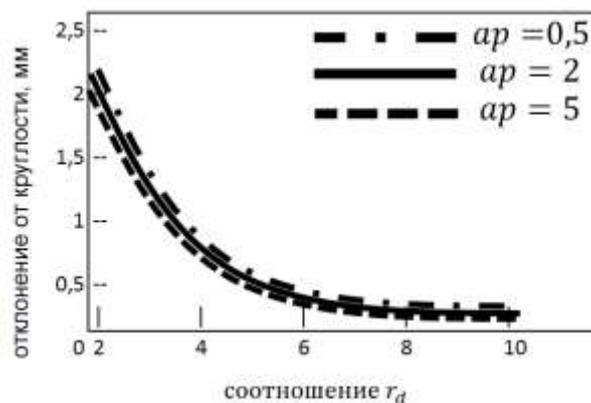


Рис. 11. Степень округлости фрезерования по очереди относительно глубины резания и  $r_n$   
Fig. 11. Degree of milling circularity vs cutting depth and  $r_n$

Эта перспективная технология становится альтернативой классической токарной обработке благодаря ее преимуществам, таким как более высокая производительность и более низкие температуры резания, которые обеспечивают более длительный срок службы инструмента. Прерывистые характеристики токарного фрезерования помогают поддерживать более низкие температуры резания и делают возможными высокие скорости резания.

В связи с вышесказанным, рассматриваемая технология рекомендуется к применению в следующих случаях:

1) обработка эксцентриковых поверхностей или в других ситуациях, когда обработка периферией фрезы не представляется возможным;

2) на цилиндрической поверхности имеются отверстия, канавки или еще какие-

то элементы, создающие прерывистое резание, и которые портят шероховатость поверхности при точении резцом, резец работает на удар;

3) при образовании сливной стружки, которая наматывается на резец;

4) при обработке большой заготовки, если станок не может обеспечить нужную скорость вращения.

Точение фрезерованием обеспечивает следующие преимущества:

1) возможность обработки сложных деталей за один установ с одновременным расширением возможности станков (токарно-фрезерных, фрезерных с поворотной осью, а также многих других), увеличение номенклатуры выпускаемых деталей, повышение экономической эффективности производства;

2) уменьшение вылета инструмента;



- 3) низкий крутящий момент резания за счет небольшого диаметра инструмента;
- 4) моделирование температуры резания, как при обработке фрезерованием;
- 5) возможность профильной обработки.

Однако точение фрезерованием имеет ряд недостатков:

- 1) невозможность обработки отверстий;
- 2) увеличение скорости резания и значений  $a_e$  повышают температуру резания;
- 3) зависимость качества поверхности от соотношения скоростей вращения заготовки и инструмента (если отношение скорости вращения заготовки к инструменту уменьшается, т.е. инструмент вращается быстрее, поперечное сечение заготовки приближается к идеальной окружности);
- 4) сложность моделирования динамики резания;
- 5) ухудшение шероховатости поверхности при повышении глубины резания  $a_e$  (при ортогональной токарной обработке).

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были рассмотрены два метода точения фрезерованием: ортогональное и тангенциальное. Данные методы являются малоизученными и теоретические расчеты, представленные указанными выше учеными, проведены для конструкционных сталей. В целом вопросы эффективного применения точения фрезерованием требуют дополнительного изучения в зависимости от конкретных задач. Для внедрения данной технологии в инструментальном производстве требуется дополнительное практическое изучение.

Если скорость резания в классическом точении определяется вращением заготовки, то при точении фрезерованием она является результирующей скоростей резания фрезы и заготовки. Если техническая характеристика привода главного движения станка не позволяет обеспечить нужную частоту вращения заготовки, то и скорость резания не достигнет оптималь-

ных значений. Следовательно, трудно ожидать эффективного выполнения токарной операции. Внедряя в производство точение фрезерованием, можно значительно повысить производительность резания.

Фрезы со сменными пластинами являются эффективными инструментами для точения фрезерованием. Однако следует заметить, что для получения ожидаемого результата необходимо не только выбрать оптимальную режущую геометрию, но и правильно определить положение фрезы относительно заготовки – таким образом снижаются погрешности формы и достигается необходимая шероховатость поверхности обработки.

На силы резания влияют многие параметры. Одним из важнейших является соотношение скоростей резания. Усилие резания уменьшается с увеличением скорости. Изменение силы резания в зависимости от соотношения диаметров также необходимо продолжать исследовать. Максимальная сила при тангенциальном фрезеровании остается постоянной с соотношением диаметров. С другой стороны, при фрезерной обработке в ортогональном направлении максимальные силы уменьшаются с соотношением диаметров. Дополнительные средние абсолютные силы при тангенциальной фрезерной обработке остаются постоянными с отношением диаметров, тогда как при ортогональном фрезеровании они уменьшаются.

Скорость резания при ортогональном фрезеровании изменяется в зависимости от угла погружения, поскольку окружные скорости инструмента и заготовки находятся в одной плоскости. При фрезерной обработке в ортогональном направлении имеет значение, вращается ли заготовка по часовой стрелке или против часовой стрелки. Если она вращается по часовой стрелке, скорость резания будет минимальной за один оборот инструмента и наоборот. С другой стороны, при тангенциальном фрезеровании окружные скорости находятся в перпендикулярных плоскостях, что приводит к постоянной скорости резания (для не спиральных инструментов).

**Библиографический список**

1. Гиршов В.Л., Тополянский П.А. Металлорежущий инструмент из порошковой стали с дисперсной структурой и алмазоподобным нанопокрытием // *Металлообработка*. 2009. № 1. С. 43–49.
2. Савилов А.В., Никулин Д.С., Николаева Е.П., Родыгина А.Е. Современное состояние производства высокопроизводительного режущего инструмента из порошковой быстрорежущей стали и твердых сплавов // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2013. № 6. С. 26–33.
3. ASP@2012 is the best in class for high toughness up to 58 HRC in cold-, warm- and hot applications // *Erasteel* [Электронный ресурс]. URL: <https://www.erasteel.com/> (02.02.2020).
4. Turbine and Engine Parts (Aerosp) // *Böhler* [Электронный ресурс]. URL: [http://www.boehler.de/en/\(05.02.2020\)](http://www.boehler.de/en/(05.02.2020)).
5. От достигнутых целей к новым горизонтам // *Полема* [Электронный ресурс]. URL: <http://www.polema.net> (10.02.2020).
6. Particle Size Analysis Report // *Инсталь* [Электронный ресурс]. URL: <https://instzinc.ru/about/> (02.02.2020).
7. Серков А.С., Бородовицин А.С., Гречухин Н.А. Проблемы ротационной обработки точения металла // *Научное сообщество студентов. Междисциплинарные исследования: электрон. сб. ст. по матер. XIX студ. Междунар. заоч. науч.-практ. конф.* 2017. № 8. С. 128–131. [Электронный ресурс]. URL: [https://sibac.info/archive/meghdis/8\(19\).pdf](https://sibac.info/archive/meghdis/8(19).pdf) (02.02.2020).
8. MAS-Lösungen // *MAS tools & engineering* [Электронный ресурс]. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=mJ0ggQ2MqmQ> (15.02.2020).
9. Schulz H., Spur G. High Speed Turn-milling – A New Precision Manufacturing Technology for the Machining of Rotationally Symmetrical Workpieces // *CIRP Annals*. 1990. Vol. 39. Issue 1. P. 107–109. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61013-0](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61013-0)
10. Choudhury S.K., Bajpai J.B. Investigation in orthogonal turn-milling towards better surface finish // *Journal of Materials Processing Technology*. 2005. Vol. 170. Issue 3. P. 487–493. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.12.010>
11. Zhu Lida, Li Haonan, Wang Wansan. Research on rotary surface topography by orthogonal turn-milling // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. Vol. 69. P. 2279–2292. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5202-8>
12. Crichigno Filho J.M. Prediction of cutting forces in mill turning through process simulation using a five-axis machining center // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2012. Vol. 58. Issue 6. P. 71–80. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3391-6>
13. Karagüzel U., Uysal E., Budak E., Bakkal M. Analytical modeling of turn-milling process geometry, kinematics and mechanics // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2015. Vol. 91. P. 24–33. <https://doi.org/10.1016/j.jmachtools.2014.11.014>
14. Qiu Wenwang, Liu Qiang, Ding Ji, Yuan Songmei. Cutting force prediction in orthogonal turn-milling by directly using engagement boundaries // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 86. P. 963–975. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8173-0>
15. Rong Yan, Xiaowei Tang, Peng Fangyu, Yong Wang, Feng Qiu. The effect of variable depth and thickness on milling stability for orthogonal turn-milling // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 82. P. 765–777. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7418-2>
16. Abukhshim N.A., Mativenga P.T., Sheikh M.A. Heat generation and temperature prediction in metal cutting: A review and implications for high speed machining // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2006. Vol. 46. Issue 7-8. P. 782–800. <https://doi.org/10.1016/j.jmachtools.2005.07.024>
17. Stephenson D.A., Ali A. Tool Temperatures in Interrupted Metal Cutting // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 1992. Vol. 114. Issue 2. P. 127–136. <https://doi.org/10.1115/1.2899765>
18. Karaguzel U., Budak E., Bakkal M. Cutting Temperature and Tool Wear in Turn-Milling // *4th International Conference on Virtual Machining Process Technology*. 2015. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.researchgate.net/publication/282665404\\_Cutting\\_Temperature\\_and\\_Tool\\_Wear\\_in\\_Turn-Milling](https://www.researchgate.net/publication/282665404_Cutting_Temperature_and_Tool_Wear_in_Turn-Milling) (02.02.2020).
19. Peng Fangyu, Liu Yizhi, Lin Sen, Yan Rong, Yang Sheng, Li Bin. An Investigation of Workpiece Temperature in Orthogonal Turn-Milling Compound Machining // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2015. Vol. 137. Issue 1. P. 011014. [Электронный ресурс]. URL: <https://asmedigitalcollection.asme.org/manufacturingscience/article-abstract/137/1/011014/375245/An-Investigation-of-Workpiece-Temperature-in?redirectedFrom=fulltext> (15.02.2020). <https://doi.org/10.1115/1.4028234>
20. Savas V., Ozay C. Analysis of the surface roughness of tangential turn-milling for machining with end milling cutter // *Journal of Materials Processing Technology*. 2007. Vol. 186. Issue 1-3. P. 279–283. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.09.040>
21. Neagu C., Gheorghe M., Dumitrescu A. Fundamentals on face milling processing of straight shafts // *Journal of Materials Processing Technology*. 2005. Vol. 166. Issue 3. P. 337–344. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.08.006>
22. Crichigno Filho J.M. Prediction of cutting forces in mill turning through process simulation using a five-axis machining center // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2012. Vol. 58. P. 71–80. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3391-6>
23. Jiang Zenghui, Liu Xin, Deng Xiaoye. Modeling and Simulation on Surface Texture of Workpiece Machined by Tangential Turn-milling Based on Matlab // *2nd International Conference on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce*. 2011. [Электронный ресурс]. URL:



<https://ieeexplore.ieee.org/document/6009922>  
(05.02.2020).

<https://doi.org/10.1109/AIMSEC.2011.6009922>

24. Karaguzel U., Bakkal M., Budak E. Mechanical and Thermal Modeling of Orthogonal Turn-milling Operation // *Procedia CIRP*. 2017. Vol. 58. P. 287–292. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.191>

25. Karaguzel U., Bakkal M., Budak E. Process Model-

ing of Turn-Milling Using Analytical Approach // *Procedia CIRP*. 2012. Vol. 4. P. 131–139. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.10.024>

26. Karaguzel U., Uysal E., Budak E., Bakkal M. Effects of tool axis offset in turn-milling process // *Journal of Materials Processing Technology*. 2016. Vol. 231. P. 239–247.

<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.12.020>

## References

1. Girshov VL, Topolyansky PA. Metal-Cutting Tool of Powdered Steel with Disperse Structure and Diamondlike Nanocoating. *Metalloobrabotka*. 2009;1:43–49. (In Russ.)

2. Savilov AV, Nikulin DS, Nikolaeva E.P, Rodygina AE. Current State of Manufacturing High Performance Cutting Tools from Powdered Metal High-Speed Steels and Hard Alloys. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2013;6:26–33 (In Russ.)

3. ASP@2012 is the Best in Class for High Toughness up to 58 HRC in Cold-, Warm- and Hot Applications. *Erasteel*. Available from: <https://www.erasteel.com/> [Accessed 2nd February 2020].

4. Turbine and Engine Parts (Aerosp). *Böhler*. Available from: <http://www.boehler.de/en/> [Accessed 5th February 2020].

5. From Goals Achieved to New Horizons. *Polema*. Available from: <http://www.polema.net> [Accessed 10th February 2020] (In Russ.)

6. Particle Size Analysis Report. *Instal'*. Available from: <https://instzinc.ru/about/> [Accessed 2nd February 2020]. (In Russ.)

7. Serkov AS, Borodovicin AS, Grechuhin NA. Issues of rotational processing of metal turning. *Nauchnoe soobshchestvo studentov. Mezhdisciplinarnye issledovaniya: elektronnyj sbornik statej po materialam XIX studencheskoj mezhdunarodnoj zaochnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* = Scientific Community of Students. Interdisciplinary Research: electronic collection of articles based on the materials of XIX Student International Correspondence Scientific and Practical Conference. 2017;8:128–131. Available from: [https://sibac.info/archive/meghdis/8\(19\).pdf](https://sibac.info/archive/meghdis/8(19).pdf) [Accessed 2nd February 2020]. (In Russ.)

8. MAS-Lösungen. *MAS Tools & Engineering*. Available from: <https://www.youtube.com/watch?v=mJ0ggQ2MqmQ> [Accessed 15th February 2020].

9. Schulz H, Spur G. High Speed Turn-milling – A New Precision Manufacturing Technology for the Machining of Rotationally Symmetrical Workpieces. *CIRP Annals*. 1990;39(1):107–109. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61013-0](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61013-0)

10. Choudhury SK, Bajpai JB. Investigation in Orthogonal Turn-milling towards Better Surface Finish. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005;170(3):487–493. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.12.010>

11. Zhu Lida, Li Haonan, Wang Wansan. Research on Rotary Surface Topography by Orthogonal Turn-milling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013;69:2279–2292.

<https://doi.org/10.1007/s00170-013-5202-8>

12. Crichigno Filho JM. Prediction of Cutting Forces in Mill Turning through Process Simulation using a Five-Axis Machining Center. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2012;58(6):71–80. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3391-6>

13. Karaguzel U, Uysal E, Budak E, Bakkal M. Analytical Modeling of Turn-milling Process Geometry, Kinematics and Mechanics. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2015;91:24–33. <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2014.11.014>

14. Qiu Wenwang, Liu Qiang, Ding Ji, Yuan Songmei. Cutting Force Prediction in Orthogonal Turn-milling by Directly using Engagement Boundaries. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016;86:963–975. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8173-0>

15. Rong Yan, Xiaowei Tang, Peng Fangyu, Yong Wang, Feng Qiu. The Effect of Variable Depth and Thickness on Milling Stability for Orthogonal Turn-milling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016;82:765–777.

<https://doi.org/10.1007/s00170-015-7418-2>

16. Abukhshim NA, Mativenga PT, Sheikh MA. Heat Generation and Temperature Prediction in Metal Cutting: A Review and Implications for High Speed Machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2006;46(7-8):782–800. <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2005.07.024>

17. Stephenson DA, Ali A. Tool Temperatures in Interrupted Metal Cutting. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 1992;114(2):127–136. <https://doi.org/10.1115/1.2899765>

18. Karaguzel U, Budak E, Bakkal M. Cutting Temperature and Tool Wear in Turn-milling. In: *4th International Conference on Virtual Machining Process Technology*. 2015. Available from: [https://www.researchgate.net/publication/282665404\\_Cutting\\_Temperature\\_and\\_Tool\\_Wear\\_in\\_Turn-milling](https://www.researchgate.net/publication/282665404_Cutting_Temperature_and_Tool_Wear_in_Turn-milling)

19. Peng Fangyu, Liu Yizhi, Lin Sen, Yan Rong, Yang Sheng, Li Bin. An Investigation of Workpiece Temperature in Orthogonal Turn-milling Compound Machining. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2015;137(1):011014. Available from:

<https://asmedigitalcollection.asme.org/manufacturingscience/article-abstract/137/1/011014/375245/An-Investigation-of-Workpiece-Temperature-in?redirectedFrom=fulltext> [Accessed 15th February 2020]. <https://doi.org/10.1115/1.4028234>

20. Savas V, Ozay C. Analysis of the Surface Roughness of Tangential Turn-milling for Machining with End Milling Cutter. *Journal of Materials Processing Technol-*

ogy. 2007;186(1-3):279–283.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.09.040>  
21. Neagu C, Gheorghe M, Dumitrescu A. Fundamentals on Face Milling Processing of Straight Shafts. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005;166(3):337–344.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.08.006>  
22. Crichigno Filho JM. Prediction of Cutting Forces in Mill Turning through Process Simulation using a Five-Axis Machining Center. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2012;58:71–80.  
<https://doi.org/10.1007/s00170-011-3391-6>  
23. Jiang Zenghui, Liu Xin, Deng Xiaoye. Modeling and Simulation on Surface Texture of Workpiece Machined by Tangential Turn-milling based on Matlab. In: *2nd International Conference on Artificial Intelligence, Management Science and*

*Electronic Commerce*. 2011. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6009922> [Accessed 5th February 2020].  
<https://doi.org/10.1109/AIMSEC.2011.6009922>  
24. Karaguzel U, Bakkal M, Budak E. Mechanical and Thermal Modeling of Orthogonal Turn-milling Operation. *Procedia CIRP*. 2017;58:287–292.  
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.191>  
25. Karaguzel U, Bakkal M, Budak E. Process Modeling of Turn-milling Using Analytical Approach. *Procedia CIRP*. 2012;4:131–139.  
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.10.024>  
26. Karaguzel U, Uysal E, Budak E, Bakkal M. Effects of Tool Axis Offset in Turn-milling Process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2016;231:239–247.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.12.020>

#### **Критерии авторства**

Матлыгин Г.В., Савилов А.В., Зарак Т.В. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

#### **Authorship criteria**

Matlygin G.V., Savilov A.V., Zarak T.V. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### **Conflict of interests**

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Матлыгин Георгий Валерьевич**,  
аспирант,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;  
e-mail: gmatlygin@mail.ru

**Georgy V. Matlygin**,  
Postgraduate Student,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;  
e-mail: gmatlygin@mail.ru

**Савилов Андрей Владиславович**,  
кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры технологии и оборудования  
машиностроительных производств,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;  
✉ e-mail: saw@ex.istu.edu

**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;  
✉ e-mail: saw@ex.istu.edu

**Зарак Татьяна Владимировна**,  
кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры технологии и оборудования  
машиностроительных производств,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;  
e-mail: tv\_zar@ex.istu.edu

**Tatiana V. Zarak**,  
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;  
e-mail: tv\_zar@ex.istu.edu



Оригинальная статья / Original article  
УДК 66.041; 62-65; 62-97  
DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-514-526>

## Оценка эффективности по коэффициентам полезного действия энергетических блоков новой электрической модульно-спусковой печи

© А.И. Нижегородов

*Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия*

**Резюме:** Цель – изучение и экспериментальное подтверждение возможности повышения коэффициента полезного действия электрической модульно-спусковой печи для снижения удельной энергоемкости обжига вермикулитовых концентратов за счет получения наиболее рациональной (с точки зрения коэффициента полезного действия) конструктивной структуры печи. Методы исследования основываются на теоретическом анализе энергетических характеристик рабочего процесса печного агрегата – коэффициенте полезного действия и удельной энергоемкости, законах физики температурного излучения и теплотехники, а также на анализе экспериментальных данных, полученных при испытаниях опытной модели печи в лабораторных условиях при температуре 730...780°C и продолжительности обжига 2,48...3,06 с. За счет изменения конструктивной структуры шестимодульной печи достигнуто снижение удельной энергоемкости обжига вермикулита, согласно расчетам, до 188,9 мДж/м<sup>3</sup>, а по экспериментальным данным – до 197,0 мДж/м<sup>3</sup>. Снижение экстремального значения удельной энергоемкости модернизированной печи с минимальным значением стандартной аналогичной печи составило 17,9%. Установлено, что эффект снижения энергоемкости обусловлен структурной трансформацией печного агрегата путем переноса нижнего модуля с минимально низким коэффициентом полезного действия и установкой его в параллельное сопряжение с верхним модулем, что приводит к существенному увеличению его коэффициента полезного действия и печи в целом. Кроме того, в рассматриваемой печи применены более эффективные подвесные нагревательные системы. Согласно расчетам и проведенным экспериментальным исследованиям, ожидаемый совокупный эффект, достигаемый за счет конструктивной трансформации печного агрегата и применения более энергоэффективных подвесных нагревательных систем в энергетических блоках печи, по снижению удельной энергоемкости обжига вермикулитовых концентратов составил в среднем для их различных видов и размерных групп до 147,3 мДж/м<sup>3</sup>.

**Ключевые слова:** электрическая модульно-спусковая печь, измененная конструктивная структура, шестимодульная печь, подвесная нагревательная система, удельная энергоемкость обжига

**Информация о статье:** Дата поступления 16 марта 2020 г.; дата принятия к печати 22 мая 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 июня 2020 г.

**Для цитирования:** Нижегородов А.И. Оценка эффективности по коэффициентам полезного действия энергетических блоков новой электрической модульно-спусковой печи. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 3. С. 514–526. <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-514-526>

## Efficiency evaluation of a new electric modular descending furnace according to the performance factor for energy blocks

Anatoliy I. Nizhegorodov

*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

**Abstract:** The present work is focused at the study and experimental confirmation of the possibility for increasing the efficiency of an electric modular descending furnace in terms of reducing the specific energy consumption of roasting vermiculite concentrates by obtaining the most rational structural furnace design. Research methods were based on a theoretical analysis of the working process energy characteristics for the furnace unit, such as performance factor and specific energy consumption, the laws of thermal radiation physics and thermal engineering, as well as on the analysis of experimental data obtained during testing of the experimental furnace model under laboratory conditions at a temperature of 730–780°C and an annealing time of 2.48–3.06 s. Due to changes in the structure of the six-module furnace, the specific vermiculite roasting energy consumption was reduced to 188.9 and 197.0 mJ/m<sup>3</sup> in accordance to calculated and experimental data, respectively. As compared to the minimum value for a standard similar furnace, the decrease in

the specific energy consumption for the modernised furnace amounted to 17.9%. The effect of reducing energy consumption was shown to be due to the structural transformation of the furnace unit by transferring the lower module with a lowest performance factor and installing it in parallel with the upper module, leading to a significant increase in the overall efficiency of the furnace. Additional efficiencies were obtained by applying suspended heating systems to the furnace under consideration. According to calculations and experimental studies, due to the furnace unit structural transformation and the use of more energy-efficient suspended heating systems in the furnace energy blocks, the expected combined effect of reducing the specific energy consumption in roasting vermiculite concentrates averaged up to 147.3 mJ/m<sup>3</sup> for various types and size groups of furnaces.

**Keywords:** electric modular descending furnace, structural furnace design, six-module furnace, suspended heating system, specific energy consumption of roasting

**Information about the article:** Received March 16, 2020; accepted for publication May 22, 2020; available online June 30, 2020.

**For citation:** Nizhegorodov AI. Efficiency evaluation of a new electric modular descending furnace according to the performance factor for energy blocks. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(3):514–526. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-514-526>

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Вспученный вермикулит, использование которого началось уже более ста лет назад [1], в настоящее время, несмотря на появление многих синтезированных материалов, остается востребованным во многих отраслях производства, поэтому его исследование (и поиск новых форм применения) продолжается как за рубежом [2–11], так и в России [1, 12–14]. Одновременно идет работа по совершенствованию технологического оборудования и, в частности, печей для его термической обработки [15–19], и это доказывает актуальность рассматриваемых ниже вопросов.

Дообжиговая подготовка, высокотемпературная обработка вермикулитовых концентратов в электрических модульно-спусковых печах и дальнейшая переработка вспученного материала (фракционирование, дообогащение и т. п.) широко применяются в технологии для придания вермикулиту новых полезных свойств [15, 17, 18]. Кроме того, эти печи способны работать не только на концентратах, но и конгломератах вермикулита, например, песочных, сунгулитовых и др. [12, 13, 19, 20]. За 2–3 с исходное вермикулитосодержащее сырье, двигаясь в тепловом поле нагревательных систем модулей обжига спусковой печи, изменяет структуру вермикулитовых плоских частиц до объемных зерен со щелевидным строением. После такой трансформации оно становится отличным теп-

лоизоляционным материалом, негорючим, химически и биологически инертным, а, например, сунгулит приобретает свойства реагента для иммобилизации тяжелых металлов из серпентиносодержащих вскрышных пород [13].

Первая трехмодульная электропечь, появившаяся уже семнадцать лет назад, обеспечивала обжиг вермикулита при удельной энергоемкости процесса 245–252 мДж/м<sup>3</sup> и уже тогда превосходила огневые печи, работавшие на углеводородном топливе [1]. Их шестимодульные модификации за счет увеличения продолжительности обжига при меньшем потреблении электроэнергии и той же производительности снизили энергоемкость процесса до 230–235 мДж/м<sup>3</sup>. В работе [15] была доказана возможность повышения энергоэффективности модульно-спусковых печей за счет новой подвесной нагревательной системы, позволившей дополнительно понизить потребляемую электрическую мощность на 22%, а удельную энергоемкость при обжиге вермикулита довести до 172 мДж/м<sup>3</sup>.

Анализ распределения КПД таких печей по модулям показал, что энергоэффективность верхнего модуля (принимающего вермикулитовый концентрат из дозатора) намного выше, чем нижнего (выводящего вспученный продукт). Это и привело к идее структурной трансформации конструкции электрических модульно-спусковых печей.

В работе, на основе анализа рабо-



чего процесса измененной шестимодульной печи, демонстрируется возможность дополнительного снижения энергоемкости обжига вермикулитовых концентратов и других сыпучих материалов.

## 2. ИЗМЕНЕНИЕ КОНСТРУКТИВНОЙ СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОДУЛЬНО-СПУСКОВОЙ ПЕЧИ

На рис. 1 показана исходная трехмодульная электропечь для обжига вермикулита: опытное изделие (а) и ее принципиальная схема (b).

Она содержит корпус 1, дозатор сырья 6, включающий бункер и рифленный барабан со спусковым лотком 5. Внутри корпуса размещены модули обжига 2 – основные энергетические блоки печи, главными элементами которых являются огнеупорные основания, накрытые термокрышками 10, крепежные головки с серьгами термокрышек, удерживающие нагреватели 11,

образующие подвесные нагревательные системы из проволочного нихрома [15]. Зоны сопряжения модулей 2 использовались для взятия проб вспучивающегося вермикулита при выполнении экспериментов.

Модули обжига работают как гравитационные спуски. Из дозатора 6, снабженного приводом 8 с ременной передачей 9, на верхний модуль подается вермикулитовый концентрат или другой сыпучий материал, который пересыпается с одного модуля на другой, где в тепловом поле их нагревательных систем из проволочных нихромовых нагревателей 11 подвергается высокотемпературному обжигу.

Рассмотрим суть процесса дегидратации – высвобождения химически связанной в минерале воды при термоударе, который создает давление водяных паров в межслоевых микространствах пластинок вермикулитовой слюды и производит механическую работу вспучивания зерен [16].



Рис. 1. Электрическая печь: 1 – корпус, 2 – модуль, 3 – дверца, 4 – пылеуловитель, 5 – лоток, 6 – барабанный дозатор, 7 – тиристорный регулятор, 8 – привод дозатора, 9 – ременная передача, 10 – термокрышка модуля (на рис. 1 а термокрышки сняты), 11 – проволочный электрический нагреватель (рис. 1 б)

Fig. 1. Electric furnace: 1 – body, 2 – unit, 3 – door, 4 – dust collector, 5 – tray, 6 – drum batcher, 7 – thyristor controller, 8 – batcher drive, 9 – belt drive, 10 – unit thermal cover (in Fig. 1 a – thermal covers are removed), 11 – wire electric heater (Fig. 1 b)

На рис. 2 приведен график зависимости относительной насыпной плотности вермикулита  $\delta$ , определяемой отношением  $\rho_n / \rho_k$  ( $\rho_n$  – начальная и  $\rho_k$  – конечная насыпные плотности вермикулита,  $\text{кг/м}^3$ ) от относительного времени обжига, равного отношению времени обжига частиц разных размеров к самому себе. График построен по результатам многократных экспериментов с различными видами вермикулитовых концентратов на трех- и шестимодульных печах и представляет собой универсальную кривую дегидратации концентратов всех размерных групп, для чего и введены относительные плотность и время. Но если относительное время измеряется точно от нуля до единицы, то относительная плотность примерно от шести до единицы (разброс  $\delta$  для разных по крупности концентратов не превышает 4–5% [16]).

Процессы выхода химически связанной воды и вспучивания являются следствием поглощения вермикулитом теплового излучения нагревателей и наиболее интенсивны на первом модуле, т.к. относительная плотность уменьшается здесь на 3,22 ед., на втором модуле – на 1,04 ед., а на шестом – на 0,08, что в сорок раз меньше, чем на первом (изменение относительных плотностей показано на рис. 2). Оче-

видно, что эффективность модулей сильно отличается, хотя они потребляют одинаковую мощность.

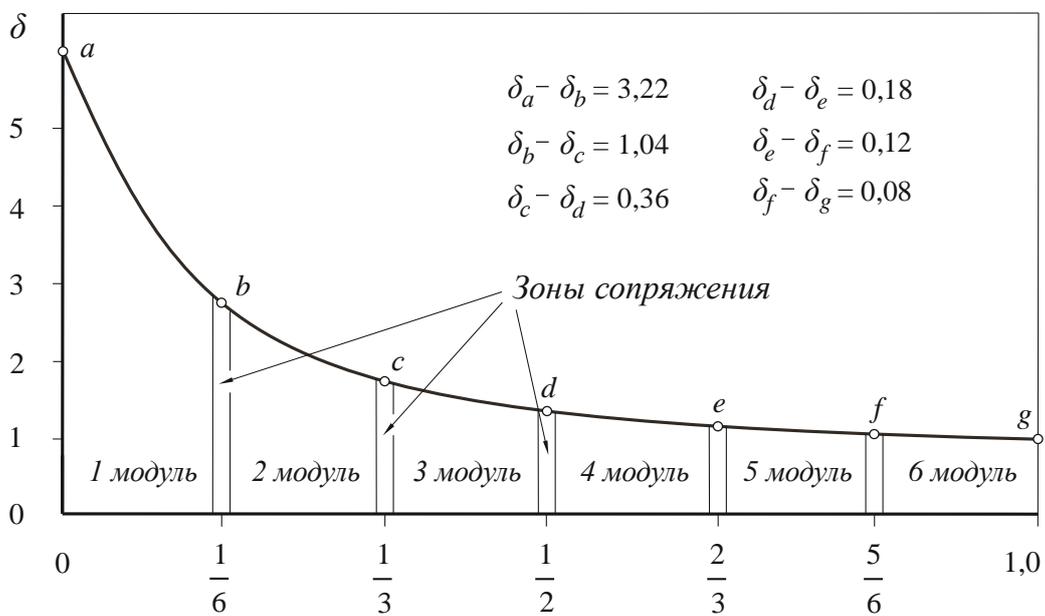
Ниже приведена оценка вклада каждого модуля в процесс механической работы вспучивания вермикулита. Для этого использовались коэффициенты эффективности энергоусвоения  $k_{э}$ , определявшиеся по формуле:

$$k_{эi} = \delta_i / (\delta_{вх} - \delta_{вых}), \quad (1)$$

где  $\delta_i$  – изменение относительной плотности на  $i$ -м модуле печи,  $\delta_{вх}$  и  $\delta_{вых}$  – относительные плотности на входе и выходе печи, соответственно, определенные экспериментальным путем [16].

Сумма коэффициентов  $k_{эi}$  равна единице ( $0,644 + 0,208 + 0,072 + 0,036 + 0,024 + 0,016 = 1,0$ ), поэтому сумма произведений КПД электрической модульно-спусковой печи  $\eta_n$  на соответствующие коэффициенты эффективности энергоусвоения дает полный КПД печного агрегата. Его значение для трех- и шестимодульных печей рассчитывается по одной формуле [16]:

$$\eta_n = \frac{\theta \cdot \Pi_G \eta_{эм}}{3IU}, \quad (2)$$



**Рис. 2. Универсальная кривая изменения плотности при обжиге вермикулита  
 Fig. 2. Universal density curve when firing vermiculite**



где  $\theta$  – удельная энергия, поглощаемая термообрабатываемой сыпучей средой (для вермикулита примерно равно 1209,1 кДж/кг [16]);  $P_G$  – массовая производительность печного агрегата, кг/с;  $\eta_{mm}$  – КПД процесса механической трансформации вермикулита;  $3IU$  – потребляемая электрическая мощность, Вт (в шестимодульных печах модули соединяются парами последовательно, поэтому в знаменателе 3, а не 6).

Коэффициент  $\eta_{mm}$ , определяемый отношением:

$$\eta_{mm} = \frac{E_{mm}}{\theta}, \quad (3)$$

где  $E_{mm}$  – механическая работа вспучивания, кДж/кг, равная 0,544, а полный КПД шестимодульного печного агрегата составляет 0,334 [15].

Располагая приведенными выше значениями  $k_{эi}$ , можно расписать распределение полного КПД печи по шести модулям:

$$\eta_n = k_{э1} \eta_n + k_{э2} \eta_n + k_{э3} \eta_n + k_{э4} \eta_n + k_{э5} \eta_n + k_{э6} \eta_n = 0,334.$$

В таблице приведены расчетные значения КПД модулей ( $k_{эi} \eta_n$ ) шестимодульной печи.

Отнесем значения КПД нижнего (шестого) модуля к верхнему (первому):  $0,0053 / 0,2151 = 0,0247$  или 2,47%. Очевидно, что нижний модуль энергетически самый неэффективный, и его следует переместить наверх, установив параллельно с первым верхним модулем шестимодульной печи, показанной на рис. 3.

Отношение КПД пятого модуля и

первого равно 0,0377, что составляет 3,8%. Далее приведем отношения КПД четвертого, третьего и второго модулей к первому, соответственно: 0,056 или 5,6%; 0,112 или 11,2%; 0,323 или 32,3%. Становится очевидным, что только второй и третий модули можно считать относительно эффективными, тогда как четвертый и пятый – малоэффективны. Тем не менее, как будет показано ниже, перенос шестого (самого нижнего) модуля существенно изменяет энергоэффективность печи в целом, хотя еще остается некоторый «ресурс» для дальнейшего совершенствования электрических модульно-спусковых печей за счет более эффективного использования четвертого и пятого модулей.

Рассмотрим устройство и работу измененной конструкции шестимодульного энерготехнологического агрегата, см. рис. 3.

Электропечь содержит раму 1, барабанный дозатор сырья, включающий бункер 2, барабаны 3 и симметричные спусковые лотки 4, по которым сыпучий материал скатывается на верхние, параллельно установленные электрические модули обжига 5, снабженные термокрышками 6. Длина нагревательных систем первого (левого) и второго (правого) модулей одинакова, как и их огнеупорные основания.

Частично вспучившийся материал на выходе из модулей 5 удвоенным потоком движется в тепловом поле подвесных нагревательных систем 7 третьего и последующих модулей 8, сопряженных между собой последовательно. Пересыпаясь с одного модуля на другой в зонах сопряжения 9, вермикулит удвоенным потоком, оставаясь частично недовспученным, поступает в так называемый «нулевой» не

### Коэффициенты модульных блоков шестимодульного печного агрегата

#### Coefficients of unit assembly of a six-unit furnace

Значение	Порядковый номер модуля					
	1	2	3	4	5	6
Коэффициент полезного действия <i>i</i> -го модуля шестимодульной печи	0,2151	0,0694	0,0241	0,0121	0,0081	0,0053

электрифицированный модуль 10. Он представляет собой хорошо термоизолированный ломаный щелевидный канал, по которому вермикулит дополнительно движется еще примерно 1,8–2,0 с в стесненных условиях, плотно прилегая зернами друг к другу. При этом мелкие и средние зерна, успевшие нагреться до температуры 520–530°C, и в которых процессы дегидратации и структурообразования уже завершились [15, 20], передают накопленную внутреннюю эксергию недовспученным крупным зернам не только через тепловое излучение, но и кондуктивным путем [17].

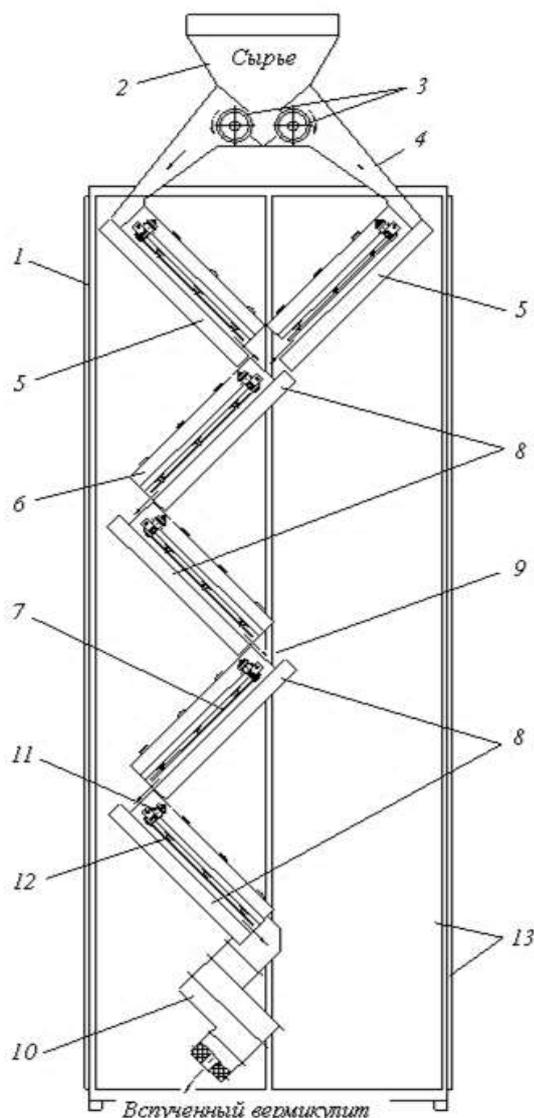


Рис. 3. Схема измененной шестимодульной печи

Fig. 3. Diagram of the modified six-unit furnace

В работе [18] теоретически обоснована и экспериментально доказана эффективность использования «нулевых» модулей для завершения дегидратации и механического вспучивания вместо электрических (нижних) в последовательной цепи их сопряжения с минимальными значениями коэффициентов эффективности энергоусвоения и КПД.

Подвесные нагревательные системы содержат также крепежные головки 11 и комплекты подвески круглых нихромовых нагревателей 12, а сама электропечь – дверцы 13, обеспечивающие электробезопасность печного агрегата.

### 3. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ИЗМЕНЕННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОДУЛЬНО-СПУСКОВОЙ ПЕЧИ

Мощность теплового излучения, поглощаемого движущимся вермикулитовым потоком  $Q_n$  [16], и удельная энергия теплопоглощения  $\theta$ , связаны выражением:

$$\theta \cdot P_G = Q_n, \quad (4)$$

где  $P_G$  – массовая производительность модульно-спусковой печи, кг/с.

$$P_G = m / t, \quad (5)$$

где  $m$  – суммарная масса всего вермикулитового концентрата, движущегося в тепловом поле модулей обжига печи, кг;  $t$  – время обжига, с.

После соответствующих преобразований выражение (2) с учетом формулы (3) и равенства  $Q_n = \Omega \cdot \varepsilon_n \sigma T_n^4 f_n$  [15] примет вид (здесь и далее рассматривается нагревательная система камерного типа с плоскими нагревателями, поставленными на ребро [15]):

$$\theta \cdot \frac{m}{t} = \Omega \cdot \varepsilon_n \sigma T_n^4 f_n, \quad (6)$$

где  $\Omega$  – комплексный параметр, учитывающий конструктивные и оптико-геомет-



рические характеристики рабочих камер модулей обжига и вермикулита: шага  $r$  и высоты нагревателей  $h$ , высоты рабочего пространства модулей  $\Delta u$ , степени черноты никрома  $\varepsilon_n$ , отражательной и поглощательной способностей стенок рабочих камер, соотношения среднего расстояния  $\lambda$  и условного диаметра зерен  $D$ , их оптических свойств и др. [15, 16],  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана.

Для шестимодульной печи, с измененной структурой (см. рис. 3), уравнения баланса мощностей на двух верхних модулях (4) и последующих четырех (5) будут иметь следующий вид:

$$\theta_1 \cdot \frac{m_1}{t_1} = \Omega_1 \varepsilon_n \sigma T_1^4 f_{n1}; \quad (7)$$

$$\theta_2 \cdot \frac{m_2}{t_2} = \Omega_2 \varepsilon_n \sigma T_2^4 4 f_{n2}, \quad (8)$$

где  $m_1$  – масса вспучиваемого вермикулита, одновременно находящегося в печи, кг;  $t_1$  – время движения вермикулита по модулям, с;  $\Omega_1$  – параметр, учитывающий оптико-геометрические свойства рабочего пространства верхних модулей и самого вермикулита;  $T_1$  – температура электронагревателей верхних модулей;  $f_{n1}$  – суммарная площадь нагревательных элементов верхних модульных блоков;  $m_2$  – масса вспучиваемого вермикулита на нижних модулях, кг;  $t_2$  – время движения по ним, с;  $\Omega_2$  – параметр, учитывающий оптико-геометрические свойства рабочего пространства нижних модулей и самого вермикулита;  $T_2$  – температура их электронагревателей;  $f_{n2}$  – суммарная площадь нагревательных элементов нижних модульных блоков.

В схеме, представленной на рис. 3, длины нагревательных систем и самих модулей равны. Кроме того, имеют место равенства:  $T_1 = T_2 = T$ .

С учетом сказанного запишем выражения (4) и (5) в виде:

$$\theta_1 = \frac{\Omega_1}{m_1} \varepsilon_n \sigma T^4 f_{n1} t_1, \quad (9)$$

$$\theta_2 = \frac{4 \cdot \Omega_2}{m_2} \varepsilon_n \sigma T^4 f_{n2} t_2, \quad (10)$$

а затем, суммируя (9) и (10), получим выражение удельной энергии теплопоглощения вермикулита для печи в целом:

$$\theta = 2 \cdot \theta_1 + \theta_2 = 2 \cdot \varepsilon_n \sigma T^4 f_n \times \left( \Omega_1 \frac{t_1}{m_1} + 2 \cdot \Omega_2 \frac{t_2}{m_2} \right), \quad (11)$$

где  $f_n$  – суммарная площадь поверхностей всех нагревательных элементов печи. При этом потребляемая электрическая мощность печи, выраженная через температуру нагревателей ( $K$ ), равна

$$\sigma T^4 f_n = N. \quad (12)$$

Решая уравнение (11) относительно температуры, получим:

$$T = \left\{ \theta \cdot \left[ 2 \cdot \varepsilon_n \sigma f_n \left( \Omega_1 \frac{t_1}{m_1} + 2 \cdot \Omega_2 \frac{t_2}{m_2} \right) \right]^{-1} \right\}^{\frac{1}{4}}. \quad (13)$$

Для верхних модулей справедливо соотношение  $\lambda \approx D$ . На последующих – потоки суммируются, а соотношение изменяется:  $\lambda \approx 0,5D$ . При этом массы вермикулита, одновременно находящегося на первом, втором и последующих модулях, будут равны:

$$m_1 = \pi DB (l + \zeta) / 24 (1 - \kappa_n);$$

$$m_2 = \pi DB (4l + 3\zeta) / 13,5 (1 - \kappa_n) \kappa_в,$$

где  $\kappa_n$  – коэффициент пористости ( $\sim 0,35$ );  $\kappa_в$  – коэффициент вспучивания ( $\sim 0,0085 \text{ м}^3/\text{кг}$ ).

При подстановке составленных выражений и формулы (12) в уравнение (13), получим

$$T = \pi DB \theta \cdot \left\{ \left[ 2 \cdot \varepsilon_n \sigma f_n \kappa_n (1 - \kappa_n) \times \left( \frac{24 \cdot \Omega_1 t_1}{l + \zeta} + \frac{27 \cdot \Omega_2 t_2}{4l + 3\zeta} \right) \right]^{-1} \right\}^{\frac{1}{4}} \quad (14)$$

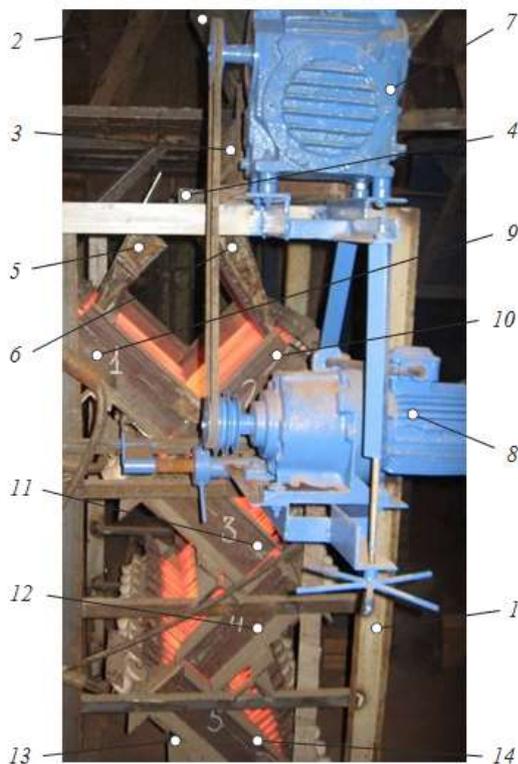


Рис. 4. Измененная шестимодульная опытная электропечь 1 - рама, 2 – бункер сырья, 3 – делитель потока сырья, 4 – пылеуловитель, 5 и 6 – лотки, 7 – редуктор дозатора, 8 - привод, 9 и 10 – два из шести параллельно сопряженных модуля, 11...14 – четыре из шести последовательно сопряженных модуля (термокрышки условно сняты)

Fig. 4. Modified pilot six-unit electric furnace 1 – frame, 2 – feed hopper, 3 – feed flow divider, 4 – dust collector, 5 and 6 – trays, 7 – batcher reducing gearbox, 8 – drive, 9 and 10 – two of six parallel units, 11 ... 14 – four of six sequentially interfaced units (thermal covers are conditionally removed)

Примем конструктивные размеры как у экспериментального печного агрегата (рис. 4), а именно:  $\zeta = 0,06$  м,  $B = 0,69$  м,  $r = 0,036$  м,  $l = 0,297$  м, сечение нагревателя  $1 \times 8$  мм, количество нагревателей  $n = 8$  шт, время обжига 2,395 с, среднюю скорость движения вермикулита по модулям  $v = 0,72$  м/с. Можно рассчитать время движения на верхних

модулях и последующих модулях, с:

$$t_1 = (l + \zeta) / v = 0,496;$$

$$t_2 = [3(l + \zeta) + l] / v = 1,9.$$

Комплексные параметры  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$  рассчитываются по весьма сложному алгоритму, приведенному в работе [16], связанному с определением мощности лучистых потоков в рабочем пространстве модулей обжига, вычислением соответствующих угловых коэффициентов этих потоков (метод сальдо-потоков, метод натянутых нитей [16]), а также коэффициентов поглощения и отражения ограничительных поверхностей и вермикулита в условных рабочих камерах модулей [15]. Поэтому приводим их значения для конструктивно-трансформированной печи с параметрами экспериментальной, показанной на рис. 4:  $\Omega_1 = 0,61$  и  $\Omega_2 = 0,66$ .

Теперь по формуле (14) можно построить зависимость времени обжига от температуры нагревателей с учетом постоянной Стефана-Больцмана ( $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>), расчетной площади всех нагревательных элементов  $f_n = 0,643$  м<sup>2</sup>, задавая ряд значений суммарной длины модулей печи, определяемой по формуле:  $l_{\Sigma} = 4(l + \zeta) + l$ .

На рис. 5 приведена указанная зависимость времени обжига вермикулита от температуры нагревателей.

Далее рассчитываем объемную производительность, м<sup>3</sup>/с:

$$\Pi_v = \frac{\pi BD}{(1 - \kappa_n)} \left( \frac{l + \zeta}{12} + \frac{4l + 3\zeta}{13,5} \right) \frac{1}{t}$$

и массовую  $\Pi_G$  по формуле (3). По графику на рис. 5 принимаем ряд значений  $t$ , соответствующих температурам в интервале 700...840°С, подставляем их в выражение:

$$\eta_n = \frac{\theta \cdot \frac{\pi DB \cdot [nl + (n-1)\zeta]}{24\kappa_n(1-\kappa_n)t} \eta_{sum}}{\sigma T_n^4 f_n},$$



полученное из формулы (1), и строим зависимость коэффициента полезного действия измененной шестимодульной печи в зависимости от температуры нагревателей, рис. 6.

Экстремум функции  $\eta_n = f(T)$  на рис. 6 проявляется при температуре  $780^\circ\text{C}$  (т. а), равен 0,449, и это максимальный КПД

измененной шестимодульной печи. Скорость нарастания температуры вермикулита в т. а, определяемая по формуле,  $^\circ\text{C}/\text{c}$ :

$$(T - 100^\circ\text{C}) / t,$$

( $100^\circ\text{C}$  – температура начальной тепловой подготовки вермикулитового концентрата перед обжигом), составляет  $-274^\circ\text{C}/\text{c}$ , см. рис. 5.

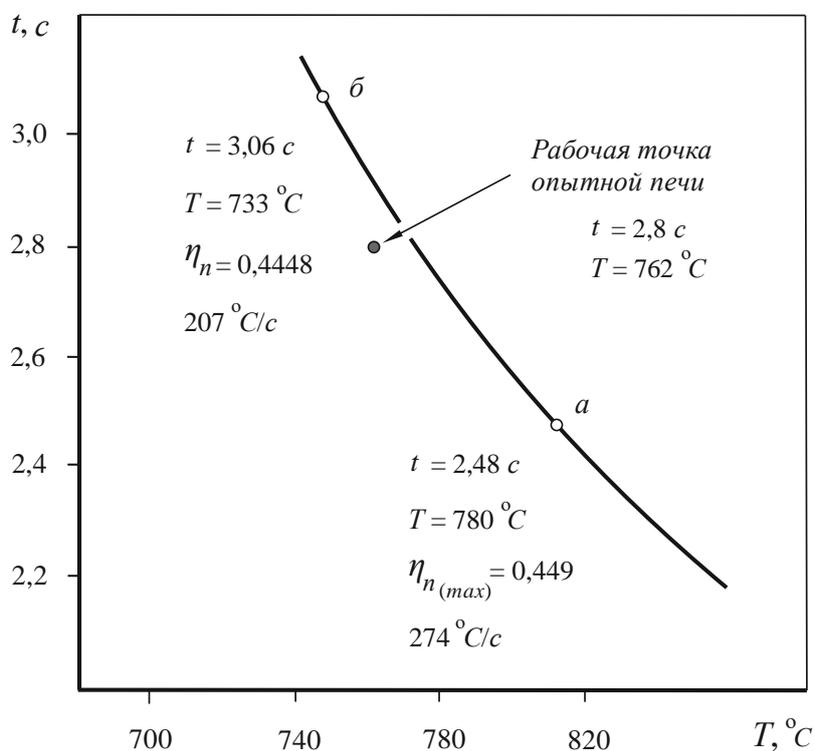


Рис. 5. Зависимость времени обжига от температуры нагревателей  
Fig. 5. Firing time vs temperature of heaters

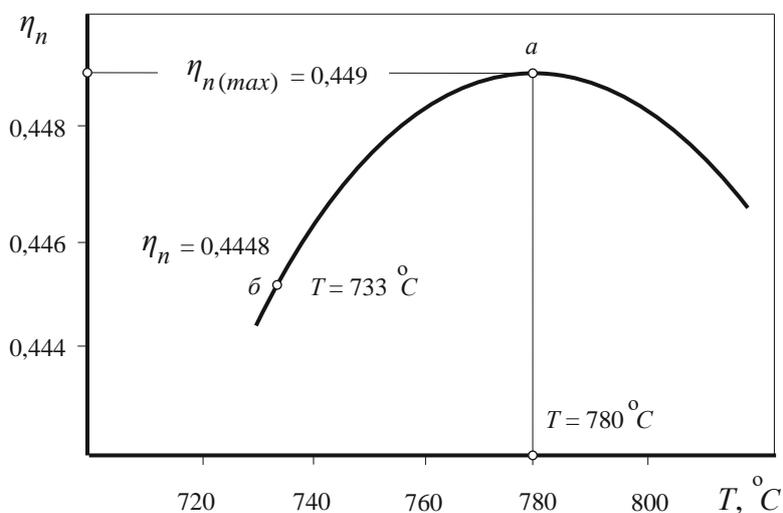


Рис. 6. Зависимость коэффициента полезного действия измененной печи от температуры нагревателей  
Fig. 6. Modified furnace efficiency vs temperature of heaters

Точка б соответствует минимальной и достаточной скорости нагревания ( $207^{\circ}\text{C}/\text{с}$ ), температура равна  $733^{\circ}\text{C}$ , а КПД измененного печного агрегата  $\eta_n = 0,4448$ , а это на 0,94% меньше.

При дальнейшем уменьшении температуры не будет выполняться условие достаточности скорости увеличения температуры [15]. Поэтому для измененных шестимодульных печей с параметрами нагревательной системы, указанными выше, рациональным будет температурно-временной режим –  $t = 2,48 - 3,06$  с и  $T = 780 - 733^{\circ}\text{C}$ .

Удельная энергоемкость обжига определяется по формуле:

$$e_y = \frac{N}{\Pi_V} = \frac{3IU}{\Pi_V}, \quad (15)$$

где  $N$  – электрическая мощность, потребляемая печным агрегатом в целом, Вт;  $\Pi_V$  – объемная производительность печи,  $\text{м}^3/\text{с}$ , определявшаяся экспериментальным путем [21].

Аналогично исследуя на экстремум выражение:

$$e_y = \frac{\sigma T^4 f_n}{\pi DB [nl + (n-1)\zeta]}, \quad \frac{24\kappa_e (1-\kappa_n) t}{\pi DB [nl + (n-1)\zeta]}$$

полученное из формулы (15); определяем минимальное значение удельной энергоемкости при обжиге вермикулита равное  $e_y = 188,9$   $\text{мДж}/\text{м}^3$ , которого процесс достигает при  $T = 780^{\circ}\text{C}$  и минимально достаточной скорости роста температуры (т. а) –  $274^{\circ}\text{C}/\text{с}$ , что всего на 1,2% больше, чем в экстремуме.

Сопоставление экстремального значения удельной энергоемкости измененной шестимодульной печи ( $e_y = 188,9$   $\text{мДж}/\text{м}^3$ ) с минимальным значением простой шестимодульной печи (230–235  $\text{мДж}/\text{м}^3$ ) показывает на снижение на 17,9%.

Проведенные на экспериментальной печи исследования, см. рис. 4, показали минимально возможное значение удельной

энергоемкости процесса обжига вермикулита 197,0  $\text{мДж}/\text{м}^3$ , что хорошо согласуется с расчетным результатом.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученный результат – снижение удельной энергоемкости процесса обжига вермикулитового концентрата в измененном энерготехнологическом агрегате – достигнуто на аналитической (188,9  $\text{мДж}/\text{м}^3$ ) и физической моделях (опытное изделие, 197,0  $\text{мДж}/\text{м}^3$ ), содержащих прежние, устаревшие нагревательные системы камерного типа с полосовыми нагревателями, поставленными на ребро. Достигнутый эффект заключается исключительно в изменении конструктивной структуры шестимодульной печи, когда нижний модуль с минимально низким КПД устанавливается в параллельное сопряжение с верхним модулем, увеличивая свой КПД и КПД печи в целом.

Так как измененная печь, см. рис. 3, имеет новые подвесные нагревательные системы, рассмотренные в работе [15], энергоэффективность которых значительно выше (снижение удельной энергоемкости на 22%), то можно ожидать дополнительно эффекта – снижения энергоемкости обжига вермикулита в среднем до 147,3  $\text{мДж}/\text{м}^3$  для различных видов и размерных групп вермикулитовых концентратов.

Все сказанное относится не только к вермикулиту, но и к другим сыпучим материалам, хотя и с иными характеристиками процесса обжига.

Работа по повышению энергоэффективности модульно-спусковых печей еще не завершена. Выше было показано, что в шестимодульной печи не только шестой (нижний) модуль является малоэффективным. Четвертый и пятый (см. табл. 1) также имеют весьма низкие значения КПД: 0,0121 и 0,0081, что составляет 5,6 и 3,8% от КПД верхнего модуля.

Если вернуться к трехмодульной конструкции печи (см. рис. 1) с длиной модулей в два раза большей длины модулей шестимодульной печи и рассмотреть рас-



пределение коэффициентов эффективности энергоусвоения  $k_{3i}$  (0,82; 0,126 и 0,038), а затем – распределение КПД печи по модулям  $\eta_n$  (0,282; 0,0433 и 0,013), то можно заметить следующее:

– КПД верхнего модуля трехмодульной печи на 31,1% больше, чем у шестимодульной (0,282 против 0,2151);

– КПД второго модуля относительно первого составляет 15,4%;

– после переноса нижнего модуля наверх только один модуль трехмодульной печи останется относительно малоэффективным (15,4%), но более эффективным,

чем третий (11,2%), четвертый (5,6%) и пятый (3,8%) от КПД верхнего модуля шестимодульной печи.

Измененная трехмодульная печь обещает быть еще более эффективной.

Но следует учесть, что простая шестимодульная печь понизила энергоемкость трехмодульной печи от 245–252 мДж/м<sup>3</sup> до 230–235 мДж/м<sup>3</sup> при равной производительности.

Поэтому без численного анализа вопрос об эффективности измененной трехмодульной печи остается пока открытым.

### Библиографический список

1. Ахтямов Р.Я. Вермикулит – сырье для производства огнеупорных теплоизоляционных материалов // Огнеупоры и техническая керамика. 2009. № 1-2. С. 58–64.
2. Rashad A.M. Vermiculite as a construction material – A short guide for Civil Engineer // Construction and Building Materials. 2016. Vol. 125. P. 53–62. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.019>
3. Fuks L., Herdzyk-Koniecko I. Vermiculite as a potential component of the engineered barriers in low- and medium-level radioactive waste repositories // Applied Clay Science. 2018. Vol. 161. P. 139–150. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.04.010>
4. Kariya J., Ryu J., Kato Y. Development of Thermal Storage Material Using Vermiculite and Calcium Hydroxide // Applied Thermal Engineering. 2016. Vol. 94. P. 186–192. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.10.090>
5. Mo Kim Hung, Lee Hong Jie, Liu Michael Yong Jing, Ling Tung-Chai. Incorporation of expanded vermiculite lightweight aggregate in cement mortar // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 179. P. 302–306. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.219>
6. Sutcun M. Influence of expanded vermiculite on physical properties and thermal conductivity of clay bricks // Ceramics International. 2015. Vol. 41. Issue 2-B. P. 2819–2827. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.10.102>
7. Zhang Yannan, Wang Ruzhu, Zhao Yanjie, Li Tingxian, Riffat S.B., Wajid N.M. Development and thermochemical characterizations of vermiculite/SrBr<sub>2</sub> composite sorbents for low-temperature heat storage // Energy. 2016. Vol. 115. Part 1. P. 120–128. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.108>
8. Balima F., Nguyen An-Ngoc, Reinert L., Le Floch S., Pischedda V., Duclaux L. Effect of the temperature on the structural and textural properties of a compressed K-vermiculite // Chemical Engineering Science. 2015. Vol. 134. P. 555–562. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2015.05.061>
9. Marcos C., Menendez R., Rodriguez I. Thermoexfoliated and hydrophobized vermiculites for oleic acid removal // Applied Clay Science. 2017. Vol. 150. P. 147–152. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.09.026>
10. İşçi S. Intercalation of vermiculite in presence of surfactants // Applied Clay Science. 2017. Vol. 146. P. 7–13. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.05.030>
11. İşçi S. Characterization and comparison of thermal & mechanical properties of vermiculite polyvinylbutyral nanocomposites synthesized by solution casting method // Applied Clay Science. 2018. Vol. 151. P. 189–193. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.10.009>
12. Кременецкая И.П., Беляевский А.Т., Васильева Т.Н., Корытная О.П., Макарова Т.И. Аморфизация серпентиновых минералов в технологии получения магнезиально-силикатного реагента для иммобилизации тяжелых металлов // Химия в интересах устойчивого развития. 2010. № 1. С. 41–49.
13. Кременецкая И.П., Корытная О.П., Васильева Т.Н. Реагент для иммобилизации тяжелых металлов из серпентиносодержащих вскрышных пород // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2008. № 4. С. 33–40.
14. Nizhegorodov A.I. Modeling of the Optical Properties of Vermiculite-Sungulite Conglomerates Subject to Thermal Activation in Electric Furnaces // Refractories and Industrial Ceramics. 2019. Vol. 60. No. 1. P. 14–17. <https://doi.org/10.1007/s11148-019-00302-4>
15. Звездин А.В., Нижегородов А.И. Оценка энергоэффективности подвесной нагревательной системы электрической печи для тепловой обработки сыпучих материалов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2019. Т. 23. № 1. С. 41–53. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-1-41-53>
16. Нижегородов А.И., Звездин А.В. Энерготехнологические агрегаты для переработки вермикулитовых концентратов. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2015. 250 с.
17. Zvezdin A.V., Bryanskikh T.B. Considering adaptation of electrical ovens with unit-type releasing to pecu-

liarities of thermal energization of mineral raw materials // *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2017. Vol. 168. P. 12–17. [Электронный ресурс]. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/168/1/012003/pdf> (28.02.2020). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/168/1/012003>

18. Nizhegorodov A.I., Zvezdin A.V. Transformation of Vermiculite Energy Into Mechanical Transformation Energy During Firing in Electric Furnaces With a «Zero» Module // *Refractories and Industrial Ceramics*. 2016. Vol. 57. No. 3. P. 239–245. <https://doi.org/10.1007/s11148-016-9960-3>

19. Звездин А.В. К технологии получения сунгулитовых и вермикулитовых концентратов из вскрышных

пород Ковдорского флогопит-вермикулитового месторождения // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2015. № 8. С. 93–99.

20. Брянских Т.Б. Трехмодульная электрическая печь для обжига вермикулита и других сыпучих материалов с вибрационной подачей сырья // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2016. № 5. С. 10–18. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-5-10-18>

21. Звездин А.В. К расчету спусковых печей с механическим «нулевым» модулем с учетом модели поглощательно-отражательных свойств перерабатываемого материала // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2016. № 12. С. 38–48. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-12-38-48>

### References

1. Akhtyamov RY. Vermiculite – a Raw Material for Making Heat-Insulating Refractories. *Ogneupory i tehničeskaya keramika* = Refractories and Industrial Ceramics. 2009;1-2:58–64. (In Russ.)

2. Rashad AM. Vermiculite as a Construction Material – A short Guide for Civil Engineer. *Construction and Building Materials*. 2016;125:53–62. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.019>

3. Fuks L, Herdzyk-Koniecko I. Vermiculite as a Potential Component of the Engineered Bar-Riers in Low- and Medium-Level Radioactive Waste Repositories. *Applied Clay Science*. 2018;161:139–150. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.04.010>

4. Kariya J, Ryu J, Kato Y. Development of Thermal Storage Material using Vermiculite and Calcium Hydroxide. *Applied Thermal Engineering*. 2016;94:186–192. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.10.090>

5. Mo Kim Hung, Lee Hong Jie, Liu Michael Yong Jing, Ling Tung-Chai. Incorporation of Expanded Vermiculite Lightweight Aggregate in Cement Mortar. *Construction and Building Materials*. 2018;179:302–306. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.219>

6. Sutcun M. Influence of Expanded Vermiculite on Physical Properties and Thermal Conductivity of Clay Bricks. *Ceramics International*. 2015;41(2-B):2819–2827. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.10.102>

7. Zhang Yannan, Wang Ruzhu, Zhao Yanjie, Li Tingxian, Riffat S.B., Wajid N.M. Development and Thermochemical Characterizations of Vermiculite/SrBr<sub>2</sub> Composite Sorbents for Low-Temperature Heat Storage. *Energy*. 2016;115(1):120–128. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.108>

8. Balima F, Nguyen An-Ngoc, Reinert L, Le Floch S, Pischedda V, Duclaux L. Effect of the Temperature on the Structural and Textural Properties of a Compressed K-Vermiculite. *Chemical Engineering Science*. 2015;134:555–562. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2015.05.061>

9. Marcos C, Menendez R, Rodriguez I. Thermoexfoliated and Hydrophobized Vermiculites for Oleic Acid Removal. *Applied Clay Science*. 2017;150:147–152.

<https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.09.026>

10. İşçi S. Intercalation of Vermiculite in Presence of Surfactants. *Applied Clay Science*. 2017;146:7–13. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.05.030>

11. İşçi S. Characterization and Comparison of Thermal & Mechanical Properties of Vermiculite Polyvinylbutyral Nanocomposites Synthesized by Solution Casting Method. *Applied Clay Science*. 2018;151:189–193. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.10.009>

12. Kremeneckaya IP, Belyaevskij AT, Vasil'eva TN, Korytnaya OP, Makarova TI. Amorphization of Serpentine Minerals in the Technology of Obtaining Magnesia-Silicate Reagent for Heavy Metal Immobilization. *Himiya v interesah ustojchivogo razvitiya* = Chemistry for Sustainable Development. 2010;1:41–49. (In Russ.)

13. Kremeneckaya IP, Korytnaya OP, Vasil'eva TN. Reagent for heavy metal immobilization from serpentine containing overburden rocks. *Vodoočistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie* = Water Purification. Water Treatment. Water Supply Journal. 2008;4:33–40. (In Russ.)

14. Nizhegorodov AI. Modeling of the Optical Properties of Vermiculite-Sungulite Conglomerates Subject to Thermal Activation in Electric Furnaces. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2019;60(1):14–17. <https://doi.org/10.1007/s11148-019-00302-4>

15. Zvezdin VA, Nizhegorodov AI. Assessing Energy Efficiency of Electric Furnace Suspended Heating System for Bulk Material Heat Treatment. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2019;23(1):41–53. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-1-41-53>

16. Nizhegorodov AI, Zvezdin AV. *Energy Technology Units for Vermiculite Concentrates Processing*. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2015, 250 p. (In Russ.)

17. Zvezdin AV, Bryanskikh TB. Considering Adaptation of Electrical Ovens with Unit-Type Releasing to Peculiarities of Thermal Energization of Mineral Raw Materials. In: *Materials Science and Engineering: IOP Confer-*



ence Series. 2017;168:12–17. Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/168/1/012003/pdf> [Accessed 28th February 2020]. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/168/1/012003>

18. Nizhegorodov AI, Zvezdin AV. Transformation of Vermiculite Energy into Mechanical Transformation Energy during Firing in Electric Furnaces with a “Zero” Module. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2016;57(3):239–245. <https://doi.org/10.1007/s11148-016-9960-3>

19. Zvezdin AV. To the Technology of Sungulite and Vermiculite Concentrate Production from Kovdor Phlogopite-Vermiculite Field Overburden. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University.

#### Критерии авторства

Низегородов А.И. получил и оформил научные результаты и несет ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

##### Низегородов Анатолий Иванович,

доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры строительных, дорожных  
машин и гидравлических систем,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;  
✉ e-mail: [nastromo\\_irkutsk@mail.ru](mailto:nastromo_irkutsk@mail.ru)

2015;8:93–99. (In Russ.)

20. Bryanskikh TB. A Triple-Unit Electric Kiln with Vibratory Feed of Raw Materials used for Vermiculite and Other Bulk Materials Roasting. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2016;5:10–18. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-5-10-18>

21. Zvezdin AV. To Calculation of Unit-Type Releasing Furnaces with a Mechanical “Zero” Unit considering the Model of Absorption-Reflecting Properties of the Processed Material. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2016;12:38–48. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-12-38-48>

#### Authorship criteria

Nizhegorodov A.I. has obtained and formalized the scientific results and bears the responsibility for plagiarism.

#### Conflict of interests

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

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

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

##### Anatoliy I. Nizhegorodov,

Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Professor of the Department of Construction,  
Road Machinery and Hydraulic Systems,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;  
✉ e-mail: [nastromo\\_irkutsk@mail.ru](mailto:nastromo_irkutsk@mail.ru)



Оригинальная статья / Original article

УДК 534.134

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-527-547>

## О вибрации колесно-моторного блока вследствие взаимодействия колеса с рельсом и работы зубчатой передачи электровоза ЗЭС5К в условиях горно-перевального участка

© А.Ю. Портной, О.В. Мельниченко, К.П. Селедцов, А.О. Линьков,  
Д.А. Яговкин, С.Г. Шрамко, Г.Г. Грузин

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

**Резюме:** Цель – экспериментальное исследование вибрации, возникающей на узлах колесно-моторного блока электровоза при движении в кривых малого радиуса ( $R = 250\text{--}350$  м) в условиях горно-перевального участка (с уклонами до 17 ‰). Измерение вибраций осуществлялось экспериментально на электровозе ЗЭС5К «Ермак» при помощи вибропреобразователей типа АР-2038-10 и АР-2038-100, установленных на буксе первой по ходу движения колесной пары, кожухе зубчатой передачи и остова тягового двигателя. Для измерений использовалась система, позволяющая непрерывно записывать сигнал вибропреобразователей по восьми каналам с частотой дискретизации 12,8 кГц. Получены экспериментальные данные параметров вибраций, возникающих на буксе колесной пары, кожухе зубчатой передачи и остова тягового двигателя электровоза, при взаимодействии колеса электровоза и рельса на практически бесстыковом пути при движении в кривых малого радиуса. Установлена закономерность, что уровень вибрации при входе в кривые малого радиуса по трем координатам  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  практически на порядок выше, чем вне кривой. При работе электровоза в режиме тяги выявлено, что резкое увеличение амплитуды (до 10 раз) гармоник с частотами, кратными зубчатой частоте, связано с совпадением с собственными частотами кожуха зубчатой передачи. В режиме выбега, в области частот около 1,5 кГц, на буксе регистрируется псевдослучайная вибрация, среднеквадратичное значение ускорения которой выше  $100$  м/с<sup>2</sup>, что сопоставимо со значениями ускорения при прохождении стыка пути. Полученные данные параметров вибрации позволяют предположить, что надежность локомотивов, работающих в условиях горно-перевальных участков с большим количеством кривых малого радиуса, будет существенно меньше, чем при работе на равнинных участках, а переход к бесстыковому пути не является эффективной мерой снижения вибрации в кривых малого радиуса.

**Ключевые слова:** электроподвижной состав, вибрация, система «колесо – рельс», колесно-моторный блок, вибрационное воздействие, кривые малого радиуса

**Благодарности:** Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и ОАО «Российская железная дорога» в рамках научного проекта № 17-20-01059/18 от 27.11.2018.

**Информация о статье:** Дата поступления 05 декабря 2019 г.; дата принятия к печати 27 мая 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 июня 2020 г.

**Для цитирования:** Портной А.Ю., Мельниченко О.В., Селедцов К.П., Линьков А.О., Яговкин Д.А., Шрамко С.Г., Грузин Г.Г. О вибрации колесно-моторного блока вследствие взаимодействия колеса с рельсом и работы зубчатой передачи электровоза ЗЭС5К в условиях горно-перевального участка. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 3. С. 527–547. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-527-547>

## Study into vibration effects due to the wheel-rail interaction on the operation of an 3ES5K electric locomotive gear transmission under conditions of mountain pass traversal

Aleksandr Yu. Portnoy, Oleg V. Melnichenko, Konstantin P. Seledtsov,  
Aleksey O. Linkov, Dmitriy A. Yagovkin, Sergey G. Shramko, Gennadiy G. Gruzin

*Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia*

**Abstract:** The aim of the present work is to carry out an experimental study of vibration occurring at the nodes of the electric locomotive wheel and motor unit during motion in small radius curves ( $R = 250\text{--}350$  m) of a mountain-pass sec-

tion (with gradients up to 17‰). The vibration measurement was carried out experimentally at the 3ES5K Ermak electric locomotive using AR-2038-10 and AR-2038-100 vibration transducers mounted on the axle box of the first wheel pair, gear cover and traction engine frame. A specially designed system was used to continuously record the signal from vibration transducers over eight channels with a sampling frequency of 12.8 kHz. Experimental data on the parameters of vibration occurring at the specified locations of the electric locomotive were obtained during the wheel-rail interaction of the electric locomotive on an almost jointless trajectory of small radius curves. The level of vibration at the entrance to the small radius curves along the three coordinates of X, Y and Z was established to be almost an order of magnitude higher than outside the curve. In the case of traction mode operation of the electric locomotive, a sharp increase in the amplitude (up to 10 times) of harmonics with multiples of the gear frequency was shown to be caused by a coincidence with the natural frequencies of the gear cover. In coasting mode, in the frequency region of about 1.5 kHz, a pseudo-random vibration is recorded on the axle box with the RMS acceleration value of above  $100 \text{ m/s}^2$ , which is comparable to the acceleration values when passing a junction. The obtained data of the vibration parameters suggest the reliability of locomotives operating in mountain pass areas having many small radius curves to be significantly less than for flat area operation with the alternative of a jointless trajectory representing ineffective measure of reduction vibrations in small radius curves.

**Keywords:** electric rolling stock, vibration, wheel-rail system, wheel-motor unit, vibration impact, small radius curves

**Acknowledgements:** The research has been carried out with financial support from the Russian Foundation for basic research and Russian Railways JSC in the framework of the scientific project No. 17-20-01059/18 of November 27, 2018.

**Information about the article:** Received December 05, 2019; accepted for publication May 27, 2020; available online June 30, 2020.

**For citation:** Portnoy AYu, Melnichenko OV, Seledtsov KP, Linkov AO, Yagovkin DA, Shramko SG, Gruzin GG. Study into vibration effects due to the wheel-rail interaction on the operation of an 3ES5K electric locomotive gear transmission under conditions of mountain pass traversal. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(3):527–547. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-527-547>

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Срок службы узлов подвижного состава напрямую зависит от наличия колебаний, возникающих при эксплуатации<sup>1</sup>. Особенно остро данная проблема проявляется в условиях прохождения горно-перевальных участков с большим количеством кривых малого радиуса. Основным источником вибраций является система «колесо – рельс» [1–5]. Применения смазки с целью уменьшения трения в данной системе недостаточно для горно-перевальных условий, а возможные попадания смазки на поверхность качения рельса резко уменьшают силу тяги локомотива. Взаимодействие пары «колесо – рельс» подробно рассмотрено в работе [6], однако в ней нет данных о характеристиках вибраций, возникающих на криволинейных участках пути малого радиуса. Помимо этого, фрикционное взаимодействие в системе

«колесо – рельс» обычно изучается на прямых участках пути в условиях предельно возможной тяги, при этом дополнительную вибрацию, возникающую в кривых малого радиуса, не учитывают [7].

Анализ причин вибраций, возникающих на электровозе, требует учета множества факторов: наличие большого количества зазоров в элементах механической части; собственный спектр частот зубчатой передачи; присутствие магнитного поля, создаваемого тяговым электродвигателем<sup>2</sup>. Исследование причин возникновения вибраций экспериментальными методами позволит разработать мероприятия и технические решения для их устранения, что необходимо для обеспечения безотказной работы элементов тягового подвижного состава в условиях роста веса поездов и нагрузок на тяговое оборудование локомотивов.

Объект исследования – колесно-

<sup>1</sup>Вибрации в технике: справочник: в 6 т. Т. 1. / под ред. В.Н. Челомея. М.: Машиностроение, 1978. 352 с.

<sup>2</sup>Вибрации в технике: справочник: в 6 т. Т. 3. / под ред. В.Н. Челомея. М.: Машиностроение, 1980. 544 с.



моторный блок электровоза ЗЭС5К «Ермак», работающего при движении в кривых малого радиуса ( $R = 250\text{--}350$  м) в условиях горно-перевального участка (с уклонами до 17 ‰). Приведенные в статье данные являются базовыми для дальнейшей постановки задач исследований, направленных на увеличение надежности электровозов, работающих в рассматриваемых условиях.

## 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРАЦИИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ КОЛЕСА И РЕЛЬСА

Вибродиагностика широко применяется для анализа дефектов, возникающих во вращающихся узлах машин [8, 9]. Для такой диагностики достаточно хорошо разработан математический аппарат и критерии дефектов, как при анализе сигнала во временной области [10], так и в спектральной, например, в литературных источниках<sup>3</sup> [11].

Тем не менее в работе, касающейся выявления дефектов при помощи вибрации, возникающей в паре «колесо – рельс» [12, 13], отмечено, что до сих пор описание взаимодействия колеса и рельса является сложной задачей и не позволяет однозначно интерпретировать изменение характеристик сигнала. Описать достаточно точно такую систему математической и физической моделями на сегодняшний день чрезвычайно сложно и зачастую даже невозможно.

Моделирование вибрации при взаимодействии колеса и рельса на стыках рельсов в условиях высокоскоростного движения рассматривается в работах [14–16], однако моделирование производится только на прямых участках пути. В работах [17–19] проведено моделирование вибрации в районе дефектов рельсов типа 40<sup>4</sup> методом конечных элементов, но снова только на прямых участках пути. Экспери-

ментальное измерение вибрации приведено в работе [20], однако измерения производились только в районе стрелочных переводов.

Таким образом, можно заключить, что ни экспериментальными, ни математическими методами вибрация, возникающая в кривых малого радиуса на горно-перевальных участках, не рассматривается. По мнению авторов статьи, это необходимо, т.к. подобных участков достаточно много. Например, на Транссибирской магистрали участок Большой Луг – Подкаменная Восточно-Сибирской железной дороги имеет 70% кривых от общей длины.

Очевидно, надежность элементов машин и механизмов напрямую зависит от уровня вибрации, возникающей при их работе. Наличие вибраций приводит к возникновению трещин, изломов, раскручиванию болтовых соединений и т.п.

В зависимости от условий эксплуатации обычно рассматривают различные диапазоны частот и максимальные амплитуды ускорения вибраций согласно ГОСТ 30631-99<sup>5</sup>. Для необрессоренных изделий тележек транспортных средств железнодорожного транспорта по группе механического исполнения М27 предъявляются следующие требования:

- диапазон частот синусоидальных вибраций – 0,5–100 Гц;
- максимальная амплитуда ускорения синусоидальных вибраций – 150 м/с<sup>2</sup>.

Предельные рабочие значения механических внешних воздействующих факторов по ГОСТ 30631-99:

- диапазон частот синусоидальных вибраций – 100–500 Гц;
- максимальная амплитуда ускорения синусоидальных вибраций – 40 м/с<sup>2</sup>.

Разработка достаточно сложной модели колесно-моторного блока электровоза без экспериментальных данных является

<sup>3</sup>Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: учебник. СПб.: Питер, 2003. 604 с.

<sup>4</sup>Инструкция «Дефекты рельсов. Классификация, каталог и параметры дефектных и острodefектных рельсов». Утв. распоряжением ОАО «РЖД» № 2499р от 23.10.2014.

<sup>5</sup>ГОСТ 30631-99. Межгосударственный стандарт. Общие требования к машинам, приборам и другим техническим изделиям в части стойкости к механическим внешним воздействующим факторам при эксплуатации М.: ИПК Изд-во стандартов, 1999.

на сегодняшний день трудновыполнимой задачей. Получение и анализ экспериментальных данных о вибрации необходимы для выявления причин, приводящих к выходу из строя элементов электровоза.

На сегодняшний день существует возможность экспериментальных измерений длительных вибрационных сигналов в практически постоянном режиме с сохранением мгновенных значений амплитуды вибрации в файлах [21]. На выходе получаемый сигнал может быть преобразован в удобную для рассмотрения форму. В настоящей работе использовалась аналогичная система, позволяющая по 8-ми каналам фиксировать данные с частотой дискретизации 12,8 кГц, которая является стандартной для большинства систем сбора информации с датчиков вибрации.

Измерение вибраций осуществлялось на электровозе ЗЭС5К «Ермак» посредством вибропреобразователей АР-2038-10 и АР-2038-100. Датчики крепились посредством изолирующих магнитов. Дополнительно датчики с магнитами фиксировались киперной лентой. Частота среза такого крепления вибропреобразователя оценивалась значением 2,5 кГц, поэтому приведенные данные ограничены этой частотой. Кадры данных, где по характеру сигнала можно было предположить отрыв датчика с магнитом от буксы (три случая за поездку), удалялись в ручном режиме. В диапазоне частот до половины частоты дискретизации систематических резонансов на частоте около 2,5 кГц при такой конструкции основных и дополнительных креплений не выявлено.

На рис. 1 а представлена упрощенная схема секции электровоза ЗЭС5К «Ермак»<sup>6</sup>. Данный электровоз имеет двухступенчатое подвешивание, которое показано на примере задней тележки. Конструкция тяговых двигателей электровоза предусматривает установку подшипников качения на оси двигателя и подшипников скольжения на оси колесной пары. Уста-

новка вибропреобразователей производилась на буксе первой по ходу движения колесной пары, кожухе зубчатой передачи и остова тягового двигателя (см. рис. 1 б). Оси вибропреобразователей представлены на рис. 1 а: X – ось поперек пути, Y – ось вдоль пути, Z – вертикальная ось.

Для проведения измерений был использован электровоз ЗЭС5К, прошедший ТР-1 и обточку бандажей колесных пар. Зазоры в моторно-осевых подшипниках по результатам замеров при ремонте составляли 0,4–0,9 мм. Опытная поездка проводилась на участке Большой Луг – Подкаменная Восточно-Сибирской железной дороги на электровозе ЗЭС5К-034 с поездом массой 6900 т в режиме подталкивания, где путь в большей части бесстыковой.

На рис. 2 представлены полученные диаграммы скорости и тока двигателя электровоза. В нижней части рисунка приведен упрощенный профиль пути.

Погода ясная, температура воздуха от +5 до +10°C, рельсы сухие, что соответствует хорошим условиям для рассматриваемого участка пути.

После поездки визуально оценивалось состояние пути. В кривых малого радиуса наблюдался дефект типа 44, согласно инструкции<sup>4</sup>, по внешнему рельсу на участках с типовым выбегом, а также дефект типа 40 по внутреннему рельсу и типа 44 по внешнему рельсу на участках с типовыми режимами: тяга и рекуперация. Типовая длина рифлей составляла 0,2–0,6 м. На участках, где износ по внешнему рельсу составлял от 15 до 20 мм, было выставлено ограничение по скорости – 50 км/ч.

### **3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

На рис. 3–5 приведены среднеквадратические значения ускорений на буксе, которые регистрировались в ходе опытной поездки, по осям X, Y, Z, соответственно. На условных обозначениях представлены

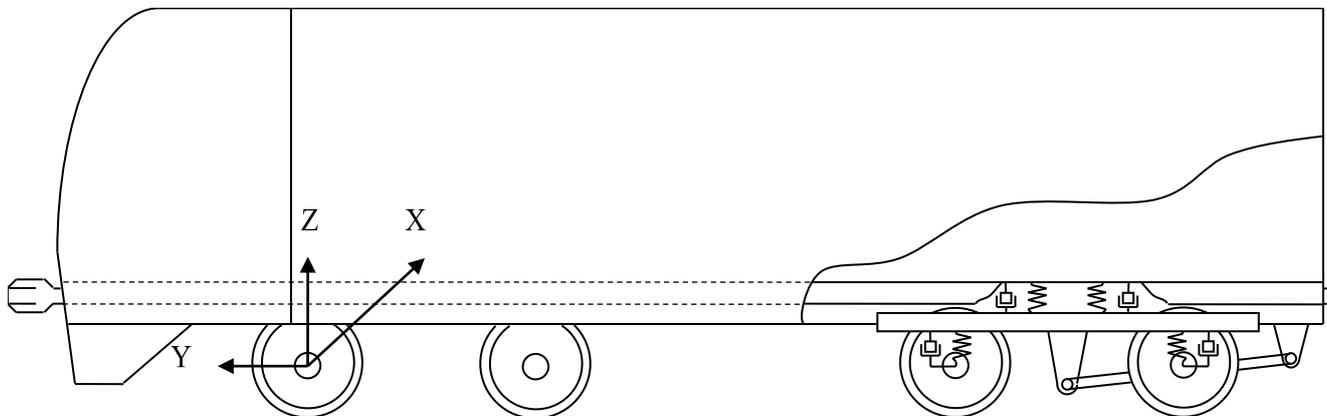
<sup>6</sup>Электровоз магистральный 2ЭС5К (ЗЭС5К). Руководство по эксплуатации. Новочеркасск: Изд-во НЭВЗ, 2007. Т. 1. 635 с.; Т. 2. 640 с.



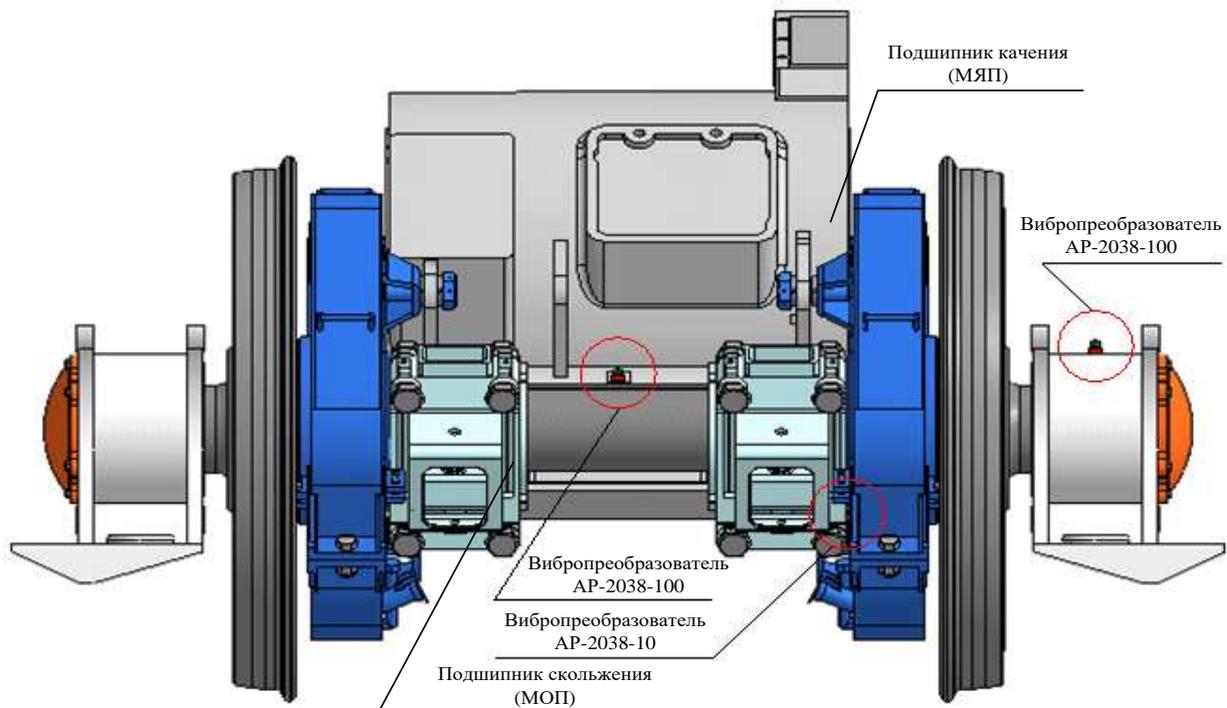
радиусы поворотов, направления поворотов и длины участков с поворотами.

Из результатов измерений видно, что при входе электровоза в кривую малого радиуса среднее квадратическое значение вибрации на буксе резко возрастает, что требует отдельного рассмотрения процессов на прямых участках и в кривых малого радиуса. Из рис. 3–5 также следует: как

только электровоз выходит из кривой малого радиуса на выбеге, уровень вибрации по всем трем координатам падает практически на порядок. На рис. 6 представлены типовые зависимости амплитуды ускорений на буксе от времени по трем координатам, полученные при прохождении стыка на прямом участке стыкового пути.



a



b

Рис. 1. Расположение вибропреобразователей: а – упрощенная схема головной секции электровоза ЗЭС5К «Ермак»; б – расположение преобразователей на колесно-моторном блоке

Fig. 1. Location of vibration transducers: a – simplified diagram of the head section of the electric locomotive Ermak 3ES5K; b – transducer location on the wheel-motor unit

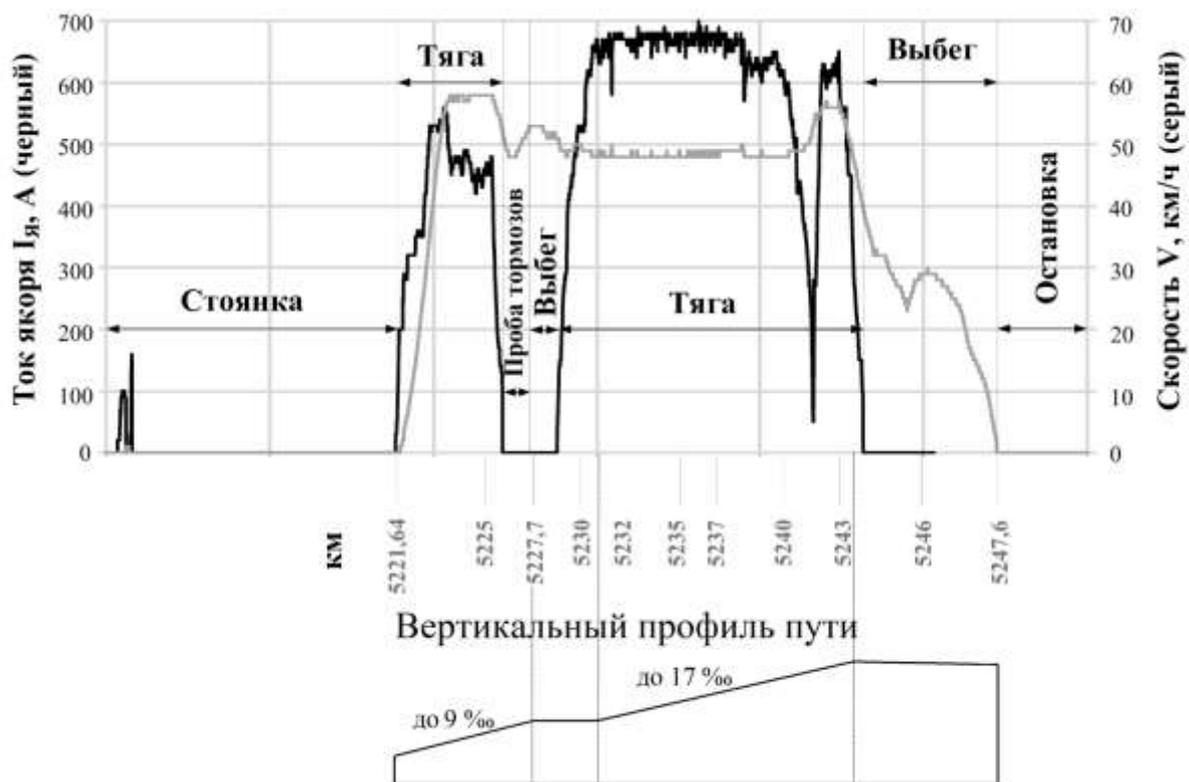


Рис. 2. Параметры работы электровоза ЗЭС5К-034 с поездом № 2326 при опытной поездке 25.10.2017  
 Fig. 2. Operation parameters of an electric locomotive 3ES5K-034 with the train no. 2326 at a trial trip on 25 October, 2017

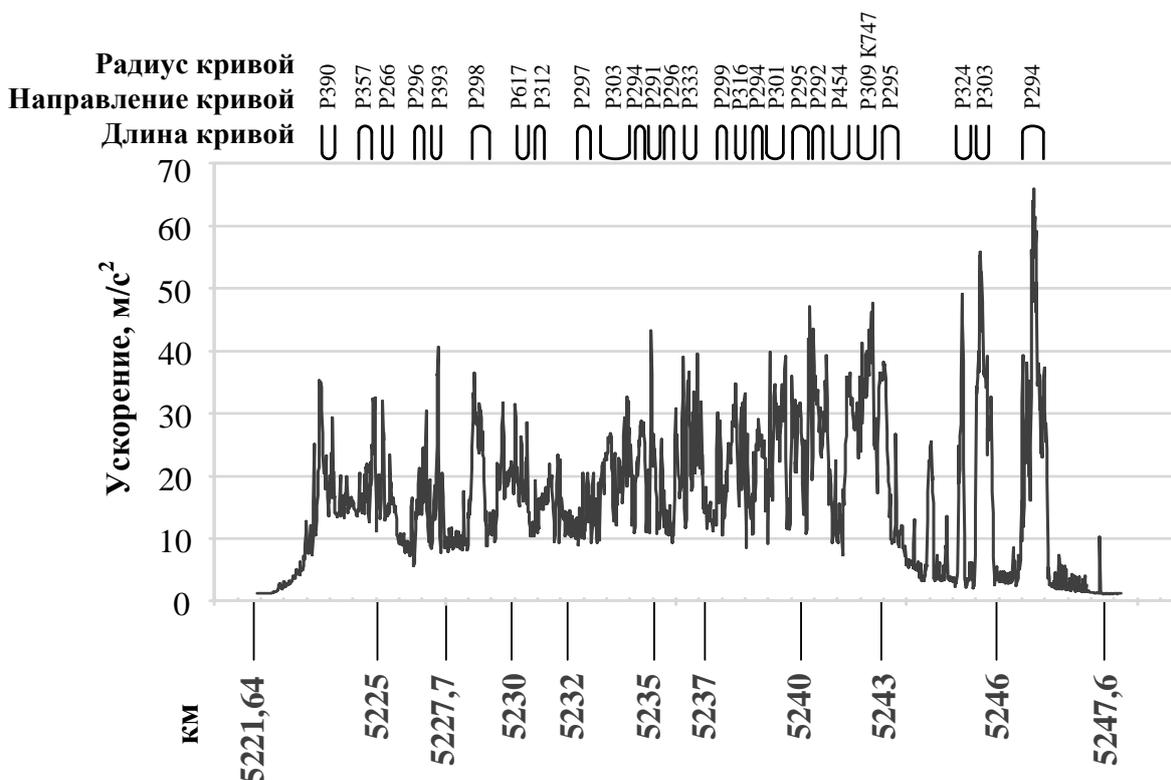
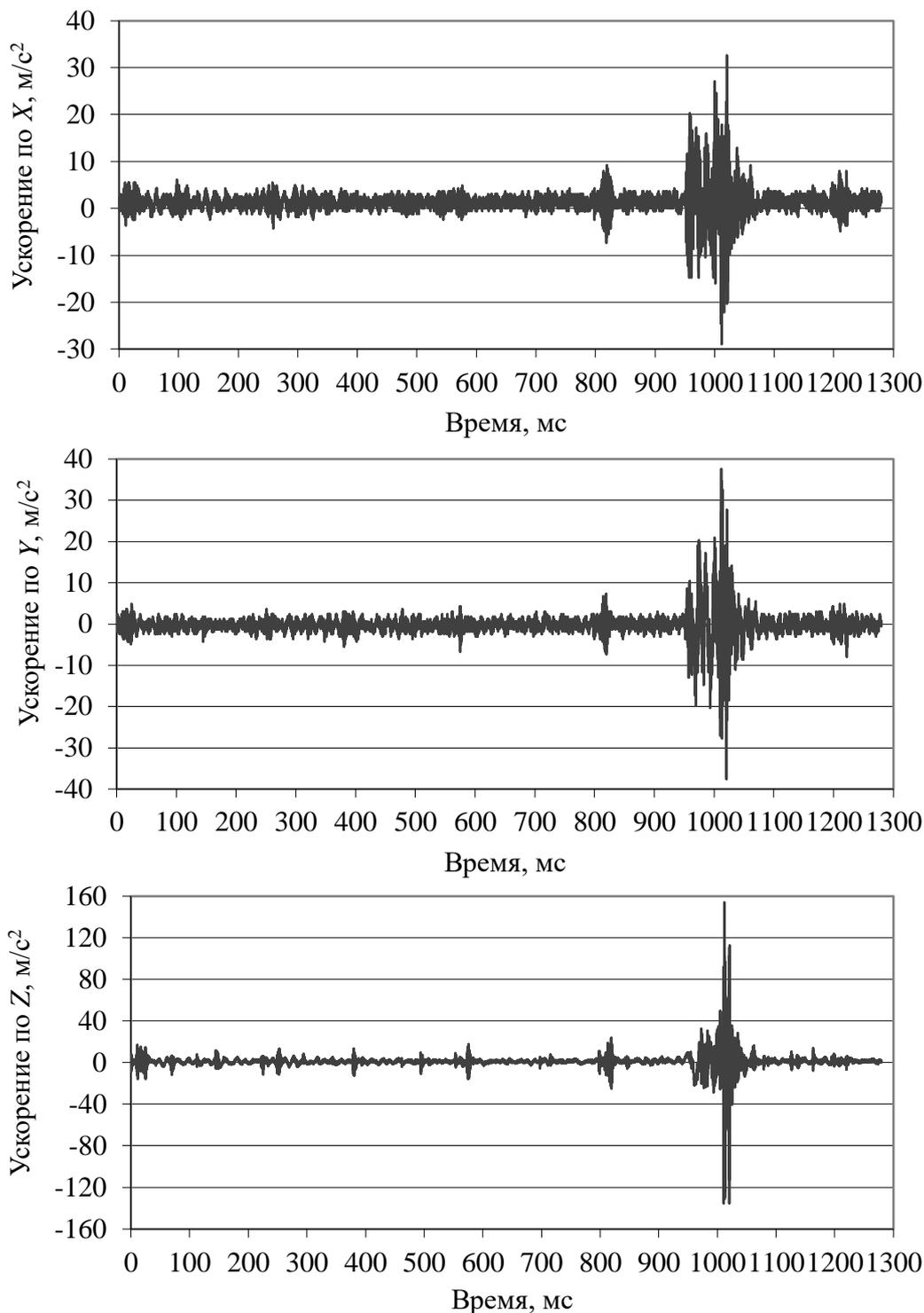


Рис. 3. Зависимость среднеквадратичных значений ускорений на буксе колесной пары по оси X  
 Fig. 3. Dependence of rms acceleration values on the wheelset box along X axis

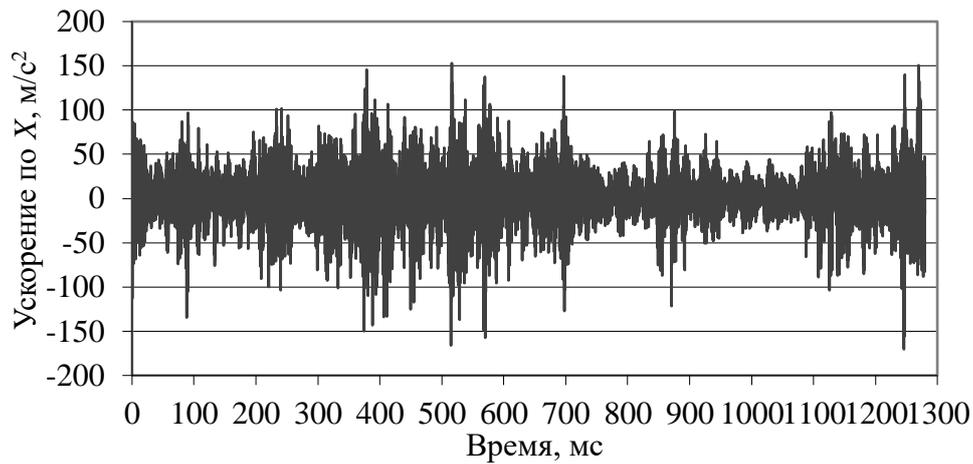




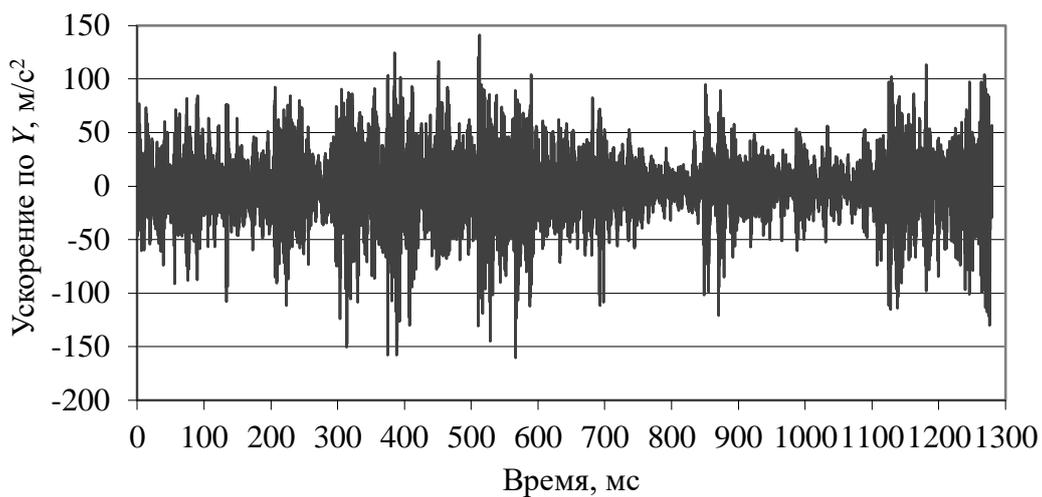
**Рис. 6. Зависимость амплитуды ускорений на буксе от времени по трем координатам при прохождении стыка на прямом участке стыкового пути**  
**Fig. 6. Dependence of the axle box acceleration amplitude on time by three coordinates when passing a joint in a straight section of a joint rail track**

На рис. 7, 8 представлены зависимости амплитуды ускорений на буксе от времени по трем координатам, полученные при вписывании электровоза в кривую радиусом 300 м по внутреннему и внешнему рельсам, соответственно. Показания реги-

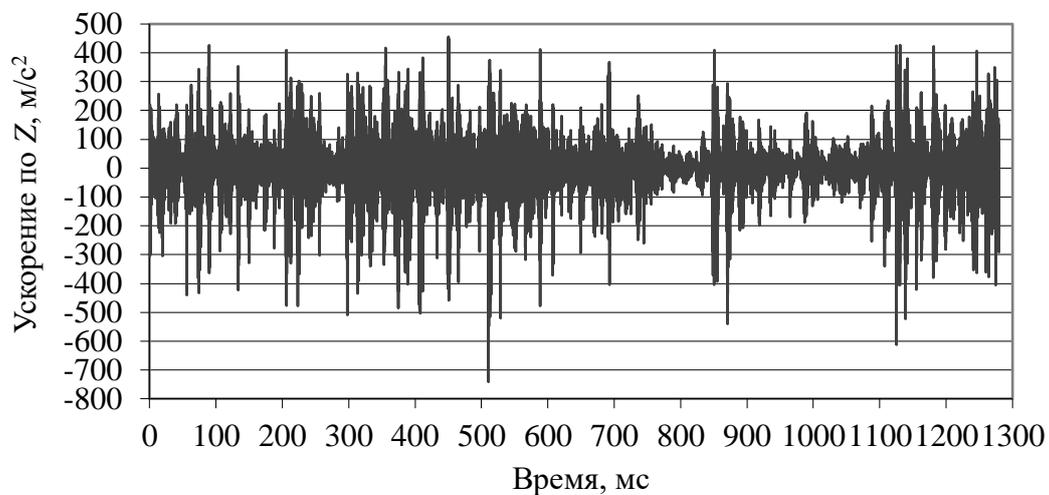
стрировались в режиме выбега при скорости электровоза около 30 км/ч. Данный режим выбран для упрощения анализа возникающих колебаний при вписывании электровоза в кривую.



**a**



**b**



**c**

**Рис. 7. Зависимость амплитуды ускорений на буксе от времени по трем координатам (а–с) при  
вписывании в кривую радиусом 300 м по внутреннему рельсу в режиме выбега**  
**Fig. 7. Dependence of the axle box acceleration amplitude on time by three coordinates (a-c) when passing  
around the curve with the radius of 300 m on the inner rail in the coasting retardation mode**

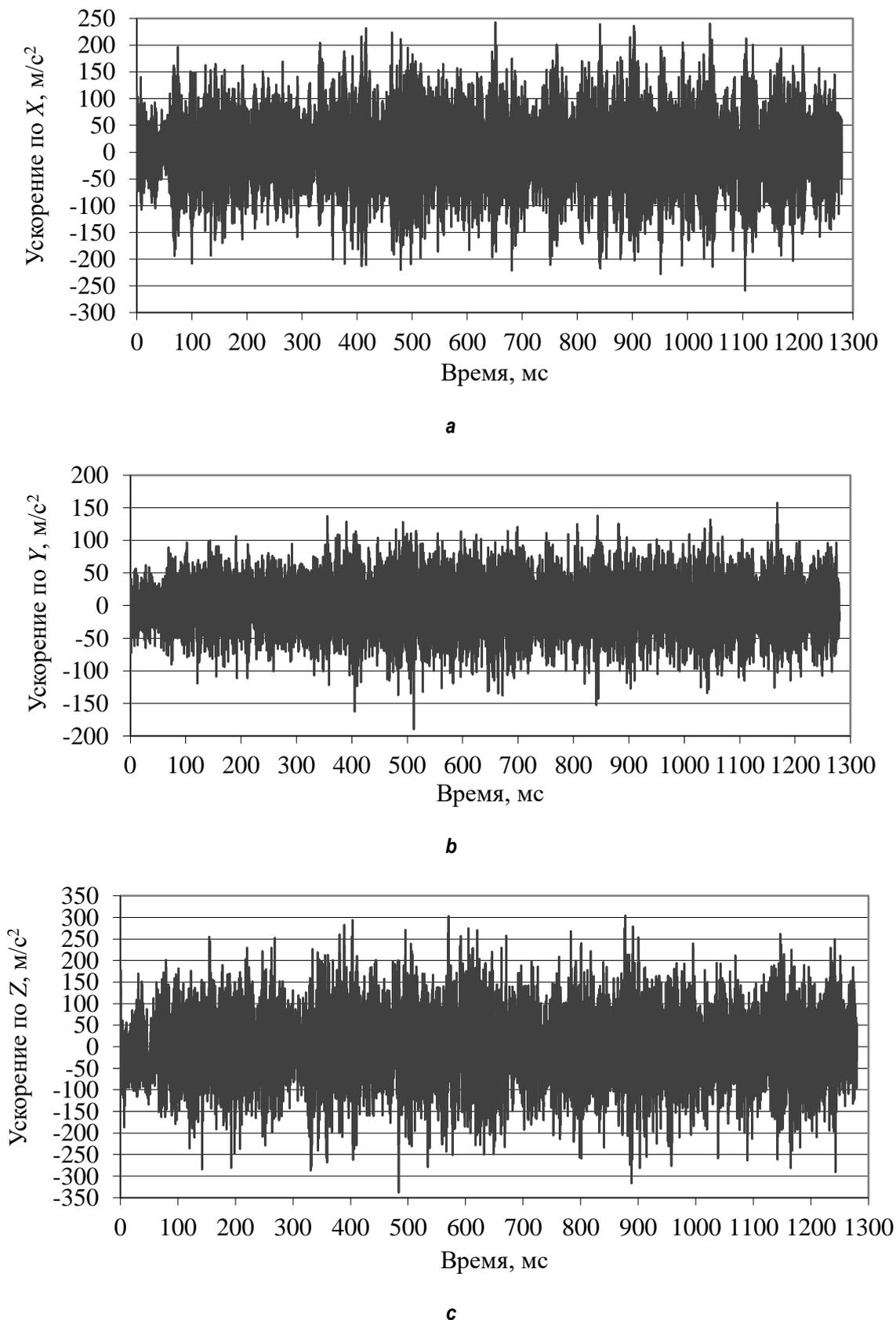


Рис. 8. Зависимость амплитуды ускорений на буксе от времени по трем координатам (а-с) при вписывании в кривую радиусом 300 м по внешнему рельсу в режиме выбега  
Fig. 8. Dependence of the axle box acceleration amplitude on time by three coordinates (a-c) when passing around the curve with the radius of 300 m on the outer rail in the coasting retardation mode



Из диаграмм видно, что в кривых малого радиуса даже в режиме выбега вибрация достигает предельных значений по ГОСТ 30631-99. Установленное (более продолжительное) превышение уровня вибрации с позиции взаимодействия колеса и рельса при движении в кривой над уровнем вибрации, регистрируемой при прохождении стыка стыкового пути, означает, что при движении электровозов в кривых малого радиуса применение бесстыкового пути на железобетонных шпалах не означает существенного уменьшения вибрации по всем координатам. Полученные отличия вибрационных процессов в прямых участках и кривых малого радиуса бесстыкового пути не рассматриваются в доступной литературе и обладают научной новизной. Для уменьшения вибрации необходимо рассматривать процессы диссипации энергии колебаний в рельсошпальной решетке, амортизаторах электровоза, а также процессы рельсосмазывания.

При рассмотрении вибраций необходимо использовать и спектральный анализ, который является мощным средством, позволяющим оценивать колебательные процессы<sup>3,7</sup>.

На рис. 9 и 10 показаны спектры виброускорений на буксе в режимах тяги при вписывании электровоза в кривую большого радиуса и выбега при вписывании электровоза в кривую малого радиуса (300 м), соответственно. В режиме тяги явно просматриваются 1–4 гармоники зубчатой частоты тягового редуктора.

Анализ амплитуды виброускорений по осям датчика на буксе показывает, что изменение геометрии внешнего рельса при вписывании электровоза в кривую малого радиуса включает процесс не столько «выдавливания», сколько стачивания рельса колесом электровоза, а также стачивания самого колеса электровоза рельсом.

Спектр вибрации при вписывании электровоза в кривую малого радиуса – широкополосный, не имеющий преимущественно проявляющихся гармоник, что показывает наличие большого количества псевдослучайных событий типа ударов, приводящих к вибрации. Подобные удары могут возникать при наезде гребня колеса на изношенный рельс (дефект типа 40 инструкции<sup>4</sup>) с последующим соскальзыванием с достаточно большой высотой (до 10 мм по измерениям, связанными с двукратным

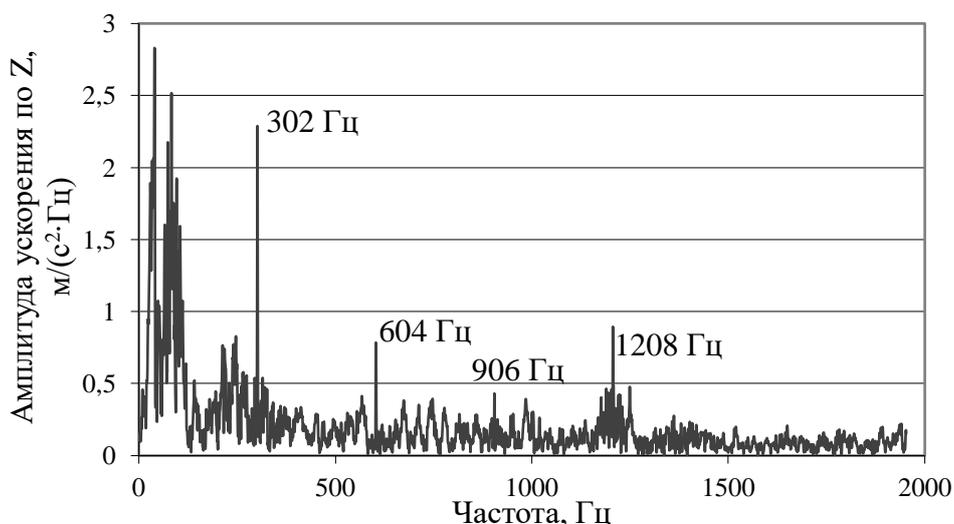
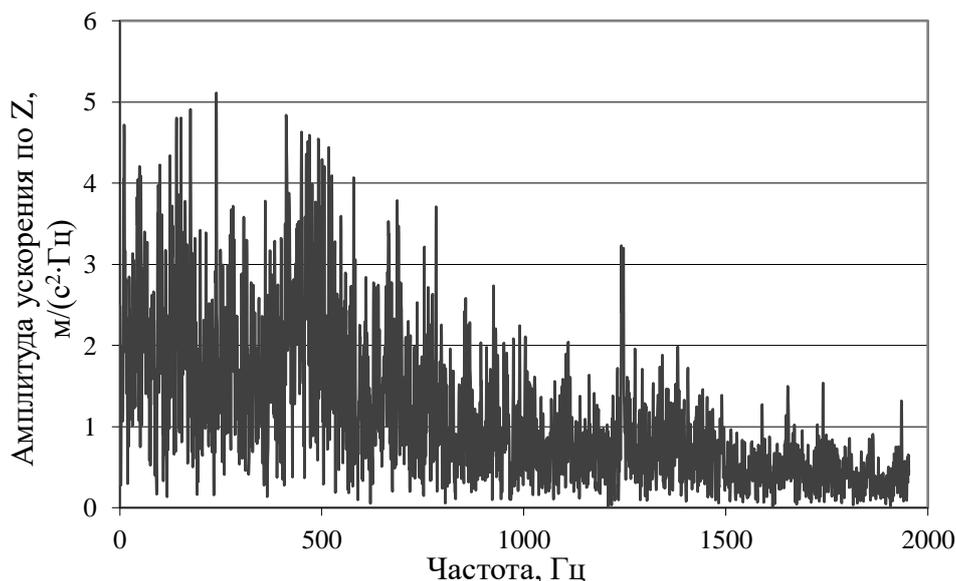


Рис. 9. Спектр при вписывании в кривую большого радиуса в режиме тяги (скорость 50 км/ч)  
Fig. 9. Spectrum when passing around a large radius curve in the traction mode (speed of 50 km/h)

<sup>7</sup>Неразрушающий контроль: справочник: в 7 т. Т. 7. Кн. 2. / под общ. ред. В.В. Ключева. М.: Машиностроение, 2005. 489 с.



**Рис. 10. Спектр при вписывании в кривую малого радиуса в режиме выбега, соответствующий временной части рис. 8 (скорость 30 км/ч)**  
**Fig. 10. Spectrum when passing around a small radius curve in the coasting retardation mode corresponding to the time part of Fig. 8 (speed of 30 km/h)**

интегрированием сигнала) и достаточно случайным временем между соскальзываниями. Необходимо отметить, что ручной анализ большого количества спектров сложный для понимания и трудоемкий процесс, поэтому для дальнейшего анализа многочисленных спектров вибраций применялся следующий способ.

Кадр измерений за 1,2 с подвергался Фурье-преобразованию (с разрешением по частоте примерно 0,8 Гц). В дальнейшем спектральная плотность виброускорений кодировалась цветом в логарифмическом масштабе и наносилась на график зависимости спектральной плотности виброускорений от времени. Дополнительно на диаграммы нанесены данные о радиусах поворотов и их направлениях. Диаграммы позволяют достаточно точно различать вибрации, возникающие от пути и от узлов колесно-моторного блока.

Для лучшего визуального анализа амплитуда спектральной плотности ускорений кодируется цветом. В отличие от построения 3D-графиков кодирование цветом позволяет достаточно точно оценивать именно частоты вызывающих колебаний. Способ представления спектральных данных может быть рассмотрен как способ

вейвлет-преобразования [22] со стандартным для спектрального анализа гармоническим базисом.

На рис. 11–13 представлены зависимости спектральной плотности амплитуды ускорения вибрации буксы колесной пары по осям X, Y, Z от времени.

На построенных таким образом диаграммах узкополосные вибрации, соответствующие гармоникам зубчатой частоты (см. рис. 9), представляются как линии, частота которых пропорциональна скорости, а широкополосные вибрации (см. также рис. 10) – как вертикальные полосы. Широкополосность спектра вибраций, возникающих вследствие взаимодействия пары «колесо – рельс» в кривых малого радиуса бесстыкового пути также обладает научной новизной.

На рис. 14–16 представлены зависимости спектральной плотности амплитуды ускорения вибрации на кожухе зубчатой передачи по осям X, Y, Z от времени.

Широкие горизонтальные темные полосы на рис. 14–16 говорят о наличии некоторых собственных частот кожуха в диапазоне частот 800–1600 Гц. Как только гармоника зубчатой частоты совпадает с данными частотами, амплитуда ее резко

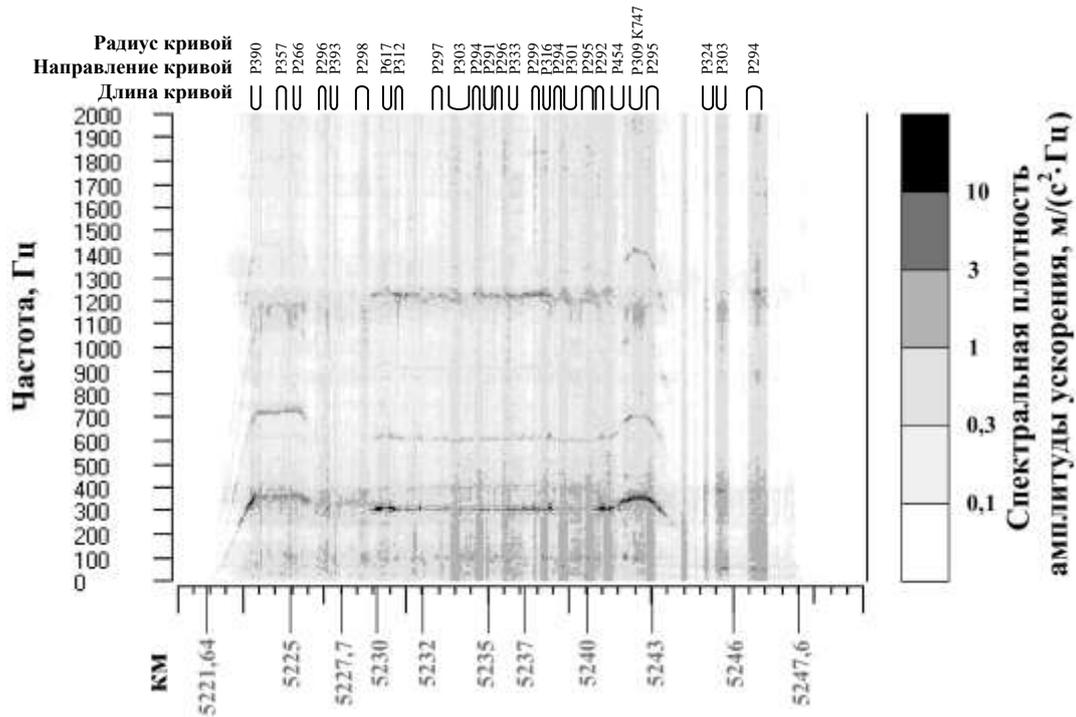


Рис. 11. Зависимость спектральной плотности амплитуды ускорения вибрации буксы колесной пары по оси X от времени

Fig. 11. Dependence of spectral density of acceleration amplitude of wheelset box vibration along X axis on time

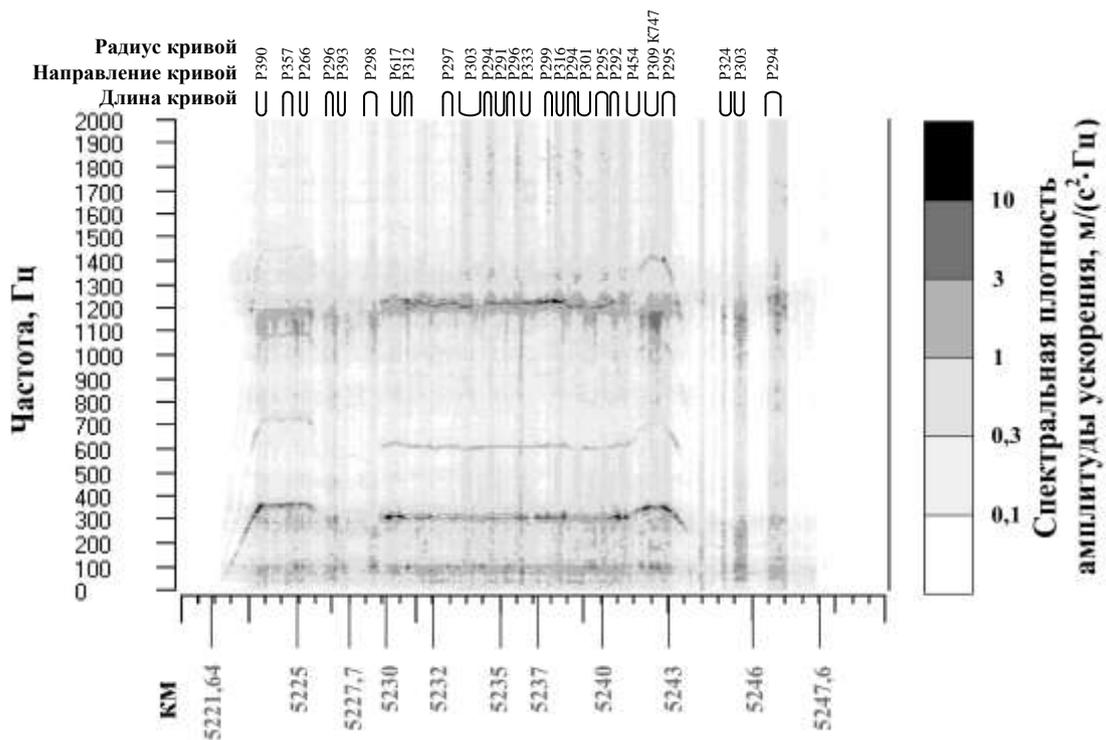


Рис. 12. Зависимость спектральной плотности амплитуды ускорения вибрации буксы колесной пары по оси Y от времени

Fig. 12. Dependence of spectral density of acceleration amplitude of wheelset box vibration along Y axis on time

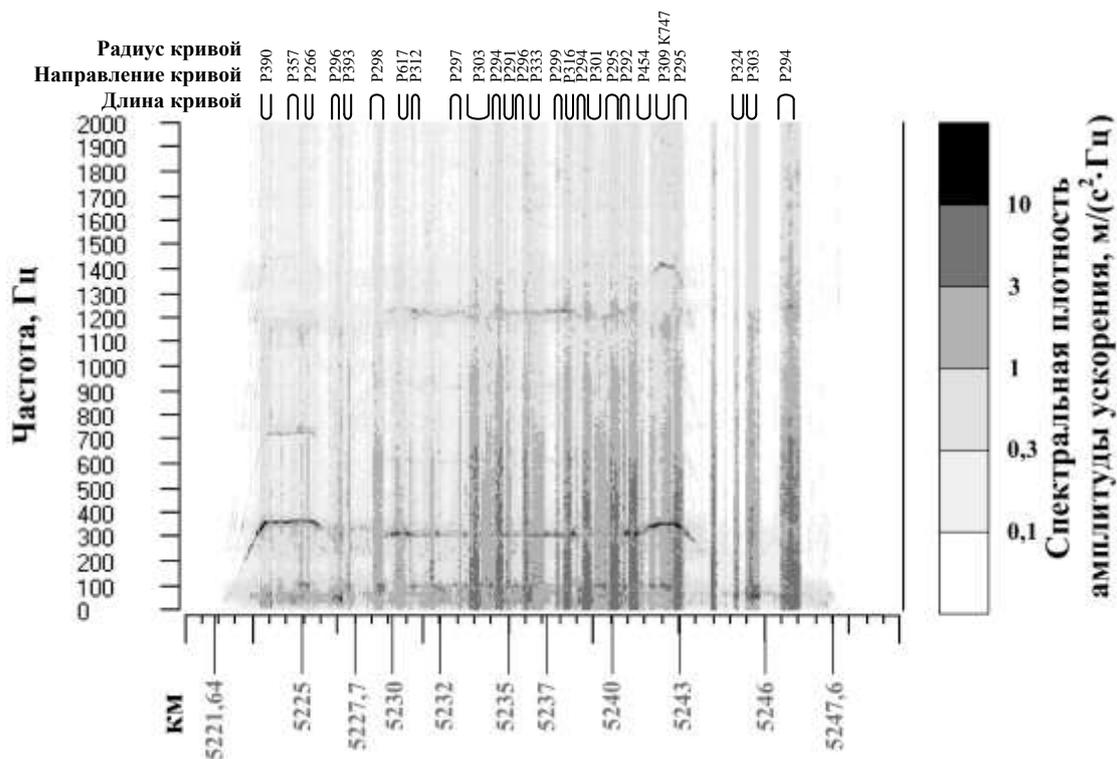


Рис. 13. Зависимость спектральной плотности амплитуды ускорения вибрации  
 буксы колесной пары по оси Z от времени  
 Fig. 13. Dependence of spectral density of acceleration amplitude of wheelset box  
 vibration along Z axis on time

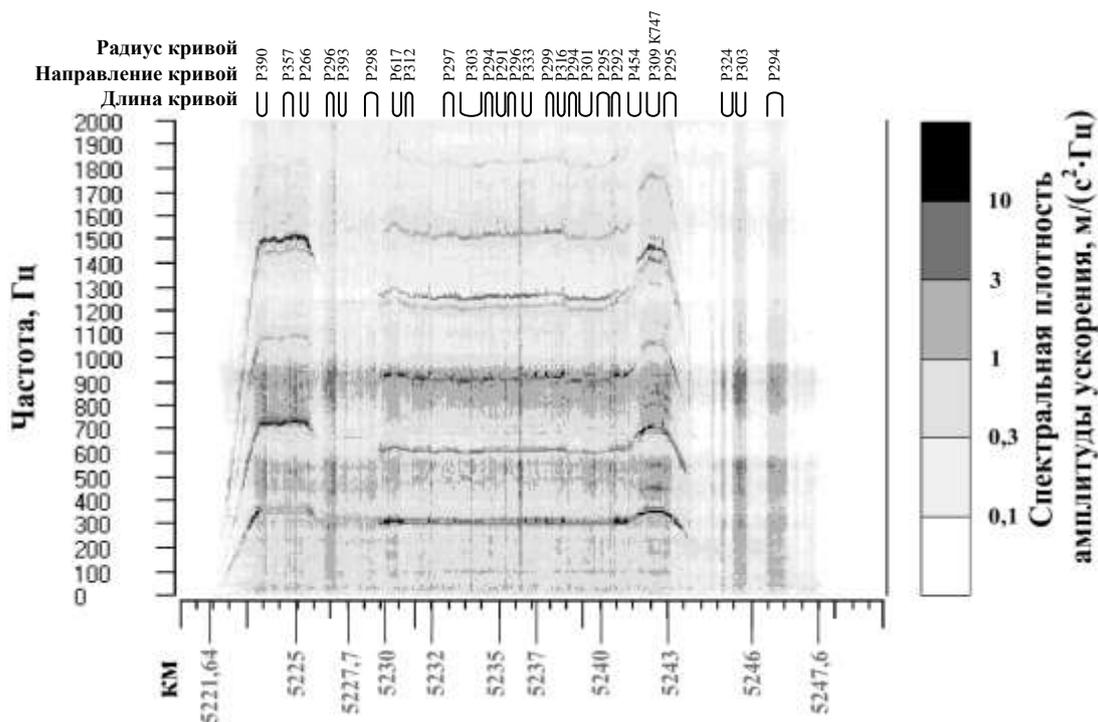


Рис. 14. Зависимость спектральной плотности амплитуды ускорения вибрации  
 на кожухе зубчатой передачи по оси X от времени  
 Fig. 14. Dependence of spectral density of vibration acceleration amplitude on the gear casing  
 along X axis on time







Библиографический список

1. Iwnicki S.D., Bevan A.J. Damage to Railway Wheels and Rails: A Review of the Causes, Prediction Methods, Reduction and Allocation of Costs // *International Journal of Railway Technology*. 2012. Vol. 1. Issue 1. P. 121–146. <https://doi.org/10.4203/ijrt.1.1.6>
2. Cigada A., Manzoni S., Vanali M. Vibro-acoustic characterization of railway wheels // *Applied Acoustics*. 2008. Vol. 69. Issue 6. P. 530–545. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2007.01.002>
3. Черняк А.Ю., Гриндей Е.О., Кравченко Е.А., Кравченко К.А. Проблема износа трибосистемы «колесо – рельс» // *Вісник Хмельницького національного університету*. 2014. № 6. С. 53–58.
4. Giannakos K. Modeling the influence of short wavelength defects in a railway track on the dynamic behavior of the Non-Suspended Masses // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2016. Vol. 68-69. P. 68–83. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2015.07.020>
5. Thakkar N.A., Steel J.A., Reuben R.L. Rail-wheel interaction monitoring using Acoustic Emission: A laboratory study of normal rolling signals with natural rail defects // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2010. Vol. 24. Issue 1. P. 256–266. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2009.06.007>
6. Харрис У.Дж., Захаров С.М., Ландарен Дж., Торне Х., Эберсен В. Обобщение передового опыта тяжеловесного движения: вопросы взаимодействия колеса и рельса / пер. с англ. М.: Интекст, 2002. 408 с.
7. Самме Г.В. Фрикционное взаимодействие колесных пар локомотива с рельсами. Теория и практика сцепления локомотива: монография. М.: Учеб.-метод. центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2014. 104 с.
8. Muszynska A. Vibrational Diagnostics of Rotating Machinery Malfunctions // *International Journal of Rotating Machinery*. 1995. Vol. 1. No. 3-4. P. 237–266. <https://doi.org/10.1155/S1023621X95000108>
9. Khadersab A., Shivakumar S.Dr. Vibration Analysis Techniques for Rotating Machinery and its effect on Bearing Faults // *Procedia Manufacturing*. 2018. Vol. 20. P. 247–252. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.036>
10. Tang Jian, Zhao Lijie, Yue Heng, Yud Wen, Chai Tianyou. Vibration Analysis Based on Empirical Mode Decomposition and Partial Least Square // *Procedia Engineering*. 2011. Vol. 16. P. 646–652. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.08.1136>
11. You Lei, Hu Jun, Fang Fang, Duan Lintao. Fault Diagnosis System of Rotating Machinery Vibration Signal // *Procedia Engineering*. 2011. Vol. 15. P. 671–675. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.08.125>
12. Baasch B., Groos J.C., Roth M. Sensorgestützte Anomalie-Detektion zur Zustandsbewertung der Schiene mit Regelzügen // *Eisenbahntechnische Rundschau*. 2018. No. 12. P. 32–35.
13. Groos J.C., Roth M., Havrila P. Zustandsüberwachung mit kostengünstigen Multi-Sensor-Systemen // *El-Der Eisenbahningenieur*. 2017. No. 10. P. 41–45.
14. An Boyang, Wang Ping, Xiao Jieling, Xu Jingmang, Chen Rong. Dynamic Response of Wheel-Rail Interaction at Rail Weld in High-Speed Railway // *Hindawi*. 2017. 11 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.hindawi.com/journals/sv/2017/5634726/> (15.02.2019). <https://doi.org/10.1155/2017/5634726>
15. Zhao Xin, Wen Ze-feng, Wang Heng-yu, Jin Xue-song, Zhu Min-hao. Modeling of high-speed wheel-rail rolling contact on a corrugated rail and corrugation development // *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*. 2014. Vol. 15. No. 12. P. 946–963. <https://doi.org/10.1631/jzus.A1400191>
16. An Boyang, Wang Ping, Xu Jingmang, Chen Rong, Cui Dabin. Observation and Simulation of Axle Box Acceleration in the Presence of Rail Weld in High-Speed Railway // *Applied Sciences*. 2017. Vol. 7. Issue 12. P. 16. <https://doi.org/10.3390/app7121259>
17. Molodova M., Li Zili, Núñez A., Dollevoet R. Validation of a finite element model for axle box acceleration at squats in the high frequency range // *Computers and Structures*. 2014. No. 141. P. 84–93. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2014.05.005>
18. Molodova M., Li Zili, Núñez A., Dollevoet R. Parametric study of axle box acceleration at squats // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2015. Vol. 229. Issue 8. P. 841–851. <https://doi.org/10.1177/0954409714523583>
19. Núñez A., Hendriks J., Moraal J., Ramirez I., Dollevoet R., Li Zili. Rail Condition Monitoring using Axle Box Acceleration Measurements: defect detection in the Netherlands and Romania // *Proceedings of the 2018 World Transport Convention*. 2018. P. 12. [Электронный ресурс]. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/91d6/ab34a4bd43b0b46952e0b7d14234891e58e2.pdf> (15.02.2019).
20. Boogaard M.A., Li Zili, Dollevoet R.P.B.J. In situ measurements of the crossing vibrations of a railway turnout // *Measurement*. 2018. Vol. 125. P. 313–324. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.04.094>
21. Лукьянов А.В., Алейников Д.П., Портной А.Ю. Система защиты обрабатывающих центров от опасных динамических нагрузок на основе анализа параметров вибрации и силы // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2017. Т. 21. № 4. С. 30–38. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-4-30-38>
22. Kovacevic J., Goyal V.K., Vetterli M. Fourier and Wavelet Signal Processing // *Creative Commons*. 2013. [Электронный ресурс]. URL: <https://b-ok.cc/ireader/2863473> (15.02.2019).



### References

1. Iwnicki SD, Bevan AJ. Damage to Railway Wheels and Rails: A Review of the Causes, Prediction Methods, Reduction and Allocation of Costs. *International Journal of Railway Technology*. 2012;1(1):121–146. <https://doi.org/10.4203/ijrt.1.1.6>
2. Cigada A, Manzoni S, Vanali M. Vibro-Acoustic Characterization of Railway Wheels. *Applied Acoustics*. 2008;69(6):530–545. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2007.01.002>
3. Chernyak AY, Gryndei OO, Kravchenko KA, Kravchenko CA. The Problem of Wear Tribosystem "Wheel - Rail". *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки = Herald of Khmelnytskyi National University*. 2014;6:53–58.
4. Giannakos K. Modeling the Influence of Short Wavelength Defects in a Railway Track on the Dynamic Behavior of the Non-Suspended Masses. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2016;68-69:68–83. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2015.07.020>
5. Thakkar NA, Steel JA, Reuben RL. Rail–Wheel Interaction Monitoring Using Acoustic Emission: A Laboratory Study of Normal Rolling Signals with Natural Rail Defects. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2010;24(1):256–266. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2009.06.007>
6. Harris UDzh, Zaharov SM, Landaren Dzh, Torne H, Ebersen V. Summarized Best Practices of Heavy Traffic: Issues of Wheel-Rail Interaction, 2002, 408 p. (Russ. ed.: *Obobshchenie peredovogo opyta tyazhelevosnogo dvizheniya: voprosy vzaimodejstviya koleasa i rel'sa*. Moscow, Intekst, 2002, 408 p.)
7. Samme GV. Frictional Interaction of Locomotive Wheelsets and Rails. Theory and Practice of Locomotive Coupling: a monograph. Moscow: Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte; 2014, 104 p. (In Russ.)
8. Muszynska A. Vibrational Diagnostics of Rotating Machinery Malfunctions. *International Journal of Rotating Machinery*. 1995;1(3-4):237–266. <https://doi.org/10.1155/S1023621X95000108>
9. Khadersab A, Shivakumar SDr. Vibration Analysis Techniques for Rotating Machinery and its Effect on Bearing Faults. *Procedia Manufacturing*. 2018;20:247–252. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.036>
10. Tang Jian, Zhao Lijie, Yue Heng, Yud Wen, Chai Tianyou. Vibration Analysis Based on Empirical Mode Decomposition and Partial Least Square. *Procedia Engineering*. 2011;16:646–652. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.08.1136>
11. You Lei, Hu Jun, Fang Fang, Duan Lintao. Fault Diagnosis System of Rotating Machinery Vibration Signal. *Procedia Engineering*. 2011;15:671–675. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.08.125>
12. Baasch B, Groos JC, Roth M. Sensorgestützte Anomalie-Detektion zur Zustandsbewertung der Schiene mit Regelzügen. *Eisenbahntechnische Rundschau*. 2018;12:32–35.
13. Groos JC, Roth M, Havrila P. Zustandsüberwachung mit kostengünstigen Multi-Sensor-Systemen. *El-Der Eisenbahningenieur*. 2017;10:41–45.
14. An Boyang, Wang Ping, Xiao Jieling, Xu Jingmang, Chen Rong. Dynamic Response of Wheel-Rail Interaction at Rail Weld in High-Speed Railway. *Hindawi*. 2017;11. Available from: <https://www.hindawi.com/journals/sv/2017/5634726/> [Accessed 15th February 2019]. <https://doi.org/10.1155/2017/5634726https://doi.org/10.1155/2017/5634726>
15. Zhao Xin, Wen Ze-feng, Wang Heng-yu, Jin Xue-song, Zhu Min-hao. Modeling of High-Speed Wheel-Rail Rolling Contact on a Corrugated Rail and Corrugation Development. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*. 2014;15(12):946–963. <https://doi.org/10.1631/jzus.A1400191>
16. An Boyang, Wang Ping, Xu Jingmang, Chen Rong, Cui Dabin. Observation and Simulation of Axle Box Acceleration in the Presence of Rail Weld in High-Speed Railway. *Applied Sciences*. 2017;7(12):16. <https://doi.org/10.3390/app7121259>
17. Molodova M, Li Zili, Núñez A, Dollevoet R. Validation of a Finite Element Model for Ax-Le Box Acceleration at Squats in the High Frequency Range. *Computers and Structures*. 2014;141:84–93. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2014.05.005>
18. Molodova M, Li Zili, Núñez A, Dollevoet R. Parametric Study of Axle Box Acceleration at Squats. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2015;229(8):841–851. <https://doi.org/10.1177/0954409714523583>
19. Núñez A, Hendriks J, Moraal J, Ramirez I, Dollevoet R, Li Zili. Rail Condition Monitoring using Axle Box Acceleration Measurements: Defect Detection in the Netherlands and Romania. In: *Proceedings of the 2018 World Transport Convention*. 2018;12. Available from: <https://pdfs.semanticscholar.org/91d6/ab34a4bd43b0b46952e0b7d14234891e58e2.pdf> [Accessed 15th February 2019].
20. Boogaard MA, Li Zili, Dollevoet RPB. In Situ Measurements of the Crossing Vibrations of a Railway Turnout. *Measurement*. 2018;125:313–324. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.04.094>
21. Lukyanov AV, Aleinikov DP, Portnoy AY. Vibration and Force Parameter Analysis-Based System of Machining Center Protection from Dangerous Dynamic Loads. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2017;21(4):30–38. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-4-30-38>
22. Kovacevic J, Goyal VK, Vetterli M. Fourier and Wavelet Signal Processing. *Creative Commons*. 2013. Available from: <https://b-ok.cc/ireader/2863473> [Accessed 15th February 2019].

#### **Критерии авторства**

Портной А.Ю., Мельниченко О.В., Селедцов К.П., Линьков А.О., Яговкин Д.А., Шрамко С.Г., Грузин Г.Г. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

##### **Портной Александр Юрьевич,**

доктор физико-математических наук, доцент,  
доцент кафедры «Физика, механика  
и приборостроение»,  
Иркутский государственный университет  
путей сообщения,  
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия;  
e-mail: portnoyalex@yandex.ru

##### **Мельниченко Олег Валерьевич,**

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Электроподвижной состав»,  
Иркутский государственный университет  
путей сообщения,  
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия;  
e-mail: olegmelnval@mail.ru

##### **Селедцов Константин Павлович,**

аспирант,  
Иркутский государственный университет  
путей сообщения,  
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия;  
✉ e-mail: kostyans7kss@gmail.com

##### **Линьков Алексей Олегович,**

кандидат технических наук, доцент  
доцент кафедры «Электроподвижной состав»,  
Иркутский государственный университет  
путей сообщения,  
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия;  
e-mail: linkovalex@mail.ru

##### **Яговкин Дмитрий Андреевич,**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Электроподвижной состав»,  
Иркутский государственный университет  
путей сообщения,  
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия;  
e-mail: yagovkinda@mail.ru

#### **Authorship criteria**

Portnoy A.Yu., Melnichenko O.V., Seledtsov K.P., Linkov A.O., Yagovkin D.A., Shramko S.G., Gruzin G.G. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

#### **Conflict of interests**

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

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

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

##### **Aleksandr Yu. Portnoy,**

Dr. Sci. (Physics and Mathematics),  
Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Physics,  
Mechanics and Instrument Engineering,  
Irkutsk State Transport University,  
15, Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia;  
e-mail: portnoyalex@yandex.ru

##### **Oleg V. Melnichenko,**

Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Head of the Department of Electric Rolling Stock,  
Irkutsk State Transport University,  
15, Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia;  
e-mail: olegmelnval@mail.ru

##### **Konstantin P. Seledtsov,**

Postgraduate Student,  
Irkutsk State Transport University,  
15, Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia;  
✉ e-mail: kostyans7kss@gmail.com

##### **Aleksey O. Linkov,**

Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor of the Department  
of Electric Rolling Stock,  
Irkutsk State Transport University,  
15, Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia;  
e-mail: linkovalex@mail.ru

##### **Dmitriy A. Yagovkin,**

Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor of the Department  
of Electric Rolling Stock,  
Irkutsk State Transport University,  
15, Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia;  
e-mail: yagovkinda@mail.ru



**Шрамко Сергей Геннадьевич,**  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Электроподвижной состав»,  
Иркутский государственный университет  
путей сообщения,  
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия;  
e-mail: novorossereg@mail.ru

**Грузин Геннадий Григорьевич,**  
аспирант,  
Иркутский государственный университет  
путей сообщения,  
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия;  
e-mail: margeni@mail.ru

**Sergey G. Shramko,**  
Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor of the Department  
of Electric Rolling Stock,  
Irkutsk State Transport University,  
15, Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia;  
e-mail: novorossereg@mail.ru

**Gennadiy G. Gruzin,**  
Postgraduate Student,  
Irkutsk State Transport University,  
15, Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia;  
e-mail: margeni@mail.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.7.013

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-548-560>

## Титановый сплав VT22: исследование зависимости выходных параметров токарной обработки от геометрии режущего инструмента

© А.Г. Серебренникова, В.Б. Гурылев

*Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия*

**Резюме:** Цель – установить влияние переднего угла  $\gamma$  (в диапазоне от  $-8^\circ$  до  $+10^\circ$  при постоянном заднем угле  $\alpha+6^\circ$ ) токарного резца из твердого сплава BK8 на выходные параметры (силу резания, шероховатость, износ режущей кромки по передней и задней поверхностям) при точении заготовки из титанового сплава VT22. Для определения сил резания использовался динамометрический анализ с помощью лабораторного стенда STD.201-1. Точение заготовки производилось при постоянной скорости резания равной 50 м/мин, глубине резания 3 мм и при значениях подачи движения резца вдоль заготовки 0,11, 0,15, 0,21 мм/об. Измерение шероховатости производилось профилометром TR200, износ режущей кромки – при помощи измерительной машины Micro Vu-Sol-1. Установлено, что наибольшее значение (2000 Н) тангенциальной силы резания достигнуто при подаче равной 0,21 мм/об, при этом зафиксирован самый большой перепад (равный 400 Н) значений тангенциальной силы резания в зависимости от изменения значений  $\gamma$  в диапазоне от  $-8^\circ$  до  $+10^\circ$ . При подаче 0,11 мм/об такой перепад составил 300 Н, при подаче 0,15 мм/об – 100 Н. Измеренная при заданных значениях подачи шероховатость находится в допустимых пределах чистоты поверхности, соответствующей 8–9 классу чистоты (кроме  $\gamma = +10^\circ$ ). По полученным результатам рекомендован выбор значений режимов токарной обработки заготовок из титанового сплава VT22 по различным критериям: фиксированной тангенциальной силе резания – подача 0,11 мм/об ( $\gamma = +10^\circ$ ); значениям шероховатости – подача 0,11 и 0,21 мм/об (при всех выбранных значениях  $\gamma$ ) или 0,15 мм/об (для  $\gamma = -4, 0, +4, +8^\circ$ ); износу режущей кромки – подача 0,11 мм/об при  $\gamma$  от  $-8^\circ$  до  $-2^\circ$ , 0,15 мм/об (при  $\gamma = -4^\circ, 0^\circ, 2^\circ, 4^\circ, 8^\circ, 10^\circ$ ), 0,21 мм/об (при  $\gamma = -4^\circ, -2^\circ, 2^\circ, 4^\circ, 6^\circ, 8^\circ, 10^\circ$ ).

**Ключевые слова:** точение, титан, геометрия инструмента, износ инструмента, силы резания, шероховатость поверхности

**Информация о статье:** Дата поступления 02 апреля 2020 г.; дата принятия к печати 08 мая 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 июня 2020 г.

**Для цитирования:** Серебренникова А.Г., Гурылев В.Б. Титановый сплав VT22: исследование зависимости выходных параметров токарной обработки от геометрии режущего инструмента. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 3. С. 548–560. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-548-560>

## VT22 titanium alloy: study of the cutting tool geometry effect on output parameters of turning process

Anzhela G. Serebrennikova, Vladimir B. Gurylyov

*Komsomolsk-na-Amure State University, Komsomolsk-na-Amure, Russia*

**Abstract:** The aim of the present work consists in studying the effect of the rake angle (in the range from  $-8^\circ$  to  $+10^\circ$  with a constant relief angle of  $+6^\circ$ ) of a VK8 hard material turning tool on the output parameters (cutting force, roughness, wear of the cutting edge at the rake and flank surfaces) in turning a VT22 titanium alloy billet. In order to determine the cutting forces, a dynamometric analysis was performed using the STD. 201-1 laboratory bench. The turning of the billet was carried out at a constant cutting speed of 50 m/min, a cutting depth of 3 mm and feed values of the tool movement along the billet equal to 0.11, 0.15 and 0.21 mm/rev. A TR200 profilometer and Micro Vu-Sol-1 measuring machine were applied for determining the roughness and wear of the cutting edge, respectively. The highest value (2000 N) of the tangential cutting force was established to be achieved with a 0.21 mm/rev feed, while the largest difference (400 N) of the tangential cutting force was recorded depending on the  $\gamma$  value variation in the range from  $-8^\circ$  to  $+10^\circ$ . For a feed rate of 0.11 and 0.15 mm/rev, this difference amounted to 300 and 100 N, respectively. The roughness measured

at specified feed values lies within the acceptable range of surface cleanliness corresponding to 8–9 grade (except for  $\gamma = +10^\circ$ ). Based on the results, the following mode selection algorithm for turning of a VT22 titanium alloy billet is proposed according to various criteria: fixed tangential cutting force – 0.11 mm/rev feed rate ( $\gamma = +10^\circ$ ); roughness values – 0.11 and 0.21 mm/rev feed rate (for all selected  $\gamma$  values) or 0.15 mm/rev (for  $\gamma = -4, 0, +4, +8^\circ$ ); wear of the cutting edge – feed rate of 0.11 mm/rev at  $\gamma$  from  $-8^\circ$  to  $-2^\circ$ , 0.15 mm/rev (at  $\gamma = -4^\circ, 0^\circ, 2^\circ, 4^\circ, 8^\circ, 10^\circ$ ), 0.21 mm/rev (at  $\gamma = -4^\circ, -2^\circ, 2^\circ, 4^\circ, 6^\circ, 8^\circ, 10^\circ$ ).

**Keywords:** turning, titanium, cutting tool geometry, cutter wear, cutting forces, surface roughness

**Information about the article:** Received April 02, 2020; accepted for publication May 08, 2020; available online June 30, 2020.

**For citation:** Serebrennikova AG, Gurylyov VB. VT22 titanium alloy: study of the cutting tool geometry effect on output parameters of turning process. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(3):548–560. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-548-560>

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Обработка металлов резанием – наиболее распространенная и трудоемкая часть работ, совершаемых при изготовлении деталей машин. Поэтому снижение затрат труда и времени на ее выполнение является одним из главных направлений дальнейшего увеличения производительности в современном машиностроении. Решение этих задач путем исследования явлений и закономерностей при резании, совершенствование конструкций и геометрии режущих инструментов, а также создание новых, более эффективных способов обработки составляют основное содержание науки о резании металлов.

Изучение процессов токарной обработки титановых сплавов имело свое развитие<sup>1-3</sup> [2–9]. Так как титановые сплавы относятся к труднообрабатываемым материалам, их обработка сопряжена с определенными проблемами, отчасти возникающими оттого, что высокопроизводительная механическая обработка титана – новая область, и в ней не накоплено достаточно опыта. Ограниченное количество исследований посвящено высокопроизводительному точению титановых сплавов, и только в некоторых из них рассмотрены отечественные титановые сплавы, которые по своим механическим свойствам и обрабатываемости

резанием отличаются от зарубежных [10–16]. Как правило, авторы концентрируют внимание на исследовании зависимости выходных параметров обработки, таких как силы резания, вибрации, качество обработанной поверхности от параметров обработки и геометрии режущей части инструмента. Геометрия режущей части токарного инструмента и режимы резания должны быть оптимальными, с целью обеспечения экономически обоснованной стойкости режущей кромки инструмента и достижения заданной шероховатости поверхности.

Согласно литературным источникам [4–9], вопросы влияния геометрии режущей части на процесс обработки находились в фокусе исследований длительное время. Но данные исследования посвящены вопросам точения материалов, которые были актуальны в промышленности в тот период и в настоящее время, либо не так часто применяются, или вообще сняты с производства.

Следует также заметить, что геометрия токарных инструментов для высокопроизводительной обработки отличается от геометрии классических резцов [17–25]. Также отличаются стратегия обработки и принципы расчета режимов резания. Следовательно, закономерности и зависимости, полученные ранее для классической обработки, требуют корректировки и до-

<sup>1</sup> Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов: учебник. М.: Высш. шк., 1985. 304 с.

<sup>2</sup> Петрушин С.И. Введение в теорию несвободного резания материалов: учеб. пособ. Томск: Изд-во ТПУ, 1999. 97 с.

<sup>3</sup> Режимы резания труднообрабатываемых материалов: справочник / Я.Л. Гуревич, М.В. Горохов, В.И. Захаров и др. Изд. 2-е, перераб и доп. М: Машиностроение, 1986. 240 с.



полнительных исследований для последующего использования в реальном производстве.

Титановые сплавы последнего поколения VT20, VT22, VT23 в основном применяются в авиационной и ракетной промышленности, судостроении. В авиационной технике, где стремятся получить наиболее легкую конструкцию в сочетании с необходимой прочностью, из титановых сплавов изготавливают обшивку, детали крепления, силовой набор, фитинги, центроплан, детали шасси, карданы и прочие агрегаты. Также данные материалы применяются в конструкциях авиационных реактивных двигателей.

Задача исследования заключалась в определении зависимостей выходных параметров от геометрии инструмента и режимов резания при точении титанового сплава VT22 на универсальном оборудовании с применением современной исследовательской аппаратуры. К выходным параметрам относятся силы резания в трех направлениях ( $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$ ), температура ( $T$ ), шероховатость поверхности ( $R_a$ ) и износ инструмента по задней поверхности ( $h_z$ ).

## 2. МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Титановый деформируемый сплав VT22 используется для получения высоконагруженных деталей и конструкций, длительно работающих до температур 350—400°C (силовые детали фюзеляжа, крыла, штамповки, детали системы управления, крепежные детали типа ушковых болтов).

Сплав VT22 ( $\alpha + \beta$ )-класса относится к сильнолегированным высокопрочным сплавам системы Ti–Al–Mo–V–Fe–Cr. Структура и свойства сплава VT22 зависят от колебания химического состава в пределах, установленных техническими условиями. По структуре в закаленном состоянии

– это сплав переходного класса.

Наличие хрома в составе сплава VT22 повышает его сопротивление коррозии, а вместе с молибденом и ванадием значительно влияет на прочность и твердость сплава. Эти свойства, которые придают VT22 статус наиболее подходящего материала для изготовления деталей, оказывают значительный эффект на его обрабатываемость. В результате обработка сопровождается высокими и концентрированными силами, действующими на режущую кромку. Это часто приводит к вибрациям при резании и к быстрому износу режущей кромки инструмента.

Для проведения эксперимента применялся лабораторный стенд STD.201-1 (рис. 1), который представляет собой динамометр с программным обеспечением. Динамометр предназначен для проведения научно-исследовательских и лабораторных работ с целью изучения динамических, вибрационных и тепловых процессов, протекающих при резании металлов в различных режимах токарных станков [1].

Для измерения динамометрических данных по осям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , проекций виброскопления  $A_x$ ,  $A_y$ ,  $A_z$ , сил резания  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  в динамометр устанавливают режущий инструмент, заготовку закрепляют в патроне станка. При вращении заготовки детали и перемещении динамометра с резцом относительно заготовки осуществляется резание с заданной глубиной, что сопровождается регистрацией составляющих сил резания по указанным осям, регистрацией вибраций в направлениях указанных осей.

В качестве режущего инструмента был выбран токарный резец подрезной отогнутый с напайными пластинами из твердого сплава BK8 (ГОСТ 18880-73<sup>4</sup>). В литературных источниках отмечено, что передний угол  $\gamma$  оказывает ключевое влияние на процесс резания [2–9].

<sup>4</sup>ГОСТ 18880-73. Резцы токарные подрезные отогнутые с пластинами из твердого сплава. Конструкция и размеры. Введ. постановлением № 1429 Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 01.07.1974. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2003.



Рис. 1. Лабораторный стенд для исследования сил резания  
 Fig. 1. Laboratory test bench for studying cutting forces

Всего было задействовано 10 таких резцов (рис. 2) с передним углом  $\gamma$ , изменяющимся от  $-8^\circ$  до  $+10^\circ$  с шагом  $2^\circ$  (таблица). Задний угол при этом был постоянным и составлял  $\alpha = 6^\circ$ . Главный угол в плане  $\varphi = 90^\circ$ .

Значения данных геометрических параметров были выбраны с целью проверки гипотезы влияния переднего и заднего углов, приведенной в работе [25], на динамику резания и стойкость инструмента.

Влияние переднего и заднего углов на процесс резания и принципы их выбора описаны в литературных источниках [4, 8–9, 18–20]. Передний угол влияет на силу резания через изменение условий деформации. С увеличением переднего угла (уменьшением угла резания) увеличивается угол сдвига, уменьшается коэффициент усадки стружки, а, следовательно, и сила резания.

**Геометрия режущего инструмента для проведения экспериментов**  
**Geometry of the cutting tool for experiments**

Номер резца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Задний угол $\alpha, ^\circ$	+6									
Передний угол $\gamma, ^\circ$	-8	-6	-4	-2	0	+2	+4	+6	+8	+10



Рис. 2. Токарные подрезные отогнутые резцы  
 Fig. 2. Turning bent facing cutters



В зависимости от характера и степени износа изменение сил может происходить в различных направлениях. Например, износ резцов по задней поверхности сопровождается увеличением силы резания. При преобладающем износе по передней поверхности сила резания может и снижаться.

Одним из отрицательных явлений при обработке титановых сплавов является явление адгезии, а в некоторых случаях происходит поверхностное упрочнение титановых сплавов, что способствует существенному затуплению режущего инструмента. Содержание углерода более чем 0,2% способствует образованию карбида титана (предел растворимости углерода в титановом сплаве составляет 0,2%); если содержание углерода в титановом сплаве превосходит это число, то образуются твердые карбиды титана, которые действуют на режущую кромку инструмента как абразив и затупляют ее.

Повышение обрабатываемости резанием осуществляется за счет оптимизации геометрии режущей части инструмента. Проведенный анализ зарубежной [11–17] и отечественной литературы [2–9] показал, что увеличение переднего угла приводит к

уменьшению сопротивления резания и прочности лезвия. Лезвие резца с отрицательным углом  $\gamma$  прочнее резца с положительным передним углом  $\gamma$ . С увеличением прочности обрабатываемого материала и снижением прочности инструментального материала передний угол необходимо уменьшать.

**Силы резания.** Величина силы резания, необходимая для преодоления сопротивления материалов при снятии стружки, зависит от ряда факторов: обрабатываемого материала, глубины резания, подачи, углов заточки резца, скорости резания ( $V$ ) и др. Схема сил резания при точении приведена на рис. 3.

Описывать процессы при точении при разных подачах будем по составляющей силе  $P_z$ , т.к. составляющая  $P_z$  действует в направлении  $V$  и называется «тангенциальной» силой резания. Поскольку она обычно лишь на 6–10% меньше полной силы резания  $R$ , то ее называют «усилием» резания.

**Режимы обработки.** Скорость резания была постоянной – 50 м/мин. Глубина резания  $t = 3$  мм. Менялась только подача  $S$ , значения которой составляли: 0,11; 0,15; 0,21 мм/об.

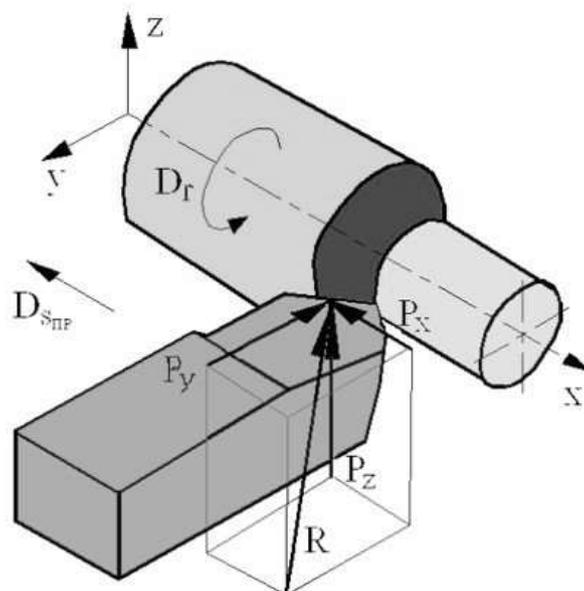


Рис. 3. Составляющие сил резания при токарной обработке  
Fig. 3. Components of cutting forces under turning

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные зависимости сил резания от переднего угла  $\gamma$  при различных значениях подачи приведены на рис. 4–6 [1].

Анализ зависимостей показывает, что при точении с подачей 0,11 мм/об (рис. 4), с увеличением  $\gamma$  до  $+10^\circ$ , сила резания

$P_z$  постепенно уменьшается. Ее значение изменяется от 1100 до 1000 Н (диапазон изменения составил всего 100 Н).

При точении с подачей  $S = 0,15$  мм/об (рис. 5) сила резания  $P_z$  изменилась, значение при переднем угле  $-8^\circ$  равно 1600 Н, и при увеличении переднего угла на значении  $+10^\circ$  она равна 1300 Н. Перепад значений равен 300 Н.

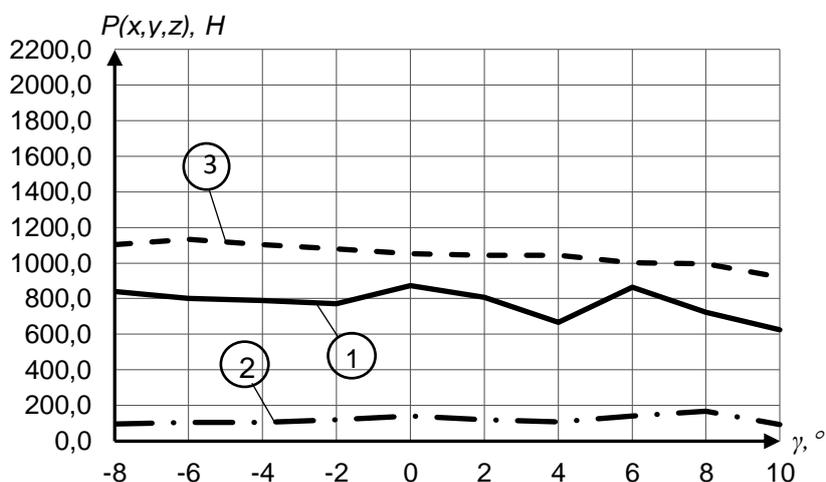


Рис. 4. Полученные зависимости сил резания от переднего угла резца при подаче  $S = 0,11$  мм/об: кривая 1 – сила  $P_x$ ; кривая 2 – сила  $P_y$ ; кривая 3 – сила  $P_z$   
 Fig. 4. Obtained dependences of the cutting forces on the cutter front corner at the feed  $S = 0.11$  mm/rev: curve 1 – cutting force  $P_x$  (N); curve 2 – cutting force  $P_y$  (N); curve 3 – cutting force  $P_z$  (N)

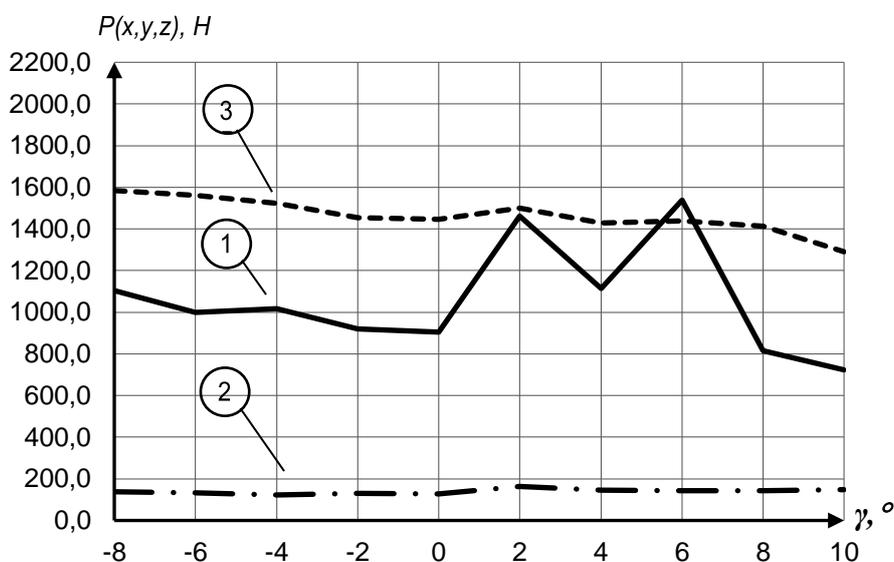


Рис. 5. Полученные зависимости сил резания от переднего угла резца при подаче  $S = 0,15$  мм/об: кривая 1 – сила  $P_x$ ; кривая 2 – сила  $P_y$ ; кривая 3 – сила  $P_z$   
 Fig. 5. Obtained dependences of the cutting forces on the cutter front corner at the feed  $S = 0.15$  mm/rev: curve 1 – cutting force  $P_x$  (N); curve 2 – cutting force  $P_y$  (N); curve 3 – cutting force  $P_z$  (N)



Значение силы резания  $P_z$  при подаче  $S = 0,21$  мм/об (рис. 6) уже равно 2000 Н. В данном случае перепад сил от  $-8$  до  $+10^\circ$  составляет уже 400 Н.

Проведенный анализ по графикам с изменением подачи однозначно показывает, что с увеличением подачи значение силы  $P_z$  увеличивается, что подтверждает классические определения из теории резания [2–9]. При увеличении глубины резания и подачи растет площадь сечения срезаемого слоя, что вызывает возрастание всех составляющих силы резания. Но если рассматривать каждый график отдельно, то получается, что с увеличением переднего угла  $\gamma$  происходит уменьшение сопротивления резания, и, соответственно, силы резания уменьшаются [22, 25].

**Шероховатость.** После обработки заготовки проводились измерения шероховатости профилометром TR200. Построены графики, показывающие влияние режимов обработки на качество поверхности, с учетом изменения переднего угла  $\gamma$  (рис. 7). Согласно полученным графикам, можно сказать, что хорошее качество поверхности получается на протяжении всех передних углов только при подачах 0,11 и 0,21 мм/об. Значение параметра  $R_a$  колеблется между 8 и 9 классами чистоты поверхности, что соответствует по параметрам чистовому

точению и может быть использовано в производстве.

Значения шероховатости  $R_a$  при подаче 0,15 мм/об носят неоднозначный характер. Если рекомендовать режим обработки, при котором нужна качественная поверхность, то нужно выбирать передний угол  $\gamma$  со значениями  $-4, 0, +4, +8^\circ$ .

**Износ.** В процессе проведения эксперимента, после каждого прохода всеми резцами, измерялась длина площадки износа по передней и задней поверхностям с использованием измерительной машины Micro Vu-Sol-1. Износ рабочих поверхностей инструмента представляет собой сложный физико-механический процесс разрушения поверхностных слоев. Интенсивность износа зависит от скорости резания и подачи.

В процессе износа на многих фотографиях наблюдалось зональное выкрашивание режущей кромки. Это происходит потому, что частицы твердого сплава уносятся сходящей стружкой и имеют разные размеры. При точении с подачей  $S = 0,11$  мм/об, начиная со значения переднего угла от 0 до  $+10^\circ$ , происходило «выламывание» частиц кромки резца, что приводило к невозможности точения. Поэтому на графиках (рис. 8, 9) нет снятых значений износа у этих параметров угла.

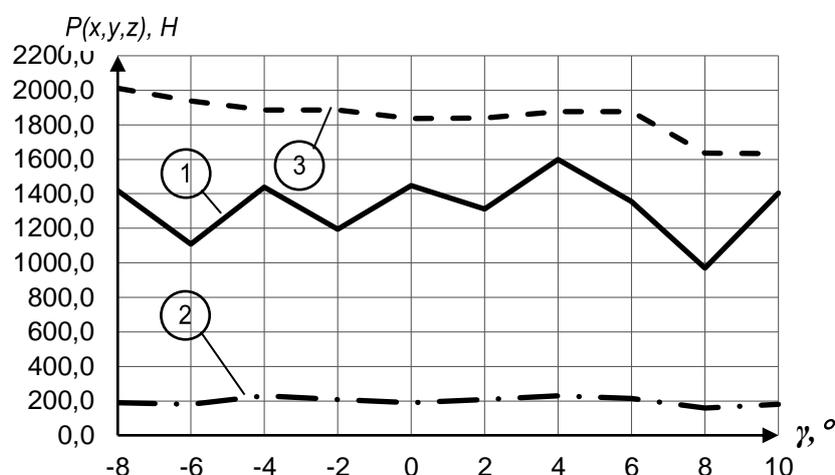


Рис. 6. Полученные зависимости сил резания от переднего угла резца при подаче  $S = 0,21$  мм/об: кривая 1 – сила  $P_x$ ; кривая 2 – сила  $P_y$ ; кривая 3 – сила  $P_z$   
Fig. 6. Obtained dependences of the cutting forces on the cutter front corner at the feed  $S = 0.21$  mm/rev: curve 1 – cutting force  $P_x$  (N); curve 2 – cutting force  $P_y$  (N); curve 3 – cutting force  $P_z$  (N)

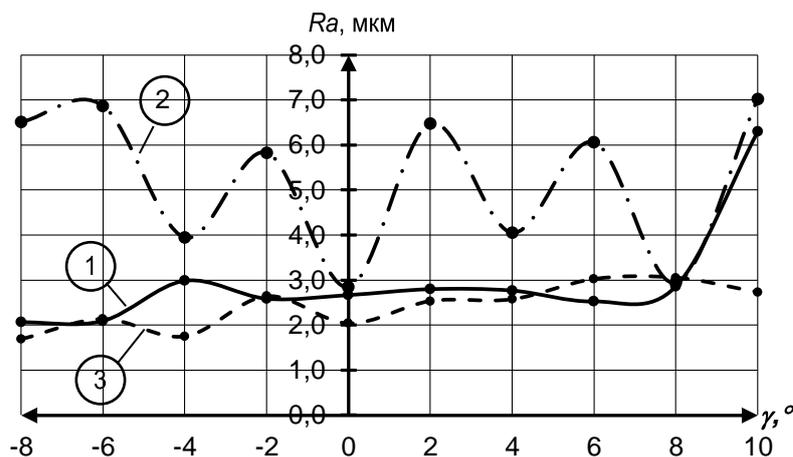


Рис. 7. Полученные зависимости шероховатости  $Ra$  от изменения подачи  $S$  и переднего угла  $\gamma$ :

кривая 1 –  $S = 0,11$  мм/об; кривая 2 –  $S = 0,15$  мм/об; кривая 3 –  $S = 0,21$  мм/об;  
 Fig. 7. Obtained dependences of roughness  $Ra$  on the variations of the feed  $S$  and the front angle  $\gamma$ :  
 curve 1 –  $S = 0.11$  mm/rev; curve 2 –  $S = 0.15$  mm/rev; curve 3 –  $S = 0.21$  mm/rev

Так как длина участков точения была одинаковая и составляла 10 мм, то время обработки зависело только от подачи, т.к. протекание износа во времени очень зависит от подачи и переднего угла как основных факторов, в данном случае  $V$  во внимание не берем [8, 9].

На рис. 8 представлены зависимости износа по передней поверхности  $h_p$ .

В целом можно отметить тенденцию всех кривых к уменьшению износа с увеличением переднего угла  $\gamma$ , если не заострять внимание на пиковых значениях в углах  $-6^\circ$ ,  $-2^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $+6^\circ$ . Быстрее всего при этих значениях происходило наростообразование (которое сопровождает процесс точения титановых сплавов) и отрыв частиц рабочих поверхностей, как было объяснено выше.

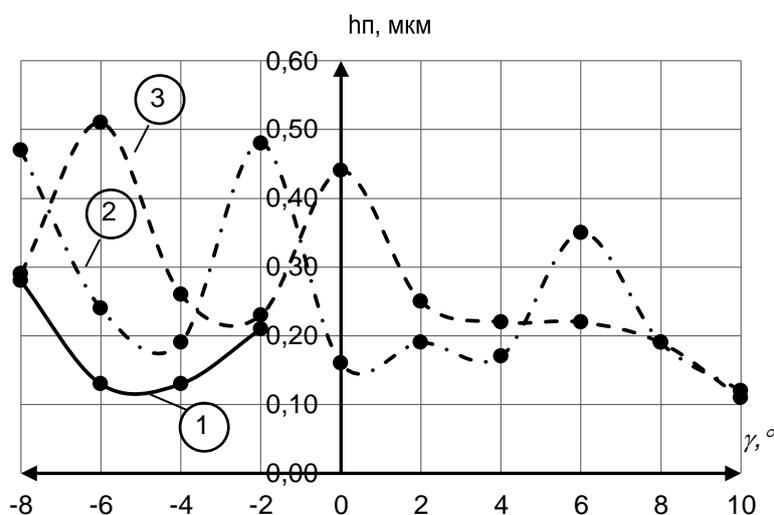


Рис. 8. Полученные зависимости износа по передней поверхности  $h_p$  от подачи  $S$

кривая 1 –  $S = 0,11$  мм/об; кривая 2 –  $S = 0,15$  мм/об; кривая 3 –  $S = 0,21$  мм/об  
 Fig. 8. Obtained dependences of the front surface  $h_p$  wear on the feed  $S$ :  
 curve 1 –  $S = 0.11$  mm/rev; curve 2 –  $S = 0.15$  mm/rev; curve 3 –  $S = 0.21$  mm/rev

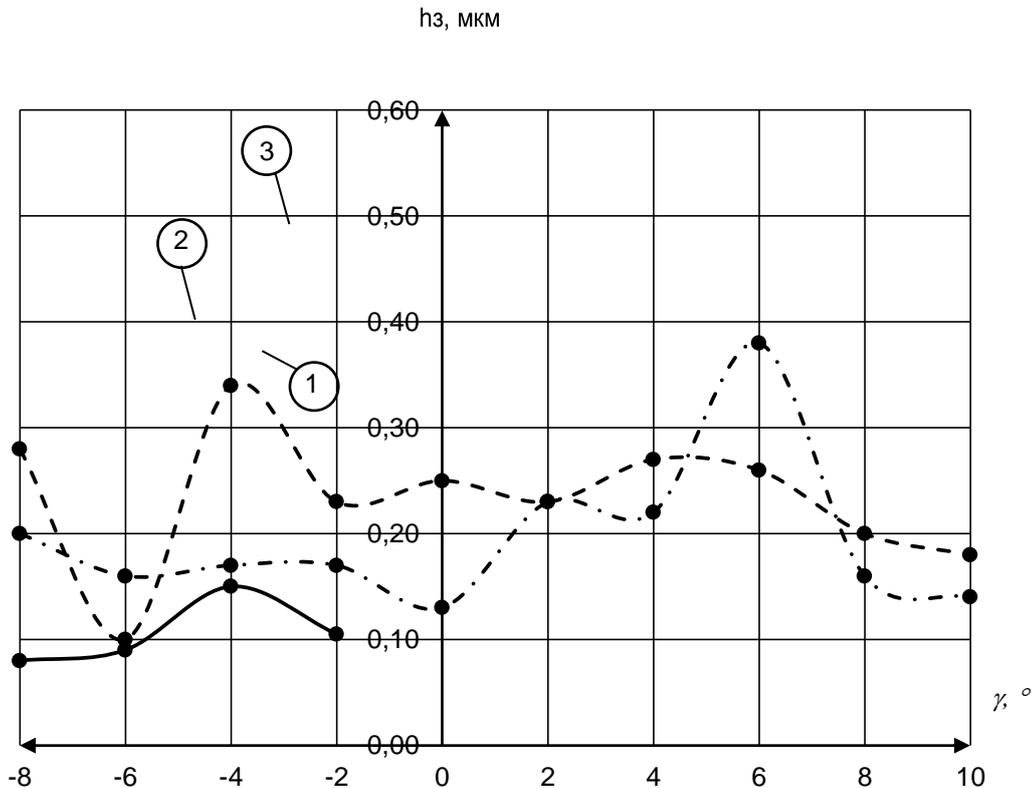


Рис. 9. Полученные зависимости износа по задней поверхности  $h_z$  от подачи  $S$ :  
кривая 1 –  $S = 0,11$  мм/об; кривая 2 –  $S = 0,15$  мм/об; кривая 3 –  $S = 0,21$  мм/об  
Fig. 9. Obtained dependences of the back surface  $h_z$  wear on the feed  $S$ :  
curve 1 –  $S = 0.11$  mm/rev; curve 2 –  $S = 0.15$  mm/rev; 3 curve –  $S = 0.21$  mm/rev

Изменение кривых износа по задней поверхности  $h_z$  (рис. 9) имеет более монотонный характер, по сравнению с износом по передней поверхности  $h_p$ , это вполне объяснимо. Привлекают внимание значения переднего угла  $\gamma$  равные  $-6^\circ$ ,  $-4^\circ$ ,  $+6^\circ$ . В среднем все значения не попадают в зону «критического» износа, и инструмент можно считать работоспособным, кроме значения подачи  $S = 0,11$  мм/об.

Проведенные исследования характера износа твердосплавного инструмента при точении титанового сплава BT22 представляют значительный интерес для решения основного вопроса обрабатываемости резанием труднообрабатываемых материалов – определение стойкости и работоспособности режущего инструмента.

Проведенные исследования позволили уточнить представление о механизме износа по передней и задней граням инструмента.

Выявлено, что износ меняется в зависимости от параметров подачи  $S$  и значения переднего угла  $\gamma$ .

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. С увеличением переднего угла  $\gamma$  сила резания  $P_z$  уменьшается при всех подачах. Значение силы резания при подаче  $S = 0,11$  мм/об изменяется с 1100 Н до 1000 Н, при подаче  $S = 0,15$  мм/об диапазон изменения увеличивается с 1600 Н до 1300 Н, при подаче  $S = 0,21$  мм/об изменяется с 2000 Н до 1600 Н. Это свидетельствует о том, что при большей подаче прилагаются большие усилия резания. Оптимальный передний угол  $\gamma$  при всех подачах равен  $+10^\circ$ .

2. Согласно полученным графикам, можно сказать, что хорошее качество поверхности получается в диапазоне всех передних углов только при подачах 0,11 и

0,21 мм/об, кроме значения угла  $+10^\circ$ . Значение параметра  $Ra$  соответствует 8 и 9 классам чистоты поверхности.

3. В среднем все значения износа по задней поверхности  $h_z$  при подачах  $S = 0,15$  и  $0,21$  мм/об не попадают в зону «критического» износа, и инструмент можно считать работоспособным, кроме значения подачи  $S = 0,11$  мм/об, начиная с угла  $0^\circ$ . Привлекают внимание значения переднего угла  $\gamma$  равные  $-6^\circ$ ,  $-4^\circ$ ,  $+6^\circ$ . Данное явление

можно объяснить внутренними процессами деформации в рабочей зоне либо появлением нароста. Износ по передней поверхности  $h_p$  имеет тенденцию к уменьшению с увеличением переднего угла  $\gamma$ . Это схоже с изменением силы резания  $P_z$  (п. 1), что позволяет предположить следующее: оптимальным передним углом  $\gamma$  в данных исследованиях является угол, который равен  $+10^\circ$ .

### Библиографический список

1. Гурылев В.Б., Серебренникова А.Г. Подбор геометрии режущего инструмента при токарной обработке титанового сплава VT22 с целью анализа выходных параметров // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы II Всероссийской национальной научн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (г. Комсомольск-на-Амуре, 8–12 апреля 2019 г). Комсомольск-на-Амуре: Изд-во КНАГУ, 2019. Т. 1. С. 66–69.
2. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975. 344 с.
3. Ящерицын П.И., Ерёменко М.Л., Жигалко Н.И. Основы резания металлов и режущий инструмент. Изд. 2-е, перераб. и доп. Мн.: Высшая школа, 1981. 560 с.
4. Остафьев В.А., Антонюк В.С., Тымчик Г.С. Диагностика процесса металлообработки. К.: Техника, 1991. 152 с.
5. Кривоухов В.А., Чубаров А.Д. Обработка резанием титановых сплавов. М.: Машиностроение, 1970. 184 с.
6. Вульф А.М. Резание металлов. Изд. 2-е. Л.: Машиностроение, 1973. 496 с.
7. Армарего И.Дж.А., Браун Р.Х. Обработка металлов резанием / пер. с англ. В.А. Пастунова. М.: Машиностроение, 1977. 325 с.
8. Куфарев Г.Л., Наумов В.А. Износ твердосплавного резца по задней грани и его влияние на силу резания // Известия Томского Ордена Октябрьской революции и Ордена Трудового красного знамени политехнического института им. С.М. Кирова. 1970. Т. 175. С. 147–153. [Электронный ресурс]. URL: [earchive.tpu.ru/bitstream/11683/9586/1/bulletin\\_tpu-1970-v157-32\\_bw.pdf](http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/9586/1/bulletin_tpu-1970-v157-32_bw.pdf) (15.06.2019).
9. Полетика М.Ф., Афонасов А.И. Характер износа твердосплавного инструмента при точении труднообрабатываемых сплавов титана // Известия Томского Ордена Октябрьской революции и Ордена Трудового красного знамени политехнического института им. С.М. Кирова. 1976. Т. 224. С. 144–147. [Электронный ресурс]. URL: [earchive.tpu.ru/bitstream/11683/11745/1/bulletin\\_tpu-1976-v224-33\\_bw.pdf](http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/11745/1/bulletin_tpu-1976-v224-33_bw.pdf) (15.06.2019).
10. Савичева Ю.М. Cutting tools wear // Студенческий научный форум: материалы XI Международной студенческой науч. конф. [Электронный ресурс]. URL: <http://scienceforum.ru/2019/article/2018015753>
11. Kovalev A., Yazhao Zhang, Hui Cao, Meng Yonggang. A Concept of the Effective Surface Profile to Predict the Roughness Parameters of Worn Surface // Frontiers in Mechanical Engineering. 2019. P. 1–11. <https://doi.org/10.3389/fmech.2019.00031>
12. Karaguzela U., Bakkal M, Budak M. Mechanical and Thermal Modeling of Orthogonal Turn-milling Operation // Procedia CIRP. 2017. Vol. 58. P. 287–292. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.191>
13. Balaji J.H., Vijayan K., Yogeswaraj S. Investigation on High Speed Turning of Titanium Alloys // Procedia Engineering. 2013. Vol. 64. P. 926–935. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.169>
14. Jagadesh T., Samuel G.L. Investigations into Cutting Forces and Surface Roughness in Micro Turning of Titanium Alloy Using Coated Carbide Tool // Procedia Materials Science. 2014. Vol. 5. P. 2450–2457. <http://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.496>
15. Chinesta F., Filice L., Micari F., Rizzuti S., Umbrello D. Assessments of Material Models Through Simple Machining Tests // International Journal of Material Forming. 2008. Issue 1. P. 507–510. <http://doi.org/10.1007/s12289-008-0171-4>
16. Belhadi S., Mabrouki T., Rigal J.-F., Boulanouar L. Experimental and Numerical Study of Chip Formation During Straight Turning of Hardened AISI 4340 Steel // Journal Engineering Manufacture. 2005. Vol. 219. Issue 7. P. 515–524. <https://doi.org/10.1243/095440505X32445>
17. Krainev D.V., Polyanchikova M.Yu., Bondarev A.A. Influence of the surface layer characteristics of the regularities of the cutting process // International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 129. P. 3. <http://doi.org/10.1051/mateccconf/201712901045>
18. Кабалдин Ю.Г., Власов Е.Е. Наноструктурные процессы при разрушении и изнашивании твердосплавного режущего инструмента // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2015.



№ 7. С. 59–66.

19. Кабалдин Ю.Г., Лаптев И.Л., Шатагин Д.А., Зотов В.О., Серый С.В. Диагностика износа режущего инструмента на основе фрактального и Вейвлет анализа с использованием искусственного интеллекта в режиме реального времени с возможностью удаленного доступа // Труды Нижегородского государственного технического университета им. П.Е. Алексеева. 2013. № 5. С. 183–189. [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/diagnostika-iznosa-rezhushchego-instrumenta-na-osnove-fraktalnogo-i-veyvlet-analiza-s-ispolzovaniem-iskusstvennogo-intellekta-v-rezhime-vremeni-s-vozmozhnostyu-udalennogo-dostupa> (03.06.2019).
20. Кабалдин Ю.Г., Кретинин О.В., Шатагин Д.А., Кузьмишина А.М. Повышение эффективности процессов механообработки на основе подходов искусственного интеллекта и нелинейной динамики. М.: Инновационное машиностроение, 2018. 184 с.
21. Отений Я.Н., Мартыненко О.В. Исследование особенностей процесса обработки резанием цилиндрических поверхностей деталей машин // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 9-3. С. 452–456. [Электронный ресурс]. URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=7346> (03.06.2019).
22. Ким В.А., Якубов Ч.Ф. Диссипативная структура контактно-фрикционного взаимодействия при реза-

- нии металлов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 12. С. 35–45.  
<http://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-12-35-45>
23. Savilov A.V., Svinin V.M., Timofeev S.A. Investigation of Output Parameters of Titanium Reverse Turning // International Conference Information Technologies in Business and Industry: IOP Conference Series. 2018. Vol. 1015. Issue 4. P. 042055. [Электронный ресурс]. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1015/4/042055/pdf> (03.06.2019). <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1015/4/042055>
24. Савилов А.В., Никулин Д.С., Николаева Е.П., Родыгина А.Е. Современное состояние производства высокопроизводительного режущего инструмента из порошковых быстрорежущих сталей и твердых сплавов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 6. С. 26–33.
25. Serebrennikova A.G., Nikolaeva E.P., Savilov A.V., Timofeev S.A., Pyatykh A.S. Research Results of Stress-Strain State of Cutting Tool When Aviation Materials Turning // Journal of Physics: IOP Conference Series. 2018. Vol. 944. P. 012104. [Электронный ресурс]. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/944/1/012104> (03.06.2019). <http://doi.org/10.1088/1742-6596/944/1/012104>

#### References

1. Gurylev VB, Serebrennikova AG. Selection of Cutting Tool Geometry when Turning Titanium Alloy VT22 in Order to Analyze Output Parameters. In: *Molodezh i nauka: aktualnye problemy fundamentalnykh i prikladnykh issledovaniy: materialy II vserossiyskoy nationalnoy nauchnoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* = Youth and Science: Topical Problems of Fundamental and Applied Research; Proceedings of II All-Russian National Scientific Conference of Students, Postgraduate Students and Young Scientists. (8–12 April 2019, Komsomolsk-na-Amure). Komsomolsk-na-Amure: Komsomolsk-na-Amure State University; 2019, vol. 1, p. 66–69. (In Russ.)
2. Bobrov VF. *Fundamentals of the Metal Cutting Theory*. Moscow: Mashinostroenie; 1975, 344 p. (In Russ.)
3. Yascheritsyn PI, Eryomenko ML, Zhigalko NI. *Fundamentals of Metal Cutting and Cutting Tools*. Minsk: Vyscheyshaya shkola; 1981, 560 p. (In Russ.)
4. Ostafiev VA, Antonuk VC, Tymchik GS. *Diagnostics of Metalworking Process*. Kiev: Tehnik; 1991, 152 p. (In Russ.)
5. Krivoukhov VA, Chubarov AD. *Cutting of Titanium Alloys*. Moscow: Mashinostroenie; 1970, 184 p. (In Russ.)
6. Woolf AM. *Cutting of Metals*. Leningrad: Mashinostroenie; 1973, 496 p. (In Russ.)
7. Armarego IJA, Brown RH. *The Machining of Metals*, 1977, 325 p. (Russ. ed.: *Obrabotka metallov rezaniem*. Moscow, Mashinostroenie, 1977, 325 p.)
8. Kufarev GL, Naumov VA. Back-edge Wear of Hard-Alloy Cutter and its Effect on the Cutting Force. *Izvestiya Tomskogo Ordena Otkjabskoy Revolyutsii i Ordena Trudovogo Krasnogo Znameni politehnicheskogo instituta*. 1970;175:147–153. Available from: [earchive.tpu.ru/bitstream/11683/9586/1/bulletin\\_tpu-1970-v157-32\\_bw.pdf](http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/9586/1/bulletin_tpu-1970-v157-32_bw.pdf) [Accessed 15th June 2019]. (In Russ.)
9. Poletika MF, Afonov AI. The Nature of Carbide Tool Wear when Turning Hard-to-Work Titanium Alloys. *Izvestiya Tomskogo Ordena Otkjabskoy Revolyutsii i Ordena Trudovogo Krasnogo Znameni politehnicheskogo instituta*. 1976;224:144–147. Available from: [earchive.tpu.ru/bitstream/11683/11745/1/bulletin\\_tpu-1976-v224-33\\_bw.pdf](http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/11745/1/bulletin_tpu-1976-v224-33_bw.pdf) [Accessed 15th June 2019]. (In Russ.)
10. Savicheva YuM. Cutting Tools Wear. In: *Studencheskij nauchnyj forum: materialy XI Mezhdunarodnoj studencheskoj nauchnoj konferencii* = Student Science Forum: Proceedings of XI International Student Scientific Conference. Available from: <http://scienceforum.ru/2019/article/2018015753> [Accessed 15th June 2019].
11. Kovalev A, Yazhao Zhang, Hui Cao, Meng Yonggang. A Concept of the Effective Surface Profile to Predict the Roughness Parameters of Worn Surface. *Frontiers in Mechanical Engineering*. 2019:1–11. <https://doi.org/10.3389/fmech.2019.00031>
12. Karaguzela U, Bakkal M, Budak M. Mechanical and

Thermal Modeling of Orthogonal Turn-Milling Operation. *Procedia CIRP*. 2017;58:287–292. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.191>

13. Balaji JH, Vijayan K, Yogeswaraj S. Investigation on High Speed Turning of Titanium Alloys. *Procedia Engineering*. 2013;64:926–935. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.169>

14. Jagadesh T, Samuel GL. Investigations into Cutting Forces and Surface Roughness in Micro Turning of Titanium Alloy using Coated Carbide Tool. *Procedia Materials Science*. 2014;5:2450–2457. <http://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.496>

15. Chinesta F, Filice L, Micari F, Rizzuti S, Umbrello D. Assessments of Material Models through Simple Machining Tests. *International Journal of Material Forming*. 2008;1:507–510. <http://doi.org/10.1007/s12289-008-0171-4>

16. Belhadi S, Mabrouki T, Rigal J-F, Boulanouar L. Experimental and Numerical Study of Chip Formation During Straight Turning of Hardened AISI 4340 Steel. *Journal Engineering Manufacture*. 2005;219(7):515–524. <https://doi.org/10.1243/095440505X32445>

17. Krainev DV, Polyanchikova MYu, Bondarev AA. Influence of the Surface Layer Characteristics of the Regularities of the Cutting Process. In: *International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: MATEC Web of Conferences*. 2017, vol. 129, p. 3. <http://doi.org/10.1051/mateconf/201712901045>

18. Kabaldin YG, Vlasov EE. Nanostructured Processes at the Destruction and Wear of Carbide Cutting Tools. *Izvestiya vysschih uchebnyh zavedenij. Mashinostroenie* = BMSTU Journal of Mechanical Engineering. 2015;7:59–66. (In Russ.)

19. Kabaldin YuG, Laptev IL, Shatagin DA, Zotov VO, Seryj SV. Diagnosis Tool Wear based on the Fractal and Wavelet Analysis using Artificial Intelligence in Real Time with Remote Access Capabilities. *Trudy Nizhegorodskogo tekhnicheskogo universiteta imeni RE Alekseeva* = Proceedings of Nizhny Novgorod Technical University named after R.E. Alekseev. 2013;5:183–189. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/diagnostika-iznosa->

#### **Критерии авторства**

Серебренникова А.Г., Гурылев В.Б. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

rezhuschego-instrumenta-na-osnove-fraktalnogo-i-vevlet-analiza-s-ispol-zlvaniem-iskusstvennogo-intellekta-v-rezhime/viewer [Accessed 3rd June 2019]. (In Russ.)

20. Kabaldin IuG, Kretinin OV, Shatagin DA, Kuz'mishina AM. *Improving Machining Efficiency based on Artificial Intelligence Approaches and Nonlinear Dynamics*. Moscow: Innovatsionnoe mashinostroenie; 2018, 184 p. (In Russ.)

21. Oteniy YaN, Martynenko OV. Studying features of cutting of machine cylindrical surfaces. *International Journal of Applied and Fundamental Research Development*. 2015;9-3:452–456. Available from: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=7346> [Accessed 3rd June 2019].

22. Kim VA, Yakubov CF. Dissipative Structure of Contact-Friction Interaction at Metal Cutting. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018;22(12):35–45. (In Russ.) <http://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-12-35-45>

23. Savilov AV, Svinin VM, Timofeev SA. Investigation of Output Parameters of Titanium Reverse Turning. In: *International Conference Information Technologies in Business and Industry: IOP Conference Series*. 2018;1015(4):042055. Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1015/4/042055/pdf> [Accessed 3rd June 2019]. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1015/4/042055>

24. Savilov AV, Nikulin DS, Nikolaeva EP, Rodygina AE. Current State of Manufacturing High Performance Cutting Tools from Powdered Metal High-Speed Steels and Hard Alloys. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2013;6:26–33. (In Russ.)

25. Serebrennikova AG, Nikolaeva EP, Savilov AV, Timofeev SA, Pyatykh AS. Research Results of Stress-Strain State of Cutting Tool when Aviation Materials Turning. *Journal of Physics: IOP Conference Series*. 2018;944:012104. Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/944/1/012104> [Accessed 3rd June 2019]. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/944/1/012104>

#### **Authorship criteria**

Serebrennikova A.G., Gurylyov V.B. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

#### **Conflict of interests**

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

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



СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Серебренникова Анжела Геннадьевна**,  
кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры «Машиностроение»,  
Комсомольский-на-Амуре  
государственный технический университет,  
681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27,  
Россия;  
e-mail: Anzhela03121967@yandex.ru

**Гурылев Владимир Борисович**,  
магистрант,  
Комсомольский-на-Амуре  
государственный технический университет,  
681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27,  
Россия;  
✉ e-mail: vova.96-79@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Anzhela G. Serebrennikova**,  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor  
Associate Professor of the Department  
of Mechanical Engineering  
Komsomolsk-na-Amure State University,  
27, Lenin Ave., Komsomolsk-na-Amure 681013,  
Russia;  
e-mail: anzhela03121967@yandex.ru

**Vladimir B. Gurylyov**,  
Master Degree Student,  
Komsomolsk-na-Amure State University,  
27, Lenin Ave., Komsomolsk-na-Amure 681013,  
Russia;  
✉ e-mail: vova.96-79@mail.ru



## Method for polishing the surface of Ni-P-coated SKD11 steel

Phung Xuan Son, Vu Thi Hue

Hanoi University of Industry, HaNoi, Vietnam

**Abstract:** Aim – to develop an effective method for polishing the surface of products using a magnetic field, facilitating the necessary removal of material and resulting in a low degree of workpiece roughness. The object of research was a sample of SKD11 steel having a cylindrical profile and a diameter of 16 mm, coated with a 1 mm layer of Ni-P. For polishing such steel according to the Taguchi experimental method, magnetic-liquid suspension patterns containing magnetic iron grains and abrasive grains having various diameters and at different working distances to the magnet attached to the polishing equipment were used. The experimental polishing system included a permanent magnet (with magnetic induction equal to 0.45 T), a disk carrying a magnetic-liquid suspension and two electric motors. A distribution of containing magnetic iron grains and abrasive grains in the magnetic-liquid suspension on the working surface of the treated surface was studied by scanning electron microscopy and energy dispersive X-ray spectroscopy. It was found that magnetic-liquid suspension containing large diameter MIGs (7  $\mu\text{m}$ ) and smaller diameter AGs (1  $\mu\text{m}$ ) should be used with the same polishing distance (= 1 mm) and be set to surface-finish the mirror surface of Ni-P coated SKD11 steel when using an emulsion based on magnetic iron grains; the roughness of the specimen surface of 3.6 Nm was achieved without leaving scratches or adhesion of abrasives with the magnetic-liquid suspension mixture on the treated surface. The use of a magnetic-liquid suspension, containing magnetic iron grains, is an effective method for obtaining precision on the workpiece surface to the nanoscale when the diameter of magnetic iron grains is greater than the diameter of abrasive grains. In terms of cost and performance, this mixture combination has good prospects for implementation in polishing technology compared to the expensive magnetic-liquid suspension containing magnetic iron grains with ZrO<sub>2</sub> coating.

**Keywords:** magnetic-liquid suspension, magnetic iron grains, abrasive grains, polishing, Ni-P coating

**Information about the article:** Received February 02, 2020; accepted for publication May 19, 2020; available online June 30, 2020.

**For citation:** Phung Xuan Son, Vu Thi Hue. Method for polishing the surface of Ni-P-coated SKD11 steel. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(3):561–569. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-561-569>

## Метод полирования поверхности стали SKD11 с покрытием Ni-P

Фунг Суан Шон, Ву Тхи Хуэ

Ханойский индустриальный университет, г. Ханой, Вьетнам

**Резюме:** Цель – разработать эффективный способ полировки поверхности изделий с использованием магнитного поля, позволяющий обеспечить необходимый съем материала и низкую степень шероховатости обрабатываемой детали. Объектом исследований был выбран образец стали SKD11 цилиндрического профиля диаметром 16 мм, покрытый Ni-P-слоем толщиной 1 мм. Для полировки стали SKD11 с покрытием Ni-P в соответствии с экспериментальной методикой Тагучи использовались образцы жидкой магнитной суспензии, содержащие магнитные зерна из железа и абразивные зерна разных диаметров с различными рабочими расстояниями до магнита полировального оборудования. Экспериментальная полировальная система включала в себя постоянный магнит (с магнитной индукцией равной 0,45 Тл), диск, несущий жидкую магнитную суспензию, и два электродвигателя. Распределение магнитных железосодержащих зерен и абразивных зерен в жидкой магнитной суспензии на рабочей обрабатываемой поверхности было исследовано методами сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. Установлено, что жидкая магнитная суспензия, содержащая магнитные зерна из железа большого диаметра (7 мкм) и абразивные зерна меньшего диаметра (1 мкм), должна использоваться на том же расстоянии полировки (= 1 мм) и применяться одновременно с эмульсией на основе магнитных зерен из железа для финишной обработки зеркальной поверхности стали SKD11, покрытой Ni-P-слоем. Использование данной смеси жидкой магнитной суспензии позволило достичь шероховатости 3,6 Нм на обрабатываемой поверхности образца при отсутствии царапин или адгезии абразивов со смесью. Применение жидкой магнитной суспензии, содержащей магнитные зерна из железа, является эффективным методом прецизионной обработки поверхности заготовки с погрешностью до наноуровня, когда диаметр магнитных зерен больше диаметра абразивных зерен. По характеристикам стоимости и производительности данная комбинированная смесь весьма перспективна в качестве технологии полировки по сравнению с дорогостоящей жидкой магнитной

суспензией, содержащей магнитные железные зерна с покрытием  $ZrO_2$ .

**Ключевые слова:** магнитная жидкая суспензия, магнитные зерна из железа, абразивные зерна, полировка, покрытие Ni-P

**Информация о статье:** Дата поступления 02 февраля 2020 г.; дата принятия к печати 19 мая 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 июня 2020 г.

**Для цитирования:** Фунг Суан Шон, Ву Тхи Хуэ. Метод полирования поверхности стали SKD11 с покрытием Ni-P. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 3. С. 561–569. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-561-569>

## 1. INTRODUCTION

Due to their abrasion- and corrosion-resistance along with high hardness, magnetic materials such as Ni-P-coated SKD11 steel have become widespread in many manufacturing processes including in plastics, chemicals, electronics, automotive, aerospace and mould production industries. Due to significantly improving efficiency and working time and thereby reducing the costs in production processes, improving economic efficiency, such working materials are particularly useful in the production of moulds, including those manufactured by metal injection and stamping [1, 2]. Previously, details of the moulds coated with Ni-P were typically machined by the grinding process [3–5]. However, surfaces machined under processes of grinding with a single diamond crystal material are associated with low quality. It is therefore necessary to finish processing by polishing moulds in order to remove blemishes caused by cutting tools and reduce the roughness of the machining surface to nanometre tolerances.

Although traditional polishing processes also have the ability to improve the quality of the machining surface, in this case, abrasive particles with high hardness tend to scratch and become lodged in the machined surface of softer workpiece materials under high pressure, reducing surface quality [6–12]. For this reason, it is very difficult to create a coated Ni-P surface with high roughness quality and high machining precision using traditional polishing methods. In order to improve the quality of the surface, it is therefore necessary to develop a new, more effective polishing method for removing excess material at the same time as removing blemishes as a result of cutting tools used during stamping

and abrasive particles introduced on the machined surface due to the polishing process.

In this paper, a new promising method of polishing using a magnetic field, resulting in a processed surface having a low degree of roughness and high machining accuracy, is presented.

## 2. THE PRINCIPLE OF SURFACE POLISHING USING MAGNETIC-LIQUID SUSPENSION

The operating principle of polishing using magnetic-liquid suspension (MLS) is as illustrated in Fig. 1. A shaped permanent magnet disc is attached to the underside of a rotary disc having eccentricity radius  $R$ . An aluminium plate supporting MLS grout is located below the magnet and in distance of  $H$  from this magnet. During the process of polishing, the magnet and the rotational axis of motor 2 have the same rotational speed  $n_2$ . Using this method, a magnetic field is generated, in which the flux density is constant, but the magnetic power is continuously rotating around the rotational axis of motor 2. As a result, a new type of magnetic field is generated, referred to as a rotating magnetic field. The workpiece is then placed below the sheet membrane containing the MLS grout and with the gap of  $K$  from the working surface. At this time a polishing system with MLS used for the polishing process is set up.

When the distance between the workpiece and the plate bearing MLS grout has been set, the magnetic effect causes a chain of induction clusters to be formed by the magnetic particles having nanometer dimensions. At this point, the magnetic iron grains (MIGs) having a micrometre size are formed immediately under magnetic induction force. Non-

magnetic abrasive particles (AGs) under the effect of the MIGs cluster in combination with the cellulose fibre available in the MLS during the operation. In addition, all the clusters thus formed are pulled in by the magnetic field to concentrate in areas with the strongest magnetic field. At this point, non-magnetic abrasive particles subjected to the action of gravity and a drag force are actuated by the effect of the magnetic field. Under the combined effect of the two components of the force, the majority of non-magnetic AGs in the layer of MLS grout are brought to bear on the machined surface at the same time as creating a force acting on the workpiece machining surface. When the aluminium disc carrying the MLS grout is rotated with speed  $n_1$  the magnetic particles are attracted to the lower surface of the disc and the disc rotation will transmit rotary motion to the AGs. At this time, a very small layer of workpiece surface will be removed by abrasive particles of AGs with micrometre dimensions under the effect of frictional force generated between the workpiece and AG.

### 3. DESIGN OF EXPERIMENTS USING THE TAGUCHI METHOD

The Taguchi method is commonly used in experimental design when analysing the impact factor of processes, including mul-

iple factors and multiple levels [13]. It has been successfully applied to many different areas with the purpose of saving time when optimising groups of objects [14–18]. The key advantage of this method is in the design of an orthogonal table based on the factors and level of investigated impact. This method can help researchers to select appropriate representatives in order to reduce the number of trials. In the present work, since there are four factors being investigated, as well as different levels of impact, using the Taguchi experimental design setup is necessary for reducing the number of test cases.

The distribution of the MIGs and AGs of the MLS on the working surface have been studied by electron microscopy and analytical EDX (Energy-dispersive X-ray spectroscopy). The experimental setup is shown in Fig. 2.

The polishing system includes a permanent magnet, a disc bearing the MLS and two motors with transmission belt system as shown in Fig.1, is mounted on the actuator in the z-direction of a polishing machine as in Fig. 2. In the polishing equipment, a permanent magnet disc having a magnetic field strength of 0.45T is placed eccentrically with a radius  $R = 4.5$  mm (in Fig. 1) from the rotating centre. The first motor creates rotational movement for disc bearing MLS through the transmission belt, while the second motor

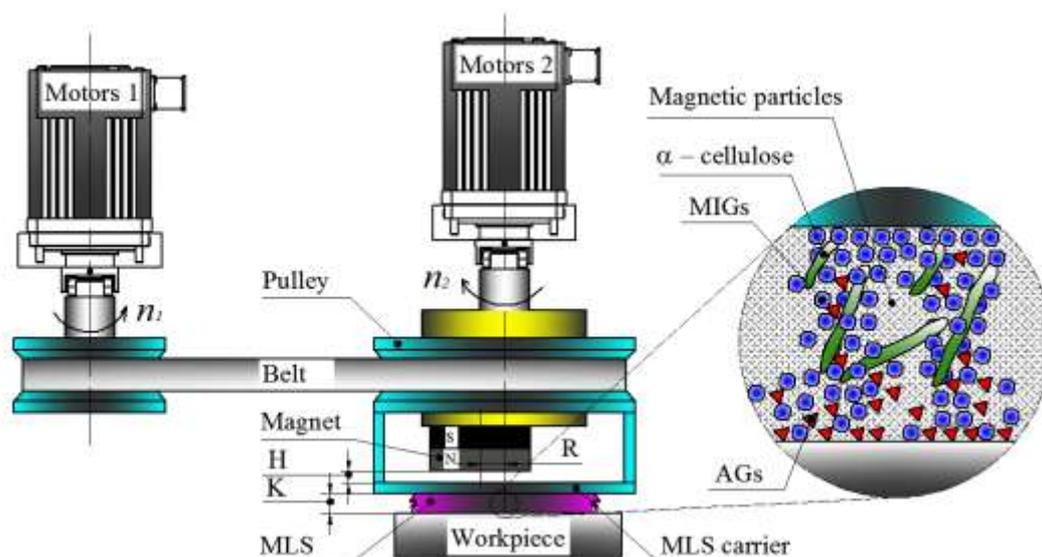
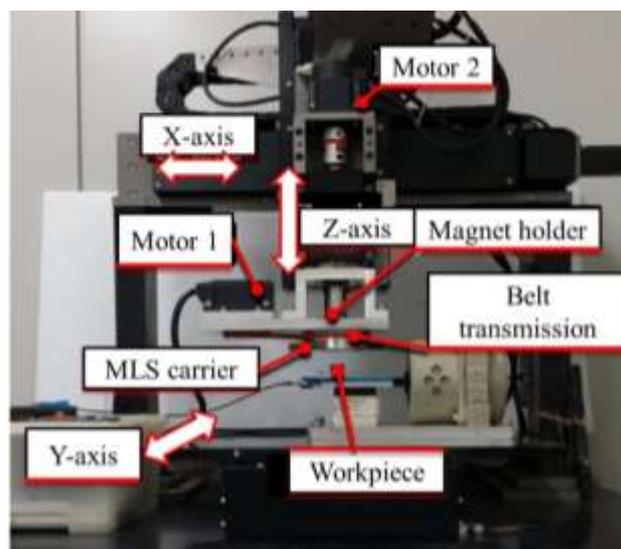


Fig. 1. Principle of polishing using mixture magnetic-liquid suspension grout  
Рис. 1. Принцип полировки с использованием жидкой магнитной суспензии с добавками



**Fig. 2. Equipment for experimental polishing**  
**Рис. 2. Оборудование для проведения экспериментов по полированию**

transmits rotary motion to the magnet through the coupling. The MLS disc bearing is made of aluminium of non-magnetic material and has apertures  $H = 1$  mm to make sure there is no contact between the magnet and disc bearing MLS (as shown in Fig. 1). This process aims to maintain the strongest possible magnetic field acting on the MLS grout. The workpiece for machining consists of a SKD11 steel of cylindrical profile having a diameter of 16 mm covered by a Ni-P coating with a thickness of 1 mm.

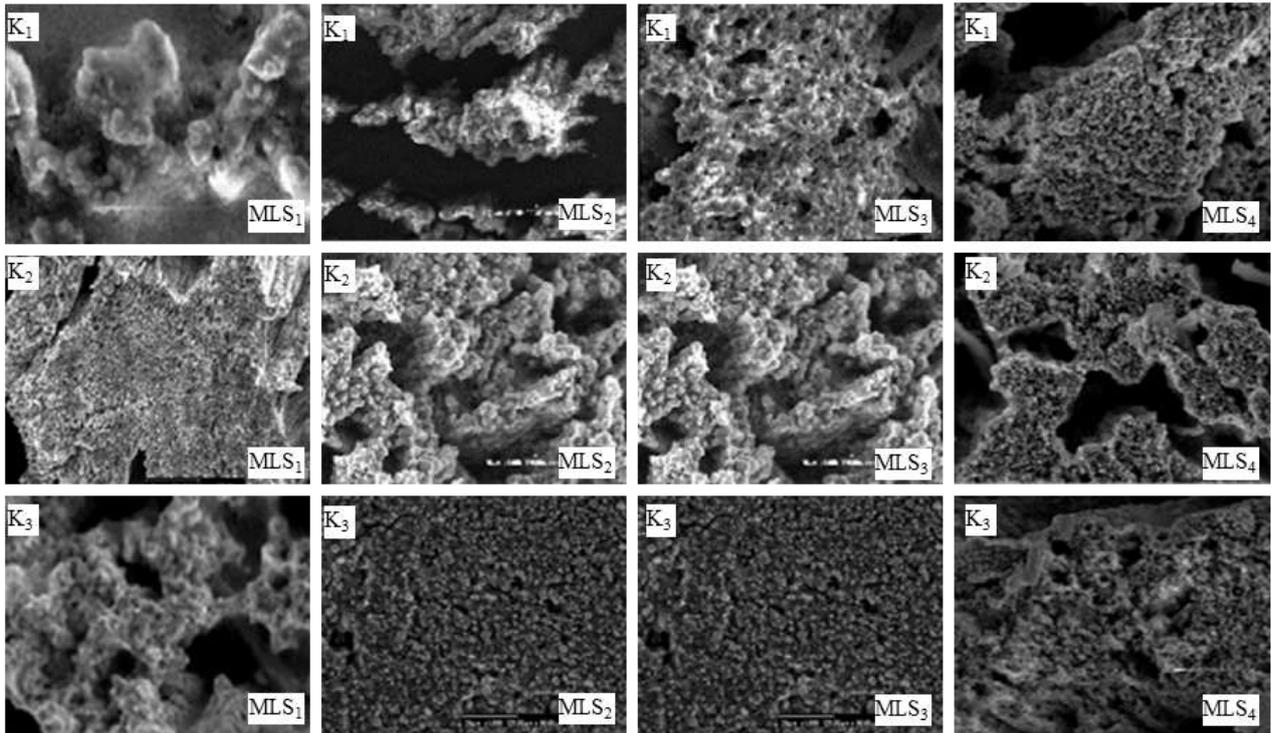
#### 4. RESULTS AND DISCUSSION

The SEM (Scanning Electron Microscopy) and EDX image analysis of the results of experimental polishing carried out on the magnetic workpiece (Ni) are shown in Figs. 3, 4 and 5. From the results of analysis, the received influence of the MIGs diameter to the ratio of AGs (through percent ratio of molecules of Al) and MIGs (through percent ratio of molecules of Fe) with magnetic material (Ni) at different positions are as shown in Fig. 6. It can be seen that when using the polishing mixtures of  $MLS_1$ ,  $MLS_2$ ,  $MLS_2$  (with increasing diameter of MIGs, respectively), the content of atoms of Al on the polishing surface increases, whereas the content of atomic Fe reduces. With a larger polishing distance of K, the distribution ratio of Al and Fe are in-

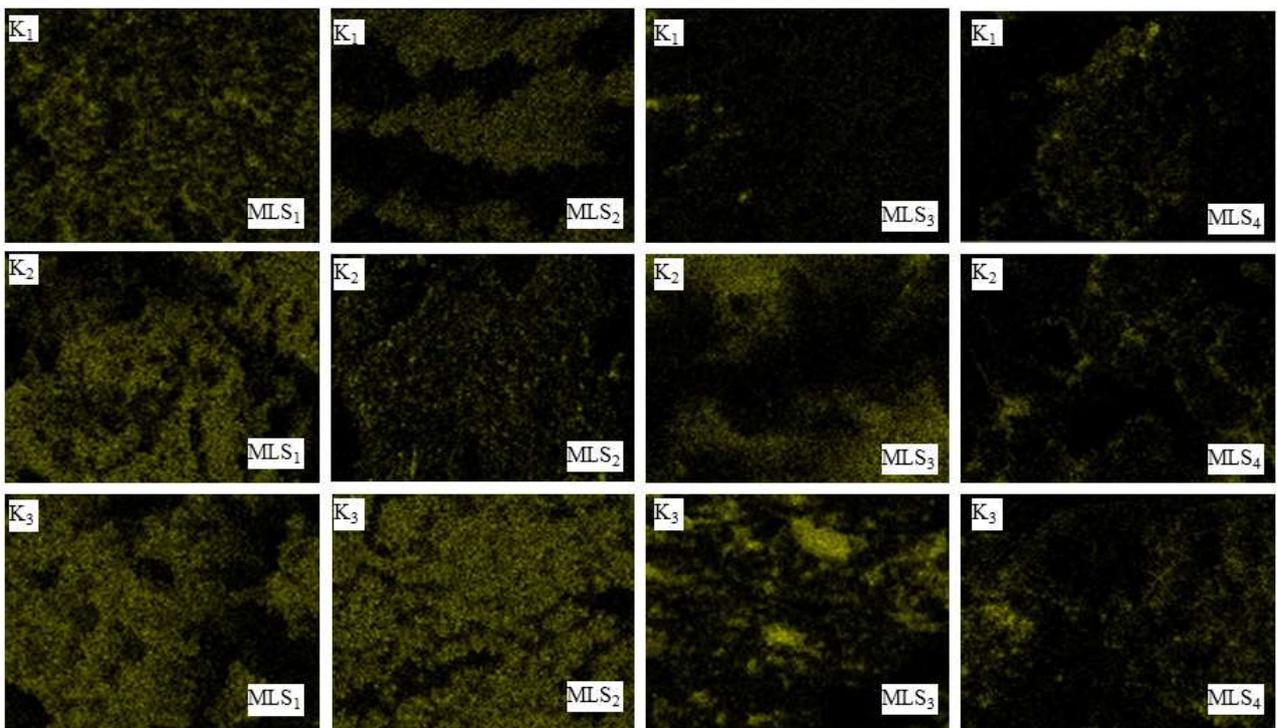
creased. It is also noted that, regardless of the diameter of the MIGs or the working distance, the percent ratio of Al is smaller than 25% when the magnetic material is used as the machining workpiece. The ratio of Al is highest at the largest working distance with  $MLS_1$ , which contains the MIGs having the largest diameter during the experiment.

The percentage of the Al distribution on the polished surface of the  $MLS_4$  with magnetic materials at different positions are compared with  $MLS_2$ ; although two polishing mixtures have the same equal ratio of diameter MIGs/diameter AGs, the size of the particles is different, as represented in Fig. 6. It is confirmed that the greater the number of AGS involved in the polishing process, the greater the material removal rate and the better the surface quality as compared to a smaller number of AGS involved in the polishing process; that is, the better surface was obtained at a greater polishing distance K shown in Fig. 6.

However, previous works [19] have demonstrated that, since increasing the working distance will reduce the polishing force and speed of material removal, it will also limit the improvement of surface quality when polishing non-magnetic workpieces with MLS. Thus, the performance of MLS grout in the process of polishing the magnetic material depends on two factors: working distance and number of active AGs impacting on the polishing surface.



**Fig. 3. Working surface images during machining magnetic workpiece with magnetic-liquid suspension**  
**Рис. 3. Изображения рабочей поверхности магнитной заготовки при обработке жидкой магнитной суспензией**



**Fig. 4. Aluminium distribution on working surface during machining magnetic workpiece with magnetic-liquid suspension**  
**Рис. 4. Распределение частиц алюминия на рабочей поверхности магнитной заготовки при обработке жидкой магнитной суспензией**

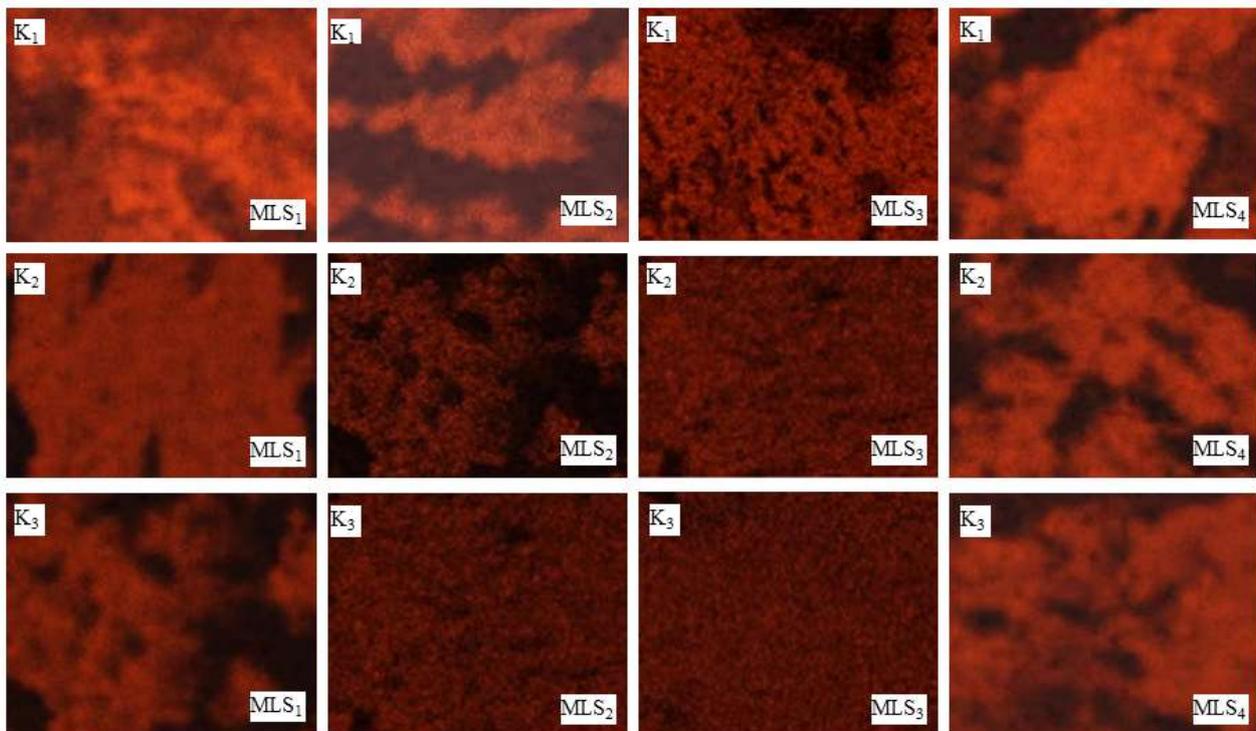


Fig. 5. Iron distribution on working surface during machining magnetic workpiece with magnetic-liquid suspension  
 Рис. 5. Распределение частиц железа на рабочей поверхности магнитной заготовки при обработке жидкой магнитной суспензией

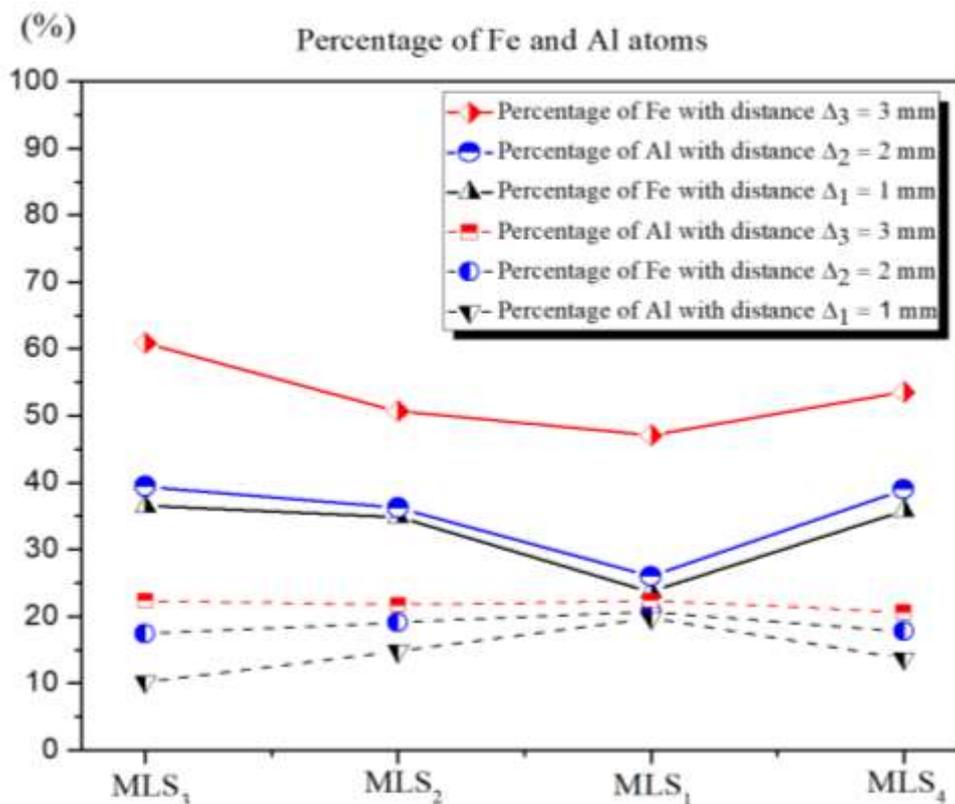


Fig. 6. Percentage of Al and Fe distribution on the magnetic working surface  
 Рис. 6. Распределение атомов Al и Fe (%) на магнитной рабочей поверхности



The experimental results and analysis of the surface before and after polishing for 60 minutes at a distance of  $K = 1$  mm with MLS<sub>1</sub>-MLS<sub>4</sub> are shown in Fig. 7. The original rough surface  $R_a = 40$  nm has been significantly smoothed out to  $R_a < 22$  nm following polishing regardless of the type of MLS grout used. However, the texture and roughness of the working surface varies with the different type of MLS grout; the working surface has highest smoothness after polishing with MLS<sub>1</sub> ( $R_a = 3.6$  nm respectively). In general, any of a mixed type MLS involved in the process of polishing reduces the roughness of the surface work coated by Ni-P layer; however, the decreased ratio of surface roughness varies with the different MLS corresponding to the different working position. When comparing the roughness before and after polishing, in most cases it can be seen that all the polished surfaces have better quality than before polishing. Nevertheless, as mentioned above, the number of active AGs is reduced when the distance  $K$  decreases, resulting in a reduction in the ability to remove material on the machining surface. However, Fig. 7 shows that when the distance  $K$  is less, the surface quality is higher. This occurs due to the working distance

being smaller and the polishing force concomitantly higher, which significantly increases the ability to polish with MLS.

Fig. 7 shows the surface polished quality, which decreases in the following sequence: with MLS<sub>1</sub> > with MLS<sub>2</sub> > with MLS<sub>3</sub> > with MLS<sub>4</sub>. The ratio of a diameter of MIG to a diameter of AP (abrasive particles) reduces from  $(7 \mu\text{m})/(1 \mu\text{m})$  in MLS<sub>1</sub> down to  $(3 \mu\text{m})/(1 \mu\text{m})$  with MLS<sub>2</sub> and beyond to  $(1 \mu\text{m})/(1 \mu\text{m})$  in MLS<sub>3</sub>, while the range of presence AGs is expanded in order: in MLS<sub>1</sub> > in MLS<sub>2</sub> > in MLS<sub>3</sub>, leading to an increase in the number of active AGs in the same order: in MLS<sub>1</sub> > in MLS<sub>2</sub> > in MLS<sub>3</sub>. This explains why the roughness reduced in the order during machining with MLS<sub>1</sub> > with MLS<sub>2</sub> > with MLS<sub>3</sub>. Although MLS<sub>2</sub> and MLS<sub>4</sub> have a very similar MIG-to-AG diameter ratio and an almost identical percentage of Al on the polishing surface (Fig. 6), the smoothing of the surface during polishing with MLS<sub>4</sub> is much lower than with MLS<sub>2</sub>. This is due to the much greater force acting on the MIGs in MLS<sub>2</sub> than that impacting on the MIGs in MLS<sub>4</sub>, leading to an increase in the pressure on the AP and concomitant significantly improvement in the ability to remove the material. Thus, the analysis of the influence of MLS

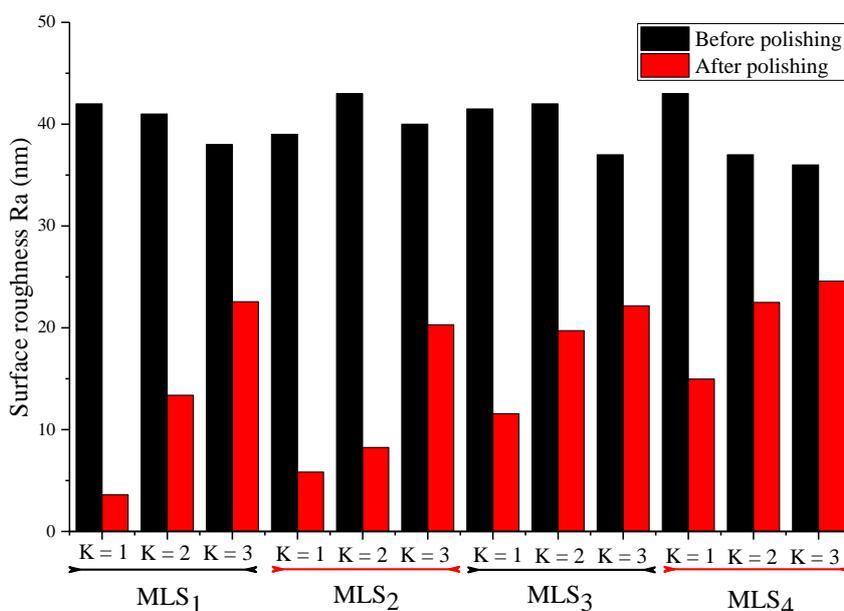


Fig. 7. Initial and final surface roughness after the polishing process using different magnetic-liquid suspension grout formulations in different working positions

Рис. 7. Начальная и конечная шероховатости поверхности до и после полировки с применением различных смесей жидких магнитных суспензий при разных рабочих позициях

grout with a different polishing distance of K during polishing the machining magnetic workpiece showed that MLS containing MIGs with diameter of 7  $\mu\text{m}$  and a AGs with diameter of 1  $\mu\text{m}$  should be used along with the same polishing distance  $K = 1$  mm and should be set up to perform surface finishing for a mirror surface of SKD11 steel covered with a layer of Ni-P using the MLS grout based on basic MIGs.

## 5. CONCLUSION

Laboratory polishing was performed on a workpiece of SKD11 steel coated with Ni-P using a MLS mixture containing the MIGs and abrasive AGs having different diameters and at a different polishing distance K to determine the distribution of the polishing abrasive on the workpiece surface. The main conclusions are summarised as follows:

A mixture MLS containing MIGs with

diameter of 7  $\mu\text{m}$  and AGs with diameter of 1  $\mu\text{m}$  should be used. The working distance of  $K = 1$  mm should be set up to perform surface finishing of a mirror surface of SKD11 steel with the Ni-P coating using the typical MIG based on MLS grout. Under the experimental conditions of this work, the quality of the surface Ni-P coating is significantly improved and a mirror surface roughness  $R_a = 3.6$  nm has been successfully achieved without leaving scratches or adhesion abrasive with MLS grout on the machined surface.

The above results have demonstrated that the use of MLS grout containing MIGs is a practical method for creating a precision surface machining surface to nano level for the workpiece since the diameter of MIGs is larger than diameter of AGs. Polishing by means of this MLS mixture has great potential in the application of technology, both in terms of cost and performance, compared to expensive MLS containing MIGs coated with  $\text{ZrO}_2$ .

## Reference

1. De Cristofaro S, Funaro N, Feriti GC, Rostagno M, Comoglio M, Merlo A, Stefanini C, et al. High-speed micro-milling: Novel coatings for tool wear reduction. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2012;63:16–20. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.07.005>
2. Tsai Frank Ching-Feng, Yan Bing Hwa, Kuan Changhee, Huang Fuang-Yuan. A Taguchi and Experimental Investigation into the Optimal Processing Conditions for the Abrasive Jet Polishing of SKD61 Mold Steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2008;48(7-8):932–945. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.08.019>
3. Gäbler J, Pleger S. Precision and Micro CVD Diamond-Coated Grinding Tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2010;50(4):420–424. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.10.008>
4. Kuo Chunliang, Hsu Yichia, Chung Chunhui, Arthur Chen Chao-Chang. Multiple Criteria Optimisation in Coated Abrasive Grinding of Titanium Alloy using Minimum Quantity Lubrication. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2017;115:47–59. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2016.12.004>
5. Chen Naichao, Ai Jun, Chen Yingchao, He Ping, Ren Jianxin, Ji Dongmei. Multilayer Strategy and Mechanical Grinding for Smoothing CVD Diamond Coated Defective Substrate. *Materials & Design*. 2016;103:194–200. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.04.069>
6. Li Min, Lyu Binghai, Yuan Julong, Yao Weifeng, Zhou Fenfen, Zhong Meipeng. Evolution and Equivalent Control Law of Surface Roughness in Shear-Thickening Polishing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2016;108:113–126. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2016.06.007>
7. Lee Eun-Sang, Cha Ji-Wan, Kim Seong-Hyun. Evaluation of the Wafer Polishing Pad Capacity and Lifetime in the Machining of Reliable Elevations. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2013;66:82–94. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.11.003>
8. Chen Fengjun, Hao Shanmei, Miao Xiangliang, Yin Shaohui, Huang Shuai. Numerical and Experimental Study on Low-Pressure Abrasive Flow Polishing of Rectangular Microgroove. *Powder Technology*. 2018;327:215–222. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.12.062>
9. Son Phung Xuan, Quy Tran Duc. Study of the Influence of the Cutting Mode to Vibration, Roughness of the Grinding Process. *Collection of III Conference reports*. 2013;4:112–119.
10. Dich Tran Van, Dien Hoang Van, Son Phung Xuan, Tiep Nguyen Viet. Study of the Influence of the Cutting Mode to Vibration, Roughness of the Grinding Process. *ICAT 2005*. 2005;028.
11. Dich Tran Van, Dien Hoang Van, Son Phung Xuan. Method of Measurement of Grinding Wheels Wear by First Measuring Compressed Air, when Grinding Flat Surfaces. *Journal of Science and Technology*. 2007;61:63.
12. Dich Tran Van, Dien Hoang Van, Son Phung Xuan. To Study the Effect of Cutting Mode on the Surface Roughness when Grinding Flat Surfaces. *Journal of*



*Science and Technology*. 2006;55:43.

13. Prihandana GS, Mahardika M, Hamdi M, Wong Yoke San, Mitsui K. Effect of Micro-Powder Suspension and Ultrasonic Vibration of Dielectric Fluid in Micro-EDM Processes – Taguchi Approach. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2009;49(12-13):1035–1041.

<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.06.014>

14. Chang Chih-Wei, Kuo Chun-Pao. Evaluation of Surface Roughness in Laser-Assisted Machining of Aluminum Oxide Ceramics with Taguchi Method. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2007;47:141–147. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.02.009>

15. Vijay Kumar M, Kiran Kumar BJ, Rudresha N. Optimization of Machining Parameters in CNC Turning of Stainless Steel (EN19) By TAGUCHI'S Orthogonal Array Experiments. *Materialstoday: Proceedings*. 2018;5(5-2):11395–11407.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.107>

#### Authorship criteria

Phung Xuan Son, Vu Thi Hue declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

#### Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

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

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

##### Phung Xuan Son,

Cand. Sci. (Eng.),  
Head of the Department of Industrial  
Equipment and Tools,  
Hanoi University of Industry,  
298 Kauzien St., HaNoi, Vietnam;  
e-mail: phungxuanson@gmail.com.com

##### Vu Thi Hue,

Master Sci. (Eng.),  
Lecturer of the Department of Industrial  
Equipment and Tools,  
Hanoi University of Industry,  
298 Kauzien St., HaNoi, Vietnam;  
✉ e-mail: vuthihue@hau.edu.vn.com

16. Tran Van Dich. Study of Machining Accuracy by Experiments. Hanoi: Technical Sciences; 2003.

17. Jeevanantham S, Sivaram NM, Robinson Smart DS, Nallusamy S. Optimization of Internal Grinding Process Parameters on C40E Steel Using Taguchi Technique. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017;12(19):8660–8664.

18. Le Xuan Hung, Tran Thi Hong, Le Hong Ky, Luu Anh Tung, Nguyen Thi Thanh Nga, Vu Ngoc Pi. Optimum dressing parameters for maximum material removal rate when internal cylindrical grinding using Taguchi method. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*. 2018;9(12):123–129.

19. Niranjana MS, Singh KP, Murtaza Q. Characterization of Magnetic Abrasive Particles based Magnetorheological Polishing Fluid. *Materialstoday: Proceedings*. 2017;4(2-A):752–757. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.01.082>

#### Критерии авторства

Фунг Суан Шон, Ву Тхи Хуэ заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

##### Фунг Суан Шон,

кандидат технических наук,  
заведующий кафедрой  
промышленного оборудования и инструмента,  
Ханойский индустриальный университет,  
г. Ханой, ул. Каузиен, 298, Вьетнам;  
e-mail: phungxuanson@gmail.com.com

##### Ву Тхи Хуэ,

магистр технологии,  
преподаватель кафедры  
промышленного оборудования и инструментов,  
Ханойский индустриальный университет,  
г. Ханой, ул. Каузиен, 298, Вьетнам;  
✉ e-mail: vuthihue@hau.edu.vn.com



## Влияние термоциклирования на выбор рабочего тела с фазовым переходом для теплоаккумуляторов систем солнечного теплоснабжения

© А.Э. Амер, В.А. Лебедев

Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

**Резюме:** Цель исследований – анализ характеристик известных теплоаккумулирующих материалов с фазовым переходом и изучение влияния основных эксплуатационных параметров (термоциклирование, недостаточная долговременная стабильность, фазовая сегрегация, коррозия, переохлаждение) на теплофизические и эксплуатационные свойства этих материалов. Используются аналитические методы исследований, основанные на обобщении и анализе значительного количества эмпирической информации по теплоаккумулирующим материалам, классификации материалов по их основным свойствам и синтезу рекомендаций по практическому использованию теплоаккумулирующих материалов в системах теплоснабжения, использующих энергию солнца. Рассмотрены критерии выбора рабочего тела, использующего скрытую теплоту фазового перехода для тепловых аккумуляторов. Одним из основных, сформулированных авторами, требований к рабочему телу является сохранение теплофизических свойств (температуры плавления, скрытой теплоты плавления, а также диапазонов их изменения) при многократных фазовых переходах в процессе эксплуатации. Показано влияние числа переходов (100–1500 термоциклов) на стабильность теплофизических свойств материалов, а также представлены рекомендации по выбору термоаккумулирующих материалов для систем аккумулирования тепловой энергии в системах теплоснабжения, использующих энергию солнца. В качестве теплоаккумулирующих материалов с фазовым переходом для систем, использующих солнечную энергию и работающих с достаточно невысокими температурами (порядка 30–60°C), могут быть использованы как органические (парафины, жирные кислоты), так и неорганические (кристаллогидраты солей) материалы. Для повышения эффективности процессов теплообмена в системах аккумулирования тепла, использующих материалы с низким коэффициентом теплопроводности (0,148–0,6 Вт/м·К), рекомендовано применять специальные технические решения: увеличение площади теплопередающих поверхностей, использование инклюзивных добавок (например, вставка пористой металлической пены и металлической матрицы в теплоаккумулирующий материал, добавление или дисперсия наночастиц) и др.

**Ключевые слова:** аккумулирование тепла, теплоаккумулирующие материалы, фазовые переходы, теплофизические свойства, термоциклирование, теплообмен

**Информация о статье:** Дата поступления 05 февраля 2020 г.; дата принятия к печати 25 мая 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 июня 2020 г.

**Для цитирования:** Амер А.Э., Лебедев В.А. Влияние термоциклирования на выбор рабочего тела с фазовым переходом для теплоаккумуляторов систем солнечного теплоснабжения. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 3. С. 570–581. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-570-581>

## The effect of thermal cycling on the selection of a phase transition medium for thermal receivers of solar heat supply systems

Ahmed E. Amer, Vladimir A. Lebedev

Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

**Abstract:** The present work is aimed at analysing the characteristics of known thermal storage materials featuring phase transition and studying the effect of the main operational parameters (thermal cycling, insufficient long-term stability, phase segregation, corrosion, supercooling) on the thermophysical and operational properties of these materials. Here, analytical research methods are applied based on the generalisation and analysis of a significant amount of empirical information on thermal storage materials, the classification of materials according to their main properties and the synthesis of recommendations on the practical use of thermal storage materials in heat supply systems using solar energy. The selection criteria for a medium using the latent heat of the phase transition for thermal receivers are considered. One of the main requirements formulated by the authors for the medium consists in the preservation of thermophysical prop-

erties, such as melting point, latent heat of melting, as well as their variation ranges, during in-operation repeated phase transitions. The effect of the transition number (100–1500 thermal cycles) on the stability of the thermophysical properties of materials is demonstrated with the recommendations provided on the selection of thermal storage materials for thermal energy storage in solar heat supply systems. In terms of heat storage materials with a phase transition for solar energy systems operating at relatively low temperatures (30–60°C), both organic (paraffins, fatty acids) and inorganic (crystalline hydrates of salts) materials are applicable. In order to increase the efficiency of thermal transfer processes in thermal storage systems based on materials with a low thermal conductivity coefficient (0.148–0.6 W/m·K), the application of special technical solutions is recommended, including an increased area of thermal transfer surfaces, the introduction of inclusive additives (for example, inserting a porous metal foam and a metal matrix in the thermal storage material, the addition or dispersion of nanoparticles), etc.

**Keywords:** thermal storage, thermal storage materials, phase transitions, thermophysical properties, thermal cycling, heat-exchange

**Information about the article:** Received February 05, 2020; accepted for publication May 25, 2020; available online June 30, 2020.

**For citation:** Amer AE, Lebedev VA. The effect of thermal cycling on the selection of a phase transition medium for thermal receivers of solar heat supply systems. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(3):570–581. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-570-581>

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема накопления и сохранения энергии всегда была актуальна, и сегодня она является очень важной для человечества. В настоящее время разработаны различные способы хранения энергии – механические, электрические, тепловые, химические и др. [1, 2]. Необходимость накопления энергии связана с нерегулярным уровнем потребления энергии. Неравномерное потребление энергии носит как сезонный, так и более динамичный – суточный характер. Особенно остро это ощущается при использовании нетрадиционных и возобновляемых источников энергии. Например, эффективность солнечной тепловой энергетики напрямую связана с суточным поступлением энергии и не совпадает с суточным потреблением. Для выравнивания баланса поступления и потребления энергии используются тепловые аккумуляторы. Возможны принципиально различные схемы аккумуляции тепла: использование теплоемкости материалов, скрытой теплоты фазовых переходов и термохимические системы. Все они имеют свои достоинства и недостатки и находят применение в конкретных приложениях. Например, исторически самый распространенный способ аккумуляции – за счет теплоемкости материалов – широко используется не только

в возобновляемых источниках энергии, но и находит место в тепловой и атомной энергетике [3].

Достаточно привлекательным для систем аккумуляции тепла является использование скрытой теплоты фазовых переходов. Основным достоинством этого способа является достаточно высокая плотность аккумуляции тепла. Таким образом, аккумуляция тепла путем использования теплоты фазового перехода является более энергоэффективным способом, чем аккумуляция за счет теплоемкости материала [4].

В качестве рабочих тел с фазовыми переходами может использоваться довольно большое количество различных материалов, имеющих разный состав и теплофизические свойства. Таким образом, возникает проблема выбора типа рабочего тела с фазовым переходом для теплоаккумуляторов конкретной теплоэнергетической установки.

## 2. ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Вопрос термодинамической стабильности материалов с фазовым переходом является одним из основных при выборе типа материала для конкретной теплоэнергетической системы. При этом важным аспектом является изучение влияния термо-



циклирования на температуру плавления, скрытую теплоту плавления и удельную теплоту материалов с фазовым переходом. Кроме того, явление термоциклирования непосредственно связано с числом термоциклов, т.е. количеством процессов плавления и кристаллизации. Некоторые материалы сохраняют свои термофизические свойства при небольшом количестве термоциклов, а при их увеличении начинается заметная деградация основных теплофизических параметров материалов.

Таким образом, целью данного исследования является анализ существующих теплоаккумулирующих материалов с фазовым переходом (ТАМФП) и влияния основных эксплуатационных факторов, таких как термоциклирование, фазовая сегрегация и переохлаждение на теплофизические и эксплуатационные свойства этих материалов.

### 3. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Выбор теплоаккумулирующего материала с фазовым переходом.** Основными критериями, определяющими выбор материала с фазовым переходом для теплоаккумуляторов, являются:

- температура плавления должна находиться в желаемом диапазоне рабочих температур (температурный диапазон применения);
- высокая скрытая удельная теплота плавления;
- удельная теплоемкость ТАМФП должна быть как можно больше, что повышает суммарную эффективность аккумуляции тепла;
- теплопроводность ТАМФП также должна быть максимально большой, что способствует более высоким темпам процессов плавления и кристаллизации, а также снижению градиентов температур до и после плавления и кристаллизации;
- незначительное изменение объема рабочего тела во время фазового перехода, что позволяет использовать простую геометрию контейнера с рабочим телом и

теплообменника;

- минимальное переохлаждение в процессе кристаллизации;
- химическая стабильность, высокая коррозионная стойкость при контакте с конструкционными материалами;
- безопасность использования;
- доступность и низкая цена.

Таким образом, выбор ТАМФП зависит от его теплофизических свойств: температуры плавления и кристаллизации, скрытой теплоты плавления, теплопроводности и удельной теплоемкости. В силу специфики работы термоаккумуляторов рабочее тело подвержено периодическим многократным процессам зарядки-разрядки. Число таких циклов исчисляется тысячами. При этом важным требованием к теплоаккумулирующим материалам является неизменность (или очень незначительное изменение) вышеперечисленных теплофизических свойств при термоциклировании.

В настоящее время в качестве ТАМФП используется большое количество различных веществ и материалов, в том числе моносоставных и полисоставных (в том числе бинарных). Наиболее распространенными из них являются органические соединения (парафины (*n*-алканы), жирные кислоты) и неорганические соединения (гидраты солей и соединения металлов).

Вместе с тем все большую популярность (особенно в строительной индустрии) находят составы на основе полимеров. Перспективным признано применение полимерных композиционных материалов, состоящих из связующей полимерной матрицы и наполнителя – материала с фазовым переходом, подверженных влиянию температуры [5].

Парафины (жидкие и твердые) являются наиболее распространенными ТАМФП, имеющими как высокие теплотехнические и эксплуатационные характеристики, так и низкие стоимость и доступность (продукты переработки нефти).

Основным компонентом парафина являются алифатические углеводороды

$C_nH_{2n+2}$  (*n*-алканы). Жидкие парафины представляют собой смесь нормальных *n*-алканов от  $C_9H_{20}$  до  $C_{40}H_{82}$ , имеющих достаточно высокие температуры кипения (порядка 180–370°C). Теплофизические свойства парафинов зависят в первую очередь от состава смеси и наличия примесей. Твердые парафины также представляют собой смесь твердых *n*-алканов от  $C_{20}H_{42}$  до  $C_{24}H_{50}$  с температурой кипения 300–500°C. Из табл. 1 следует, что с увеличением числа атомов углерода от 16 до 50 в *n*-алканах теплотехнические параметры (температура фазового перехода ( $T_{фп}$ )) и суммарная теплота плавления и фазового перехода) увеличиваются.  $T_{фп}$  для парафинов с большим количеством атомов углерода лежат в диапазоне 18–68°C, делая данную группу ТАМФП весьма привлекательной при выборе материала для систем солнечного теплоснабжения.

Кроме парафинов, большую группу органических ТАМФП составляют сложные эфиры, жирные кислоты (табл. 2), спирты и гликоли, обладающие весьма разнообразными свойствами. Эти материалы являются горючими и не должны подвергаться воздействию чрезмерно высоких температур и окислителей. Их главные недостатки: высокая температура плавления (для систем солнечного теплоснабжения), воспламеняемость, достаточно низкая теплопроводность, токсичность и химическая неста-

бильность в условиях высоких температур.

Из данных табл. 2 видно, что у жирных кислот значения некоторых теплофизических параметров (температуры и суммарной теплоты плавления) практически равны значениям параметров парафинов, а такие как коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость имеют значения существенно ниже (на 20–30%). Достоинствами являются достаточно высокая химическая стойкость соединений и низкая степень переохлаждения (или вообще его отсутствие). К недостаткам жирных кислот в качестве ТАМФП можно отнести относительно высокие температуры плавления (для систем солнечного теплоснабжения). Кроме того, они имеют относительно высокую стоимость по сравнению с парафинами (в 2,0–2,5 раза).

Солевые гидраты являются важнейшей группой ТАМФП и считаются наиболее изученными для использования в термоаккумулирующих системах с фазовыми переходами.

Основными достоинствами солевых гидратов являются: низкая цена, приемлемая для эксплуатационных условий температура фазового перехода, высокая суммарная теплота плавления и фазового перехода, высокая теплопроводность и меньшее изменение объема, по сравнению с другими материалами с фазовым переходом (табл. 3).

**Таблица 1**

**Теплофизические свойства технических парафинов [6]**

**Table 1**

**Thermophysical properties of technical paraffins [6]**

Количество атомов углерода	$T_{фп}$ , °C	Суммарная теплота плавления и фазового перехода, Дж/г	$\rho^*$ , кг/м <sup>3</sup>	Удельная теплоемкость, кДж/кг К	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К
9–12	9–53	184	686	2,1	0,15
13–16	6–18	196	716	2,1	0,19
16–18	18–28	212	734	2,1	0,21
16–28	42–44	214	765	2,1	0,21
20–33	48–50	218	769	2,1	0,21
22–45	58–60	221	795	2,1	0,21
24–50	6–68	221	830	2,1	0,21

Примечание: \* плотность в жидком состоянии при определенной температуре.



Таблица 2

Теплофизические свойства жирных кислот [6]

Table 2

Thermophysical properties of fatty acids [6]

Кислота	Химическая формула	$T_{\text{фп}}, ^\circ\text{C}$	Суммарная теплота плавления и фазового перехода, Дж/г	$\rho^*, \text{кг/м}^3$	Удельная теплоемкость, кДж/кг·К	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К
Каприловая	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_6\text{COOH}$	16	128	862 (80°C)	–	0,148
Каприновая	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_8\text{COOH}$	32	136	866 (40°C)	–	0,149
Лауриновая	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{COOH}$	42–44	155	870 (50°C)	1,6	0,147
Миристиновая	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{COOH}$	54	158	840 (80°C)	1,6	–
Пальмитиновая	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH}$	63	159	847 (80°C)	–	0,165
Стеариновая	$\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COOH}$	70	191	–	–	0,172

Таблица 3

Теплофизические свойства гидратов солей [6]

Table 3

Thermophysical properties of salt hydrates [6]

Вещество	Химическая формула	$T_{\text{фп}}, ^\circ\text{C}$	Суммарная теплота плавления и фазового перехода, Дж/г	$\rho^*, \text{кг/м}^3$	Удельная теплоемкость, кДж/кг·К	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К
Гидрат хлорида кальция	$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	29,7	171	1710	–	0,60
Гидрат сульфата натрия	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	32,4	254	1485	1,93	0,54
Гидрат гидрофосфата натрия	$\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	35,2	280	1420	1,55	0,50
Гидрат нитрата цинка	$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	36,4	147	2065	1,34	–
Гидрат дитионита натрия	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	48,0	201	1600	1,46	–
Гидрат гидроксида бария	$\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	78,0	267	2180	1,17	–
Гидрат хлорида магния	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	116,0	165	1570	1,72	–

Главным недостатком гидратов солей является их неравновесное плавление, что негативно сказывается на эксплуатационных свойствах теплоаккумуляторов. Это связано с тем, что при плавлении таких

ТАМФП образуются жидкая фаза и малогидратированная твердая фаза. Кроме того, расплавы гидратов солей обладают свойством переохлаждения, что негативно сказывается на эффективности аккумуляли-

рования тепла. Существенным недостатком солевых гидратов является также их повышенное коррозионное воздействие на конструкционные материалы теплоаккумуляторов.

Особую группу ТАМФП составляют соединения металлов в виде многокомпонентных фторидов, силицидов, оксидов, а также эвтектические соединения. Они характеризуются высокими значениями теплоты фазового перехода (выше, чем у парафинов (*n*-алканов), жирных кислот и гидратов солей). Кроме того, они имеют высокие температуры плавления (900–2000°C), что позволяет отнести их к высокотемпературным материалам. Все это делает данную группу ТАМФП малоприменимой для систем теплоснабжения на солнечной энергии.

Перспективы развития теплоаккумулирующих материалов связаны с изучением фазовых равновесий в растворах полимеров и полимерных композициях на основе смесей полимеров. Среди этого класса материалов можно выделить составы, содержащие полимеры, кристаллические олигомеры и их соединения, а также материалы, содержащие полимерные связующие и специальные наполнители, изменяющие свои свойства при повышении температуры. Одним из ценных свойств ТАМФП является устойчивость формы материала, что позволяет значительно упростить конструкцию термоаккумулятора. Наилучшую устойчивость формы ТАМФП могут обеспечить перспективные материалы, состоящие из наполнителя с фазовым переходом и полимерного связующего, обеспечивающего сохранение формы композита. Наполнителями с фазовым переходом могут быть парафины и полиэтилен, а материалами, выполняющими роль полимерного связующего и загустителя, могут быть эластомеры [7]. Кроме того, при выборе ТАМФП необходимо учитывать возможность химического взаимодействия между материалом с фазовым переходом и материалом контейнера, приводящего к изменению свойств первого и коррозии второго [8, 9].

**Влияние термоциклирования на теплофизические свойства.** Для определения влияния термоциклирования на различные группы ФТАМ было проведено большое количество научно-технических исследований и практических работ. Результаты этих исследований имеют большое практическое значение при выборе типа ФТАМ для конкретных технических приложений, в данном случае – для аккумуляции тепла в солнечных системах теплоснабжения.

Подробная информация об основных параметрах исследуемых ТАМФП (температуре плавления, скрытой теплоте плавления, а также диапазоны их изменения при определенном количестве термоциклов), пригодных для систем солнечного теплоснабжения, приведена в табл. 4.

**Фазовая сегрегация и переохлаждение.** Одной из проблем, возникающих при выборе ТАМФП, является фазовая сегрегация материала и связанное с ней явление переохлаждения. Этими недостатками в первую очередь страдают ТАМФП на основе гидратов солей. Как уже было отмечено выше, фазовая сегрегация проявляется по причине их неравномерного плавления. При этом материал разлагается на две фазы – жидкую и твердую в виде более низкого порядка гидрата той же соли. Такое расслоение материала ведет к осаждению твердой фазы и нарушению режима аккумуляции. Сегрегация может быть уменьшена путем изменения свойств соли гидрата с добавлением другого материала, который может препятствовать опусканию более тяжелой фазы на дно контейнера. Такими материалами могут быть материалы, способствующие гелеобразованию или загущению. Гелеобразование осуществляется путем добавления специального материала (например, полимера) к соли, при этом создается трехмерная структура, которая удерживает основной материал ТАМФП внутри этой структуры [5].

Кроме того, расплавам гидратов солей свойственно переохлаждение, возникающее вследствие того, что при охлаждении расплав остается еще в жидком состо-



Таблица 4

**Влияние термоциклирования на температуру плавления, скрытую теплоту плавления и диапазоны их изменения основных теплоаккумулирующих материалов с фазовым переходом, пригодных для солнечных систем теплоснабжения**

Table 4

**Effect of thermal cycling on melting temperature, latent heat of melting and their variation ranges of main heat storage materials with a phase transition suitable for solar heating systems**

№ п/п	Теплоаккумулирующие материалы с фазовым переходом	Температура плавления, °С		Скрытая теплота плавления, кДж/кг		Количество циклов	Источник
		Начальная	Конечная	Начальная	Конечная		
1	Парафин (C <sub>22</sub> H <sub>44.1</sub> ) (технический сорт)	47,1	46,6	166	163	900	[10]
	Парафин (C <sub>23</sub> H <sub>48.4</sub> ) (технический сорт)	57,1	57,8	220	224	900	[10]
	Парафиновый воск 53 (товарный сорт)	53	53	184	165	300	[11]
	Парафиновый воск 53 (товарный сорт)	53	50	184	136	1500	[12]
	Парафиновый воск 58–60	58,27	55	129,8	102	600	[13]
	Парафиновый воск 60–62	57,78	59	129,7	109	600	[13]
2	Лауриновая кислота	42,6	41,3	176,6	156,6	1200	[14]
		42,6	44,1	211,6	132,8	910	[15]
3	Миристиновая кислота	50,4	49,8	189,4	163,5	450	[16]
		52,99	46,21	181,0	159,1	1200	[14]
		53,8	45,3	192,0	159,1	910	[15]
4	Пальмитиновая кислота	57,8	57,7	201,2	184,4	450	[16]
		61,31	55,47	197,9	172,4	1200	[14]
		60,9	55,5	197,9	162,9	910	[15]
5	Стеариновая кислота	65,2	65,9	209,9	185,3	450	[16]
		62,59	63	154,6	159	300	[12]
		54,7	46,83	159,3	157,7	1200	[14]
		53,8	46,9	174,6	118,9	910	[15]
		63	64	155	123	1500	[9]
6	Гексагидрат хлорида кальция	23,26	23,26	125,4	125,4	1000	[11]
7	Лауриновая кислота (77,05% масс.) + Пальмитиновая кислота (22,95% масс.)	33,09	32,92	150,6	165,6	100	[17]

8	Лауриновая кислота (69% масс.) Пальмитиновая кислота (% масс.)	35,2	34,8	166,3	168,8	1460	[18]
9	Миристиновая кислота + глицерин	31,96	31,22	154,3	151,8	1000	[19]
10	Пальмитиновая кислота + глицерин	58,50	57,45	185,9	175,8	1000	[18]
11	Стеариновая кислота + глицерин	63,45	62,83	149,4	152,8	1000	[18]

янии при температурах, лежащих много ниже температуры кристаллизации (и температуры плавления). Переохлаждение, как правило, сопровождается интенсивной очаговой кристаллизацией. С целью уменьшения переохлаждения, как правило, применяют вещества, являющиеся первичными центрами кристаллизации. Такими материалами могут быть боракс, оксид титана, также полимеры и некоторые ингибиторы [20].

#### **4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

Таким образом, анализ основных теплофизических и эксплуатационных свойств ТАМФП для систем солнечного теплоснабжения выявил некоторые закономерности, которые необходимо учитывать при выборе ТАМФП:

1. Отдельные ТАМФП, имеющие приемлемые теплофизические свойства, не могут быть использованы в системах аккумуляции тепла вследствие негативного влияния термоциклирования на материал. В частности, в [21] описано влияние термоциклирования на мочевины и отмечено, что после нескольких циклов она прекращает плавиться. Таким образом, был сделан вывод о невозможности использования мочевины в качестве ТАМФП для систем аккумуляции тепла.

2. Комплексные исследования [8, 9] наиболее распространенных и изученных ТАМФП (стеариновая кислота, ацетамид и парафиновый воск) показали, что даже при 1500 циклах плавление-затвердевание не происходит существенного изменения их

теплофизических свойств. Использование смесей парафинов в качестве ТАМФП позволяет получить теплоаккумулирующий материал с хорошими и стабильными теплофизическими свойствами.

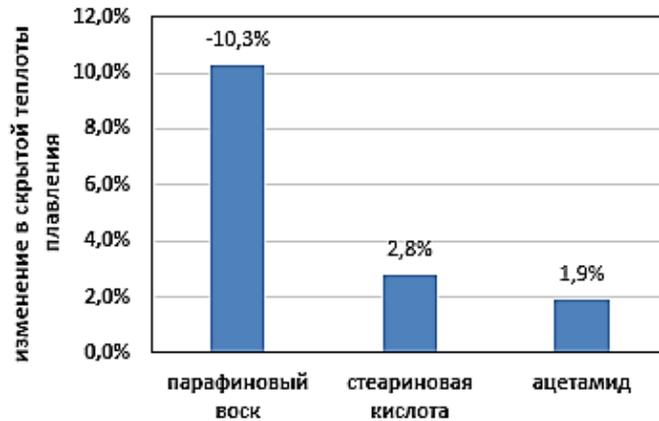
3. Ряд материалов (стеариновая кислота, ацетамид и парафиновый воск) [11] при термоциклировании практически не изменяют температуры плавления, в то время как скрытая теплота фазового перехода незначительно изменяется (в пределах 10%). Изменение скрытой теплоты плавления для основных ТАМФП при термоциклировании составляет 2,8, 1,9 и 10,3%, соответственно (рисунок).

4. Определено, что влияние термоциклирования на теплофизические свойства ТАМФП зависит от степени очистки исходных материалов (рекомендованная степень очистки около 95%) [2].

5. В ряде исследований [11, 12] определено, что теплофизические свойства парафинов при термоциклировании существенно зависят от их химического состава, определенного методами химического и газохроматографического анализов.

6. При проведении термоциклических испытаний различных органических и неорганических ТАМФП [11, 12] было отмечено, что неорганические материалы существенно изменяют свои теплофизические свойства после нескольких циклов и не могут быть рекомендованы в качестве ТАМФП для систем аккумуляции тепла.

7. Исследования теплофизических свойств жирных кислот (стеариновой, миристиновой и пальмитиновой кислот) [13–15] показали высокую устойчивость данных характеристик в условиях термоциклирова-



*Изменение скрытой теплоты плавления основных материалов при термоциклировании*  
*Variation of latent melting heat of basic materials under thermal cycling*

ния (1200–1500 циклов). Вместе с тем показано, что жирные кислоты имеют более низкие (по сравнению с парафинами) значения коэффициентов теплопроводности и удельных теплоемкостей (до 30%). Кроме того, при определенных условиях жирные кислоты склонны к химическому разложению.

8. Перспективными для использования в качестве ТАМФП являются эфиры жирных (миристиновой, пальмитиновой и стеариновой) кислот с глицерином [17, 19].

9. Установлено, что эфиры в качестве фазовых материалов обладают хорошей термической стабильностью. В [17] выполнено 100 термических циклов эвтектической смеси лауриновой и пальмитиновой кислот. Отмечено изменение температуры плавления на -0,51% и скрытой теплоты на 10%.

10. Исследования по использованию солевых гидратов в качестве возможных ТАМФП показали их высокие теплофизические свойства в условиях термоциклирования. В [22] проведено 1000 тепловых циклов с неорганической солью хлорида кальция гексагидрата в качестве материала аккумулирования тепла. Было отмечено отсутствие изменения температуры плавления и скрытой теплоты плавления.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теплофизические свойства, а именно – температура плавления, скрытая теп-

лота плавления, удельные теплоемкость и теплопроводность являются важнейшими параметрами для выбора теплоаккумулирующего материала. Наиболее важными критериями, ограничивающими использование накопителей тепла с фазовым переходом, являются недостаточная долговременная стабильность, термоциклирование, коррозия, фазовая сегрегация и переохлаждение.

В качестве теплоаккумулирующих материалов с фазовым переходом для систем, использующих энергию солнца и работающих с достаточно невысокими температурами (порядка 30–60°C), могут быть использованы как органические (парафины и жирные кислоты), так и неорганические (кристаллогидраты солей) материалы. При выборе ТАМФП необходимо учитывать такие факторы как влияние термоциклирования на свойства материала, переохлаждение и влияние коррозии на конструкционные материалы аккумулятора.

Для повышения эффективности процессов теплообмена в системах аккумулирования тепла, в которых используются ТАМФП с низким коэффициентом теплопроводности, необходимо принимать специальные технические решения: увеличивать площадь теплопередающих поверхностей, использовать инклюзивные добавки (например, вставку пористой металлической пены и металлической матрицы в теплоаккумулирующий материал, добавление или дисперсия наночастиц) и др.

Таким образом, в статье затронут только небольшой аспект выбора типа термомкумулирующего материала для систем солнечного теплоснабжения. Очевидно, что дальнейшее решение научной задачи по применению тепловых аккумуляторов с фа-

зовым переходом требует серьезных исследований по изменению теплофизических свойств ТАМФП в условиях эксплуатации, конструктивных решений высокоэффективных тепловых аккумуляторов и других вопросов.

#### **Библиографический список**

1. Бабаев Б.Д. Принципы теплового аккумулирования и используемые теплоаккумулирующие материалы // Теплофизика высоких температур. 2014. Т. 52. Вып. 5. С. 760–776. <https://doi.org/10.7868/S0040364414050019>
2. КукOLEV М.И. Основы проектирования тепловых накопителей энергии. Петрозаводск: Изд-во Петрозав. гос. ун-та, 2001. 238 с.
3. Кругликов П.А., Лебедев В.А., Рудченко С.А. Перспективы использования систем аккумулирования тепла на атомных электрических станциях // Энергоэффективность энергетического оборудования: сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. (г. Санкт-Петербург, 8–9 октября 2014 г.). СПб.: НМСУ «Горный», 2014. Т. 1. С. 204–210.
4. Лебедев В.А., Амер А. Проблема накопления и сохранения тепловой энергии в теплоэнергетике. Состояние и пути решения // Современные образовательные технологии в подготовке специалистов для минерально-сырьевого комплекса: сб. науч. тр. II Всерос. науч. конф. (г. Санкт-Петербург, 27–28 сентября 2018 г.). СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского горного ун-та, 2018. С. 929–935.
5. Данилин В.Н., Шабалина С.Г. Теплоаккумулирующие материалы на основе высокомолекулярных соединений [Электронный ресурс]. URL: <https://fh.kubstu.ru/fams/issues/issue01/st0107.pdf> (12.02.2020).
6. Аймбетова И.О., Сулейменов У.С., Камбаров М.А., Калшабекова Э.Н., Риставлетов Р.А. Теплофизические свойства фазопереходных теплоаккумулирующих материалов, применяемых в строительстве // Успехи современного естествознания. 2018. № 12. Ч. 1. С. 9–13. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.natural-sciences.ru/ru/article/view?id=36966> (12.02.2020). <https://doi.org/10.17513/use.36966>
7. Алексеев В.А., Карабин А.Е. Новый тип тепловых аккумуляторов для охлаждения радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов // Труды МАИ. 2011. Вып. 49. С. 1–11. [Электронный ресурс]. URL: <https://docplayer.ru/47663129-Novyy-tip-teplovyyh-akkumulyatorov-dlya-ohlazhdeniya-radioelektronnoy-apparatury-kosmicheskikh-apparatov.html> (12.02.2020).
8. Zalba B., Marín J.M., Cabeza L.F., Mehling H. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications // Applied Thermal Engineering. 2003. Vol. 23. Issue 3. P. 251–283. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00192-8](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00192-8)
9. Cabeza L.F., Castell A., Barreneche C., De Gracia A., Fernández A.I. Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2011. Vol. 15. Issue 3. P. 1675–1695. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.018>
10. Hadjieva M., Kanev S., Argirov J. M. Thermophysical properties of some paraffins applicable to thermal energy storage // Solar Energy Materials and Solar Cells. 1992. Vol. 27. Issue 2. P. 181–187. [https://doi.org/10.1016/0927-0248\(92\)90119-A](https://doi.org/10.1016/0927-0248(92)90119-A)
11. Sharma S.D., Buddhi D., Sawhney R.L. Accelerated thermal cycle test of latent heat-storage materials // Solar Energy. 1999. Vol. 66. Issue 6. P. 483–490. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(99\)00045-6](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(99)00045-6)
12. Sharma A., Sharma S.D., Buddhi D. Accelerated thermal cycle test of acetamide, stearic acid and paraffin wax for solar thermal latent heat storage applications // Energy Conversion and Management. 2002. Vol. 43. Issue 14. P. 1923–1930. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(01\)00131-5](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(01)00131-5)
13. Shukla A., Buddhi D., Sawhney R.L. Thermal cycling test of few selected inorganic and organic phase change materials // Renewable Energy. 2008. Vol. 33. Issue 12. P. 2606–2614. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.02.026>
14. Sari A. Thermal reliability test of some fatty acids as PCMs used for solar thermal latent heat storage applications // Energy Conversion and Management. 2003. Vol. 44. Issue 14. P. 2277–2287. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(02\)00251-0](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(02)00251-0)
15. Sari A., Kaygusuz K. Some fatty acids used for latent heat storage: thermal stability and corrosion of metals with respect to thermal cycling // Renewable Energy. 2003. Vol. 28. Issue 6. P. 939–948. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(02\)00110-6](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(02)00110-6)
16. Hasan A., Sayigh A.A. Some fatty acids as phase-change thermal energy storage materials // Renewable Energy. 1994. Vol. 4. Issue 1. P. 69–76. [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(94\)90066-3](https://doi.org/10.1016/0960-1481(94)90066-3)
17. Zhang Jian-Jun, Zhang Jian-ling, He Shu-mei, Wu Kezhong, Liu Xiaoqing. Thermal studies on the solid-liquid phase transition in binary systems of fatty acids // Thermochemica Acta. 2001. Vol. 369. Issue 1-2. P. 157–160. [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(00\)00766-8](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(00)00766-8)
18. Sari A., Sari H., Önal A. Thermal properties and thermal reliability of eutectic mixtures of some fatty acids as latent heat storage materials // Energy Conversion and Management. 2004. Vol. 45. Issue 3. P. 365–376. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(03\)00154-7](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(03)00154-7)



19. Sari A., Biçer A., Karaipekli A., Alkan C., Karadag A. Synthesis, thermal energy storage properties and thermal reliability of some fatty acid esters with glycerol as novel solid-liquid phase change materials // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2010. Vol. 94. Issue 10. P. 1711–1715. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.05.033>

20. Sharma A., Sharma S.D., Buddhi D., Sawhney R.L. Thermal cycle test of urea for latent heat storage applications // *International Journal of Energy Research*. 2001. Vol. 25. Issue 5. P. 465–468. <https://doi.org/10.1002/er.692>

21. Tyagi V.V., Buddhi D. Thermal cycle testing of calcium chloride hexahydrate as a possible PCM for latent heat storage // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2008. Vol. 92. Issue 8. P. 891–899. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2008.02.021>

22. Александров В.Д., Соболев О.В., Соболев А.Ю., Марченкова Ю.А. Использование теплоаккумулирующих материалов на основе кристаллогидратов солей натрия в транспортных средствах // *Вісник Донецької академії автомобільного транспорту*. 2015. № 1. С. 34–41.

### References

1. Babaev BD. Principles of Heat Accumulation and Heat-Accumulating Materials in Use. *Теплофізика vysokikh temperatur = High Temperature*. 2014;52(5):760–776. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0040364414050019>

2. Kukolev Ml. *Principles of Thermal Energy Storage Design*. Petrozavodsk; Petrozavodsk State University; 2001, p. 238. (In Russ.)

3. Kruglikov PA, Lebedev VA, Rudchenko SA. Application Prospects of Heat Storage Systems at Nuclear Power Plants. In: *Energoeffektivnost' energeticheskogo oborudovaniya: sbornik trudov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Energy Efficiency of Power Equipment: Collected Works of the International Scientific and Practical Conference*. 8–9 October 2014, Saint-Petersburg. Saint-Petersburg: St. Petersburg Mining University; 2014, vol. 1, p. 204–210. (In Russ.)

4. Lebedev VA, Amer A. The Problem of Accumulation and Preservation of Thermal Energy in Heat Power Engineering. Present State and Solutions. In: *Sovremennye obrazovatel'nye tehnologii v podgotovke specialistov dlja mineral'no-syr'evogo kompleksa: sbornik nauchnyh trudov II Vserossijskoj nauchnoj konferencii = Modern Educational Technologies in Training Specialists for the Mineral Resource Complex: Collected Scientific Works of II All-Russian Scientific Conference*. 27–28 September 2018, Saint Petersburg. Saint Petersburg: St. Petersburg Mining University; 2018, p. 929–935. (In Russ.)

5. Danilin VN, Shabalina SG. Macromolecular Compound-based Thermal Storage Materials. Available from: <https://fh.kubstu.ru/fams/issues/issue01/st0107.pdf> [Accessed 12th February 2020]. (In Russ.)

6. Ajmbetova IO, Sulejmenov US, Kambarov MA, Kalshabekova JeN, Ristavletov RA. Thermophysical Properties of Phase Transparent Heat-Storing Materials used in Construction. *Uspehi sovremennogo estestvoznaniya = Advances in Current Natural Sciences*. 2018;12-1:9–13. (In Russ.)

7. Alekseev VA, Karabin AE. A New Type of Heat Accumulator for Spacecraft Radio-Electronic Equipment Cooling. *Trudy MAI = Proceedings of Moscow Aviation Institute*. 2011;49:1–11. Available from: <https://docplayer.ru/47663129-Novyy-tip-teplovyh->

[akkumulyatorov-dlya-ohlazhdeniya-radioelektronnoy-apparaty-kosmicheskikh-apparatov.html](http://akkumulyatorov-dlya-ohlazhdeniya-radioelektronnoy-apparaty-kosmicheskikh-apparatov.html) [Accessed 12th February 2020]. (In Russ.)

8. Zalba B, Marin JM, Cabeza LF, Mehling H. Review on Thermal Energy Storage with Phase Change: Materials, Heat Transfer Analysis and Applications. *Applied Thermal Engineering*. 2003;23(3):251–283. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00192-8](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00192-8)

9. Cabeza LF, Castell A, Barreneche C, De Gracia A, Fernández AI. Materials used as PCM in Thermal Energy Storage in Buildings: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011;15(3):1675–1695. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.018>

10. Hadjieva M, Kanev S, Argirov JM. Thermophysical Properties of Some Paraffins Applicable to Thermal Energy Storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 1992;27(2):181–187. [https://doi.org/10.1016/0927-0248\(92\)90119-A](https://doi.org/10.1016/0927-0248(92)90119-A)

11. Sharma SD, Buddhi D, Sawhney RL. Accelerated Thermal Cycle Test of Latent Heat-Storage Materials. *Solar Energy*. 1999;66(6):483–490. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(99\)00045-6](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(99)00045-6)

12. Sharma A, Sharma SD, Buddhi D. Accelerated Thermal Cycle Test of Acetamide, Stearic Acid and Paraffin Wax for Solar Thermal Latent Heat Storage Applications. *Energy Conversion and Management*. 2002;43(14):1923–1930. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(01\)00131-5](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(01)00131-5)

13. Shukla A, Buddhi D, Sawhney RL. Thermal Cycling Test of Few Selected Inorganic and Organic Phase Change Materials. *Renewable Energy*. 2008;33(12):2606–2614. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.02.026>

14. Sari A. Thermal Reliability Test of Some Fatty Acids as PCMs used for Solar Thermal Latent Heat Storage Applications. *Energy Conversion and Management*. 2003;44(14):2277–2287. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(02\)00251-0](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(02)00251-0)

15. Sari A, Kaygusuz K. Some Fatty Acids used for Latent Heat Storage: Thermal Stability and Corrosion of Metals with Respect to Thermal Cycling. *Renewable Energy*. 2003;28(6):939–948. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(02\)00110-6](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(02)00110-6)

16. Hasan A, Sayigh AA. Some Fatty Acids as Phase-Change Thermal Energy Storage Materials. *Renewable*

*Energy*. 1994;4(1):69–76.

[https://doi.org/10.1016/0960-1481\(94\)90066-3](https://doi.org/10.1016/0960-1481(94)90066-3)

17. Zhang Jian-Jun, Zhang Jian-ling, He Shu-mei, Wu Kezhong, Liu Xiaoqing. Thermal Studies on the Solid–Liquid Phase Transition in Binary Systems of Fatty Acids. *Thermochimica Acta*. 2001;369(1-2):157–160.

[https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(00\)00766-8](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(00)00766-8)

18. Sari A, Sari H, Önal A. Thermal Properties and Thermal Reliability of Eutectic Mixtures of Some Fatty Acids as Latent Heat Storage Materials. *Energy Conversion and Management*. 2004;45(3):365–376.

[https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(03\)00154-7](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(03)00154-7)

19. Sari A, Biçer A, Karaipekli A, Alkan C, Karadag A. Synthesis, Thermal Energy Storage Properties and Thermal Reliability of Some Fatty Acid Esters with Glycerol as Novel Solid–Liquid Phase Change Materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*.

2010;94(10):1711–1715.

<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.05.033>

20. Sharma A, Sharma SD, Buddhi D, Sawhney RL. Thermal Cycle Test of Urea for Latent Heat Storage Applications. *International Journal of Energy Research*. 2001;25(5):465–468. <https://doi.org/10.1002/er.692>

21. Tyagi VV, Buddhi D. Thermal Cycle Testing of Calcium Chloride Hexahydrate as a Possible PCM for Latent Heat Storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2008;92(8):891–899.

<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2008.02.021>

22. Aleksandrov VD, Sobol OV, Sobolev AYU, Marchenkova YuA. Using Heat Storage Materials based on Sodium Salts Crystalline Hydrates in Vehicles. *Visnik Donec'koï akademii avtomobil'nogo transportu = Bulletin of the Donetsk Academy of Automobile Transport*. 2015;1:34–41.

#### **Критерии авторства**

Амер А.Э., Лебедев В.А. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

##### **Амер Ахмед Элсайед,**

аспирант,

Санкт-Петербургский горный университет,  
199106, г. Санкт-Петербург, 21 линия В.О., 2,  
Россия;

✉ e-mail: eng.ahmed\_amer@yahoo.com

##### **Лебедев Владимир Александрович,**

кандидат технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой теплотехники  
и теплоэнергетики,

Санкт-Петербургский горный университет,  
199106, г. Санкт-Петербург, 21 линия В.О., 2,  
Россия;

e-mail: lebedev\_va@spmi.ru

#### **Authorship criteria**

Amer A.E., Lebedev V.A. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

#### **Conflict of interests**

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

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

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

##### **Ahmed E. Amer,**

Postgraduate Student,

Saint-Petersburg Mining University,  
2, 21<sup>st</sup> Line, St. Petersburg 199106, Russia;

✉ e-mail: eng.ahmed\_amer@yahoo.com

##### **Vladimir A. Lebedev,**

Cand. Sci. (Eng.), Professor,

Head of the Department of Heat Engineering  
and Heat Power Engineering,

Saint-Petersburg Mining University,  
2, 21<sup>st</sup> Line, St. Petersburg 199106, Russia;

e-mail: lebedev\_va@spmi.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.311.004-021.387

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-582-595>

## Алгоритм поиска адаптивной траектории утяжеления для энергосистем большой размерности

© Н.Л. Бацева, В.А. Сухоруков

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*

**Резюме:** Цель исследования – создание и апробация алгоритма поиска адаптивной траектории утяжеления, соответствующей наименьшему предельному по статической аperiodической устойчивости перетоку активной мощности для текущей схемно-режимной ситуации в энергосистеме. Для разработки алгоритма использовано значение определителя матрицы Якоби, методы кластерного анализа, а также программный комплекс RastrWin, пакет Microsoft Excel, функции Matlab и методы математической статистики. Предложен, разработан (на языках программирования Visual Basic Script, Visual Basic for Application) и апробирован алгоритм, базирующийся на изменении численного значения определителя матрицы Якоби в зависимости от изменения активной мощности генерирующего оборудования и активной мощности нагрузок энергосистемы (на схеме части Иркутской энергосистемы). Определены сенсорные нагрузочные узлы для исследуемого контролируемого сечения № 1, связывающего энергорайон с остальной частью энергосистемы. Установлено, что увеличение величины мощности (на 0,197 МВт – для узлов 220 кВ, на 0,076 МВт – для узлов 110 кВ, на 0,112 МВт – для узлов 6–10 кВ) в этих узлах приводит к значительному изменению значений определителя матрицы Якоби (на 0,103 о.е. – для узлов 220 кВ, на 0,926 о.е. – для узлов 110 кВ, на 0,33 о.е. – для узлов 6–10 кВ). Установлено, что разница в 27 МВт между значениями предельного перетока, определенного по статической аperiodической устойчивости, и предельного перетока, рассчитанного с использованием траектории утяжеления, объясняется отличием исходных расчетных моделей, которые использованы при утяжелении режима. Апробация алгоритма на контролируемом сечении № 1 Иркутской энергосистемы позволила сделать вывод о его пригодности для поиска адаптивной траектории утяжеления с ее последующим применением при расчете и анализе предельных по статической аperiodической устойчивости перетоков активной мощности в контролируемом сечении.

**Ключевые слова:** траектория утяжеления, определитель матрицы Якоби, статическая аperiodическая устойчивость, схема большой размерности, сенсорные узлы, контролируемое сечение

**Информация о статье:** Дата поступления 18 декабря 2019 г.; дата принятия к печати 29 мая 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 июня 2020 г.

**Для цитирования:** Бацева Н.Л., Сухоруков В.А. Алгоритм поиска адаптивной траектории утяжеления для энергосистем большой размерности. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 3. С. 582–595. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-582-595>

## Search algorithm for adaptive weighting trajectory in large-scale power systems

Natalia L. Batseva, Vasilii A. Sukhorukov

*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia*

**Abstract:** The study is aimed at the creation and testing of a search algorithm for the adaptive weighting trajectory corresponding to the smallest ultimate active-power flow for the current circuit-mode situation in terms of aperiodic stability in a power system. To develop the algorithm, a cluster analysis approach was taken using the Jacobi matrix determinant in RastrWin, Microsoft Excel and Matlab software environments alongside various mathematical statistical methods. As a result, the proposed algorithm was developed (in the programming languages of Visual Basic Script and Visual Basic for Applications) and tested based on a change in the numerical value of the Jacobi matrix determinant depending on changes in the active power of both the generating equipment and the power system loads (in the diagram for a part of the Irkutsk power system). Sensory load nodes were determined for the investigated controlled section No. 1 connecting the energy district with the rest of the energy system. An increase in the power (by 0.197, 0.076 and 0.112 MW for nodes of 220, 110 and 6–10 kV, respectively) in these nodes was shown to result in significant changes in the values of the Jacobi matrix determinant (by 0.103, 0.926 and 0.33 p.u. for nodes of 220, 110 and 6-10 kV, respectively). The difference of 27 MW between the values of the limiting power flow both determined by the static aperiodic stability and calculated

using the weighting trajectory is explained in terms of the difference between the initial calculation models used for mode weighting. Testing the algorithm on the controlled section No. 1 of the Irkutsk power system led to a conclusion concerning its applicability in searching for an adaptive weighting trajectory with subsequent application in calculating and analysing ultimate active-power flows in the controlled section in terms of static aperiodic stability.

**Keywords:** weighting trajectory, Jacobian matrix determinant, aperiodic stability, large-scale power system, sensor nodes, controlled section

**Information about the article:** Received December 18, 2019; accepted for publication May 29, 2020; available online June 30, 2020.

**For citation:** Batseva NL, Sukhorukov VA. Search algorithm for adaptive weighting trajectory in large-scale power systems. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(3):582–595. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-582-595>

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Траектория утяжеления представляет собой набор изменений значений параметров режима энергосистемы (ЭС) на каждом шаге утяжеления, которые приводят к увеличению перетока активной мощности в контролируемом сечении (КС)<sup>1</sup>. В соответствии с принятой для определения величин допустимых перетоков мощности траекторией утяжеления должен быть получен наименьший предельный по статической аperiodической устойчивости (САУ) переток активной мощности в КС, поэтому возникает задача поиска кратчайшей и «наиболее опасной» траектории утяжеления, которая будет приводить исследуемый режим ЭС к границе устойчивости.

В практических расчетах применяются два типа траекторий утяжеления – «генерация – генерация» и «генерация – нагрузка». Первый тип характерен для частей ЭС, в которых имеется достаточная мощность генерации, при этом поиск траектории утяжеления сводится к решению задачи оптимальной загрузки (или разгрузки) генераторов для получения наименьшего предельного перетока в КС. Второй тип используется, когда в передающей части ЭС в качестве изменяемого режимного параметра используется мощность генерации, а в приемной части ЭС – мощность нагрузки. Проблема поиска траектории решается путем определения опорных нагрузочных уз-

лов, в которых следует увеличить нагрузку. Опорными являются узлы, где прогнозируется увеличение мощности нагрузки или подключение новых потребителей в соответствии со схемой и программой развития (СиПР) субъекта. Выполнение задач СиПР не всегда может быть гарантировано в полном объеме, поэтому появляется неопределенность в правильности найденной траектории утяжеления. Кроме того, режимные параметры постоянно изменяются, поэтому для получения значений допустимых перетоков, соответствующих текущему режиму ЭС, необходимо искать траекторию утяжеления с учетом актуальных значений параметров режима, т.е. адаптировать ее к изменяющимся режимным параметрам.

Вопросы поиска адаптивной траектории утяжеления рассмотрены в работах [1–10]. Автор работы [1] предлагает использовать модифицированные уравнения предельных режимов для того, чтобы найти кратчайшую нормаль к границе устойчивости. Для ЭС, которая может быть замещена многомашинным эквивалентом, граница устойчивости представляется в  $n$ -мерном пространстве, и поэтому существует множество нормалей к границе устойчивости. В работах [2, 3] описан алгоритм определения кратчайшего расстояния до границы области устойчивости режима ЭС путем минимизации целевой функции. Целевая функция состоит из сумм квадратов невязок уравнений, описывающих установив-

<sup>1</sup>СТО 59012820.27.010.001 – 2013. Правила определения максимально допустимых и аварийно допустимых перетоков активной мощности в контролируемых сечениях диспетчерского центра ОАО «СО ЕЭС». Введ. приказом ОАО «СО ЕЭС» № 10 от 18.01.2013.



шийся режим ЭС. В первом случае они задаются вектором регулируемых параметров режима, а во втором – узлами утяжеления, мощности которых будут изменяться. Вектор регулируемых параметров режима представляет собой совокупность узлов расчетной модели, в которых изменяют мощности генерации и нагрузки для достижения границы области САУ. При задании траектории утяжеления типа «генерация – нагрузка» и выборе вектора регулируемых параметров режима вначале необходимо выбрать опорные узлы. От выбранного состава опорных узлов будет зависеть расчетный предельный переток активной мощности. Однако перед выполнением расчетов точный состав опорных узлов неизвестен, поэтому поиск критического направления утяжеления затруднен. Выбор опорных узлов на основании экспертных оценок неоднозначен и приведет к различным значениям предельных перетоков при разных совокупностях опорных узлов, входящих в вектор регулируемых параметров режима. В работе [2] сделан акцент на то, что для реальных схем ЭС вопрос поиска направления утяжеления является достаточно сложной задачей, и чаще всего направление утяжеления выбирается с учетом знаний персонала о режимах работы ЭС и опыта выполнения расчетов, что не позволяет применять данный подход в качестве универсального.

Для того чтобы избежать многомерности задачи утяжеления режима, авторы работы [4] предлагают использовать деформацию области САУ равномерным образом, изменяя параметры схемы сети в  $k_n$  раз. Данный подход планируется применять и при выборе управляющих воздействий (УВ) с использованием алгоритма I-ДО в централизованной системе противоаварийной автоматики (ЦСПА). С его помощью можно загрузить все КС схемы, а затем найти наиболее загруженное (опасное) сечение и относительно определенно-го опасного сечения выбирать УВ. Однако

использование такого подхода при определении предельных величин по САУ перетоков активной мощности и назначении максимально допустимых (МДП) и аварийно допустимых (АДП) перетоков мощности в КС затруднительно, поскольку при выполнении расчетов необходимо добиваться нарушения устойчивости именно в исследуемом КС, а не в смежных с ним сечениях.

В работах [5–7] авторы предлагают оригинальный подход определения величины МДП в КС с использованием текущей телеметрической информации на основе методов оценивания состояния ЭС. Идея подхода состоит в задании псевдоизмерения величины МДП (ПИ МДП), которое заведомо превышает существующий МДП, и далее в определении МДП при изменении заданных параметров режима в пределах регулирования. Регулируемыми параметрами режима выступают активные и реактивные мощности, а также модули напряжения в узлах ЭЭС. Определение МДП происходит путем максимального приближения перетока активной мощности в КС к величине ПИ МДП путем минимизации целевой функции взвешенных наименьших квадратов.

В работе [8] рассматривается поиск сенсорных или чувствительных узлов. Режимные параметры (напряжение и угол при напряжении) сенсорных или чувствительных узлов изменяются в большей степени при изменениях мощности нагрузки и генерации. Сенсорные узлы предполагается использовать в качестве опорных узлов в адаптивной траектории утяжеления режима. При этом не рассматривается, какие именно узлы следует отнести к сенсорным после применения алгоритмов поиска (с использованием обратной матрицы Якоби, спектрального или сингулярного разложения матрицы Якоби) и их ранжирования.

В работе<sup>2</sup> описывается общая тенденция снижения границы области САУ при увеличении количества узлов, которые входят в траекторию утяжеления. Данный

<sup>2</sup>Гайсин Б.М. Разработка методик определения влияния неоднородности электроэнергетических систем на возникновение и развитие аварийных каскадных процессов: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02. Уфа, 2019. 156 с.

факт выводит задачу отделения наиболее сенсорных узлов от несенсорных узлов на достаточно важный уровень при поиске адаптивной траектории утяжеления.

В работах [9, 10] авторы приводят алгоритм поиска адаптивной траектории утяжеления, который основывается на степени изменения величины определителя матрицы Якоби при различных изменениях мощности в узлах расчетной модели ЭС. В предлагаемом алгоритме при изменении активной мощности в каком-либо узле ЭС реактивная мощность остается неизменной. Однако, как следует из<sup>1</sup>, изменение реактивной мощности необходимо учитывать при определении величины предельного по САУ перетока активной мощности в КС. Также в рассматриваемом алгоритме не учитывается изменение мощности генерации при изменении мощности нагрузки, т.е. используется несбалансированная траектория утяжеления. Использование такой траектории утяжеления может приводить к изменению баланса мощности балансирующего узла, частных производных матрицы Якоби в балансирующем и соседних с ним узлах, и в конечном итоге – к неверному значению изменения определителя матрицы Якоби. Помимо этого, при таком подходе предел по САУ может достигаться не в исследуемом КС, а в других сечениях расчетной модели.

В работах [1–3, 8–10] предлагаемые алгоритмы преимущественно апробируются на тестовых ЭС. В расчетную модель реальной ЭС входят тысячи узлов и ветвей, в связи с чем размерность матрицы Якоби для схемы реальной ЭС будет большой, поэтому возникает проблема анализа определителя матрицы Якоби для ЭС большой размерности.

Проблема поиска адаптивной траектории утяжеления связана в том числе с внедрением и функционированием в Единой энергетической системе (ЕЭС) России системы мониторинга запасов устойчивости (СМЗУ), которая предназначена для определения в режиме реального времени величин МДП и АДП в КС [11]. На данном этапе развития технологии в СМЗУ приме-

няется алгоритм пересчета нормировочных коэффициентов вектора изменения режима (ВИР) [12]. Данный алгоритм позволяет на каждом цикле расчета изменять параметры утяжеления, т.е. приращения мощностей в заранее определенных узлах утяжеления, учитывая текущие значения мощностей нагрузки и генерации, а также технологические ограничения генераторов электрических станций. Использование адаптивной траектории утяжеления сделало бы возможным не только определение параметров узлов утяжеления на каждом расчетном цикле СМЗУ, но и адаптивный выбор узлов утяжеления с учетом текущей схемно-режимной ситуации.

Таким образом, проблема поиска адаптивной траектории утяжеления с определением опорных узлов для схем большой размерности до сих пор остается актуальной.

В статье ставится задача алгоритмизации процесса поиска оптимальной траектории утяжеления в текущем режиме ЭС, которая будет являться адаптивной к сложившейся схемно-режимной ситуации.

Целью исследования является поиск адаптивной траектории утяжеления для текущей схемно-режимной ситуации ЭС, соответствующей наименьшему предельному по САУ перетоку активной мощности.

## **2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Классическим подходом к анализу САУ является известный метод малых колебаний. Корни характеристического уравнения позволяют судить об устойчивом или неустойчивом состоянии ЭС. Появление хотя бы одного корня с положительной вещественной частью будет свидетельствовать об аperiodическом нарушении устойчивости и смене знака свободного члена характеристического уравнения. При наличии в расчетной схеме балансирующего узла, рассматриваемого как шины бесконечной мощности, задании для генераторов  $U_i = const$ , использовании *PU*-модели генератора, применении в расчетах устой-



чивости и установившихся режимов одних и тех же статических характеристик нагрузки, значения свободного члена характеристического уравнения и определителя матрицы Якоби совпадают между собой, что дает возможность использовать определитель матрицы Якоби в качестве критерия САУ.

Матрица Якоби представляет собой квадратную матрицу размерностью  $(2n - (n_{\text{баз}} + n_{V_{3д}}) - n_{\text{баз}})$  [13]. Структура матрицы Якоби и размерность ее блоков приведена на рис. 1.

На рис. 1 использованы обозначения:  $n$  – общее число узлов в расчетной модели ЭС,  $n_{\text{баз}}$  – число базисно-балансирующих узлов,  $n_{V_{3д}}$  – число  $PU$ -узлов (узлы, моделирующие генераторы электростанций, а также плавно регулируемые средства компенсации реактивной мощности, например, синхронный компенсатор, статический тиристорный компенсатор, управляемый шунтирующий реактор).

При расчете определителя матрицы большой размерности использовалось  $LU$  – разложение матрицы Якоби с учетом слабой заполненности матрицы.

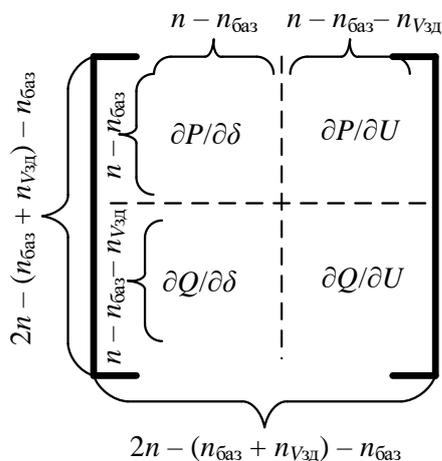


Рис. 1. Структура матрицы Якоби  
Fig. 1. Jacobian matrix structure

В специализированных математических пакетах имеется функция *sparse*, которая позволяет хранить слабозаполненные матрицы с помощью покоординатного хра-

нения, когда хранятся только ненулевые элементы матрицы и соответствующие строчные и столбцовые индексы [14].

$LU$  – разложение матрицы  $A$  имеет следующий вид [15]:

$$A = LU, \quad (1)$$

где  $A$  – исходная матрица;  $L$  – нижняя унитреугольная матрица (на главной диагонали расположены единицы, все элементы, расположенные выше главной диагонали, равны нулю);  $U$  – верхняя треугольная матрица (все элементы, расположенные ниже главной диагонали, равны нулю).

Получив  $LU$  – разложение матрицы, можно вычислить ее определитель как произведение диагональных элементов матрицы  $U$ , т.е.

$$\begin{aligned} \det(A) &= \det(LU) = \det(L) \det(U) = \\ &= \det(U) = u_{11} \dots u_{mm}. \end{aligned}$$

Блок-схема алгоритма поиска адаптивной траектории утяжеления в части выбора нагрузочных узлов, изменение мощности в которых наиболее сильно влияет на определитель матрицы Якоби, приведена на рис. 2 с учетом сведений, представленных в работах [9, 10].

Алгоритм поиска адаптивной траектории утяжеления состоит в следующем:

1. Рассчитывается исходное значение определителя матрицы Якоби  $\det J$  для рассматриваемой схемно-режимной ситуации в следующей последовательности:

1.1 выгружается массив значений производных матрицы Якоби ( $\partial P/\partial \delta$ ,  $\partial P/\partial U$ ,  $\partial Q/\partial \delta$ ,  $\partial Q/\partial U$ ) из ПК RastrWin в пакет Microsoft Excel;

1.2 выполняется макрос на языке VBA, результатом которого являются три массива, реализующие покоординатное хранение матрицы Якоби;

1.3 выполняется  $LU$  – разложение матрицы Якоби и определяется значение ее определителя путем перемножения диагональных элементов верхней треугольной матрицы  $U$ .

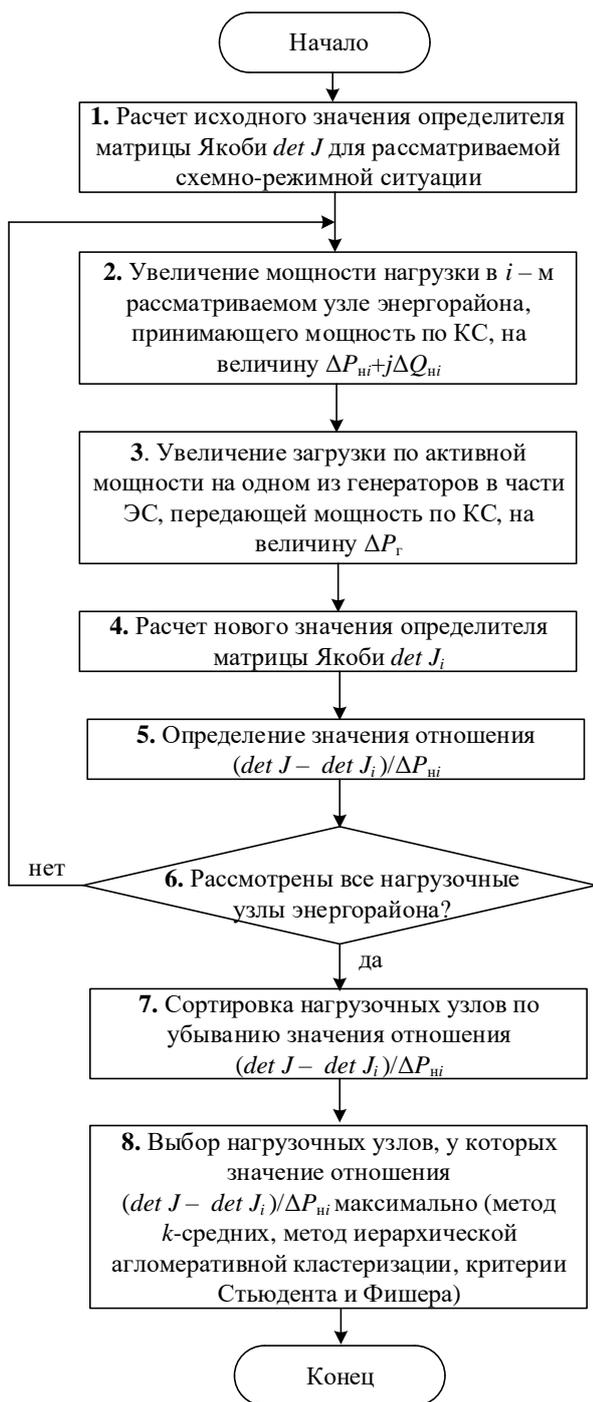


Рис. 2. Блок-схема алгоритма поиска адаптивной траектории утяжеления  
 Fig. 2. Flow diagram of the search algorithm of an adaptive heavy-loaded trajectory

2. В узле части ЭС, принимающей мощность по КС, увеличивается значение активной мощности нагрузки на величину  $\Delta P_{ни}$ :

$$\Delta P_{ни} = \frac{P_{ни}}{\sum_{i=1}^n P_{ни}} P_{н.баз}, \quad (2)$$

где  $\Delta P_{ни}$  – приращение активной мощности нагрузки в  $i$ -м узле;  $P_{ни}$  – исходная активная мощность нагрузки  $i$ -го узла;  $P_{н.баз}$  – базовое значение активной мощности нагрузки (выбирается произвольно);  $\sum_{i=1}^n P_{ни}$  – суммарная активная мощность нагрузки всех рассматриваемых нагрузочных узлов;  $n$  – количество рассматриваемых узлов.

Пропорционально значению  $\Delta P_{ни}$  (с сохранением коэффициента мощности) увеличивается значение реактивной мощности нагрузки на величину  $\Delta Q_{ни}$ :

$$\Delta Q_{ни} = \Delta P_{ни} \cos \varphi, \quad (3)$$

где  $\Delta Q_{ни}$  – приращение реактивной мощности нагрузки в  $i$ -м узле;  $\Delta P_{ни}$  – приращение активной мощности нагрузки в  $i$ -м узле;  $\cos \varphi$  – коэффициент мощности.

3. На генераторе в части ЭС, передающей мощность по КС, увеличивается загрузка по активной мощности на величину  $\Delta P_{г}$ :

$$\Delta P_{г} = \Delta P_{ни} + P_{пот}, \quad (4)$$

где  $\Delta P_{г}$  – приращение активной мощности генерации на одном из генераторов в передающей части ЭС;  $\Delta P_{ни}$  – приращение активной мощности нагрузки в  $i$ -м узле;  $P_{пот}$  – величина потерь активной мощности в электросетевых элементах (принимается равной 1–2 МВт).

4. Рассчитывается новое значение  $\det J_i$  после увеличения нагрузки в  $i$ -м узле на величину  $\Delta P_{ни}$  и увеличения загрузки одного из генераторов в передающей части ЭС на величину  $\Delta P_{г}$ .

5. Определяется значение отношения



$$\frac{\Delta \det J}{\Delta P_{ni}} = \frac{\det J - \det J_i}{\Delta P_{ni}}, \quad (5)$$

где  $\Delta \det J$  – изменение значения определителя матрицы Якоби;  $\Delta P_{ni}$  – приращение активной мощности нагрузки в  $i$ -м узле;  $\det J$  – исходное значение определителя матрицы Якоби;  $\det J_i$  – значение определителя матрицы Якоби после увеличения нагрузки в  $i$ -м узле на величину  $\Delta P_{ni}$  и увеличения загрузки одного из генераторов в передающей части ЭС на величину  $\Delta P_r$ .

6. Процесс повторяется в той же последовательности для других исследуемых узлов.

7. Рассматриваемые нагрузочные узлы сортируются по убыванию значения отношения  $\frac{\Delta \det J}{\Delta P_{ni}}$ .

8. Выбираются узлы, для которых значение отношения  $\frac{\Delta \det J}{\Delta P_{ni}}$  является максимальным.

Нагрузочные узлы разного класса напряжения рассматриваются отдельно, а узлы с активной мощностью нагрузки равной нулю, и узлы, в которых реактивная мощность нагрузки больше или равна активной, исключаются из рассмотрения, т.к. увеличение мощности в таких узлах приведет к высоким значениям отношения  $\Delta \det J / \Delta P_{ni}$ , выпадающим из общей выборки узлов.

Для выбора нагрузочных узлов, значения отношений  $\Delta \det J / \Delta P_{ni}$  которых являются максимальными, необходимо провести границу между двумя выборками, взяв при этом значение отношения  $\Delta \det J / \Delta P_{ni}$ , выступающего в качестве граничного: все нагрузочные узлы с отношением  $\Delta \det J / \Delta P_{ni}$ , большим, чем граничное, попадут в первую выборку, а со значением меньшим, чем граничное, – во вторую. В связи с этим возникает задача определения значения граничного отношения, от величины которого будет зависеть,

какое количество нагрузочных узлов попадет в первую выборку, сколько будут являться сенсорными и станут опорными узлами.

Для разбиения исходной выборки в качестве начального приближения были использованы методы кластерного анализа с указанием требуемого числа кластеров (два кластера): метод  $k$ -средних ( $k$ -means) и метод иерархической агломеративной кластеризации с использованием метода Уорда в качестве метрики расстояния между кластерами.

Метод  $k$ -средних является простым и распространенным методом кластеризации, используемым в совокупности с другими математическими методами для решения различных технологических задач в ЭС [16–19]. Суть его заключается в минимизации суммарного квадратичного отклонения точек кластера от центроида этого кластера:

$$\min \left[ \sum_{i=1}^k \sum_{x^{(j)} \in S_i} \|x^{(j)} - \mu_i\|^2 \right], \quad (6)$$

где  $k$  – количество кластеров;  $x^{(j)}$  –  $j$ -е наблюдение;  $S_i$  –  $i$ -й кластер;  $\mu_i$  – центроид кластера  $S_i$ .

Метод  $k$ -средних по умолчанию использует Евклидово расстояние в  $n$ -мерном пространстве в качестве метрики расстояния между точками кластера:

$$\rho(x, y) = \|x - y\| = \sqrt{\sum_{\rho=1}^n (x_{\rho} - y_{\rho})^2}, \quad (7)$$

где  $\rho(x, y)$  – Евклидово расстояние;  $x_{\rho}$ ,  $y_{\rho}$  – рассматриваемые точки кластера;  $n$  – размерность пространства кластера.

Одним из недостатков алгоритма  $k$ -средних является необходимость задания требуемого числа кластеров. Однако в нашем случае оно известно заранее: первый кластер – сенсорные нагрузочные узлы, которые войдут в адаптивную траекто-

рию утяжеления и будут опорными, второй кластер – все остальные нагрузочные узлы. Качество проведенной кластеризации во многом зависит от выбранных начальных центроидов. Для отыскания центроидов кластеров использован метод *k-means++* [20, 21].

Метод иерархической агломеративной кластеризации состоит в рассмотрении исходных точек наблюдений в качестве отдельных кластеров. Затем эти кластеры объединяются в более крупные, а те в свою очередь в еще более крупные, и т.д. Таким образом, происходит иерархическое формирование кластеров. В качестве метрики расстояния между кластерами использован метод Уорда, который на каждом шаге кластеризации объединяет два кластера так, что это приводит к минимальному увеличению дисперсии [22]:

$$\Delta = \sum_i (x_i - \bar{x})^2 - \sum_{x_i \in A} (x_i - \bar{a})^2 - \sum_{x_i \in B} (x_i - \bar{b})^2, \quad (8)$$

где  $\Delta$  – метрика Уорда;  $x_i$  –  $i$ -е наблюдение;  $A$  – первый объединяемый кластер;  $B$  – второй объединяемый кластер;  $\bar{x}$  –

центр объединенного кластера;  $\bar{a}$  – центр кластера  $A$ ;  $\bar{b}$  – центр кластера  $B$ .

Для подтверждения правильности результатов кластеризации использованы критерии Стьюдента и Фишера, которые позволяют проверить гипотезу об однородности двух выборок путем проверки равенства средних значений и дисперсий в двух выборках [23].

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для подтверждения работоспособности алгоритма поиска адаптивной траектории утяжеления был апробирован на КС № 1. Схема ЭС с КС № 1 приведена на рис. 3. При проведении расчетов рассматривалась схема ремонта устройства продольной компенсации (УПК) 500 кВ (УПК 500 кВ зашунтировано).

КС № 1 состоит из сетевых элементов:

- ВЛ 500 кВ ПС 500 кВ № 3 – ПС 500 кВ № 6;
- ВЛ 500 кВ ГЭС № 2 – ПС 500 кВ № 5 – первая цепь;
- ВЛ 500 кВ ГЭС № 2 – ПС 500 кВ № 5 – вторая цепь.

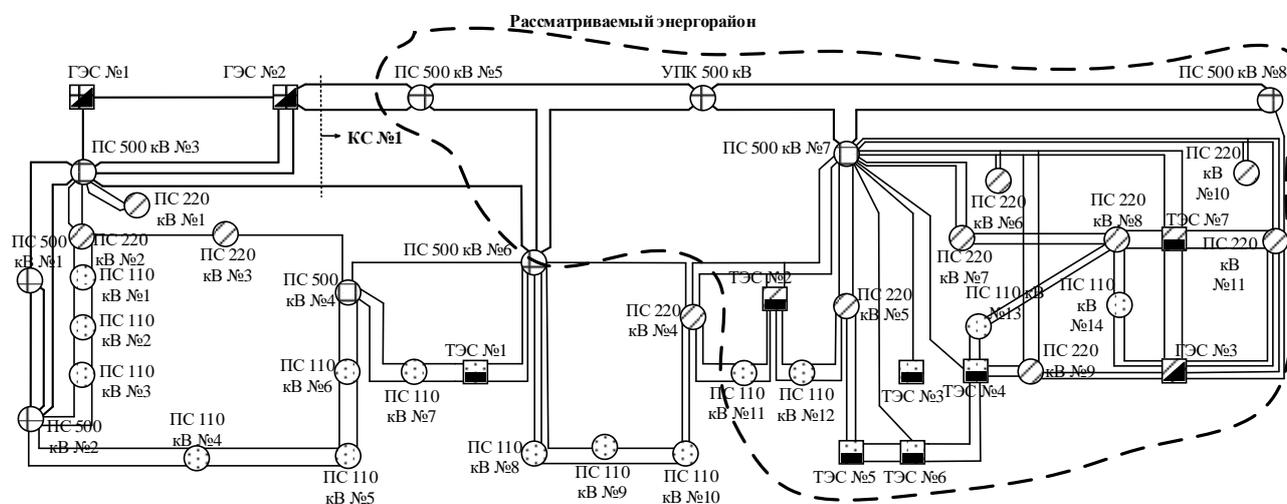


Рис. 3. Схема энергосистемы с контролируемым сечением № 1  
 Fig. 3. Diagram of a power system with a controlled section no. 1



Сенсорные нагрузочные узлы  
Sensor load nodes

Класс номинального напряжения, кВ	Общее количество нагрузочных узлов	Количество сенсорных узлов
6–10	6	3
110	114	14
220	8	6

Часть ЭС, обведенная на схеме пунктирной линией, принимает мощность по КС № 1, при этом нагрузочные узлы сгруппированы по классам номинального напряжения: 6–10 кВ, 110 кВ, 220 кВ. Мощность генерации изменялась на генераторах ГЭС № 2. В таблице приведено общее количество исследуемых узлов и количество тех узлов, изменение мощности в которых наиболее сильно влияет на изменение определителя матрицы Якоби.

Например, для нагрузочного узла № 1738 (1 СШ 110 кВ ПС 110 кВ № 14):

1. Определим исходное значение определителя матрицы. Значение определителя составляет  $\det J = 2,695947 \cdot 10^{-229}$  по пунктам 1.1–1.3 алгоритма. Отметим, что малое значение показателя степени обусловлено выполнением деления каждого диагонального элемента верхней треугольной матрицы  $U$  на 10000 для исключения переполнения переменной типа *double*, представляющей собой значение определителя матрицы Якоби. Поскольку далее в расчетах используется не само значение определителя матрицы Якоби, а его изменение, то эта операция не влияет на качество расчетов.

2. Увеличим значение активной мощности нагрузки узла № 1738 на величину  $\Delta P_n$  по формуле (2):

$$\Delta P_{n.1738} = \frac{P_{n.1738}}{n} P_{n.баз} = \sum_{i=1}^n P_{ni} = \frac{7,825}{1450} \cdot 31,825 = 0,172 \text{ МВт.}$$

Пропорционально значению  $\Delta P_n$  (с сохранением коэффициента мощности) увеличиваем значение реактивной (р)

мощности нагрузки на величину  $\Delta Q_n$  по (3):

$$\Delta Q_{n.1738} = \Delta P_{n.1738} \cos \varphi = 0,172 \cdot 0,72 = 0,124 \text{ МВ} \cdot \text{Ар.}$$

3. На одном из генераторов ГЭС № 2 увеличим загрузку по активной мощности на величину  $\Delta P_r$ , формула (4):

$$\Delta P_{r.ГЭС\#2} = \Delta P_{n.1738} + P_{пот} = 0,172 + 1 = 1,172 \text{ МВт.}$$

4. Определим новое значение определителя  $\det J_{1738}$  после увеличения нагрузки в узле на величину  $\Delta P_{n.1738}$  и увеличения загрузки одного из генераторов ГЭС № 2 на величину  $\Delta P_{r.ГЭС\#2}$ . Значение определителя составляет  $\det J_{1738} = 2,577738 \cdot 10^{-229}$ .

5. Вычислим значение отношения  $\Delta \det J / \Delta P_{n.1738}$  по формуле (5):

$$\frac{\Delta \det J}{\Delta P_{n.1738}} \cdot 10^{229} = \frac{\det J - \det J_{1738}}{\Delta P_{n.1738}} \cdot 10^{229} = \frac{(2,695947 - 2,577738) \cdot 10^{-229}}{0,172} \cdot 10^{229} = 0,687.$$

Значение отношения  $\Delta \det J / \Delta P_{n.1738}$  домножено на  $10^{229}$  для удобства дальнейших расчетов.

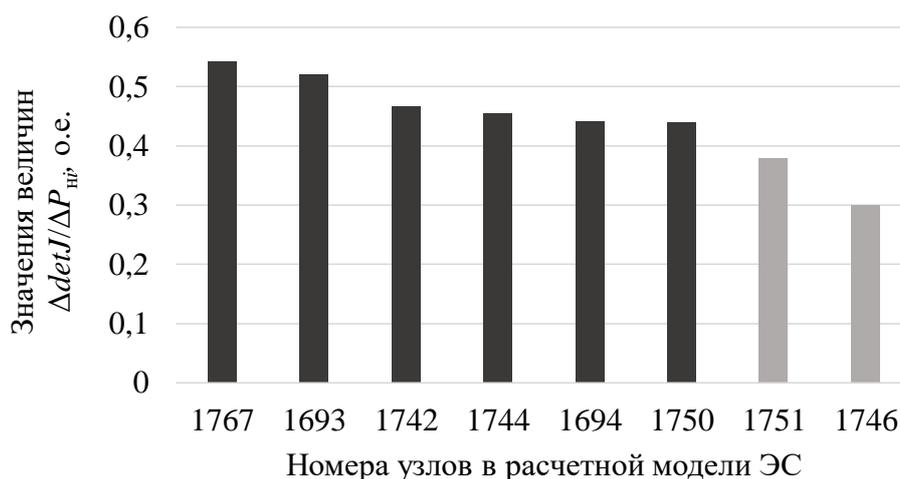
Аналогичным образом алгоритм применялся к остальным нагрузочным узлам. Для разделения полученной выборки узлов на два кластера по методам  $k$ -средних и иерархической агломеративной кластеризации использованы формулы (6)–(8). Методы выделили одни и те же нагру-

зочные узлы в первый кластер – кластер сенсорных узлов. С использованием критериев Стьюдента и Фишера было доказано, что полученные две выборки в результате процесса кластеризации действительно являются статистически различными.

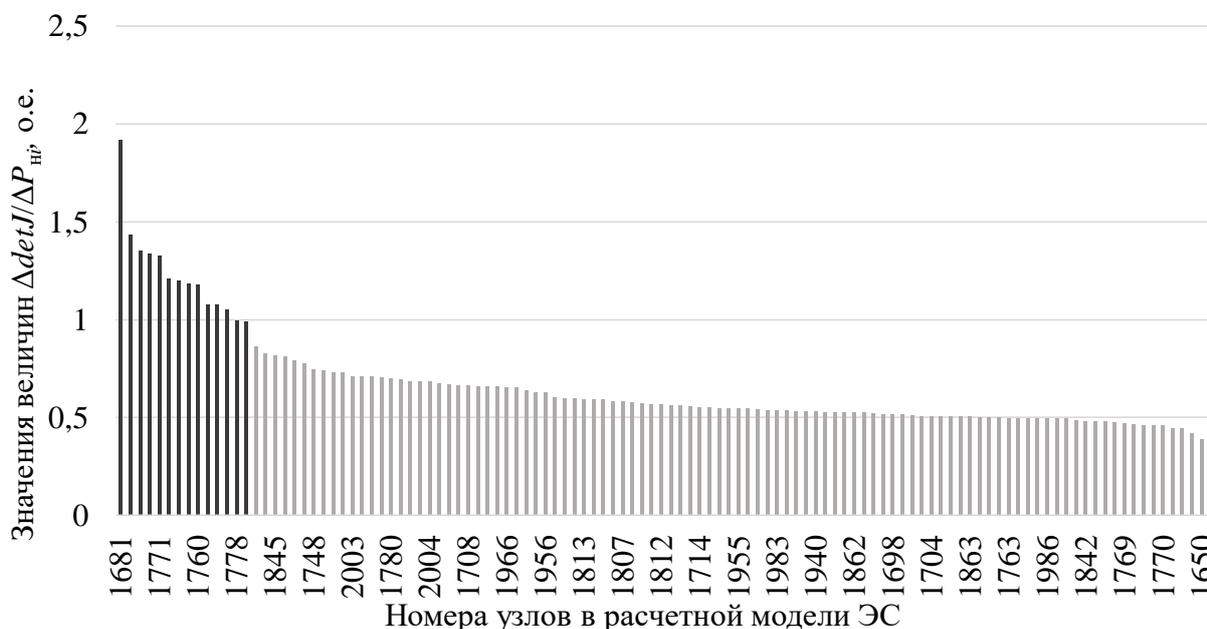
На рис. 4 и 5 приведены численные значения отношений  $\Delta det J / \Delta P_{ni}$  для выборок узлов с классами напряжений 220 кВ и 110 кВ, соответственно.

На рис. 4 и 5 темно-серым цветом выделены значения отношений

$\Delta det J / \Delta P_{ni}$  узлов, которые попали в первый кластер, являются сенсорными и должны быть использованы в адаптивной траектории утяжеления как опорные узлы, светло-серым цветом – значения отношений  $\Delta det J / \Delta P_{ni}$  нагрузочных узлов, которые попали во второй кластер. На рис. 4 приведены не все номера нагрузочных узлов 110 кВ в связи с их большим количеством.



**Рис. 4. Выборка узлов напряжением 220 кВ  
 Fig. 4. Sample of 220 kV nodes**



**Рис. 5. Выборка узлов напряжением 110 кВ  
 Fig. 5. Sample of 110 kV nodes**



При утяжелении режима по найденной траектории предел по САУ составил 2089 МВт. Предел по САУ с использованием траектории утяжеления, включающей в себя нагрузочные узлы, в которых увеличение мощности прогнозируется в соответствии с СиПР, составил 2072 МВт. Предельный переток с использованием адаптивной траектории утяжеления на 27 МВт превышает предельный переток, полученный с использованием траектории в соответствии с СиПР. Разница между значениями предельных перетоков не превышает амплитуду нерегулярных колебаний в 100 МВт. Разница в значениях предельных перетоков объясняется различием исходных расчетных моделей, которые использованы при утяжелении режима.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе выполненного исследования можно сделать вывод о корректности созданного алгоритма в части поиска адап-

тивной траектории утяжеления с последующим ее применением при определении предельных по САУ перетоков активной мощности в КС. Для получения более достоверных результатов и накопления статистических данных предложенный алгоритм планируется апробировать на других ремонтных схемах для КС № 1, а также для других КС, в том числе и для тех, где в качестве изменяемого режимного параметра используется мощность генерации в передающей и приемной частях ЭС. Кроме того, при удовлетворении требований к быстродействию алгоритм может быть апробирован на каждом цикле расчета в СМЗУ для получения адаптивной траектории утяжеления.

В статье не были исследованы смежные КС по отношению к КС № 1, не был рассмотрен вопрос о возможном нарушении устойчивости в смежных КС. Но в настоящее время алгоритм поиска адаптивной траектории утяжеления совершенствуется для решения этих задач.

#### Библиографический список

1. Крюков А.В. Предельные режимы электроэнергетических систем. Иркутск: Изд-во ИрГУПС, 2012. 236 с.
2. Паздерин А.В., Чусовитин П.В., Шабалин Г.С., Юферев С.В. Определение запасов устойчивости и управляющих воздействий для обеспечения статической устойчивости в задаче противоаварийного управления на основе Обобщенного метода Ньютона // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем: сб. науч. тр. V Междунар. науч.-техн. конф. (г. Сочи, 1–5 июня 2015 г.). Сочи, 2015. Т. 2. С. 50–57.
3. Shabalin G., Pazderin A., Bannykh P., Balakh E. Voltage stability analysis using quadratic objective function taking into account equality constraints // International Conference on the Science of Electrical Engineering (Eilat, 16–18 November 2016). New Jersey: IEEE, 2017. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICSEE.2016.7806166>
4. Аржанников С.Г., Вторушин А.С., Захаркин О.В., Ландман А.К., Петров А.Э., Попова Е.Ю. Алгоритмическое обеспечение ПТК верхнего уровня ЦСПА ОЭС Сибири и перспективы развития // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2013. № 1. С. 91–98.
5. Аксаева Е.С., Глазунова А.М. Оценивание максимально допустимого перетока контролируемого сечения электроэнергетической системы // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2018. № 1. С. 23–34.
6. Глазунова А.М. Применение метода оценивания состояния для вычисления предельных режимов электроэнергетической системы // Электричество. 2013. № 10. С. 23–29.
7. Glazunova A.M., Aksaeva E.S. Available transfer capability determination on the basis of a trade-off approach // Manchester PowerTech (Manchester, 18–22 June 2017). New Jersey: IEEE, 2017. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/PTC.2017.7981014>
8. Войтов О.Н., Воропай Н.И., Гамм А.З., Голуб И.И., Ефимов Д.Н. Анализ неоднородностей электроэнергетических систем. Новосибирск: Наука, Сиб. изд. фирма РАН, 1999. 256 с.
9. Ефремова И.Ю., Глушкин И.З. Разработка структурной схемы адаптивного пускового органа автоматики предотвращения нарушения устойчивости // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2017. № 6. С. 15–24.
10. Ефремова И.Ю., Глушкин И.З. Адаптивная настройка пускового органа противоаварийной автоматики для транзитов с промежуточными отборами // Электричество. 2017. № 2. С. 13–17. <http://dx.doi.org/10.24160/0013-5380-2017-2-13-17>
11. Томалев А.А. Система мониторинга запасов устойчивости (СМЗУ). Опыт эксплуатации и перспективные направления развития СМЗУ в ОЭС

Сибири // Электроэнергетика глазами молодежи: сб. науч. тр. юбилейной X Междунар. науч.-техн. конф. (г. Иркутск, 16–20 сентября 2019 г.). Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2019. Т. 2. С. 83–86.

12. Александров А.С., Максименко Д.М., Михайленко А.Ф., Неуймин В.Г. Развитие системы мониторинга запасов устойчивости с контролем динамической устойчивости для учета действия противоаварийной автоматики // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2017. № 1. С. 64–72.

13. Bonini Neto A., Amancio Alves D. Singularities Analysis of the Jacobian Matrix Modified in the Continuation Power Flow: Mathematical Modeling // IEEE Latin America Transactions. 2016. Vol. 14. Issue 12. P. 4750–4756. <https://doi.org/10.1109/TLA.2016.7817006>

14. Shah M. Sparse Matrix Sparse Vector Multiplication – A Novel Approach // 44th International Conference on Parallel Processing Workshops (Beijing, 1–4 September 2015). New Jersey: IEEE, 2015. P. 67–73. <https://doi.org/10.1109/ICPPW.2015.18>

15. Razik L., Schumacher L., Monti A., Guironnet A., Bureau G. A comparative analysis of LU decomposition methods for power system simulations // Milan PowerTech (Milan, 23–27 June 2019). New Jersey: IEEE, 2019. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/PTC.2019.8810616>

16. Lami B., Bhattacharya K. Clustering Technique Applied to Nodal Reliability Indices for Optimal Planning of Energy Resources // IEEE Transactions on Power Systems. 2016. Vol. 31. Issue 6. P. 4679–4690. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2015.2507061>

17. Kim Do-In, White A., Shin Yong-June. PMU-Based Event Localization Technique for Wide-Area Power System // IEEE Transactions on Power Systems. 2018. Vol. 33. Issue 6. P. 5875–5883.

<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2824851>

18. Grigoras G., Neagu B.-C., Scarlatache F., Ciobanu R.C. Identification of pilot nodes for secondary voltage control using K-means clustering algorithm // 26th International Symposium on Industrial Electronics (Edinburgh, 19–21 June 2017). New Jersey: IEEE, 2017. P. 106–110. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2017.8001231>

19. Yasrebi Nayini S.E., Geravand S., Maroosi A. A novel threshold-based clustering method to solve k-means weaknesses // International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (Chennai, 1–2 August 2017). New Jersey: IEEE, 2018. P. 47–52. <https://doi.org/10.1109/ICECDS.2017.8389496>

20. Olukanmi P.O., Twala B. K-means-sharp: Modified centroid update for outlier-robust k-means clustering // Pattern Recognition Association of South Africa and Robotics and Mechatronics (Bloemfontein, 30 November – 1 December 2017). New Jersey: IEEE, 2018. P. 14–19. <https://doi.org/10.1109/RoboMech.2017.8261116>

21. Niu Kun, Gao Zhipeng, Jiao Haizhen, Deng Nanjie. K-means+: A developed clustering algorithm for big data // 4th International Conference on Cloud Computing and Intelligence Systems (Beijing, 17–19 August 2016). New Jersey: IEEE, 2016. P. 141–144. <https://doi.org/10.1109/CCIS.2016.7790241>

22. Puggina Bianchesi N.M., Romão E.L., Lopes M.F.B.P., Balestrassi P.P., De Paiva A. P. A Design of Experiments Comparative Study on Clustering Methods // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 167726–167738. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2953528>

23. Prum R. Foundations and Applications of Statistics. An Introduction Using R. Second Edition. American Mathematical Society, 2018. 820 p.

## References

1. Kryukov AV. *Limit Load Operation of Electric Power Systems*. Irkutsk: Irkutsk State Transport University; 2012, 236 p. (In Russ.)

2. Pazderin AV, Chusovitin PV, Shabalin GS, Yuferev SV. Determination of Stability Margins and Control Actions to Ensure Steady-State Stability in the Emergency Control Problem using Newton's Method. In: *Sovremennyye napravleniya razvitiya sistem releinoi zashchity i avtomatiki energosistem: Trudy V mezhdunarodnoy nauuchno-tekhnicheskoy konferentsii = Actual Development Trends of Power System Relay Protection and Automation: Proceedings of 5th International Scientific and Technical Conference*. 01–04 June 2015, Sochi. Sochi; 2015, vol. 2, p. 50–57. (In Russ.)

3. Shabalin G, Pazderin A, Bannykh P, Balakh E. Voltage Stability Analysis using Quadratic Objective Function Taking into Account Equality Constraints. In: *International Conference on the Science of Electrical Engineering*. 16–18 November 2016, Eilat, New Jersey: IEEE; 2017, p. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICSEE.2016.7806166>

4. Arzhanikov SG, Vtorushin AS, Zakharkin OV, Land-

man AK, Petrov AE, Popova EYu. Algorithmic Support of the Upper Level Device of the Siberian Centralized Emergency Control System and its Development Prospects. *Izvestiya NTC Edinoj Enegeticheskoy Sistemi = STC of Unified Power System Proceedings*. 2013;1:91–98. (In Russ.)

5. Aksaeva ES, Glazunova AM. Estimation of Total Transfer Capability for a Controlled Cutset of Electric Power System. *Izvestiya NTC Edinoj Enegeticheskoy Sistemi = STC of Unified Power System Proceedings*. 2018;1:23–34. (In Russ.)

6. Glazunova AM. Using a State Estimation Method for Calculating Limit Load Operation Conditions of an Electric Power System. *Elektrichestvo*. 2013;10:23–29. (In Russ.)

7. Glazunova AM, Aksaeva ES. Available Transfer Capability Determination on the Basis of a Trade-Off Approach. In: *Manchester PowerTech*. 18–22 June 2017, Manchester. New Jersey: IEEE; 2017, p. 1–6. <https://doi.org/10.1109/PTC.2017.7981014>

8. Voitov ON, Voropai NI, Gamm AZ, Golub II, Efimov DN. *Analysis of Electrical Power System Heterogenei-*



ties. Novosibirsk: Nauka. The Siberian Publishing Company of the Russian Academy of Sciences; 1999, 256 p. (In Russ.)

9. Efremova IU, Glouskin IZ. Development of an Adaptive Fault Detector Structural Scheme of Automatic Stability Control System. *Vestnik Ivanovskogo Gosudarstvennogo Energeticheskogo Universiteta* = Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University. 2017;6:15–24. (In Russ.)

10. Efremova IYu, Gluskin IZ. Adaptive Tuning of the Emergency Control System for Transmission Systems with Intermediate Power Takeoff Points. *Elektrichestvo*. 2017;1:13–17. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.24160/0013-5380-2017-2-13-17>

11. Tomalev AA. System Stability Reserves Monitoring (SMZU). Using Experience and Development Prospects of SMZU in UES of Siberia. In: *Elektroenergetika glazami molodezhi: trudy yubileinoi X mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii* = Power Industry through the Eyes of Young People: Proceedings of Anniversary X International Scientific and Technical Conference. 16–20 September 2019, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2019, vol. 2, p. 83–86. (In Russ.)

12. Alexandrov AS, Maximenko DM, Mikhaylenko AF, Neuymin VG. Evolution of Stability Margin Monitoring System with Control of Dynamic Stability for Taking into Account Emergency Automatic Actions. *Izvestiya NTC Edinoj Energeticheskoy Sistemi* = STC of Unified Power System Proceedings. 2017;1:64–72. (In Russ.)

13. Bonini Neto A, Amancio Alves D. Singularities Analysis of the Jacobian Matrix Modified in the Continuation Power Flow: Mathematical Modeling. *IEEE Latin America Transactions*. 2016;14(12):4750–4756. <https://doi.org/10.1109/TLA.2016.7817006>

14. Shah M. Sparse Matrix Sparse Vector Multiplication – A Novel Approach. In: *44th International Conference on Parallel Processing Workshops*. 1–4 September 2015, Beijing. New Jersey: IEEE; 2015, p. 67–73. <https://doi.org/10.1109/ICPPW.2015.18>

15. Razik L, Schumacher L, Monti A, Guironnet A, Bureau G. A Comparative Analysis of LU Decomposition Methods for Power System Simulations. In: *Milan PowerTech*. 23–27 June 2019, Milan. New Jersey: IEEE; 2019, p. 1–6.

#### Критерии авторства

Бацева Н.Л., Сухоруков В.А. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

<https://doi.org/10.1109/PTC.2019.8810616>

16. Lami B, Bhattacharya K. Clustering Technique Applied to Nodal Reliability Indices for Optimal Planning of Energy Resources. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2016;31(6):4679–4690. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2015.2507061>

17. Kim Do-In, White A, Shin Yong-June. PMU-Based Event Localization Technique for Wide-Area Power System. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2018;33(6):5875–5883. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2824851>

18. Grigoras G, Neagu B-C, Scarlatache F, Ciobanu RC. Identification of Pilot Nodes for Secondary Voltage Control using K-Means Clustering Algorithm. In: *26th International Symposium on Industrial Electronics*. 19–21 June 2017, Edinburgh. New Jersey: IEEE; 2017, p. 106–110. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2017.8001231>

19. Yasrebi Nayini SE, Geravand S, Maroosi A. A Novel Threshold-Based Clustering Method to Solve K-Means Weaknesses. In: *International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing*. 1–2 August 2017, Chennai. New Jersey: IEEE; 2018, p. 47–52. <https://doi.org/10.1109/ICECDS.2017.8389496>

20. Olukanmi PO, Twala B. K-Means-Sharp: Modified Centroid Update for Outlier-Robust K-Means Clustering. In: *Pattern Recognition Association of South Africa and Robotics and Mechatronics*. 30 November – 1 December 2017, Bloemfontein. New Jersey: IEEE; 2018, p. 14–19. <https://doi.org/10.1109/RoboMech.2017.8261116>

21. Niu Kun, Gao Zhipeng, Jiao Haizhen, Deng Nanjie. K-Means+: A Developed Clustering Algorithm for Big Data. In: *4th International Conference on Cloud Computing and Intelligence Systems*. 17–19 August 2016, Beijing. New Jersey: IEEE; 2016, p. 141–144. <https://doi.org/10.1109/CCIS.2016.7790241>

22. Puggina Bianchesi NM, Romão EL, Lopes MFBP, Balestrassi PP, De Paiva AP. A Design of Experiments Comparative Study on Clustering Methods. *IEEE Access*. 2019;7:167726–167738. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2953528>

23. Prum R. *Foundations and Applications of Statistics. An Introduction Using R. Second Edition*. American Mathematical Society; 2018, 820 p.

#### Authorship criteria

Batseva N.L., Sukhorukov V.A. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

#### Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

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

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Бацева Наталья Ленмировна,**  
кандидат технических наук, доцент,  
доцент отделения электроэнергетики  
и электротехники  
Инженерной школы энергетики,  
Национальный исследовательский Томский  
политехнический университет,  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия;  
✉ e-mail: batsevan@tpu.ru

**Сухоруков Василий Александрович,**  
магистрант,  
Национальный исследовательский Томский  
политехнический университет,  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия;  
e-mail: vas60005596@yandex.ru

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Natalia L. Batseva,**  
Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor of the Department of Electric  
Power and Electrical Engineering, School  
of Energy and Power Engineering,  
National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Ave, Tomsk 634050, Russia;  
✉ e-mail: batsevan@tpu.ru

**Vasiliy A. Sukhorukov,**  
Master Degree Student,  
National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Ave, Tomsk 634050, Russia;  
e-mail: vas60005596@yandex.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.18

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-596-605>

## Золовой износ поверхностей нагрева котлоагрегатов

© Н.П. Герасимова

*Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия*

**Резюме:** Цель – анализ причин золового износа, приводящего к выходу из строя оборудования котлоагрегатов, и обзор способов увеличения срока службы конвективных поверхностей теплообмена котлов. Использован аналитический метод прогнозирования, включающий расчет абразивного износа в зависимости от сорта сжигаемого угольного топлива, а также метод диагностики поверхности труб (без специальной их подготовки) с помощью низкочастотных электромагнитных полей, реализуемый с помощью компьютерной программы «Состояние поверхностей нагрева» совместно с трехмерными моделями Autodesk AutoCAD. Показано, что вместе с аналитическим прогнозированием золового износа применение способа диагностики конвективных поверхностей, основанное на их сканировании, способствовало осуществлению систематического контроля за состоянием поверхностей нагрева котлов. Предложены способы снижения интенсивности абразивного износа в период эксплуатации котлоагрегатов: уменьшение количества сжигания угля с абразивностью > 63%; уменьшение тонины помола угольной пыли до 30–35%; установка защитных металлических устройств на трубы теплообменников; управление скоростью газового потока (для угля с низкой абразивностью ограничение по скорости потока составила 10–12 м/с, а для высокоабразивного угля – 6–8 м/с); регулярная диагностика поверхности труб (через каждые 50 тыс. ч наработки, а при утонении трубы на 0,5 мм и более – через каждые 25 тыс. ч). Предлагаемые мероприятия позволят увеличить срок службы поверхностей нагрева котельных агрегатов в 2–3 раза. Показана необходимость применения неразрушающих способов контроля состояния поверхностей труб в сочетании с регулировкой скорости газового потока в газоходе, а также подбора оптимальной тонины помола угольной пыли в зависимости от сорта сжигаемого на теплоэлектроцентралях угля для того, чтобы избежать незапланированных остановов котлов.

**Ключевые слова:** золовой износ, зола, абразивные свойства золы, поверхности нагрева котлоагрегатов, конвективный пароперегреватель, экономайзер

**Информация о статье:** Дата поступления 27 сентября 2019 г.; дата принятия к печати 22 декабря 2019 г.; дата онлайн-размещения 30 июня 2020 г.

**Для цитирования:** Герасимова Н.П. Золовой износ поверхностей нагрева котлоагрегатов. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 3. С. 596–605. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-596-605>

## Ash wear of boiler heating surfaces

Natalia P. Gerasimova

*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

**Abstract:** The study is aimed at analysing the causes of ash wear leading to failure of boiler unit equipment, as well as reviewing existing approaches to increasing the service life of boiler convective heat transfer surfaces. An analytical forecasting procedure was applied, including the calculation of abrasive wear depending on the type of burned coal fuel and the method of pipe surface diagnostics performed by low-frequency electromagnetic fields without special preparation. The implementation of pipe surface diagnostics was proceeded using the "Heating surface condition" software combined with Autodesk AutoCAD 3D models. Together with analytical forecasting of the ash wear, the application of the scanning-based convective surface diagnostics was demonstrated to provide the systematic monitoring of the surface condition of boiler heating units. The following approaches to reducing the abrasive wear intensity during the operation of boiler units are proposed: reduced quantity of coal fuel having abrasiveness of >63%; reducing the fineness of coal dust to the value of 30–35% by grinding; installation of protective metal devices on heat exchanger pipes; control of the gas flow rate (for low- and high-abrasive coal, the flow rate was limited by 10–12 and 6–8 m/s, respectively); regular diagnostics of the pipe surface (every 50,000 hours of operation and every 25,000 hours in the case of pipes reduced in thickness by 0.5 mm or more). The proposed measures ensure an increase in the service life of boiler heating surfaces by 2-3 times. The necessity of using non-destructive methods for monitoring the condition of pipe surfaces in combination with adjustment

of the gas flow rate in the gas duct, as well as selecting the optimal grinding for the fineness of coal dust depending on the coal type, is demonstrated to be an effective means of avoiding unplanned shutdowns of boilers.

**Keywords:** ash wear, ash, abrasive properties of ash, boiler heating surfaces, convective superheater, economizer

**Information about the article:** Received September 27, 2019; accepted for publication December 22, 2019; available online June 30, 2020.

**For citation:** Gerasimova NP. Ash wear of boiler heating surfaces. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(3):596–605. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-596-605>

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В России все большее значение приобретает ориентация теплоэнергетики на использование дешевых и легкодоступных низкосортных местных топлив. В связи с этим оценка последствий от перехода на новые виды топлива или марки угля для тепловых электрических станций является актуальной задачей, т.к. изменение состава сжигаемого угля объясняется экономическим эффектом, заключающимся в снижении стоимости на топливо, уменьшением цены его транспортировки, трудозатратами и платой за модернизацию оборудования [1, 2].

Современные работающие теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) спроектированы в свое время на использование конкретных сортов угля. Реальные характеристики угля, сжигаемого в котлах тепловых электрических станций, не соответствуют качествам проектного твердого топлива.

Из-за этого теплоэлектростанции (ТЭС) несут большие экономические потери, в том числе увеличивается время простоя оборудования в ремонте вследствие шлакования и износа поверхностей нагрева [3, 4].

Одним из серьезных последствий от сжигания низкосортного топлива является высокая интенсивность физического износа оборудования, установленного на ТЭС России. С учетом длительного срока его эксплуатации из-за использования непроектного угля интенсивнее происходит разрушение основного и вспомогательного оборудования станций, что приводит к значительным изменениям условий функционирования всей технологической системы станций [5].

Воздухоподогреватели, экономайзе-

ры, трубы в топке котла подвергаются разрушению, в том числе из-за абразивного воздействия золы и несгоревших частиц продуктов сгорания топлива, ускоряя выход из строя оборудования. Это приводит к вынужденным ремонтам конвективных поверхностей нагрева. Часто период эксплуатации составляет от 2-х до 3-х лет в связи с тем, что происходит интенсивное утонение стенок труб, которое перестает соответствовать их нормативной толщине [6–9].

При эксплуатации котлоагрегатов, работающих на сжигании твердого топлива, возможно несоответствие фактических характеристик углей нормативным, что приводит к отклонению от заданных значений объемов продуктов сгорания и температуры на выходе из топки. Следствием этого является нарушение работы конвективной части котла и увеличение золового (абразивного) износа теплообменных труб.

Не только основное котельное и вспомогательное оборудования интенсивно разрушаются из-за ухудшения качественных характеристик угля. Весь технологический цикл по эксплуатации оборудования ТЭС от разгрузки угля и его складирования до транспортирования отходов и их транспортирования подвержен, как следствие, интенсификации износа [10–14].

## 2. АНАЛИЗ ПРИЧИН ИЗНОСА ОБОРУДОВАНИЯ КОТЛОАГРЕГАТОВ

Анализ причин износа оборудования и способы продления его эксплуатационной активности раскрыты во многих исследованиях. Основными причинами отказов котельного оборудования за тридцатилетний период эксплуатации отечественных ТЭС



являются: перегрев – 32%; дефекты металла – 25%; абразивный износ и коррозия – 23%; дефекты монтажа – 13%; исчерпание ресурса – 7% [15–18]. Из чего следует, что золовой износ занимает одно из главных мест в этом перечне.

Например, анализ топливных балансов сжигаемых углей на филиалах ПАО «Иркутскэнерго» за период с 2007 по 2016 гг. (по годовым отчетам) показывает, что мугунский уголь из года в год является основным, а также прослеживается увеличение сжигания азейского угля (рисунок).

Как известно, зола бурых углей Иркутской области, Азейского и Мугунского угольных разрезов высокоабразивна – содержание в ней суммы ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ ) составляет, соответственно, 81 и 85%, т.к. зола топлив с содержанием данных оксидов  $\geq 63\%$  обладает повышенными абразивными свойствами, а значит, влияет на увеличение интенсивности золового износа поверхностей нагрева котлоагрегатов.

Абразивному (золовому) износу прежде всего подвержены трубы конвективных пароперегревателей, экономайзера и воздухоподогревателей. В отличие от коррозионного разрушения, когда продукты окислительно-восстановительной реакции остаются на поверхности, внешним признаком абразивного разрушения является чистая, как бы отшлифованная, поверхность металла. Сам механизм абразивного износа чаще всего рассматривается как результат бессчетного соударения золовых частиц с металлической поверхностью. В настоящее время нет однозначного взгляда на механизм разрушения поверхностей котлоагрегатов от воздействия абразивных свойств золы. Сложность описания механизма золового износа заключается в том, что на металлической поверхности котельного оборудования при взаимодействии с агрессивной средой одновременно с механистическим протекает коррозионное разрушение, и частицы продуктов окислитель-

но-восстановительной реакции легче выбиваются абразивом с поверхности, чем частицы основного металла.

Утонение стенок труб  $J$  (мм) зависит в первую очередь от концентрации абразивных частиц золы и несгоревших частиц топлива в газовом потоке, скорости потока продуктов сгорания топлива, конфигурации золовых частиц, качества металла поверхности нагрева, а также от рассредоточения газового потока по сечению газохода топки котла:

$$J = K_{\Sigma} \cdot \omega^3 \cdot \tau, \quad (1)$$

где  $K_{\Sigma}$  – произведение коэффициентов;  $\omega$  – скорость газового потока;  $\tau$  – срок службы поверхности нагрева.

Наиболее опасным является местный золовой износ поверхностей нагрева котлоагрегатов, по сравнению с общим. Это связано с тем, что местный износ происходит в несколько раз интенсивнее, чем общий. Разрушению при местном износе подвергаются отдельные участки поверхностей нагрева котлоагрегатов. Поэтому причиной неплановых остановов в большей степени является именно местный износ. При этом допустимой величиной абразивного износа считается 0,2 мм в год.

Толщину стен труб определяют традиционным способом, включающим методику расчета золового износа по нормативному методу<sup>1</sup>.

Для гладкотрубных и шахматных мембранных пучков водяного экономайзера котла в очень опасном ряду абразивный износ вычисляют по формуле:

$$J = 9,5 \cdot 10^3 \frac{\alpha \cdot K_p \cdot K_{\mu} \cdot \mu \cdot \tau \cdot M}{(\rho + 273)^{0,35}} \times \left( \frac{K_{\omega}}{K_D} \cdot \omega \cdot \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma_1} \right)^3 \left( \frac{R_{90}}{d} \right)^{0,5}, \quad (2)$$

<sup>1</sup>Абрутин А.А., Карасина Э.С. и др. Тепловой расчет котлов. Нормативный метод. Изд. 3-е, перераб. и доп.: справочник. СПб.: Изд-во «ВТИ», 1998. 256 с.

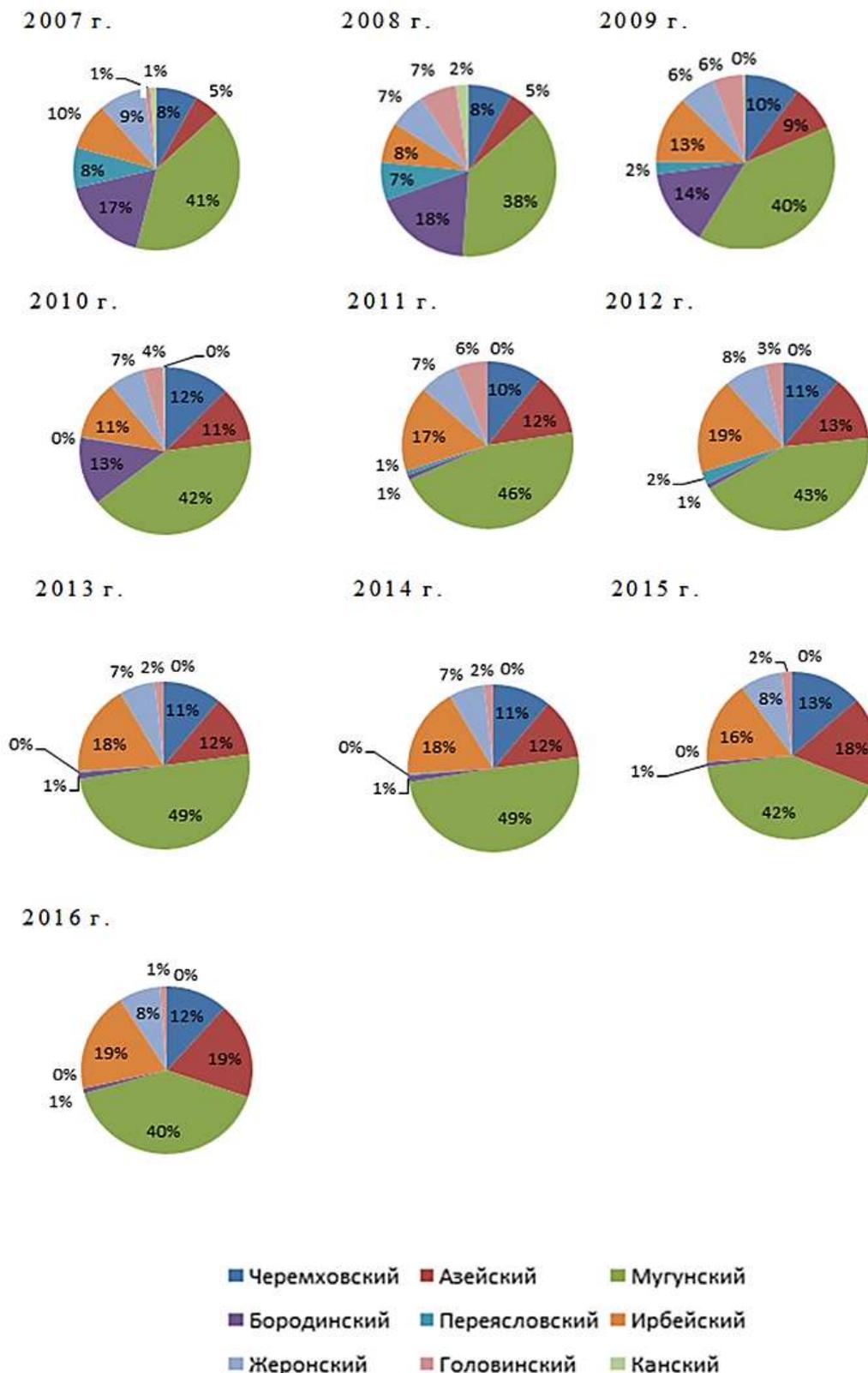


График использования различных марок угля для сжигания в ПАО «Иркутскэнерго» за период с 2007 по 2016 г.  
 Utilization schedule of various coal grades for combustion at PJSC Irkutskenergo for the period from 2007 to 2016



где  $\alpha_{20}$  – коэффициент абразивности (%) золы, который зависит от содержания в золе ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ ), и его приближенно вычисляют по формуле:

$$\alpha_{20} = 0,045(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 - 44) \cdot 10^{-11},$$

$\tau$  – период эксплуатации труб, ч;  $d$  – диаметр трубы, м;  $\mu$  – концентрация золы в газах,  $\frac{\text{г}}{\text{м}^3}$ ;  $F_G$ ,  $\text{м}^2$  – площадь живого сечения для прохода продуктов сгорания топлива;  $V_G$  – действительный объем продуктов сгорания топлива;  $M = 1$  – изнашиваемость металла труб (для углеродистых сталей);  $K_p = 3,5$  – коэффициент для учета влияния поперечного шага труб;  $K_\omega$ ,  $K_\mu$  – коэффициенты неравномерности соответственно полей скоростей газов и концентраций золы;  $K_D$  – отношение расчетной скорости газов при номинальной нагрузке котла к скорости газов при среднеэксплуатационной нагрузке.

Для входных участков теплообменных труб воздухоподогревателя котла абразивный износ вычисляют по формуле:

$$J = 37 \cdot \alpha \cdot K_\mu \cdot \tau \left( \frac{K_\omega \cdot \omega}{K_D} \right)^3 \times K_3 \exp(0,041 \cdot \beta), \text{ мм}, \quad (3)$$

где  $K_3$  – коэффициент, учитывающий защиту для вставок;  $\beta$  – угол (градусы) между вектором скорости, омывающего трубную доску газового потока, и продольными осями теплообменных труб. Если воздухоподогреватель встроен в конвективную шахту, то при прямом набегающем газовом потоке  $\beta = 0^\circ$ . Формула (3) справедлива для диапазона углов от  $0^\circ$  до  $60^\circ$ .

Аналитический метод оценки абразивного износа применяется в основном для прогнозирования эксплуатационного периода конвективных поверхностей нагрева котлоагрегатов (экономайзеров, воздухоподогревателей). При получении величины золы по указанной методике, с использованием уравнений (2) и (3)

меньше  $J_{\text{max}} = 0,2$  мм, за год эксплуатации конвективных поверхностей нагрева котлов означает, что вероятность возникновения аварийных ситуаций из-за выхода из строя труб поверхностей нагрева меньше, чем среднестатистические данные по остановкам котлов по этой же причине.

Любое сужение сечения канала, по которому протекает газовый поток, вызывает искажение его скоростного и концентрационного поля летучей золы, интенсифицируя местный износ. Такая закономерность изменения направления движения газового потока (продуктов сгорания топлива) характерна в частности для поворотной камеры котла, для газовых коридоров, образующихся в местах зазоров между конвективными поверхностями нагрева котлов и их обмуровкой, на входе в трубчатый воздухоподогреватель и др.

Местный золовый износ воздухоподогревателя обусловлен тем, что поверхность его труб разрушается прежде всего локально по глубине и периметру, а также повреждения касаются отдельных труб. На входе в воздухоподогреватель образуется сжатый газовый поток, провоцирующий наибольший износ на глубине от 1 до 2,5 диаметров трубы теплообменника. В связи с этим степень износа приобретает неравномерный характер по периметру трубы. Все это в итоге приводит к образованию сквозного износа на определенном участке поверхности трубы.

Трубы экономайзера также подвержены местному абразивному износу. Интенсивность разрушения поверхности труб экономайзера зависит от скорости газового потока. В связи с этим для золы с низкой абразивностью ограничение по скорости потока составляет 10–12 м/с, а для высокоабразивной золы – 6–8 м/с [19–22].

### 3. МЕТОДЫ УВЕЛИЧЕНИЯ СРОКА СЛУЖБЫ КОНВЕКТИВНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕПЛОБМЕНА КОТЛОВ

Соблюдение требований нормативно-технической документации, прежде все-

го правил технической эксплуатации (ПТЭ) оборудования ТЭЦ, является одним из способов предотвращения аварийности на станциях, т.к. несоблюдение ПТЭ приводит зачастую к тем нежелательным режимам движения газового потока, когда местные скорости увеличиваются вследствие неравномерности поля скоростей, скорость газов растет и износ усиливается.

С целью повышения надежности работы поверхностей нагрева и уменьшения степени его разрушения вследствие абразивного износа требуется выполнять периодический контроль состояния труб. Контролю подлежат прежде всего поперечные и продольные шаги труб пакета при осмотрах и во время ремонтов. При обнаружении искажения труб проводится рихтовка, т.к. искажение расстояний между трубами является одной из главных причин существенного местного абразивного износа и разрушения поверхности труб.

Перечень методов контроля за состоянием металлических поверхностей на тепловых электрических станциях кроме вышеописанного расчетного метода включает в том числе рентгеновские и ультразвуковые способы. Рентгеновские и ультразвуковые способы применяют для сканирования сварных стыков соединений и для оценки толщины стенок конвективных поверхностей нагрева котлоагрегатов через каждые 50 тыс. ч наработки, а при утонении трубы на 0,5 мм и более – через каждые 25 тыс. ч.

Кроме того, в настоящее время для увеличения контроля за износом поверхностей нагрева котельного оборудования с целью проведения своевременного ремонта активно применяются такие способы диагностики, которые основаны на использовании сканирования труб с помощью низкочастотных электромагнитных полей без специальной подготовки их поверхности [20]. На многих тепловых электрических станциях внедрена компьютерная программа «Состояние поверхностей нагрева» вместе с трехмерными моделями Autodesk AutoCAD, включающая специальную базу данных об участках труб поверхностей

нагрева, подвергнутых разрушению, а также произведенных ремонтных работах на этих участках. На основании сохраненных данных составляются отчеты в Microsoft Office, что позволяет, используя эту информацию, автоматически производить неразрушающий контроль труб котлотурбинного оборудования ТЭЦ, включающий как местную, так и сплошную оценки состояния металла труб.

К способам защиты от абразивного износа поверхностей нагрева котлов относятся разработки наиболее эрозионно-стойких сплавов, защитных покрытий, способы упрочнения рабочих поверхностей, как за счет выбора металла труб теплообменников, так и благодаря упрочняющей обработке, а также нанесению твердых покрытий и регулярного рельефа (во время ремонта замена вышедших из строя труб на трубы с защитным покрытием) [21–23].

Местная защита участков труб в местах изгибов, которые подвержены интенсивному абразивному износу газовым потоком, включает также установку стальных съемных манжет, несмотря на ухудшение теплопередачи от потока продуктов сгорания к воде.

Для защиты трубчатого воздухоподогревателя от повышенного золового износа устанавливают на входе в каждую трубу стальные насадки того же диаметра, что и трубы. Насадки прихватывают электросваркой к выступающим из трубной доски трубам и вместе с последней закрывают слоем торкрета. Ресурс труб воздухоподогревателя возрастет примерно в 2,5 раза и в зависимости от изменения условий эксплуатации [19–22].

Кроме того, снижения степени разрушения конвективных поверхностей теплообмена котлов от абразивного износа можно достичь снижением тонины помола до 30–35% угольной пыли [24–26]. С одной стороны, уменьшение размеров угольных пылинок приводит к снижению абразивного воздействия и к росту удельной площади поверхности топлива, что хорошо сказывается на его горении, с другой стороны это связано с ростом расхода энергии на пы-



леприготовление. Выбор наиболее оптимальной степени помола выполняется в каждом конкретном случае сравнением затрат на пылеприготовление с учетом потерь теплоты от механического недожога, выраженной по стоимости топлива.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ причин разрушения оборудования от абразивного воздействия золы и способов борьбы с золовым износом показывает, что добиться снижения его интенсивности за время эксплуатации котлов с целью продления срока их службы возможно комплексным применением рассмотренных выше способов:

– снижением сжигания угля с абразивностью > 63 %;

– управлением скоростью газового потока;

– уменьшением тонины помола угольной пыли;

– повышением твердости используемого материала поверхностей нагрева котлоагрегата;

– установкой защитных металлических устройств на трубы теплообменников.

Важно проводить оценки золотого износа:

– аналитическим способом;

– диагностикой поверхности труб, в том числе рентгеновскими и ультразвуковыми методами, а также контролем поверхностей нагрева котлоагрегата, основанным на регистрации низкочастотных электромагнитных полей.

#### Библиографический список

1. Тумановский А.Г. Перспективы развития угольных ТЭС России // Теплоэнергетика. 2017. № 6. С. 3–13.
2. Longwell J.P., Rubin E.S., Wilson J. Coal: Energy for the future // Progress in Energy and Combustion Science. 1995. Vol. 21. Issue 4. P. 269–360.
3. Fan Jianren, Zha Xudong, Sun Ping, Cen Kefa. Simulation of ash deposit in a pulverized coal-fired boiler // Fuel. 2001. Vol. 80. Issue 5. P. 645–654. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(00\)00134-4](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(00)00134-4)
4. Kumar M., Singh H., Singh N., Chavan N.M., Kumar S., Joshi S.V. Development of Erosion-Corrosion-Resistant Cold-Spray Nanostructured Ni-20Cr Coating for Coal-Fired Boiler Applications // Journal of Thermal Spray Technology. 2015. Vol. 24. No. 8. P. 1441–1449. <https://doi.org/10.1007/s11666-015-0249-8>
5. Балтян В.Н., Ефимов Н.Н., Цхяев А.Д. К вопросу модернизации котельного оборудования угольных ТЭС // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2017. Вып. 1. С. 50–53. <https://doi.org/10.17213/0321-2653-2017-1-50-53>
6. Ибрагимов Е.С., Гальтяев Е.В. Повышение эффективности и надежности работы котлов электростанций // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2019. Т. 19. № 2. С. 31–38. <https://doi.org/10.14529/power190204>
7. Strom S.K., Guffre J. Experiences with Regenerative Air Heater Performance Evaluations & Optimization // POWER-GEN Europe: Energy Conference and Trade show (Amsterdam, 8–10 June 2010). Amsterdam, 2010. P. 1–18.
8. Strom S.K., De Caprio M. Recent Regenerative Air heater Improvements at HECO Kahe Point, Oahu // Electric Power Conference. 2011. P. 10–12. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.paragonairheater.com/images/downloads/Papers/Electric%20Power%20HECO%20Kahe%20Unit%202%20Case%20Study%202011.pdf> (25.02.2020).
9. Pronobis M., Mroczek K., Tymoszuk M., Ciukaj S., Wejkowski R., Janda T., et al. Optimization of coal fineness in pulverized-fuel boilers // Energy. 2017. Vol. 139. No. 15. P. 655–666. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.057>
10. Natesan K. Applications of Coatings in Coal-Fired Energy Systems // 19th International Conference on metallurgical coatings and thin films. 1992. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.osti.gov/biblio/10117895-applications-coatings-coal-fired-energy-systems> (25.02.2020).
11. Hall I., Han K., Shrestha T. Application of Modified NiCrMo Alloy Systems for Boiler Tube Surface Protection in Waste-to-Energy Environments // Vivis IRRC. Waste Incineration. 2016. P. 237–246. [Электронный ресурс]. URL: [https://pdfs.semanticscholar.org/8574/72deb726d4b0c52baf942a0d5ef22877e7ac.pdf?\\_ga=2.95510492.1599271226.1591883211-857475659.1591883211](https://pdfs.semanticscholar.org/8574/72deb726d4b0c52baf942a0d5ef22877e7ac.pdf?_ga=2.95510492.1599271226.1591883211-857475659.1591883211) (25.02.2020).
12. Оклея П.И. Отказы оборудования и аварии на теплоэлектростанциях России: причины, следствия и последствия // Микроэкономика. 2015. № 6. С. 46–53.
13. Векслер Ф.М., Большаков А.Н., Алешинский Р.Е., Говсиевич Е.Р. Влияние основных потребительских свойств энергетических углей на показатели работы угольных электростанций // Надежность и безопасность энергетики. 2008. № 3. С. 42–49.
14. Скоробогатых В.Н., Луканин В.Л., Орлов А.С.,

Михайлов А.Г., Удалова Е.В. Повышение срока службы элементов котельного оборудования, работающего на тепловых электростанциях, подвергающегося повышенному абразивному износу // Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. № 4. С. 24–27.

15. Артёмов О.С., Федчишин В.В., Кудряшов А.Н. Отходы ТЭС как горно-техническое сырье // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: сб. науч. тр. / под ред. В.В. Федчишина. Иркутск: Изд-во ИРГТУ, 2015. С. 231–234.

16. Тюрина Э.А., Ижганайтис М.И. Математическое моделирование и технико-экономические исследования котлоагрегатов, использующих топливо различного состава, включая отходы предприятий углеобогащения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2013. № 11-12. С. 99–109.

17. Герасимова Н.П., Петрова В.А. Анализ причин абразивного износа поверхностей нагрева котлоагрегатов и способов его снижения // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Иркутск, 22–26 апреля 2019 г.). Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2019. С. 202–206.

18. Белоглазова Л.В., Булова А.В., Нечупаев В.В., Протасова А.Е., Шлейко С.В. Абразивный износ конвективных поверхностей энергетического котлоагрегата золой Экибастузского угля // Технические науки – от теории к практике. 2016. № 11. С. 73–80.

19. Герасимова Н.П., Буйнов Н.Е. Оценка абразивного износа конвективных поверхностей нагрева котельных агрегатов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2011. № 7. С. 117–119.

20. Архипов С.В., Фролов А.Г. Неразрушающие методы контроля экранных труб энергетических котлов // Знание. 2019. № 2-1. С. 72–77.

21. Артемьев А.А., Зорин И.В., Соколов Г.Н., Лысак В.И., Денисевич Д.С., Прияткин Д.В. Диагностика наплавленных сплавов на стойкость к высокотемпературному газоабразивному изнашиванию // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Серия: Машиностроение, материаловедение. 2019. Т. 21. № 1. С. 12–19. <https://doi.org/10.15593/2224-9877/2019.1.02>

22. Радченко М.В., Шевцов Ю.О., Радченко Т.Б. Пути решения проблем создания защитных покрытий на опасных промышленных объектах // Ползуновский альманах. 2015. № 4. С. 138–142.

23. Гераськин В.В. Опыт применения напыляемых металлических покрытий для защиты поверхностей нагрева паровых котлов от высокотемпературной коррозии // Энергетик. 2019. № 7. С. 44–46.

24. Каримов М.Т., Ермоленко М.В., Степанова О.А., Байжуманов М.Ж. Влияние фракционного состава золы на абразивный износ поверхностей нагрева энергетических котлов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 4-3. С. 532–535.

25. Ниязбеков А.Е., Исайнов Б.К., Ермоленко М.В. Абразивный износ поверхностей нагрева энергетических котлов в зависимости от тонины помола сжигаемого угля // Перспективы науки – 2016: материалы III Междунар. заочного конкурса науч.-исслед. работ (г. Казань, 29 апреля 2016 г.). Казань: ООО «Рокета Союз», 2016. С. 195–200.

26. Ниязбеков А.Е. Влияние тонины помола угля «Каражыра» на абразивный износ поверхностей нагрева котлов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тез. докл. 22 Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (г. Москва, 2–3 марта 2017 г.). М.: Изд-во НИУ «МЭИ», 2017. С. 109.

## References

1. Tumanovskii AG. Prospects for the Development of Coal-Steam Plants in Russia. *Teploenergetika* = Thermal Engineering. 2017;6:3–13. (In Russ.)

2. Longwell JP, Rubin ES, Wilson J. Coal: Energy for the Future. *Progress in Energy and Combustion Science*. 1995;21(4):269–360.

3. Fan Jianren, Zha Xudong, Sun Ping, Cen Kefa. Simulation of Ash Deposit in a Pulverized Coal-Fired Boiler. *Fuel*. 2001;80(5):645–654.

[https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(00\)00134-4](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(00)00134-4)

4. Kumar M, Singh H, Singh N, Chavan NM, Kumar S, Joshi SV. Development of Erosion-Corrosion-Resistant Cold-Spray Nanostructured Ni-20Cr Coating for Coal-Fired Boiler Applications. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2015;24(8):1441–1449. <https://doi.org/10.1007/s11666-015-0249-8>

5. Balyan VN, Efimov NN, Tskhyaev AD. To the Problem of Boiler Equipment Coal Plants Modernization. *University news. North-Caucasian Region. Technical*

*Sciences Series*. 2017;1:50–53. (In Russ.)

<https://doi.org/10.17213/0321-2653-2017-1-50-53>

6. Ibragimov ES, Galtayev EV. Power Plant Boiler Performance and Reliability Enhancement. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* = Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering. 2019;19(2):31–38. (In Russ.) <https://doi.org/10.14529/power190204>

7. Strom SK, Guffre J. Experiences with Regenerative Air Heater Performance Evaluations & Optimization. In: *POWER-GEN Europe: Energy Conference and Trade Show*. 8–10 June 2010, Amsterdam. Amsterdam; 2010, p. 1–18.

8. Strom SK, De Caprio M. Recent Regenerative Air Heater Improvements at HECO Kahe Point, Oahu. In: *Electric Power Conference*. 2011:10–12. Available from: <https://www.paragonairheater.com/images/downloads/Papers/Electric%20Power%20HECO%20Kahe%20Unit%2>



- 02%20Case%20Study%202011.pdf [Accessed 25th February 2020].
9. Pronobis M, Mroczek K, Tymoszek M, Ciukaj S, Wejkowski R, Janda T, et al. Optimization of Coal Fineness in Pulverized-Fuel Boilers. *Energy*. 2017;139(15):655–666. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.057>
10. Natesan K. Applications of Coatings in Coal-fired Energy Systems. In: *19th International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films*. 1992. Available from: <https://www.osti.gov/biblio/10117895-applications-coatings-coal-fired-energy-systems> [Accessed 25th February 2020].
11. Hall I, Han K, Shrestha T. Application of Modified NiCrMo Alloy Systems for Boiler Tube Surface Protection in Waste-to-Energy Environments. In: *Vivis IRRC. Waste Incineration*. 2016:237–246. Available from: [https://pdfs.semanticscholar.org/8574/72deb726d4b0c52baf942a0d5ef22877e7ac.pdf?\\_ga=2.95510492.1599271226.1591883211-857475659.1591883211](https://pdfs.semanticscholar.org/8574/72deb726d4b0c52baf942a0d5ef22877e7ac.pdf?_ga=2.95510492.1599271226.1591883211-857475659.1591883211) [Accessed 25th February 2020].
12. Okley PI. Equipment Failures and Accidents at the Thermal Power Plants in Russia: Causes, Effects and Consequences. *Mikroekonomika = Microeconomics*. 2015;6:46–53. (In Russ.)
13. Veksler FM, Bolshakov AN, Aleshinsky RE, Govsievich ER. Effect of Main Consumer Properties of Power Generating Coal on Coal-Fired Power Plant Performances. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety & Reliability of Power Industry*. 2008;3:42–49. (In Russ.)
14. Skorobogatykh VN, Lukanin VL, Orlov AS, Mikhailov AG, Udalova EV. Prolongations the Duration of Piece of Boiler Equipment, working at Thermal Stations and Undergoing Higher Abrasive Deterioration. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2011;4:24–27. (In Russ.)
15. Artemova OS, Fedchishin VV, Kudryashov AN. TPP Waste as Mining Technical Raw Materials. In: Fedchishin VV (eds.). *Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyah Sibiri: sbornik nauchnykh trudov = Improving Efficiency of Energy Production and Use in Siberia: Collection of scientific works*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2015, p. 231–234. (In Russ.)
16. Tyurina EA, Izhganaitis MI. Mathematical Modeling and Technical and Economic Studies on Boilers using Fuels of Different Composition, including Waste Coal. *Izvestiâ vysših učebnykh zavedenij. Problemy energetiki = Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2013;11-12:99–109. (In Russ.)
17. Gerasimova NP, Petrova VA. Analysis of causes of boiler unit heating surface abrasive wear and ways to reduce it. In: *Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyah Sibiri: materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem = Improving Efficiency of Energy Production and Use in Siberia: Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation*. 22–26 April 2019, Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2019, p. 202–206. (In Russ.)
18. Beloglazova LV, Bulova AV, Nechupaev VV, Protasova AE, Shleiko SV. Abrasive Wear of Convective Surfaces of Boiler Units Energy Ash Ekibastuz Coal. *Tekhnicheskie nauki – ot teorii k praktike*. 2016;11:73–80. (In Russ.)
19. Gerasimova NP, Buinov NE. Evaluation of Abrasive Wear of Boiler Unit Convective Heating Surfaces. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2011;7:117–119. (In Russ.)
20. Arkhipov SV, Frolov AG. Non-Destructive Methods of Control of Screen Pipes of Boilers. *Znanie*. 2019;2-1:72–77. (In Russ.)
21. Artem'ev AA, Zorin IV, Sokolov GN, Lysak VI, Denisevich DS, Priyatkin DV. Diagnostics of Weld Alloys for Resistance to High-Temperature Gas-Abrasive Wear. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie, materialovedenie = Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Series: Mechanical Engineering, Materials Science*. 2019;21(1):12–19. (In Russ.) <https://doi.org/10.15593/2224-9877/2019.1.02>
22. Radchenko MV, Shevtsov YuO, Radchenko TB. Solutions of the Coatings Creations on Dangerous Industrial Objects. *Polzunovskij al'manah*. 2015;4:138–142. (In Russ.)
23. Geraskin VV. Use of Thermal Spray Alloy Cladding for Erosion and Corrosion Protection of Steam Boiler Tubes. *Energetik*. 2019;7:44–46. (In Russ.)
24. Karimov MT, Yarmolenko MV, Stepanova OA, Baizhumanov MJ. Influence of Ash Fractional Abrasion Heating Surface Power Boilers. *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovanij = International Journal of Applied and Basic Research*. 2016;4-3:532–535. (In Russ.)
25. Niyazbekov AE, Isaynov BK, Ermolenko MV. Abrasive Wear of Power Boiler Heating Surfaces Depending on Grinding Fineness of Burned Coal. In: *Perspektivy nauki – 2016: materialy III Mezhdunarodnogo zaochnogo konkursa nauchno-issledovatel'skih rabot = Prospects of Science – 2016: Proceedings of III International Correspondence Competition of Research Works*. 29 April 2016, Kazan. Kazan: OOO "Róketa Soyuz"; 2016, p. 195–200. (In Russ.)
26. Niyazbekov AE. Influence of Karazhyra Coal Grinding Fineness on Abrasive Wear of Boiler Heating Surfaces. *Radioelektronika, elektrotekhnika i energetika: tezisy dokladov 22 Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii studentov i aspirantov = Radioelectronics, Electrical Engineering and Power Engineering: Abstracts of the 22nd International Scientific and Technical Conference of Students and Postgraduate students*. 2–3 March 2017, Moscow. Moscow: Moscow Power Engineering Institute; 2017, p. 109. (In Russ.)

**Критерии авторства**

Герасимова Н.П. получила и оформила научные результаты и несет ответственность за плагиат.

**Конфликт интересов**

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ**

**Герасимова Наталья Павловна,**  
кандидат химических наук, доцент,  
доцент кафедры теплоэнергетики,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;  
✉ e-mail: gerasimova@istu.edu

**Authorship criteria**

Gerasimova N.P. has obtained and formalized the scientific results and bears the responsibility for plagiarism.

**Conflict of interests**

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

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

**INFORMATION ABOUT THE AUTHOR**

**Natalia P. Gerasimova,**  
Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department  
of Heat Power Engineering,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;  
✉ e-mail: gerasimova@istu.edu



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.928.9

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-606-615>

## Оценка времени работы пылеуловителя со скругленными сепарационными элементами

© В.Э. Зинуров\*, А.В. Дмитриев\*, Т.С. Петрова\*, О.С. Дмитриева\*\*

\*Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

\*\*Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань, Россия

**Резюме:** Цель – разработка новых технических устройств для улавливания из дымовых газов тепловых электростанций частиц пыли размером до 10 мкм, а также создание инженерной методики предлагаемого сепарационного устройства и получение расчетных зависимостей для определения времени его работы до необходимого технического обслуживания. Для определения эффективности осаждения частиц на поверхности сепарационного устройства были использованы ранее апробированные методы математического моделирования, основанного на законах сохранения импульса и тепла, а также на основе решения уравнений гидрогазодинамики. Предложена оригинальная конструкция трапециевидного сепаратора с несколькими рядами дугообразных элементов, на которые в процессе эксплуатации аппарата налипают пыль за счет действия инерционных и центробежных сил. При увеличении входной скорости газового потока от 3 до 11 м/с и значениях эффективности 0,5, 0,7 и 0,9 продолжительность работы сепаратора в среднем снижается в 3,7 раза. Установлено, что минимальная продолжительность работы сепаратора составляет около 50 сут при скорости запыленного потока 11 м/с и концентрации пыли 8 мг/м<sup>3</sup>; максимальная продолжительность работы сепаратора – около 465 сут при скорости запыленного потока 3 м/с и концентрации пыли 5 мг/м<sup>3</sup>. Предложенная конструкция трапециевидного сепаратора позволяет улавливать частицы из дымовых газов тепловых электростанций размером более 10 мкм с эффективностью 99,0–99,9% и частицы размером менее 10 мкм с эффективностью в среднем 61,7%, что способствует решению задач по уменьшению выбросов в воздушный бассейн. Разработанная методика позволит определять основные конструктивные размеры предлагаемого сепаратора при заданных параметрах газового потока.

**Ключевые слова:** сепаратор, пылеочистка, продолжительность работы, эффективность, дымовой газ, центробежная сила

**Информация о статье:** Дата поступления 11 февраля 2020 г.; дата принятия к печати 04 мая 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 июня 2020 г.

**Для цитирования:** Зинуров В.Э., Дмитриев А.В., Петрова Т.С., Дмитриева О.С. Оценка времени работы пылеуловителя со скругленными сепарационными элементами. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 3. С. 606–615. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-606-615>

## Evaluation of operating time for the dust separator with rounded separation elements

© Vadim E. Zinurov, Andrey V. Dmitriev, Tatiana S. Petrova, Oksana S. Dmitrieva

\*Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

\*\*Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

**Abstract:** The study is focused at the development of new technical devices for separating dust particles up to 10 microns in size from flue gases of thermal power plants, along with the creation of an engineering methodology for the proposed separation device and obtaining calculated dependences for determining operational maintenance intervals. In order to determine the efficiency of particle deposition on the surface of the separation device, previously verified methods of mathematical modelling were used based on the laws of momentum and heat conservation, as well as a solution to hydrodynamics equations. The proposed original trapezoidal separator design is equipped with several rows of arcuate elements for concentrating dust during the operation of the apparatus due to the action of inertial and centrifugal forces. With an increase in the input velocity of the gas flow from 3 to 11 m/s and efficiency values of 0.5, 0.7 and 0.9, the operation time of the separator is decreased by an average of 3.7 times. The minimum operation time is established to be about 50 days at a dust flow rate of 11 m/s and a dust concentration of 8 mg/m<sup>3</sup>. The maximum operation time of the separator was determined to be about 465 days at a dust flow rate of 3 m/s and a dust concentration of 5 mg/m<sup>3</sup>. The proposed design of the trapezoidal separator ensures the separation of particles both larger and smaller than 10 microns

from the flue gases of thermal power plants with an efficiency of 99.0–99.9 and 61.7%, respectively, resulting in reduced atmospheric emissions. Using the developed methodology, the main structural dimensions of the proposed separator can be determined under given gas flow parameters.

**Keywords:** separator, dust cleaning, operation time, efficiency, flue gas, centrifugal force

**Information about the article:** Received February 11, 2020; accepted for publication May 04, 2020; available online June 30, 2020.

**For citation:** Zinurov VE, Dmitriev AV, Petrova TS, Dmitrieva OS. Evaluation of operating time for the dust separator with rounded separation elements. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(3):606–615. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-606-615>

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных задач по охране окружающей среды, вошедшей в энергетическую стратегию Российской Федерации на период до 2030 года<sup>1</sup> при развитии энергетического сектора, является уменьшение негативного влияния транспортировки на окружающую среду, потребление энергоресурсов, климат и здоровье людей. Актуальность задачи обусловлена тем, что многие тепловые электрические станции, используя в качестве основного или резервного топлива уголь, торф и др. виды твердого топлива, загрязняют воздушный бассейн соединениями тяжелых металлов, несгоревшими частицами твердого топлива и различными вредными оксидами. Стоит отметить, что большинство электростанций из-за негативного влияния на окружающую среду были переведены с твердого на жидкое и газообразное топлива. Однако некоторую часть станций экономически нецелесообразно, а иногда и невозможно перевести с одного вида топлива на другое. В связи с добычей в некоторых регионах большого количества природного ископаемого, являющегося основным топливом для местных электрических станций, отказ может привести к экономическому упадку в регионе или из-за географического расположения, где не проложен газопровод. Например, уголь в качестве основного топлива используют на Троицкой гидроэлектростанции, тепловой электростанции ТЭС–1 ОАО «Архангельский целлюлозно-

бумажный комбинат», Бийской теплоэлектростанции (ТЭЦ), Иркутских ТЭЦ–6, 9, 19, 11 и многих других станциях. Поэтому необходимо использовать современные высокоэффективные технологии очистки дымовых газов от частиц пыли при сжигании твердых видов топлива [1–7].

Наиболее распространенными аппаратами, улавливающими несгоревшие частицы топлива и летучую золу из дымовых газов, являются золоуловители, которые устанавливаются между газоотводными каналами котлов и дымососами. Золоуловители в зависимости от принципа работы и конструктивных особенностей подразделяют на 5 групп: механические сухие, мокрые, электрофильтры, тканевые фильтры и комбинированные. В зависимости от конкретного типа золоуловителя варьируется принцип действия аппарата и его эффективность (степень очистки). Например, эффективность сухого золоуловителя составляет до 70–80%, мокрого – до 99%. Однако общим недостатком всех видов золоуловителей является износ корпуса или конструктивных деталей (прутков, сопел и др.), как правило, вследствие абразивности твердых частиц. Еще одной проблемой золоуловителей, кроме мокрых и электрических, является низкая эффективность очистки газовых потоков от мелкодисперсных частиц размером менее 10 мкм. Стоит отметить, что использование мокрых и электрических аппаратов возможно не везде по причине сложности в эксплуатации, дороговизны и повышенных требований к

<sup>1</sup>Об утверждении Энергетической стратегии России на период до 2030 года: распоряжение Правительства Российской Федерации № 1715-р от 13.11.2009.



улавливаемому материалу, например, при использовании электрофильтров нельзя улавливать взрывоопасные частицы. Таким образом, одной из ключевых задач перед предприятиями, которые используют твердые виды топлив, в частности, уголь, является продление срока службы действующих золоуловителей и повышение эффективности очистки газовых выбросов от мелкодисперсных частиц размером до 10 мкм [8–17].

## 2. ОПИСАНИЕ УСТРОЙСТВА

Для решения данной проблемы авторами работы был разработан сепаратор, который можно использовать в качестве предварительной насадки золоуловителя. Установка сепаратора позволит продлить срок службы золоуловителя, снизив концентрацию частиц в газовых выбросах, и решить проблему с улавливанием частиц размером менее 10 мкм. Проведенные ранее исследования показали, что эффективность очистки сепаратором газовых выбросов от частиц размером более 10 мкм варьируется в пределах 99–99,9%, для частиц размером менее 10 мкм эффективность в среднем равна 61,7% [18–21].

Сепаратор состоит из 8 рядов дугообразных элементов, которые заключены в трапециевидный корпус. В каждом ряду располагается по 8 элементов под углом 30° к корпусу для обеспечения равнопрочности (рис. 1).

Очистка газовых выбросов от частиц пыли в сепараторе происходит преимущественно за счет инерционных сил. При входе в устройство газовый поток изменяет свое направление, устремляясь в сужении между дугообразными элементами, в ходе данного процесса часть частиц выбивается из потока. Также наблюдается в сепараторе действие центробежных сил, а именно – после прохождения газовыми выбросами первого ряда дугообразных элементов поток приобретает упорядоченную структуру за счет их обтекания. Причем дугообразные элементы расположены относительно друг друга на одинаковом расстоянии и таким образом, чтобы достигалось макси-

мальное значение центробежной силы, действующей на поток. При закручивании частицы выбиваются из структуры потока и прилипают к поверхностям дугообразных элементов или оседают на дно. Стоит отметить, что в днище сепаратора имеется несколько круглых отверстий для отвода частиц пыли, выбившихся из структуры потока. Более мелкие частицы пыли прилипают к поверхностям дугообразных элементов. Через определенные промежутки времени внутренние элементы сепаратора забиваются пылью, это обстоятельство влияет на эффективность работы и гидравлическое сопротивление аппарата, что требует чистки устройств, приводящей к остановке технологического процесса. Очевидно, что наиболее идеальным вариантом является совместная чистка сепаратора и золоуловителя. Для этого необходимо правильно спрогнозировать остаточный ресурс сепаратора. Поэтому целью работы является исследование продолжительности работы сепаратора при различных физических и технологических условиях – при изменении концентрации пыли в газовом потоке, входной скорости газового потока и размера частиц пыли.

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для получения расчетных зависимостей между физическими и технологическими параметрами в работе задавалась площадь входного сечения, которая остается постоянной по всей длине, исходя из размеров входного патрубка золоуловителя. Также задавалось количество рядов  $n = 8$ . Длина дугообразных элементов находится по формуле:

$$b = \frac{\sqrt{F}}{2n_k}, \text{ м}, \quad (1)$$

где  $F$  – площадь входного сечения сепаратора,  $\text{м}^2$ ;  $n_k$  – количество дугообразных элементов в одном ряду.



**Рис. 1. Трехмерная модель сепаратора (вид с разрезом). Движение газовых выбросов происходит справа налево**  
**Fig. 1. 3-D model of a separator (sectional view). Gas emissions move from right to left**

Продолжительность работы сепаратора первоначально зависит от критической степени забивки дугообразных элементов, при которой устройство можно будет рентабельно использовать, т.е. эффективность очистки запыленного газового потока и потери давления в сепараторе будут удовлетворять требуемым производственным значениям. Для определения критической степени забивки дугообразных элементов сперва был проанализирован процесс постепенного налипания пыли на поверхности элементов. Очевидно, что через некоторый промежуток времени дугообразные элементы заполнятся пылью и будут напоминать полуокружности при рассмотрении элементов сверху. Впоследствии данные полуокружности начнут приобретать конусообразные формы из-за структуры газового потока, которая устанавливается при обтекании им дугообразных элементов. Стоит отметить, что установление конусообразной формы элементов позволит улучшить аэродинамику потока, по сравнению с первоначальной формой, вследствие отсутствия обратных потоков газа при его вылете из внутренней части дугообразных элементов. Однако после приобретения конусообразной формы элементами дальнейшее налипание пыли будет приводить к хаотической прямоугольной форме, что существенно поменяет структуру газового потока и снизит значение центробежной силы на поток, следовательно снизится и

эффективность работы. Таким образом, было принято, что критическая степень забивки дугообразных элементов наступает в момент времени, когда форма дугообразных элементов изменяется на конусообразную. Тогда максимальный объем пыли в одном элементе определится как

$$V_1 = \left[ \frac{\pi b^2}{8} + 2 \left( \frac{b^2}{4} - \int_0^{0.5b} \sqrt{b^2 - x^2} dx \right) \right] \times \frac{H}{\sin \alpha}, \text{ м}^3, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – угол наклона дугообразных элементов в сепараторе, °;  $H$  – высота сепаратора, м;  $x$  – координата окружности, м.

Суммарный максимальный объем пыли в сепараторе определялся по следующему выражению:

$$V = V_1 n n_k, \text{ м}^3. \quad (3)$$

С учетом формулы (3) и заданной плотности частиц пыли  $\rho_a = 1075 \text{ кг/м}^3$  определялась критическая масса сепаратора:

$$m = V \rho_a, \text{ кг}. \quad (4)$$

Время, характеризующее продолжительность работы сепаратора, вычислялось по выражению:



$$\tau = \frac{m}{CEFW}, \text{ с}, \quad (5)$$

где  $C$  – концентрация пыли в газовом потоке,  $\text{кг/м}^3$ ;  $E$  – эффективность очистки газового потока от частиц пыли;  $W$  – входная скорость газового потока,  $\text{м/с}$ .

Эффективность очистки газового потока от частиц пыли сепаратором рассчитывалась по следующей формуле:

$$E = 1 - (1 - E_0)(1 - E_1)^{n-2}, \quad (6)$$

где  $E_0$  – эффективность первых двух рядов сепаратора;  $E_1$  – эффективность одной ступени сепаратора.

Эффективность нулевой ступени сепаратора рассчитывалась по следующей формуле:

$$E_0 = 0,5 - 0,4e^{-0,033Stk}, \quad (7)$$

где  $Stk$  – число Стокса.

Эффективность одной ступени сепаратора рассчитывалась по выражению:

$$E_1 = 1 - 0,795e^{-0,63Stk}. \quad (8)$$

Число Стокса определялось по формуле:

$$Stk = \frac{\rho_a a^2 W}{\mu b}, \quad (9)$$

где  $a$  – размер частиц пыли,  $\text{мкм}$ ;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости газа,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ .

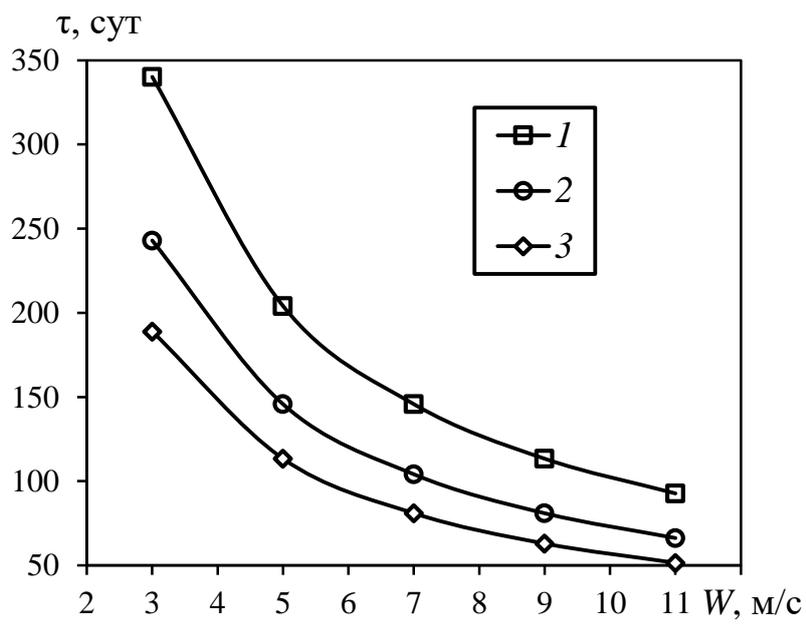
Следует отметить, что формула (7) была введена для оценки эффективности очистки газового потока от мелкодисперсных частиц первыми двумя рядами вследствие того, что очистка в данной области происходит преимущественно за счет резкого изменения направления движения потока. После прохождения газом двух рядов дугообразных элементов движение газового потока приобретает структуру за счет действия на газ центробежных сил. Поэто-

му было введено понятие «ступень очистки сепаратора» – это ряд дугообразных элементов, где газовый поток очищается под воздействием центробежных сил, т.е. ряды, расположенные после первых двух.

Для получения результатов одни показатели изменялись в заданных диапазонах, другие принимались постоянным базовым значением. Диапазоны изменения параметров – входная скорость газового потока  $W$  от 3 до 11  $\text{м/с}$ , концентрация пыли в потоке  $C$  от 2 до 8  $\text{мг/м}^3$ , эффективность очистки газового потока от мелкодисперсных частиц  $E$  от 0,5 до 0,9, размер частиц  $a$  от 1 до 9  $\text{мкм}$ . Базовые значения – входная скорость газового потока  $W = 9 \text{ м/с}$ , размер частиц  $a = 4 \text{ мкм}$ , концентрация пыли в потоке  $C = 5 \text{ мг/м}^3$ .

Проведенные исследования показали, что продолжительность работы сепаратора зависит от требуемой эффективности. Чем выше ее значение, тем ниже эксплуатационный срок. Также было выявлено, что продолжительность работы сепаратора уменьшается в зависимости от увеличения следующих параметров: скорости газового потока (рис. 2), концентрации частиц пыли в газовом потоке (рис. 3), размера частиц пыли (рис. 4).

При увеличении входной скорости газового потока от 3 до 11  $\text{м/с}$  и значениях эффективности 0,5, 0,7 и 0,9 продолжительность работы сепаратора в среднем снижается в 3,7 раза. Это объясняется тем, что при более высоких скоростях через устройство проходят большие объемы запыленного потока, чем при низких скоростях, что приводит к забивке дугообразных элементов внутри сепаратора пылью. Стоит отметить, что в производственных условиях значение входной скорости газового потока является непостоянным значением, поэтому продолжительность работы устройства необходимо усреднять. При значениях эффективности 0,5, 0,7 и 0,9 продолжительность работы сепаратора составляет в среднем 45, 58 и 81 сут, соответственно, при скорости газового потока на входе в устройство от 3 до 11  $\text{м/с}$  (см. рис. 2).



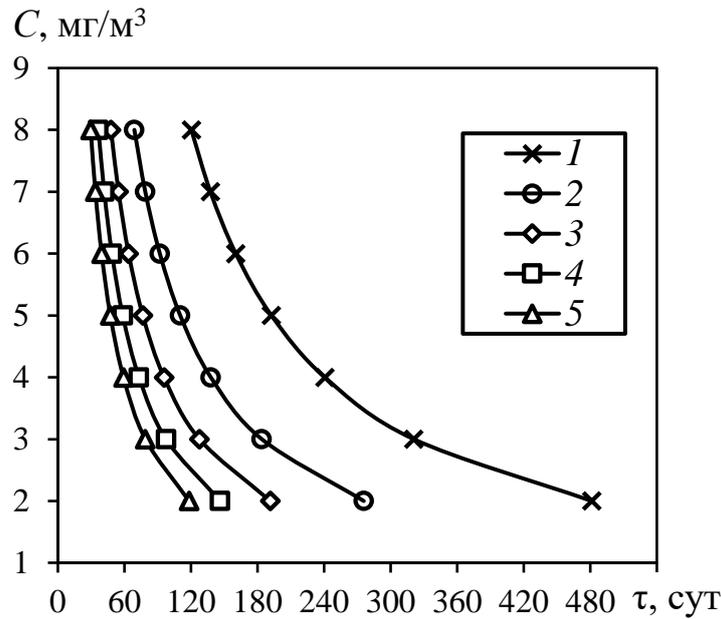
**Рис. 2. Зависимость продолжительности работы сепаратора от входной скорости газового потока при различных значениях эффективности очистки газа от мелкодисперсных частиц E: 1 – 0,5; 2 – 0,7; 3 – 0,9**  
**Fig. 2. Separator operation time vs gas flow input velocity at various values of efficiency E of gas purification from fine particles: 1 – 0.5; 2 – 0.7; 3 – 0.9**

Увеличение концентрации пыли в дымовых газах от 2 до 8 мг/м<sup>3</sup> приводит к сокращению работы трапециевидного сепаратора в среднем в 4 раза при входной скорости газового потока в диапазоне от 3 до 11 м/с. Стоит отметить, что при более низких скоростях газового потока в диапазоне от 3 до 7 м/с продолжительность работы сепаратора в среднем в 3,5 раза больше, чем при скорости газа от 9 до 11 м/с. При росте скорости газового потока в диапазонах 3–5, 5–7, 7–9 и 9–11 м/с продолжительность работы сепаратора уменьшается на 57, 69, 76 и 81%, соответственно. При увеличении концентрации пыли в газовом потоке от 2 до 8 мг/м<sup>3</sup> время работы прямоугольного сепаратора в среднем составляет 236, 135, 93, 71 и 58 сут при скорости газа 3, 5, 7, 9 и 11 м/с, соответственно (см. рис. 3).

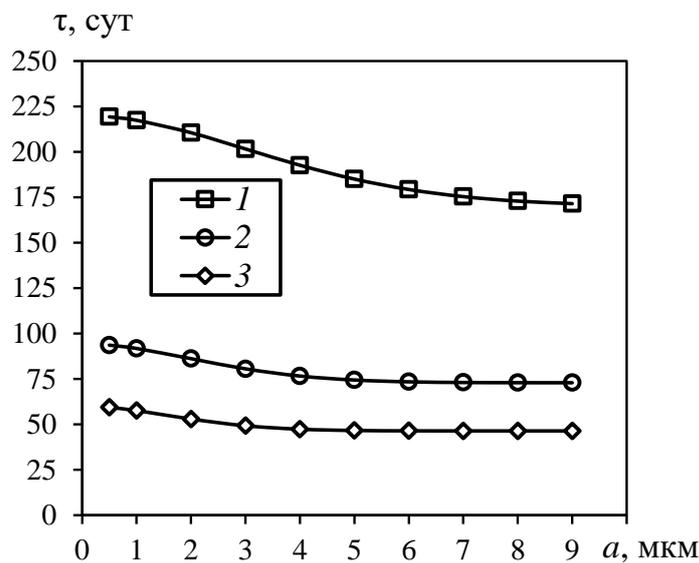
Продолжительность работы сепаратора уменьшается с увеличением размера мелкодисперсных частиц в очищаемом газовом потоке. Это вызвано тем, что скорость забивки дугообразных элементов пылью повышается, что приводит к понижению эффективности сепарации, следова-

тельно возникает необходимость в очистке элементов. Также на продолжительность работы сепаратора влияет входная скорость запыленного газового потока. С увеличением скорости повышается производительность аппарата, следовательно необходимо чаще производить очистку поверхностей дугообразных элементов. Продолжительность работы сепаратора в среднем составляет 192, 79 и 49 сут при входной скорости запыленного газового потока 3, 7 и 11 м/с, соответственно, при размере мелкодисперсных частиц в диапазоне от 1 до 9 мкм (см. рис. 4).

В ходе проделанной работы была получена формула (5), позволяющая спрогнозировать продолжительность работы сепаратора. В ходе ее анализа и варьирования параметров мелкодисперсных частиц (плотность, диаметр и концентрация) и скорости газового потока было выявлено, что продолжительность работы сепаратора с увеличением числовых значений данных параметров уменьшается вследствие повышения производительности трапециевидного сепаратора и относительно быстрой забивки дугообразных элементов пы-



**Рис. 3. Зависимость концентрации мелкодисперсных частиц в газовом потоке от продолжительности работы сепаратора при входной скорости газа  $W$ , м/с: 1 – 3; 2 – 5; 3 – 7; 4 – 9; 5 – 11**  
**Fig. 3. Fine particle concentration in gas flow vs separator operation time at input gas velocity  $W$ , m/s: 1 – 3; 2 – 5; 3 – 7; 4 – 9; 5 – 11**



**Рис. 4. Зависимость продолжительности работы сепаратора от диаметра мелкодисперсных частиц при входной скорости газа  $W$ , м/с: 1 – 3; 2 – 7; 3 – 11**  
**Fig. 4. Separator operation time vs diameter of fine particles at input gas velocity  $W$ , m/s: 1 – 3; 2 – 7; 3 – 11**

лью, приводящей к изменению структуры движения потока, из-за которой понижается эффективность очистки газового потока сепаратором от мелкодисперсных частиц. Минимальная продолжительность работы сепаратора составляет около 50 сут при

входной скорости движения запыленного потока 11 м/с и концентрации пыли в нем 8 мг/м<sup>3</sup>. Максимальная продолжительность работы составляет около 465 сут при начальной скорости запыленного потока 3 м/с и концентрации пыли 5 мг/м<sup>3</sup>.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, прогнозирование продолжительности работы сепаратора позволяет определить необходимый срок службы устройств, чтобы момент времени его очистки совпадал со временем обслу-

живания других аппаратов технологической линии очистки газовых потоков. Достоинствами сепаратора являются простота сборки и разборки, что позволяет в минимальные временные сроки произвести очистку устройства, высокая эффективность и легкость в использовании.

#### Библиографический список

1. Темникова Е.Ю., Богомолов А.Р., Тиунова Н.В., Лапин А.А. Перспективы использования золы уноса тепловых электростанций Кузбасса // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2017. № 1. С. 90–96.
2. Севостьянов В.С., Уральский В.И., Севостьянов М.В. Ресурсо-энергосберегающее оборудование и комплексы для переработки природных и техногенных материалов. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. 315 с.
3. Удилов Т.В., Кузнецов К.Л. Постановка задач исследования возможности создания порошковых огнетушащих композиций на основе зол уноса факельного сжигания углей // Тенденции развития науки и образования. 2018. № 42-5. С. 65–67. <https://doi.org/10.18411/lj-09-2018-102>
4. Пат. № 2645980, Российская Федерация, В01D 47/06. Центробежный пылеуловитель / Ю.С. Кочетов; заявитель и патентообладатель Ю.С. Кочетов. Заявл. 29.06.2017; опубл. 28.02.2018. Бюл. № 7.
5. Подпороинов Б.Ф., Семенов А.С. Пути повышения эффективности пылеулавливающих аппаратов в системах очистки вентиляционных выбросов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 11. С. 104–107. <https://doi.org/10.12737/22434>
6. Росляков П.В. Современные воздухоохранные технологии на тепловых электростанциях (Обзор) // Теплоэнергетика. 2016. № 7. С. 46–62. <https://doi.org/10.1134/S0040363616070079>
7. Сергина Н.М., Абулджалил М.С.А., Абрамова Л.М. Пылеуловители со встречными закрученными потоками в системах очистки пылевых выбросов в производстве строительных материалов // Инженерный вестник Дона. 2015. № 3. [Электронный ресурс]. URL: [ivdon.ru/uploads/article/pdf/136N3y15\\_\\_sergina.pdf\\_f1a0f0f9c5.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/136N3y15__sergina.pdf_f1a0f0f9c5.pdf) (27.01.2020).
8. Муратова К.М., Чистяков Я.В., Махнин А.А. Пылеулавливание и классификация в центробежно-инерционных аппаратах // Известия Тульского государственного университета // Науки о Земле. 2014. Вып. 4. С. 47–57.
9. Yan Jinpei, Chen Liqi, Lin Qi. Removal of fine particles in WFGD system using the simultaneous acoustic agglomeration and supersaturated vapor condensation // Powder Technology. 2017. Vol. 315. P. 106–113. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.03.056>
10. Rosa B., Parishani H., Ayala O., Wang Lian-Ping. Settling velocity of small inertial particles in homogeneous isotropic turbulence from high-resolution DNS // International Journal of Multiphase Flow. 2016. Vol. 83. P. 217–231. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.04.005>
11. Saarnio K., Frey A., Niemi J.V., Timonen H., Rönkkö T., Karjalainen P., et al. Chemical composition and size of particles in emissions of a coal-fired power plant with flue gas desulfurization // Journal of Aerosol Science. 2014. Vol. 73. P. 14–26. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2014.03.004>
12. Jingjing Bao, Linjun Yang, Jinpei Yan, Guilong Xiong, Bin Lu, Chengyun Xin. Experimental study of fine particles removal in the desulfurated scrubbed flue gas // Fuel. 2013. Vol. 108. P. 73–79. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.12.037>
13. Richardson Y., Blin J., Julbe A. A short overview on purification and conditioning of syngas produced by biomass gasification: Catalytic strategies, process intensification and new concepts // Progress in Energy and Combustion Science. 2012. Vol. 38. Issue 6. P. 765–781. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2011.12.001>
14. Anh Ho Chi, Sommerfeld M. Modelling of micro-particle agglomeration in turbulent flows // Chemical Engineering Science. 2002. Vol. 57. Issue 15. P. 3073–3084. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(02\)00172-0](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(02)00172-0)
15. Jiang Wen-ming, Chen Yi-mei, Chen Ming-can, Liu Xiao-li, Liu Yang, Wang Tianyu, et al. Removal of emulsified oil from polymer-flooding sewage by an integrated apparatus including EC and separation process // Separation and Purification Technology. 2019. Vol. 211. P. 259–268. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.09.069>
16. Wang Shuo, Qin Wei, Dai Youyuan. Separation of Oil Phase from Dilute Oil/Water Emulsion in Confined Space Apparatus // Chinese Journal of Chemical Engineering. 2012. Vol. 20. Issue 2. P. 239–245. [https://doi.org/10.1016/S1004-9541\(12\)60384-X](https://doi.org/10.1016/S1004-9541(12)60384-X)
17. Kou Jie, Chen Yi, Wu Junqiang. Numerical study and optimization of liquid-liquid flow in cyclone pipe // Chemical Engineering and Processing – Process Intensification. 2020. Vol. 147. P. 107725. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2019.107725>
18. Дмитриев А.В., Зинуров В.Э., Дмитриева О.С., Галиев А.А. Влияние конструктивного оформления элементов прямоугольного сепаратора на эффективность очистки газа от твердых частиц // Вестник технологического университета. 2018. Т. 21. № 9. С. 58–61.
19. Дмитриев А.В., Зинуров В.Э., Дмитриева О.С.,



Нгуен Ву Линь. Эффективность прямоугольного сепаратора в зависимости от оформления элементов внутри аппарата // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2018. Т. 10. № 1. С. 74–81.

20. Зинуров В.Э., Дмитриев А.В., Соловьева О.В., Латыпов Д.Н. Влияние загрязнения пылеочистительного сепаратора мелкодисперсной пылью на

энергетические затраты в ходе его эксплуатации // Вестник технологического университета. 2019. Т. 22. № 8. С. 33–37.

21. Дмитриев А.В., Зинуров В.Э., Дмитриева О.С., Поляков А.И. Эффективность входной ступени прямоугольных сепараторов // Вестник технологического университета. 2018. Т. 21. № 11. С. 66–69.

### References

1. Temnikova EY, Bogomolov AR, Tiunova NV, Lapin AA. Prospects of Using Fly Ash Produced at Thermal Power Plants of Kuzbas. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2017;1:90–96. (In Russ.)
2. Sevost'yanov VS, Ural'skij VI, Sevost'yanov MV. *Resource and Energy-Saving Equipment and Complexes for Natural and Technogenic Material Recycling*. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; 2017, 315 p. (In Russ.)
3. Udilov TV, Kuznecov KL. Setting Research Objectives on Creation Possibility of Powder Fire Extinguishing Compositions based on Fly Ash of Coal Flaring. *Tendencii razvitiya nauki i obrazovaniya*. 2018;42-5:65–67. (In Russ.) <https://doi.org/10.18411/lj-09-2018-102>
4. Kochetov YS. *Centrifugal dust collector*. Patent RF, no. 2645980; 2018. (In Russ.)
5. Podporinov BF, Seminenko AS. Ways of Increase of Efficiency of Dust Removal Devices in Cleaning Systems for Exhaust Air. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova* = Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016;11:104–107. (In Russ.) <https://doi.org/10.12737/22434>
6. Roslyakov PV. Modern Air Protection Technologies at Thermal Power Plants (Review). *Teploenergetika*. 2016;7:46–62. <https://doi.org/10.1134/S0040363616070079>
7. Sergina NM, Abul'dzhalil MSA, Abramova LM. Dust Collectors with Counter Swirl Flows in Dust Emission Cleaning Systems in the Production of Building Materials. *Inzhenernyj vestnik Dona* = Engineering Journal of Don. 2015;3. Available from: [ivdon.ru/uploads/article/pdf/136N3y15\\_sergina.pdf\\_f1a0f0f9c5.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/136N3y15_sergina.pdf_f1a0f0f9c5.pdf) [Accessed 27th January 2020]. (In Russ.)
8. Muratova KM, Chistyakov YV, Makhnin AA. Centrifugal-Inertial Dust Extractors for Dry Air Cleaning. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2014;(4):47–57. (In Russ.)
9. Yan Jinpei, Chen Liqi, Lin Qi. Removal of Fine Particles in WFGD System using The Simultaneous Acoustic Agglomeration and Supersaturated Vapor Condensation. *Powder Technology*. 2017;315:106–113. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.03.056>
10. Rosa B, Parishani H, Ayala O, Wang Lian-Ping. Settling Velocity of Small Inertial Particles in Homogeneous Isotropic Turbulence from High-Resolution DNS. *International Journal of Multiphase Flow*. 2016;83:217–

231.

<https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.04.005>

11. Saarnio K, Frey A, Niemi JV, Timonen H, Rönkkö T, Karjalainen P, et al. Chemical Composition and Size of Particles in Emissions of a Coal-Fired Power Plant with Flue Gas Desulfurization. *Journal of Aerosol Science*. 2014;73:14–26.

<https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2014.03.004>

12. Jingjing Bao, Linjun Yang, Jinpei Yan, Guilong Xiong, Bin Lu, Chengyun Xin. Experimental Study of Fine Particles Removal in the Desulfurated Scrubbed Flue Gas. *Fuel*. 2013;108:73–79. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.12.037>

13. Richardson Y, Blin J, Julbe A. A Short Overview on Purification and Conditioning of Syngas Produced by Biomass Gasification: Catalytic Strategies, Process Intensification and New Concepts. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2012;38(6):765–781. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2011.12.001>

14. Anh Ho Chi, Sommerfeld M. Modelling of Micro-Particle Agglomeration in Turbulent Flows. *Chemical Engineering Science*. 2002;57(15):3073–3084.

[https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(02\)00172-0](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(02)00172-0)

15. Jiang Wen-ming, Chen Yi-mei, Chen Ming-can, Liu Xiao-li, Liu Yang, Wang Tianyu, et al. Removal of Emulsified Oil from Polymer-Flooding Sewage by an Integrated Apparatus Including EC and Separation Process. *Separation and Purification Technology*. 2019;211:259–268. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.09.069>

16. Wang Shuo, Qin Wei, Dai Youyuan. Separation of Oil Phase from Dilute Oil/Water Emulsion in Confined Space Apparatus. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2012;20(2):239–245. [https://doi.org/10.1016/S1004-9541\(12\)60384-X](https://doi.org/10.1016/S1004-9541(12)60384-X)

17. Kou Jie, Chen Yi, Wu Junqiang. Numerical Study and Optimization of Liquid-Liquid Flow in Cyclone Pipe. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*. 2020;147:107725. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2019.107725>

18. Dmitriev AV, Zinurov VE, Dmitrieva OS, Galiev AA. Influence of Structurally Designing the Elements of a Rectangular Separator upon the Efficiency of Gas Cleaning from Solid Particles. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. 2018;21(9):58–61. (In Russ.)

19. Dmitriev AV, Zinurov VE, Dmitrieva OS, Nguen Vu Lin'. Efficiency of a Rectangular Separator depending on the Design of Elements inside the Apparatus. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo*

*universiteta*. 2018;10(1):74–81. (In Russ.)  
20. Zinurov VE, Dmitriev AV, Solov'eva OV, Latypov DN. Impact of Polluting a Dust Separator with Fine Dust upon the Energy Consumption during its Operation. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*.

#### **Критерии авторства**

Зинуров В.Э., Дмитриев А.В., Петрова Т.С., Дмитриева О.С. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Зинуров Вадим Эдуардович**,  
аспирант,  
Казанский государственный энергетический университет,  
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, Россия;  
e-mail: vadd\_93@mail.ru

**Дмитриев Андрей Владимирович**,  
доктор технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой «Теоретические основы теплотехники»,  
Казанский государственный энергетический университет,  
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, Россия;  
✉ e-mail: ieremiada@gmail.com

**Петрова Татьяна Сергеевна**,  
студент,  
Казанский государственный энергетический университет,  
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, Россия;  
e-mail: tony-sh@mail.ru

**Дмитриева Оксана Сергеевна**,  
кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры «Химическая технология переработки нефти и газа»,  
Казанский национальный исследовательский технологический университет,  
420015, г. Казань, ул. Карла Маркса, 68, Россия;  
e-mail: ja\_deva@mail.ru

2019;22(8):33–37. (In Russ.)  
21. Dmitriev AV, Zinurov VE, Dmitrieva OS, Polyakov AI. Performance of the Inlet Stage of Rectangular Separators. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. 2018;21(11):66–69. (In Russ.)

#### **Authorship criteria**

Zinurov V.E., Dmitriev A.V., Petrova T.S., Dmitrieva O.S. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

#### **Conflict of interests**

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

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

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Vadim E. Zinurov**,  
Postgraduate Student,  
Kazan State Power Engineering University,  
51, Krasnoselskaya St., Kazan 420066, Russia;  
e-mail: vadd\_93@mail.com

**Andrey V. Dmitriev**,  
Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Head of the Department of Theoretical Foundations of Heat Engineering,  
Kazan State Power Engineering University,  
51, Krasnoselskaya St., Kazan 420066, Russia;  
✉ e-mail: ieremiada@gmail.com

**Tatiana S. Petrova**,  
Student,  
Kazan State Power Engineering University,  
51, Krasnoselskaya St., Kazan 420066, Russia;  
e-mail: tony-sh@mail.ru

**Oksana S. Dmitrieva**,  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Chemical Technology of Oil and Gas Processing, Kazan National Research Technological University,  
68 Karl Marx St., Kazan 420015, Russia;  
e-mail: ja\_deva@mail.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.31

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-616-626>

## Оптимизация методом роя частиц структуры автономного энергетического комплекса с использованием солнечной энергии

© К.В. Кенден\*, А.В. Кузнецов\*\*

\*Тувинский государственный университет, г. Кызыл, Россия

\*\*Сибирский федеральный университет г. Красноярск, Россия

**Резюме:** Цель – разработка методики оптимизации структуры автономного энергетического комплекса, состоящего из фотоэлектрических панелей, аккумуляторных батарей и дизель-генератора, и ее реализация в программно-вычислительном комплексе. Для оптимизации структуры комплекса применен метод роя частиц, для использования которого не требуется знать точного градиента оптимизируемой функции, в качестве которой была выбрана себестоимость вырабатываемой энергокомплексом электроэнергии. При оптимизации учитывались изменения графика нагрузки потребителей, актинометрические и метеорологические условия местности, технические характеристики фотоэлектрических панелей и аккумуляторных батарей. Также предусмотрен выбор из трех вариантов установки фотоэлектрических панелей относительно горизонта: горизонтально; под углом к горизонту; под углом к горизонту на поворотном одноосном основании с вертикальной осью вращения с использованием системы слежения за солнцем (угол наклона выбирается равным широте местности). Для с. Кызыл-Хая Республики Тыва, функционирующего от дизельной электростанции, рассчитаны среднемесячные значения солнечной инсоляции на горизонтальную поверхность; суммарная установленная мощность электрогенерирующих элементов автономного энергокомплекса, оптимизированного методом роя частиц, составила 450,1 кВт с емкостью аккумуляторных батарей равной 22,2 кА·ч. Разработанная методика оптимизации структуры энергокомплекса реализована в программной среде MATLAB. После оптимизации по предложенной методике структуры автономного энергокомплекса с наклонным расположением фотоэлектрических панелей себестоимость вырабатываемой ими электроэнергии составила 26,978 руб/кВт·ч при капитальных затратах 16956,853 тыс. руб. Использование данной оптимизированной структуры комплекса позволит изменить график подачи электроэнергии от 18 до 24 ч в сут, а также может привести к возможному снижению потребления дизельного топлива на 70% в сравнении с потреблением при 18-часовом графике подачи электроэнергии от дизельной электростанции.

**Ключевые слова:** выработка мощности фотоэлектрического преобразователя, метод роя частиц, оптимизация, солнечно-дизельная установка, технико-экономические показатели

**Информация о статье:** Дата поступления 09 декабря 2019 г.; дата принятия к печати 08 апреля 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 июня 2020 г.

**Для цитирования:** Кенден К.В., Кузнецов А.В. Оптимизация методом роя частиц структуры автономного энергетического комплекса с использованием солнечной энергии. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 3. С. 616–626. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-616-626>

## Particle swarm optimisation for the structure of an autonomous solar energy complex

Kara-Kys V. Kenden\*, Alexander V. Kuznetsov\*\*

\*Tuvan State University, Kyzyl, Russia

\*\*Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

**Abstract:** The aim of the study involved the development of a methodology for optimising the structure of an autonomous energy complex consisting of photovoltaic panels, accumulator batteries and a diesel generator, as well as its implementation in a software and computer complex. In order to optimise the structure of the complex, a particle swarm method was used that does not require the exact gradient of the optimisation function to be known. In terms of an optimisation function, the cost price of the electricity generated by the energy complex was chosen. During the optimisation process, changes in the consumer load demand, local actinometric and meteorological conditions, as well as technical characteristics of photovoltaic panels and batteries were taken into account. Additionally, a choice of three following options for installing photovoltaic panels relative to the horizon is provided: horizontally; inclined to the horizon; inclined to the horizon on a rotary uniaxial base with a vertical rotation axis using a sun tracking system (selecting an angle of incli-

nation equal to the latitude). For Kyzyl-Khaya village in the Republic of Tyva, currently supplied from a diesel power station, the average monthly values of horizontal surface insolation are calculated with the total installed capacity of the power generating elements for an autonomous energy complex optimised by the particle swarm method equal to 450.1 kW and having a battery capacity of 22.2 kA·h. The developed technique for optimising the structure of the energy complex is implemented in the MATLAB software environment. Following optimisation by the proposed methodology, the structure of an autonomous energy complex with an inclined arrangement of photovoltaic panels, the cost of electricity generated by it amounted to 26.978 roubles/kW h with a capital cost of 16956.853 thousand roubles. This optimised structure of the complex provides for changing the power supply schedule from 18 to 24 hours a day and additional possible reduction in diesel fuel consumption by 70% compared to the same setup having an 18-hour power supply schedule from a diesel power plant.

**Keywords:** photovoltaic converter power generation, particle swarm method, optimisation, solar diesel installation, technical and economic performances

**Information about the article:** Received December 09, 2019; accepted for publication April 08, 2020; available online June 30, 2020.

**For citation:** Kenden KV, Kuznetsov AV. Particle swarm optimisation for the structure of an autonomous solar energy complex. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(3):616–626. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-616-626>

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Типичным примером децентрализованного электроснабжения является Республика Тыва, где функционирует 12 автономных дизельных электростанций (ДЭС) общей мощностью 5,6 МВт. Для бытовых и

технологических нужд населения в населенных пунктах функционируют ДЭС различных типов, модификаций и года выпуска, что затрудняет процессы их сервисного обслуживания и ремонта, соответственно, приводит к снижению надежности в эксплуатации.

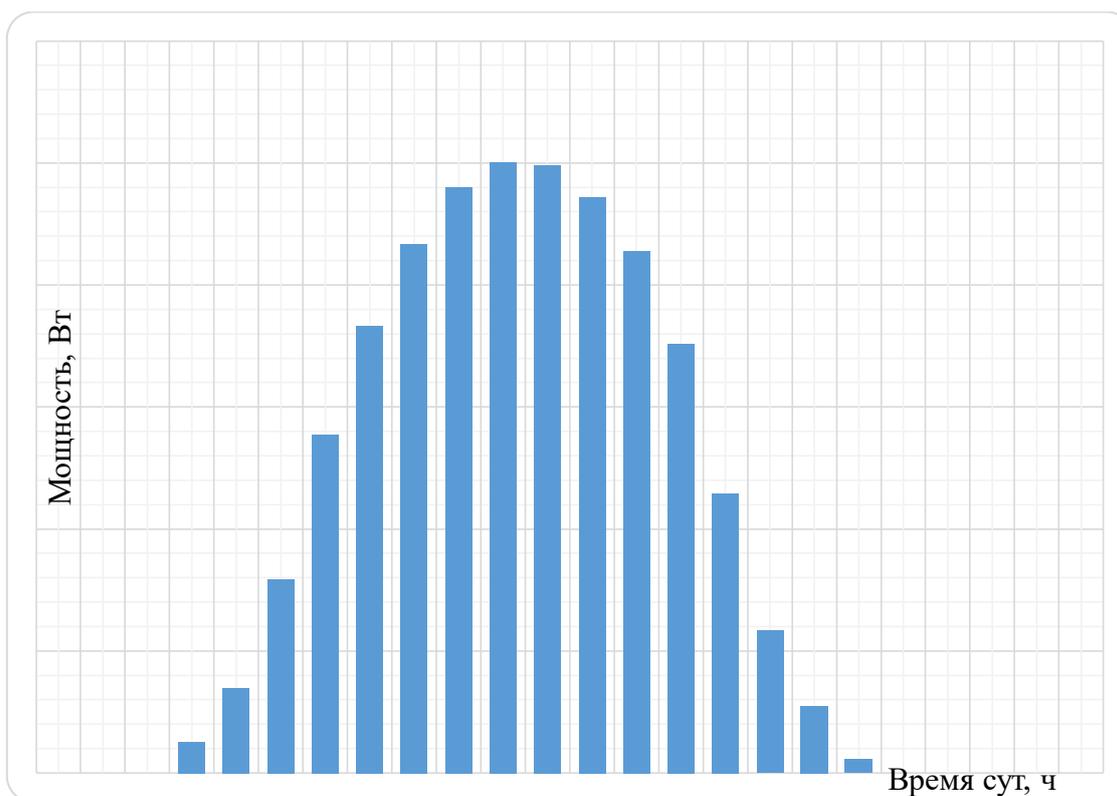


Рис. 1. Значения выработки электроэнергии фотоэлектрических преобразователей «SIP-300» в условиях с. Кызыл-Хая

Fig. 1. Values of power generated by SIP-300 photovoltaic converter in Kyzyl-Khaya settlement



Решение проблем децентрализованного электроснабжения (низкая плотность населения, устаревшие и изношенные ДЭС и электрические сети, сложная и дорогостоящая доставка топлива) принятием разовых мер у изолированных потребителей (замена изношенного оборудования, выделение средств на завоз топлива, и др.) не снимает существующей проблемы.

Для децентрализованных зон, расположенных преимущественно на юге Сибири (Республики Тыва, Алтай), наиболее перспективными являются солнечно-дизельные электростанции (СДЭС), так как солнечный потенциал этих регионов достаточно высокий. Применение фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) с накопителями энергии совместно с традиционными дизель-генераторами (ДГ) позволит снизить топливную составляющую в себестоимости вырабатываемой электроэнергии, что существенно повысит их технико-экономическую эффективность.

В настоящее время об оптимальном выборе структуры автономного энергокомплекса с использованием солнечной энергии написано большое количество научных трудов как в России [1–3], так и за рубежом [4–10]. Однако в работах при выборе генерирующих элементов автономного энергокомплекса с использованием солнечной энергии не в полной мере учитываются изменения графика нагрузки потребителей, выработка мощности ФЭП (суточная, месячная, годовая) в зависимости от актинометрических и метеорологических условий местности, технических характеристик и способа ориентации ФЭП. Поэтому цель данной работы – разработка методики оптимизации структуры автономного энергетического комплекса, состоящего из фотоэлектрических панелей, аккумуляторных батарей (АБ) и дизель-генератора, с учетом вышеперечисленных факторов, а также ее реализация в программно-вычислительном комплексе.

## 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Большое количество изолированных потребителей на территории России, в том числе и в Республике Тыва, расположено в труднодоступных и отдаленных районах, где, как правило, отсутствуют актинометрические станции. Поэтому при отсутствии данных по интенсивности солнечной инсоляции применяются косвенные методы ее расчета, основанные на астрономических параметрах Солнца [11–15]. В работе [16] по методике Берда рассчитаны среднемесячные значения суммарного прихода солнечной энергии на горизонтальную поверхность в условиях Республики Тыва.

По предложенной в работе [17] методике оценки вырабатываемой мощности ФЭП с учетом метеорологических условий местности, технических характеристик и способа ориентации ФЭП были определены прогнозируемые значения выработки электроэнергии ФЭП в условиях Республики Тыва<sup>1</sup> [18]. На рис. 1 представлен летний график выработки электроэнергии в случае наклонного поликристаллического ФЭП в условиях с. Кызыл-Хая.

## 3. СТРУКТУРА ЭНЕРГОКОМПЛЕКСА И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ МЕЖДУ ГЕНЕРИРУЮЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Автономный энергетический комплекс ФЭП–АБ–ДГ состоит из трех электрогенерирующих элементов – ФЭП, ДГ и АБ (рис. 2).

В структурной схеме ФЭП подключен к контроллеру заряда АБ. Конструкция контроллера позволяет передавать вырабатываемые ФЭП мощности непосредственно на инвертор, минуя АБ. В случае избытка или недостатка в системе вырабатываемой мощности контроллер осуществляет заряд или разряд АБ. Обеспечение

<sup>1</sup>Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019613429. Программа расчета прогнозируемых значений вырабатываемой мощности фотоэлектрического преобразователя / К.В. Кенден Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 18.03.2019 г.

потребителя электроэнергией заданного качества осуществляется с помощью инвертора. В системе основным источником электроэнергии является ФЭП, характер вырабатываемой в нем мощности отличается значительной неравномерностью, которая в большинстве случаев сглаживается наличием в системе АБ. Однако для повышения надежности электроснабжения и восполнения недостатка электроэнергии в состав системы включен резервный источник энергии – ДГ. Недостаток или избыток энергии контролируется блоком автоматики, который автоматически подключает или отключает ДГ. Вырабатываемая генератором мощность идет на обеспечение нужд потребителя совместно с ФЭП.

Для определения выработки электроэнергии каждым генерирующим элементом введены следующие обозначения:

$$W_i = W_{\text{ФЭП}} - W_{\text{П}}, \quad (1)$$

где  $W_{\text{ФЭП}}$ , кВт·ч – выработка электроэнергии ФЭП;  $W_{\text{П}}$ , кВт·ч – требуемое потребление электроэнергии;  $W_i$ , кВт·ч – избыток или недостаток энергии.

Если энергия, вырабатываемая ФЭП больше, чем требуется для покрытия нагрузки, ее излишки уходят на заряд АБ:

$W_i > 0$ , то

$$W_i = W_{\text{ФЭП}} - W_{\text{П}} - W_{\text{АБ}}, \quad (2)$$

где  $W_{\text{АБ}}$ , кВт·ч – запасенная энергия АБ.

Если энергии от ФЭП недостаточно для покрытия нагрузки, но имеется достаточный заряд АБ – дефицит покрывается за счет АБ. При этом разряд АБ не должен падать ниже 30% от номинальной емкости: при  $W_{\text{АБ}} > W_{\text{АБ}}^{\text{min}}$ , то

$$W_i = W_{\text{ФЭП}} - W_{\text{П}} + (W_{\text{АБ}}^{\text{max}} - W_{\text{АБ}}^{\text{min}}), \quad (3)$$

где  $W_{\text{АБ}}^{\text{min}}$  кВт·ч – минимальный уровень энергии заряда АБ;  $W_{\text{АБ}}^{\text{max}}$  кВт·ч – максимальный уровень энергии заряда АБ.

Если АБ разряжены до порогового значения, для питания нагрузки подключаются ДГ:  $W_i < 0$ , при

$$W_{\text{АБ}} = W_{\text{АБ}}^{\text{min}}, \text{ то } W_i = W_{\text{П}} - W_{\text{ДГ}}, \quad (4)$$

где  $W_{\text{ДГ}}$ , кВт·ч – выработка электроэнергии ДГ.

Среднегодовая выработка генерирующих элементов энергокомплекса составит:

$$W_{\text{СДЭС}}^{\text{год}} = \sum_{i=1}^{\text{год}} W_{\text{ФЭП}}^i + \sum_{i=1}^{\text{год}} W_{\text{АБ}}^i + \sum_{i=1}^{\text{год}} W_{\text{ДГ}}^i. \quad (5)$$



Рис. 2. Структурная схема автономного энергетического комплекса ФЭП–АБ–ДГ: пунктирные линии – потоки энергии, циркулирующие между элементами системы;

точечные линии – командные связи между блоком автоматики и управляемыми устройствами

Fig. 2. Block diagram of the autonomous energy complex Photovoltaic Converter – Storage Battery – Diesel Generator: dashed lines – flows of energy circulating between the elements of the system; dotted lines – control connections between the automation unit and controlled devices



#### 4. МЕТОД РОЯ ЧАСТИЦ

Для оптимизации структуры автономного энергетического комплекса ФЭП-АБ-ДГ был выбран метод роя частиц, предложенный в 1995 г. Джеймсом Кеннеди и Расселом Эберхартом [19] в классическом его представлении. Сущность оптимизации роя частиц состоит в том, чтобы вычислить новую скорость каждой переменной всех частиц, которые рассматриваются, используя ее текущую скорость, расстояние между ее текущим положением и ее собственной предыдущей лучшей позицией, и расстояние между ее текущим положением и предыдущей лучшей позицией той же самой переменной среди других частиц в рое. Эти два расстояния случайно взвешены в обновлении скорости. Как только вычислена новая скорость, обновляется новая позиция перемещением в шаг при новой скорости.

Частицы в рое представляются набором координат в пространстве решений, а также вектором скорости. Именно уравнение скорости является основой алгоритма, при ее определении используется информация о текущем положении частицы, наилучшем положении для данной частицы и наилучшем положении всего роя.

Уравнение скорости частицы:

$$V_{i,t+1} = c_{in}V_{i,t} + c_{cog}r_p(p_i - x_{i,t}) + c_{soc}r_g(g - x_{i,t});$$

$$x_{i,t+1} = x_{i,t} + V_{i,t+1}, \quad (6)$$

где  $V_{i,t}$  – значение скорости  $i$ -й частицы на  $t$ -й итерации цикла;  $x_{i,t}$  – положение (позиция)  $i$ -й частицы на  $t$ -й итерации;  $p_i$  – координата лучшего решения, найденного частицей;  $g$  – координата лучшего решения, найденного роем;  $c_{cog}$ ,  $c_{soc}$  – два коэффициента ускорения;  $r_p$ ,  $r_g$  – два однородно распределенных случайных числа в диапазоне  $[0,1]$ ;  $c_{in}$  – коэффициент утяжеления инерции, который отражает эффект скорости в строго предыдущей итерации.

#### 5. ПРОЦЕДУРА ОПТИМИЗАЦИИ АВТОНОМНОГО ЭНЕРГОКОМПЛЕКСА

Состав элементов энергокомплекса выбирается методом роя частиц, который служит для нахождения глобальных экстремумов функции. Целевой функцией в нашем случае является себестоимость электроэнергии от СДЭС, руб/кВт·ч [20]:

$$C_{комб} = \frac{(\sum_{i=1}^{zod} W_{П}^i - \sum_{i=1}^{zod} W_{ДГ}^i) \cdot C_{ФЭП} + \sum_{i=1}^{zod} W_{ДГ}^i \cdot T_{ДЭС}}{\sum_{i=1}^{zod} W_{П}^i}, \quad (7)$$

где  $T_{ДЭС}$ , руб/кВт·ч – установленный тариф на электроэнергию от существующей дизельной электростанции;  $C_{ФЭП}$ , руб/кВт·ч – себестоимость электрической энергии,

производимой от ФЭП;  $\sum_{i=1}^{zod} W_{П}^i$ , кВт·ч – годовое потребление электроэнергии:

$$C_{ФЭП} = \frac{3 + И \cdot T_{ОК}}{(W_{НАГР}^{ГОД} - W_{ДГ}^{ГОД}) \cdot T_{ОК}}. \quad (8)$$

Капитальные затраты на строительство автономного энергокомплекса, тыс. руб.:

$$3 = C_{осн} + C_{дон} + C_{Д} + C_{С} + C_{ПР} + C_{СМР}, \quad (9)$$

где  $C_{осн}$ , тыс. руб. – общая стоимость ФЭП, АБ, ДГ и инвертора;  $C_{дон}$ , тыс. руб. – стоимость дополнительного оборудования;  $C_{Д}$ , тыс. руб. – затраты на доставку;  $C_{С}$ , тыс. руб. – затраты на страховку при перевозке ФЭП, АБ и ДГ;  $C_{ПР}$ , тыс. руб. – затраты на проектные работы;  $C_{СМР}$ , тыс. руб. – затраты на строительные-монтажные работы.

Ежегодные издержки на эксплуатацию и обслуживание ФЭП-АБ-ДГ, тыс. руб.:

$$И = 3 \cdot 0,01 + \left( \frac{n_{ЗАМ} \cdot C_{АБ} \cdot n_{АБ}}{T_{ОК}} \right), \quad (10)$$

где  $T_{ОК}$ , лет – заданный срок окупаемости;

$C_{AB}$ , тыс. руб. – стоимость аккумуляторной батареи;  $n_{зам}$ . – количество замен АБ за время эксплуатации энергокомплекса ФЭП-АБ-ДГ.

При условиях:

$$\begin{aligned} P_{ФЭП} &= P_{П}^{\max} \cdot S_{ФЭП}; \\ P_{ДГ} &= P_{1ДГ} \cdot n_{ДГ}; \\ W_{АБ}^{zod} &= W_{ФЭП}^{zod} - W_{П}^{zod}, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $P_{ФЭП}$ ,  $P_{ДГ}$ , кВт – суммарные установленные мощности ФЭП и ДГ;  $S_{ФЭП}$ , кВт – шаг варьирования установленной мощности ФЭП;  $P_{П}^{\max}$ , кВт – максимальная мощность нагрузки;  $P_{1ДГ}$ , кВт – единичная установленная мощность ДГ;  $n_{ДГ}$ , шт. – количество ДГ; с точки зрения надежности минимальное количество генераторов должно быть не меньше 2, то есть,  $n_{ДГ} \geq 2$ .

Процедура использования методики роя частиц для решения задачи оптимизации структуры энергокомплекса ФЭП-АБ-ДГ включает следующие шаги:

1. Задаются начальные значения каждой частицы  $x_i$  и скорость  $V_i$  случайным образом:

$$\begin{aligned} x_{ФЭП,i} &= rand(1, x_{ФЭП,max}); \\ x_{АБ,i} &= rand(1, x_{АБ,max}); \\ x_{ДГ,i} &= rand(1, x_{ДГ,max}); \\ x_{уаз,i} &= rand(1, x_{уаз,max}); \\ V_{ФЭП,i} &= rand(-(x_{ФЭП,max} - 1), (x_{ФЭП,max} - 1)); \\ V_{АБ,i} &= rand(-(x_{АБ,max} - 1), (x_{АБ,max} - 1)); \\ V_{уаз,i} &= rand(-(x_{уаз,max} - 1), (x_{уаз,max} - 1)); \\ V_{ДГ,i} &= rand(-(x_{ДГ,max} - 1), (x_{ДГ,max} - 1)); \end{aligned}$$

где  $x_{ДГ,max}$ ,  $x_{ФЭП,max}$ ,  $x_{АБ,max}$  – количество дизельных генераторов, ФЭП или аккумуляторов, соответственно, в таблицах исходных данных;  $x_{уаз,max}$  – максимальный шаг варьирования ФЭП. При этом за лучшее положение частицы принимается ее положение при инициализации  $p_i = x_i$ , а лучше положение роя принимаем  $g = 1$ .

2. На первом этапе лучшее положение частицы определяется набором начальных значений:

$$\begin{aligned} p_{ДГ,i} &= x_{ДГ,i}; \\ p_{ФЭП,i} &= x_{ФЭП,i}; \\ p_{АБ,i} &= x_{АБ,i}; \\ p_{уаз,i} &= x_{уаз,i}. \end{aligned}$$

Расчет значений целевой функции: за целевую функцию взяты себестоимость электроэнергии автономного энергокомплекса ФЭП-АБ-ДГ при наилучших положениях частицы  $p_i$  и роя  $g$ :

$$\begin{aligned} C_p^{комб} &= f(p_{ДГ,i}, p_{ФЭП,i}, p_{АБ,i}, p_{уаз,i}); \\ C_g^{комб} &= f(g_{ДГ}, g_{ФЭП}, g_{АБ}, g_{уаз}). \end{aligned}$$

Вычисляются значения целевой функции, полученные из обновления каждой переменной для каждой частицы:

$$\begin{aligned} g_{ФЭП} &= p_{ФЭП,i}; \\ g_{АБ} &= p_{АБ,i}; \\ g_{ДГ} &= p_{ДГ,i}; \\ g_{уаз} &= p_{уаз,i}. \end{aligned}$$

«Лучшая позиция» приписывается той, которая приводит к минимуму целевой функции. Начальная лучшая позиция  $p_i$



каждой переменной в каждой частице – ее начальная позиция в первой итерации. Лучшая глобальная позиция  $g$  каждой переменной является позицией, соответствующей минимуму в значениях целевой функции, полученных из обновления той же переменной в  $N$  частицах.

1. Скорости каждой переменной каждой частицы обновляются по уравнениям:

$$V_{\PhiЭП,i}^{t+1} = c_{in} V_{\PhiЭП,i}^t + c_{cog} r_p (p_{\PhiЭП,i} - x_{\PhiЭП,i}) + c_{soc} r_g (g_{\PhiЭП} - x_{\PhiЭП,i});$$

$$V_{АБ,i}^{t+1} = c_{in} V_{АБ,i}^t + c_{cog} r_p (p_{АБ,i} - x_{АБ,i}) + c_{soc} r_g (g_{АБ} - x_{АБ,i});$$

$$V_{ДГ,i}^{t+1} = c_{in} V_{ДГ,i}^t + c_{cog} r_p (p_{ДГ,i} - x_{ДГ,i}) + c_{soc} r_g (g_{ДГ} - x_{ДГ,i});$$

$$V_{шаз,i} = c_{in} V_{шаз,i} + c_{cog} r_p (p_{шаз,i} - x_{шаз,i}) + c_{soc} r_g (g_{шаз} - x_{шаз,i}),$$

где  $V_i^{t+1}$  – значение скорости  $i$ -й частицы на  $t+1$ -й итерации цикла;  $c_{in}$ ,  $c_{cog}$ ,  $c_{soc}$  – коэффициенты, определяющие влияние каждого слагаемого на результат;  $r_p$ ,  $r_g$  – случайное распределение (0,1).

2. Позиции переменной каждой частицы обновляются по уравнениям:

$$x_{ДГ,i} = x_{ДГ,i} + V_{ДГ,i};$$

$$x_{\PhiЭП,i} = x_{\PhiЭП,i} + V_{\PhiЭП,i};$$

$$x_{АБ,i} = x_{АБ,i} + V_{АБ,i};$$

$$x_{шаз,i} = x_{шаз,i} + V_{шаз,i}.$$

3. Обновляются лучшая позиция каждой переменной каждой частицы и лучшие глобальные позиции каждой переменной для всех частиц:

$$C_x^{комб} = f(x_{ДГ,i}, x_{\PhiЭП,i}, x_{АБ,i}, x_{шаз,i});$$

$$C_p^{комб} = f(p_{ДГ,i}, p_{\PhiЭП,i}, p_{АБ,i}, p_{шаз,i})$$

при  $C_x^{комб} < C_p^{комб}$ .

4. Если у значений оптимизируемой функции нет существенного изменения в нескольких последующих итерациях или если итерационный процесс достигает заданного максимального числа итераций, оптимизация заканчивается. Иначе происходит переход на шаг 4.

## 6. РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве объекта оптимизации рассмотрен изолированный населенный пункт Республики Тыва, запитанный от ДЭС. Максимальная мощность нагрузки в зимнее время достигает 170 кВт при существующем тарифе на электроэнергию от ДЭС равном 38 руб/кВт·час.

Методика, описанная в данной работе, была реализована в программной среде MATLAB<sup>2</sup>. В базу данных программы заносятся технические характеристики и стоимость электрогенерирующих элементов различных производителей, с указанием типа и мощности (емкости) (рис. 3).

В программу необходимо ввести данные об изолированном потребителе (суточные графики нагрузки для характерного дня каждого месяца, максимальную мощность нагрузки, тариф на электроэнергию от ДЭС) и прогнозные графики выработки мощности ФЭП для характерного дня каждого месяца.

<sup>2</sup>Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019614383 Российская Федерация. Оптимизация структуры автономных систем электроснабжения на основе солнечно-дизельных установок / К.В. Кенден, А.В. Кузнецов. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ от 03.04.2019 г.

Optimization

Генераторы

	Модель	Активная мощность, кВт	Стоимость, тыс.руб.
1	АД8-T400	8	231.4130
2	АД10-T400	10	231.6860
3	АД12-T400	12	247.8800
4	АД16-T400	16	247.8840
5	АД20-T400	20	250.7050
6	АД24-T400	24	265.4470

Сохранить  
Добавить

Аккумуляторные батареи

	Модель	Ёмкость, кА*ч	Напряжение, В	Гарантийный срок, лет	С
1	MLQ12-100	0.1000	12	12	12
2	AKBSW1...	0.1000	12	12	12
3	Delta DT...	0.1000	12	10	10
4	GX12-100	0.1000	12	12	12
5	MLQ12-150	0.1500	12	12	12

Сохранить  
Добавить

Солнечные панели

	Модель	Мощность, кВт	Гарантийный срок, лет	Стоимость, тыс
1	PSIP100-...	0.1000	25	4.0
2	PSIP150-...	0.1500	25	5.4
3	PSIP200-...	0.2000	25	7.2
4	PSIP250-...	0.2500	25	8.1
5	PSIP300	0.3000	25	10.1

Сохранить  
Добавить

Рис. 3. Технические характеристики и стоимость элементов энергокомплекса в программной среде MATLAB

Fig. 3. Technical characteristics and cost of energy complex elements in MATLAB

Входные данные

Максимальная нагрузка потребителя, кВт

Срок окупаемости проекта, годы

Тариф на электроэнергию от ДГ, руб./кВт\*ч

Графики нагрузки потребителя

Графики выработки ФЭП

Рассчитать

	Модель	Колич...	Мощность / Ём...	Стоимость
ФЭП	PSIP300	567	170.1 кВт	6168.960 тыс...
АБ	MLQ12-100	222	22.2 кАч	3096.900 тыс...
ДГ	АД140-T400	2	280.0 кВт	1481.298 тыс...

Капитальные вложения: 16956.852 тыс. руб.  
 Себестоимость электроэнергии: 26.978 руб./кВтч

Рис. 4. Оптимальная структура генерирующих элементов и технико-экономические показатели автономного энергокомплекса ФЭП–АБ–ДГ «Кызыл-Хая»

Fig. 4. Optimal structure of generating elements and technical and economic performances of Kyzyl-Khaya autonomous power complex Photovoltaic Converter – Storage Battery – Diesel Generator



На примере системы электроснабжения населенного пункта Республики Тыва определена оптимальная структура генерирующих элементов автономного энергокомплекса ФЭП–АБ–ДГ, представленная на рис. 4.

Суммарная установленная мощность электрогенерирующих элементов автономного энергокомплекса ФЭП–АБ–ДГ после оптимизации методом роя частиц составила 450,1 кВт с емкостью АБ равной 22,2 кА·ч. Себестоимость электроэнергии автономного энергокомплекса ФЭП–АБ–ДГ с наклонным расположением ФЭП в процессе оптимизации структуры равна 26,978 руб/кВт·ч при капитальных затратах равных 16 956, 853 тыс. руб. При этом график подачи электроэнергии после создания энергосистемы ФЭП–АБ–ДГ изменится с 18 до 24 ч в сут.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Рассчитаны среднемесячные значения суммарного прихода солнечной энергии на горизонтальную поверхность, а также определены прогнозируемые значения выработки электроэнергии ФЭП для с. Кызыл-Хая.

2. Описаны структура энергокомплекса и распределение энергии между генерирующими элементами для автономного энергокомплекса ФЭП–АБ–ДГ.

3. Разработана и реализована методика оптимизации структуры энергокомплекса ФЭП–АБ–ДГ методом роя частиц в программной среде MATLAB.

4. Представлены практические результаты оптимизации структуры автономного энергетического комплекса ФЭП–АБ–ДГ на примере изолированного населенного пункта Республики Тыва.

### Библиографический список

1. Карамов Д.Н. Комплексная оптимизация автономной системы электроснабжения, использующей возобновляемые источники энергии и аккумулирующие устройства на примере п. «Батамай» Кобяйского района Якутии // Энергетика России в XXI веке. Инновационное развитие и управление: сб. тр. Всерос. конф. (Иркутск, 1–3 сентября 2015 г.). Иркутск: Изд-во ИСЭ им. Л.А. Мелентьева, 2015. С. 1–9.
2. Дмитриенко В.Н., Лукутин Б.В. Выбор мощности генерирующего оборудования автономной солнечно-дизельной электростанции мегаваттного класса // Фундаментальные исследования. 2015. № 4. С. 61–66.
3. Гапоненко А.М., Каграманова А.А. Оптимизация состава комплекса возобновляемых источников энергии с использованием кластерного подхода и теории случайных процессов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2016. № 116. С. 1–16. [Электронный ресурс]. URL: <http://ej.kubagro.ru/2016/02/pdf/05.pdf> (12.01.2020).
4. Rout K., Sahu J.K. Various Optimization Techniques of Hybrid Renewable Energy Systems for Power Generation: A Review // International Research Journal of Engineering and Technology. 2018. Vol. 5. Issue 7. P. 1173–1176.
5. Bhandari B., Lee Kyung-Tae, Lee Gil-Yong, Cho Young-Man, Ahn Sung-Hoon. Optimization of hybrid renewable energy power systems: A review // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology. 2015. Vol. 2. Issue 1. P. 99–112. <https://doi.org/10.1007/s40684-015-0013-z>
6. Maleki A., Ameri M., Keynia F. Scrutiny of multifarious particle swarm optimization for finding the optimal size of a PV/wind/battery hybrid system // Renewable Energy. 2015. Vol. 80. P. 552–563. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.02.045>
7. Ogunjuyigbe A.S.O., Ayodele T.R., Akinola O.A. Optimal allocation and sizing of PV/Wind/Split-diesel/Battery hybrid energy system for minimizing life cycle cost, carbon emission and dump energy of remote residential building // Applied Energy. 2016. Vol. 171. P. 153–171. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.051>
8. Askarzadeh A. A novel solution for sizing a photovoltaic/diesel hybrid power generation system for isolated sites // IET Renewable Power Generation. 2017. Vol. 11. Issue 1. P. 143–151. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2016.0319>
9. Brenna M., Foadelli F., Longo M., Abegaz T. Integration and Optimization of Renewables and Storages for Rural Electrification // Sustainable Urban and Rural Development. 2016. Vol. 8. Issue 10. P. 982. <https://doi.org/10.3390/su8100982>
10. Wagh Mahesh, Kulkarni V.V. Modeling and Optimization of Integration of Renewable Energy Resources (RER) for Minimum Energy Cost, Minimum CO<sub>2</sub> Emissions and Sustainable Development, in Recent Years: A Review // Materials today: proceedings. 2016. Vol. 5. Issue 1. Part 1. P. 11–21. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785317322794?via%3Dihub#!> (01.02.2020). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.047>

11. Ярмухаметов У.Р., Ахметшин А.Т. Имитационное моделирование режимов работы солнечных установок с фотоэлектрическими преобразователями в зависимости от внутренних и внешних факторов в среде MATLAB/SIMULINK // Вестник КрасГАУ. 2014. Вып. 8. С. 195–200.

12. Козюков Д.А. Моделирование характеристик фотоэлектрических модулей в Matlab/SIMULINK // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2015. № 112. Р. 1–16. [Электронный ресурс]. URL: <http://ej.kubagro.ru/2015/08/pdf/114.pdf> (01.02.2020).

13. Обухов С.Г., Плотников И.А. Имитационная модель режимов работы автономной фотоэлектрической станции с учетом реальных условий эксплуатации // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 6. С. 38–51.

14. Аbruков В.С., Кочаков В.Д., Аbruков С.В., Ануфриева Д.А., Васильев А.И., Смирнов А.В. Интеллектуальная система прогнозирования работы солнечных электростанций // Альтернативная энергетика и экология. 2017. № 16-18. С. 30–42. <https://doi.org/10.15518/issjaee.2017.16-18.030-042>

15. Пенджиив А.М., Астанов Н.Г. Энергетические параметры солнечных модулей, используемых для освоения пастбищных хозяйств юго-восточных кара-

кумов // Альтернативная энергетика и экология. 2014. № 2. С. 82–94.

16. Кенден К.В. Ресурсы гелиоэнергетики в Республике Тыва // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2015. № 4. С. 7–13. <https://doi.org/10.5862/JEST.231.1>

17. Кенден К.В., Тремясов В.А. Оценка мощности фотоэлектрических преобразователей в системах автономного электроснабжения Республики Тыва // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2014. Т. 7. № 8. С. 966–975.

18. Тремясов В.А., Кенден К.В. Оптимизация структуры генерирующих мощностей децентрализованной энергосистемы с фотоэлектрической установкой // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2016. Т. 9. № 1. С. 39–49. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-2016-9-1-39-49>

19. Suchitra D. Optimization of a PV-diesel hybrid stand-alone system using multi-objective genetic algorithm // Transactions on Electronics Engineering. 2013. Vol. 1. P. 114–120.

20. Тремясов В.А., Кенден К.В. Фотоэлектрические и гидроэнергетические установки в системах автономного электроснабжения: монография. Красноярск: Изд-во СФУ, 2017. 208 с.

## References

1. Karamov DN. Comprehensive Optimization of Stand Alone Power Supply System using Renewable Energy Sources and Storage Devices on Example of Batamay Settlement of the Kobayasky District of Yakutia. *Energetika Rossii v XXI veke*. In: *Innovacionnoe razvitie i upravlenie: sbornik trudov Vserossijskoj konferencii* = Russian Energy Sector in XXI Century. Innovative Development and Management: Proceedings of All-Russian Conference. 1–3 September 2015, Irkutsk. Irkutsk: Melentiev Energy Systems Institute; 2015, p. 1–9. (In Russ.)

2. Dmitrienko VN, Lukutin BV. The Choice of Capacity Generation Equipment Autonomous Solar-Diesel Plant Megawatt Class. *Fundamental'nye issledovaniya* = Fundamental Research. 2015;4:61–66. (In Russ.)

3. Gaponenko AM, Kagramanova AA. Optimization of the Composition of the Complex of Renewable Energy Sources with the Use of Cluster Approach and the Theory of Random Processes. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2016;116:1–16. Available from: <http://ej.kubagro.ru/2016/02/pdf/05.pdf> [Accessed 12th January 2020]. (In Russ.)

4. Rout K, Sahu JK. Various Optimization Techniques of Hybrid Renewable Energy Systems for Power Generation: A Review. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2018;5(7):1173–1176.

5. Bhandari B, Lee Kyung-Tae, Lee Gil-Yong, Cho Young-Man, Ahn Sung-Hoon. Optimization of Hybrid

Renewable Energy Power Systems: A Review. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. 2015;2(1):99–112. <https://doi.org/10.1007/s40684-015-0013-z>

6. Maleki A, Ameri M, Keynia F. Scrutiny of Multifarious Particle Swarm Optimization for Finding the Optimal Size of a PV/Wind/Battery Hybrid System. *Renewable Energy*. 2015;80:552–563. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.02.045>

7. Ogunjuyigbe ASO, Ayodele TR, Akinola OA. Optimal Allocation and Sizing of PV/Wind/Split-Diesel/Battery Hybrid Energy System for Minimizing Life Cycle Cost, Carbon Emission and Dump Energy of Remote Residential Building. *Applied Energy*. 2016;171:153–171. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.051>

8. Askarzadeh A. A Novel Solution for Sizing a Photovoltaic/Diesel Hybrid Power Generation System for Isolated Sites. *IET Renewable Power Generation*. 2017;11(1):143–151. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2016.0319>

9. Brenna M, Foiadelli F, Longo M, Abegaz T. Integration and Optimization of Renewables and Storages for Rural Electrification. *Sustainable Urban and Rural Development*. 2016;8(10):982. <https://doi.org/10.3390/su8100982>

10. Wagh Mahesh, Kulkarni VV. Modeling and Optimization of Integration of Renewable Energy Resources (RER) for Minimum Energy Cost, Minimum CO<sub>2</sub> Emissions and Sustainable Development, in Recent Years:



- A Review. In: *Materials Today: Proceedings*. 2016;5(1-1):11–21. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785317322794?via%3Dihub#!> [Accessed 1st February 2020]. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.047>
11. Yarmukhametov UR, Akhmetshin AT. The Operating Mode Simulation Modeling of Solar Installations with Photoelectric Converters Depending on Internal and External Factors in the MATLAB/SIMULINK Environment. *Vestnik KrasGAU = The Bulletin of KrasGAU*. 2014;8:195–200. (In Russ.)
12. Kozyukov DA. Simulation of Photovoltaic Modules Characteristics in MATLAB/SIMULINK. *Politematicheskij setевой elektronnyj nauchnyj Zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2015;112:1–16. Available from: <http://ej.kubagro.ru/2015/08/pdf/114.pdf> [Accessed 1st February 2020]. (In Russ.)
13. Obukhov SG, Plotnikov IA. Simulation Model of Operation Modes of Autonomous Photovoltaic Plant under Actual Operating Conditions. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2017;328(6):38–51. (In Russ.)
14. Abrukov VS, Kochakov VD, Abrukov SV, Anufrieva DA, Vasilyev AI, Smirnov AV. Intelligent System for Forecasting of the Solar Power Plants Work. *Alternativnaya energetika i ekologiya = Alternative Energy and Ecology*. 2017;(16-18):30–42. (In Russ.) <https://doi.org/10.15518/ijaee.2017.16-18.030-042>
15. Penjiyev AM, Astanov NG. Electric Parameters of

- Solar Modules used for Development of Pastures in South-East Kara Kum Desert. *Alternativnaya energetika i ekologiya = Alternative Energy and Ecology*. 2014;2:82–94. (In Russ.)
16. Kenden KV. Solar Energy Resources in the Tyva Republic. *Nauchno-tehnicheskie Vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta = St. Petersburg State Polytechnical University Journal*. 2015;4:7–13. (In Russ.) <https://doi.org/10.5862/JEST.231.1>
17. Kenden KV, Tremyasov VA. Article Describes the Features of Electrical Supply System Settlements of the Republic of Tyva. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii = Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2014;7(8):966–975. (In Russ.)
18. Tremyasov VA, Candy K-KV. Optimization of Structure of Generating Capacities Decentralized Energy System with Photovoltaic Installation. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii = Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2016;9(1):39–49. (In Russ.) <https://doi.org/10.17516/1999-494X-2016-9-1-39-49>
19. Suchitra D. Optimization of a PV-diesel Hybrid Stand-Alone System using Multi-Objective Genetic Algorithm. *Transactions on Electronics Engineering*. 2013;1:114–120.
20. Tremyasov VA, Kenden KV. *Photovoltaic and Hydropower Installations in Autonomous Power Supply Systems: Monograph*. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; 2017, 208 p. (In Russ.)

#### Критерии авторства

Кенден К.В., Кузнецов А.В. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Кенден Кара-Кыс Вадимовна**,  
старший преподаватель кафедры  
общеинженерных дисциплин,  
Тувинский государственный университет,  
667000, г. Кызыл, ул. Ленина, д. 36, Россия;  
✉ e-mail: kuca08@mail.ru

**Кузнецов Александр Викторович**,  
магистрант,  
Сибирский федеральный университет,  
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, Россия;  
e-mail: alexandr.nekey@gmail.com

#### Authorship criteria

Kenden K.V., Kuznetsov A.V. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

#### Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

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

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Kara-Kys V. Kenden**,  
Senior Lecturer of the Department  
of General Engineering Disciplines,  
Tuva State University,  
36 Lenin St., Kyzyl 667000, Russia;  
✉ e-mail: kuca08@mail.ru

**Alexander V. Kuznetsov**,  
Master Degree Student,  
Siberian Federal University,  
79, Svobodny pr., Krasnoyarsk 660041, Russia;  
e-mail: alexandr.nekey@gmail.com



Оригинальная статья / Original article  
УДК 621.311.25; 621.311.001.57  
DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-627-638>

## Исследование влияния изменения температуры солнечных панелей на выходные характеристики солнечной электростанции в условиях частичной затененности

© А.В. Киевец, Ю.Д. Бай, А.А. Суворов, А.Б. Аскарлов, А.А. Ким

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*

**Резюме:** Цель – установить степень влияния изменения температуры отдельных групп, оборудованных в составе солнечной электростанции солнечных панелей, находящихся в условиях частичной затененности, на вольт-амперную и ватт-вольтную характеристики всей солнечной электростанции и определить математическую модель, наиболее адекватно воспроизводящую данный процесс. В исследовании использовались 3 различные математические модели (однодиодная явная, однодиодная, двухдиодная) солнечных панелей, реализованные в программном комплексе MATLAB Simulink. При моделировании принято, что изменение температуры отдельных групп солнечных панелей под воздействием тени от облаков различной плотности происходит в диапазоне от +35°C до +60°C. Произведена верификация полученных данных реализованных математических моделей на основе солнечных панелей компании Kyocera KC200GT с данными, представленными в технической документации производителя, которая показала способность этих моделей адекватно воспроизводить вольт-амперную и ватт-вольтную характеристики. Показано, что наибольшую погрешность в полученных данных (до 18,31%) имеет однодиодная явная математическая модель, а погрешность однодиодной модели составила 3,42%. Установлено, что наиболее адекватно воспроизводит вольт-амперные характеристики солнечных электростанций в условиях частичной затененности двухдиодная математическая модель. Доказано, что при моделировании мощных солнечных электростанций, эксплуатируемых в условиях частичной затененности, с целью получения выходных характеристик необходимо учитывать не только изменение уровня освещенности отдельных групп солнечных панелей, но и соответствующее изменение их температуры. Кроме того, для получения удовлетворительных результатов математического моделирования солнечной электростанции в изучаемых условиях рекомендуется использовать эквивалентную двухдиодную математическую модель солнечной панели.

**Ключевые слова:** моделирование, электроэнергетические системы, солнечная электростанция, частичная затененность, двухдиодная математическая модель, однодиодная модель

**Благодарности:** Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 19-38-90147.

**Информация о статье:** Дата поступления 03 сентября 2019 г.; дата принятия к печати 09 января 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 июня 2020 г.

**Для цитирования:** Киевец А.В., Бай Ю.Д., Суворов А.А., Аскарлов А.Б., Ким А.А. Исследование влияния изменения температуры солнечных панелей на выходные характеристики солнечной электростанции в условиях частичной затененности. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 3. С. 627–638. <http://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-627-638>

## Study of the variation effect of solar panel temperature on the output characteristics of a solar power station under conditions of partial shadowing

Anton V. Kievets, Yuly D. Bay, Aleksey A. Suvorov, Alisher B. Askarov, Andrey A. Kim

*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia*

**Abstract:** The aim of the study consists in establishing the temperature variation effect appearing in individual banks of solar panels under conditions of partial shadowing on the current- and watt-voltage characteristics of the entire solar power plant, as well as in determining the mathematical model most adequate for reproducing this process. During the study, three different mathematical models (single-diode explicit, single-diode and two-diode) of solar panels were used as implemented in the MATLAB Simulink software package. In the modelling process, temperature variation for individual

groups of solar panels is assumed to occur in the range from +35°C to +60°C under the conditions of shadowing from clouds of various density. In the present study, verification of the obtained data for implemented mathematical models based on Kyocera KC200GT solar panels with the same presented in the manufacturer's technical documentation was performed to prove the ability of these models to adequately reproduce the current- and watt-voltage characteristics. The most significant error in the obtained data (up to 18.31%) was a characteristic of a single-diode explicit mathematical model, while that of the single-diode model error was equal to 3.42%. The two-diode mathematical model was established to be the most adequate for reproducing the current-voltage characteristics of solar power plants in the conditions of partial shadowing. In order to obtain accurate output characteristics when modelling powerful solar power plants operated under conditions of partial shadowing, it is necessary to consider not only the change in the illumination rate for individual groups of solar panels, but also the corresponding temperature variation. In addition, for obtaining satisfactory results of mathematical modelling for a solar power plant under the studied conditions, an equivalent two-diode mathematical model of a solar panel is recommended.

**Keywords:** modelling, electric power systems, solar power station, partial shadowing, two-diode mathematical model, single-diode model

**Acknowledgements:** The research has been carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research in the framework of the scientific project no.19-38-90147.

**Information about the article:** Received September 03, 2019; accepted for publication January 09, 2020; available online June 30, 2020.

**For citation:** Kievets AV, Bay YD, Suvorov AA, Askarov AB, Kim AA. Study of the variation effect of solar panel temperature on the output characteristics of a solar power station under conditions of partial shadowing. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(3):627–638. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-627-638>

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Потребление электроэнергии в мире стремительно увеличивается, и за последние 15 лет прирост составил примерно 35–40%, на этом фоне появилась потребность в новой генерации, реализуемой в настоящее время за счет внедрения возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [1], с постепенным увеличением их суммарной мощности, а в некоторых случаях и полной заменой традиционных источников энергии. Одним из распространенных видов ВИЭ являются солнечные электростанции (СЭС), установленная мощность которых в мире увеличилась примерно в десять раз с 2010 по 2017 г. [1].

Широкомасштабное внедрение в существующие электроэнергетические системы (ЭЭС) СЭС и ВИЭ в целом приводит к проблемам обеспечения надежной и безопасной работы ЭЭС с большой долей ВИЭ [2]. В частности, широкое распространение СЭС приводит к замене крупных генерирующих устройств на локальные источники энергии, вследствие чего ограничивается количество генерации реактивной мощности, и во время переходного процесса могут возникать значительные изменения напряжения. Отклонение напряжения и по-

тери реактивной мощности увеличиваются по мере увеличения доли солнечной генерации до 30% от общего количества генерации. При дальнейшем увеличении наблюдается соответствующее уменьшение отклонения напряжения на шинах ЭЭС вплоть до номинальных значений при равной 50% доле. Также при близких к генерирующему оборудованию трехфазных коротких замыканиях (КЗ) наблюдается увеличение колебаний взаимных углов генераторов и скорости вращения их роторов [2] во время переходного процесса, по сравнению с традиционными ЭЭС.

Таким образом, учитывая существенное влияние СЭС на ЭЭС в целом, а также единство и непрерывность процесса производства, транспортировки и потребления электроэнергии, тесную взаимосвязь задействованного в этом процессе оборудования, возникает неизбежная необходимость моделирования больших ЭЭС [2], в том числе включающих объекты СЭС и ВИЭ в целом.

Для адекватного моделирования ЭЭС с ВИЭ, помимо полной и достоверной модели ЭЭС, необходимо использовать достаточно подробную математическую модель СЭС. Несмотря на развитость ма-



тематических моделей СЭС, в большинстве исследований используются простейшие модели в силу их простоты и удобства, что в целом допустимо с точки зрения исследования режимов работы солнечных панелей (СП) и определения зависимостей выходных параметров от изменения температуры и освещенности. Однако при моделировании СЭС больших мощностей применение подобных моделей является причиной получения результатов, отличающихся от натуральных данных. Помимо этого, использование полных и достоверных математических моделей СЭС может приводить к результатам, не соответствующим реальным в силу неизбежно присутствующего в действительности изменения температуры и освещенности по площади СЭС под влиянием облаков, для учета которых необходимо воспроизводить эффект частичного затенения. Суть данного эффекта заключается в блокировке потока энергии затененным элементом по всей цепи. Таким образом, даже незначительное затенение одной солнечной панели СП (или группы СП) приводит к серьезному снижению генерации электроэнергии всей СЭС [2]. Кроме того, группы СП, на которые падает тень, кроме уменьшения получаемого количества солнечной инсоляции изменяют свою температуру, и скорость изменения зависит не только от параметров самой солнечной батареи, но и от величины затененности. Проблема описания данного эффекта, выбор математической модели, позволяющей наиболее адекватно воспроизвести работу СЭС в условиях частичной затененности при полной и достоверной модели всей СЭС, остается в настоящее время раскрытой не полностью, и для ее решения предназначены исследования, результаты которых приведены в статье.

При выборе математической модели СЭС необходимо обратить внимание на ее способность адекватно реагировать на изменение потока солнечной инсоляции. Следует учитывать, что анализ СЭС со сравнительно большим числом цепочек, соединенных сложным образом, которые часто затеняются пятнами с быстроизме-

няющейся формой, может быть крайне затруднен. В этих случаях в ряде работ вводятся некоторый коэффициент затенения, определяемый как отношение выходных параметров частично затененной СП произвольной формы и размера к гипотетическим выходным параметрам такой же неза-тененной батареи, однако должной точности данный способ обеспечить не может.

Также необходимо рассмотреть вопрос влияния локального изменения температуры отдельных групп СП в составе СЭС под действием частичной затененности на изменение выходных характеристик СЭС в целом.

## 2. ОПИСАНИЕ РЕАЛИЗУЕМЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

На данный момент известно большое количество математических моделей СП, однако в рамках данной статьи будут рассмотрены наиболее достоверные и распространенные.

Описание вольт-амперной характеристики (ВАХ) солнечного элемента (СЭ) основано на уравнениях, описывающих физические процессы в нем. При решении различных задач моделирования выходных характеристик СП применяют модели ВАХ различной сложности [3–15]. В рамках проводимого исследования модель солнечной панели должна отвечать следующим требованиям:

- достаточно точно описывать ВАХ СП в рассматриваемом диапазоне температур и солнечной инсоляции;

- адекватно воспроизводить характеристики СП из разнообразных полупроводниковых материалов;

- воспроизводить ВАХ и ватт-вольтную характеристику (ВВХ) СП под влиянием частичной затененности и изменения температуры затененных участков.

Данным требованиям отвечают 3 типа математических моделей.

1. Эквивалентная однодиодная модель (рис. 1) [3].

Составными элементами схемы являются источник тока, диод, шунтирующее

$R_w$  и последовательное  $R_n$  сопротивления (рис. 1). Источник тока моделирует процесс возникновения в элементе фототока  $I_\phi$  под действием солнечной инсоляции. Диод включен в прямом направлении, параллельно источнику тока. Шунтирующие сопротивления фотоэлемента  $R_w$  обусловлены наличием обратного сопротивления  $p-n$ -перехода и различных проводящих пленок. Последовательное сопротивление  $R_n$  составляют сопротивление контактов (главным образом переходное сопротивление полупроводника) и сопротивление самого полупроводникового материала, из которого изготовлен фотоэлемент. На этом сопротивлении будет теряться часть электродвижущей силы (ЭДС) [3].

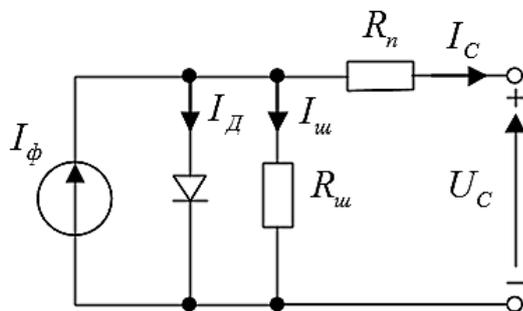


Рис. 1. Схема замещения солнечного элемента для эквивалентной однодиодной модели  
 Fig. 1. Solar cell equivalent circuit for an equivalent single-diode model

Математическое уравнение, описывающее физические процессы в СЭ, выглядит следующим образом:

$$I_C = I_\phi - I_0 \left\{ \exp \left[ \frac{q(U_C + I_C R_n)}{A k T} \right] - 1 \right\} - \frac{U_C + I_C R_n}{R_w}, \quad (1)$$

где  $I_\phi$  – фототок, А;  $I_0$  – обратный ток насыщения диода, А;  $I_C$  – рабочий ток (ток нагрузки), А;  $U_C$  – рабочее напряжение (напряжение нагрузки), В;  $q$  – заряд электрона ( $1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл);  $k$  – постоянная Больцмана ( $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К);  $A$  – постоянная диода, фактор идеализации;  $T$  – температура СП, К;  $R_w$  – шунтирующее сопротивление СП, Ом;  $R_n$  – последовательное сопротивление СП, Ом.

Уравнение тока, генерируемого СЭ, без учета потерь:

$$I_\phi = [I_{K3} + K_I(T_T - T_{CTY})]\lambda, \quad (2)$$

где  $I_{K3}$  – ток КЗ фотоэлектрического преобразователя при стандартных тестовых условиях (СТУ), А;  $K_I$  – температурный коэффициент тока короткого замыкания СЭ;  $T_T$  – текущая температура СЭ, К;  $T_{CTY}$  – температура СП при СТУ, К;  $\lambda$  – величина солнечной инсоляции, кВт/м<sup>2</sup>.

Уравнение обратного тока шунтирующего диода, обусловленного неидеальностью  $p-n$ -перехода:

$$I_0 = I_{0TK} \left( \frac{T_T}{T_{CTY}} \right)^3 \exp[qE_G(1/T_{CTY} - 1/T_T)/kA], \quad (3)$$

где  $I_{0TK}$  – обратный ток насыщения диода при СТУ, А;  $E_G$  – ширина запрещенной энергетической зоны полупроводника (определяется типом материала СЭ), для кремния  $E_G = 1,12$ В.

В режиме холостого хода (ХХ) выходной ток СП равен нулю, и если пренебречь токами утечки, то обратный ток насыщения диода при температуре СТУ может быть найден из следующего уравнения:

$$I_{0TK} = I_{K3} / [\exp(qU_{XX}/kAT_{CTY}) - 1], \quad (4)$$

где  $U_{XX}$  – напряжение ХХ СЭ, В.

Рассмотренная модель широко используется при анализе СП, однако реальные характеристики не всегда аппроксимируются уравнением (1) достаточно точно, в связи с чем были разработаны и другие модели СП. В частности, из рассмотрения физических процессов, протекающих в СЭ, известно, что диодная характеристика  $p-n$ -перехода описывается не одной, а двумя экспонентами, поэтому в ряде задач используется более сложная модель СЭ [11]. Определенным приближением является также представление о том, что шунтирующий ток через  $R_w$  подчиняется закону Ома. В реальных СЭ, особенно при высокой интенсивности освещения, проявляется распределенный характер  $R_n$  и зависимость его от  $I_C$ . Модель пренебрегает током насыщения, определяемым рекомбинацией в области объемного заряда  $p-n$ -перехода.



2. Явная однодиодная модель (рис. 2) [17].

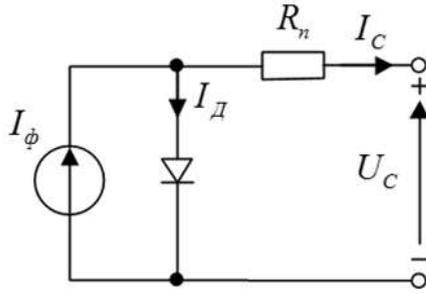


Рис. 2. Схема замещения солнечного элемента для явной однодиодной модели  
Fig. 2. Solar cell equivalent circuit for an explicit single diode model

Отличие данной модели от эквивалентной состоит в отсутствии шунтирующего диода, и в некотором уточнении параметров  $R_n$  и  $A$ .

$$R_n = \frac{N_{\text{пос}} A k T}{q} \frac{\ln\left(1 - \frac{I_M}{I_{K3}}\right) + U_{XX} - U_M}{I_M}, \quad (5)$$

где  $N_{\text{пос}}$  – количество последовательно соединенных СП, шт.;  $I_M$  – ток в точке максимальной мощности, А;  $U_M$  – напряжение в точке максимальной мощности (ТММ), В;

$$A = \frac{q(2U_M - U_{XX})}{N_{\text{пос}} k T \left[ \frac{I_{K3}}{I_{K3} - I_M} + \ln\left(1 - \frac{I_M}{I_{K3}}\right) \right]}. \quad (6)$$

Данная модель учитывает зависимость значения внутреннего сопротивления  $R_n$  и фактора идеальности  $A$  от температуры СП, поэтому ее предпочтительнее использовать для моделирования СП, находящейся в условиях сильных колебаний температуры.

3. Эквивалентная двухдиодная модель (рис. 3) [3]:

$$I_C = I_\phi - I_{01} \left( \exp \left[ \frac{q(U_C + I_C R_n)}{A_1 k T} \right] - 1 \right) - I_{02} \left( \exp \left[ \frac{q(U_C + I_C R_n)}{A_2 k T} \right] - 1 \right) - \frac{U_C + I_C R_n}{R_{ш}}, \quad (7)$$

где  $I_{01}$  – ток, протекающий через неидеальный р-п-переход, А;  $I_{02}$  – обратный ток насыщения, определяемый рекомбинацией в области объемного заряда р-п-перехода, А;  $A_1$  – фактор идеальности ВАХ диода при  $I_{01}$ ;  $A_2$  – фактор идеальности ВАХ диода при  $I_{02}$ .

$$I_{01} =$$

$$I_{02} =$$

$$\frac{(I_{K3} + K_I \cdot (T_T - T_{CTY}))}{\exp[(U_{XX} + K_V \cdot (T_T - T_{CTY})) / \{(A_1 + A_2) / 3\} V_T] - 1}, \quad (8)$$

где  $K_V$  – температурный коэффициент напряжения ХХ СЭ;  $V_T$  – термо-ЭДС соответствующего диода, В.

Данная модель является наиболее точной из реализованных, но и самой требовательной к используемому для расчетов оборудованию. Представленные двухдиодная и однодиодная модели показывают аналогичные результаты в рамках стандартных условий, однако при снижении уровня освещенности более точные результаты вблизи  $U_{XX}$  обеспечивает использование эквивалентной двухдиодной модели [18].

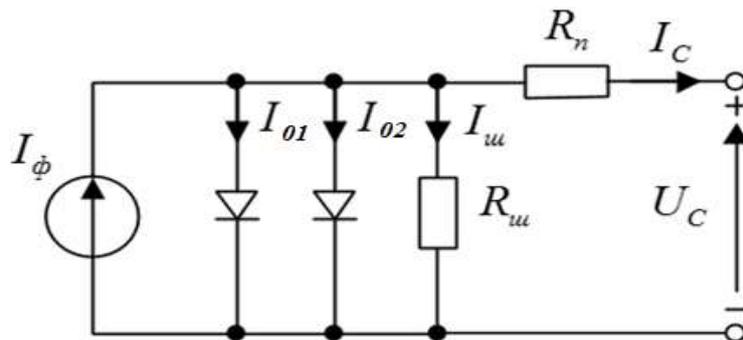


Рис. 3. Схема замещения солнечного элемента для двухдиодной модели  
Fig. 3. Solar cell equivalent circuit for a two-diode model

### 3. ВЕРИФИКАЦИЯ РЕАЛИЗОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ

С целью исследования влияния частичного затенения на выходные характеристики СЭС были реализованы описанные выше математические модели СП (рис. 4, 5), состоящие из 4 (PV1, 2, 3, 4) солнечных панелей Kyocera KC200GT [19] в программном комплексе MATLAB Simulink.

С целью верификации всей модели СЭС и выбора математической модели, наиболее точно воспроизводящей ВАХ и

ВВХ СП, было выполнено сравнение однодиодной эквивалентной, однодиодной явной и двухдиодной эквивалентной моделей с натурными данными солнечной панели Kyocera KC200GT (рис. 6).

Реализованные математические модели с разной степенью адекватности воспроизводят ВАХ СП. ВАХ двухдиодной математической модели практически совпадает с ВАХ СП не только в точках ХХ и КЗ, но и в ТММ. В дальнейших исследованиях будем полагать, что двухдиодная модель является эталонной.

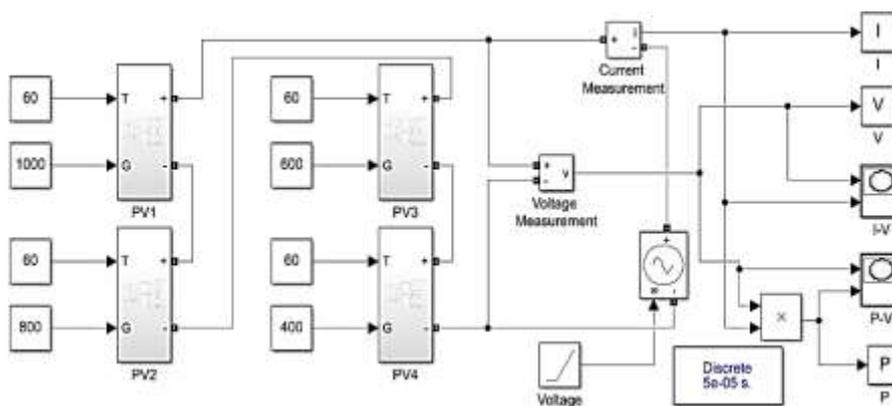


Рис. 4. Схема математической модели солнечной электростанции в MATLAB Simulink  
 Fig. 4. Diagram of the SPP mathematical model in MATLAB Simulink

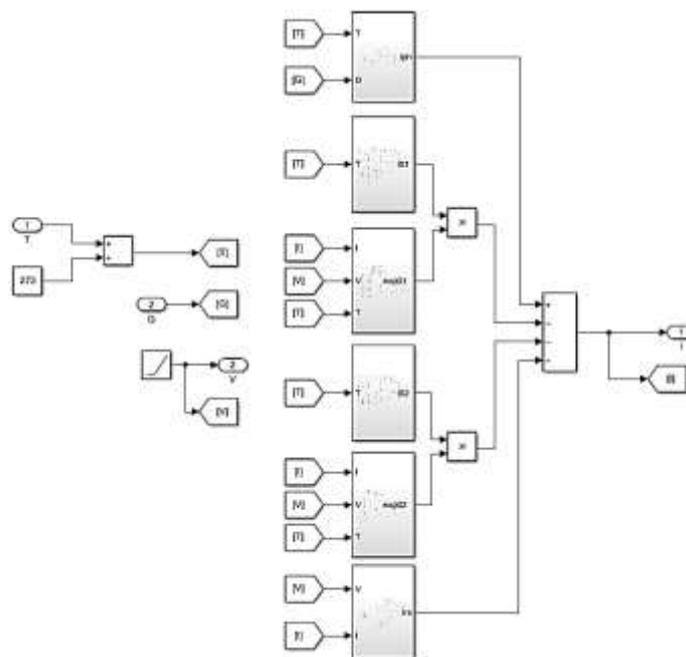


Рис. 5. Пример реализации математической модели солнечной панели PV1, 2, 3, 4 (эквивалентная двухдиодная модель)  
 Fig. 5. An implementation example of the mathematical model of the solar panel PV1, 2, 3, 4 (equivalent two-diode model)

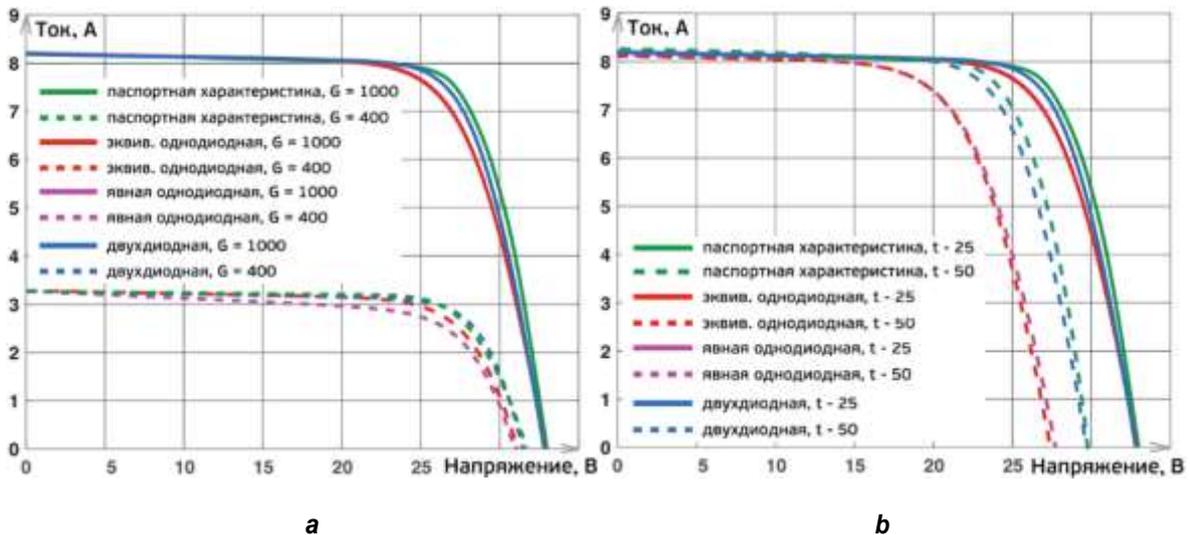


Рис. 6. Верификация моделей: а –  $G$  переменная; б –  $T$  переменная  
Fig. 6. Model validation: a –  $G$  variable; b –  $T$  variable

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Было принято, что при температуре окружающей среды  $+35^{\circ}\text{C}$  СП, находящиеся под прямыми лучами солнца, разогреются до температуры  $+60^{\circ}\text{C}$ , а затененные СП, в зависимости от плотности облаков и от времени их нахождения над отдельными участками СЭС, будут постепенно остывать (табл. 1). Расчет времени остывания СП базируется на законе Ньютона-Рихмана [20].

Согласно исследованиям, однодиодная явная математическая модель наименее адекватно воспроизводит зону около ТММ и точку ХХ, как и эквивалентная однодиодная модель, которая в свою очередь точнее рассчитывает ТММ, приближаясь к двухдиодной (рис. 7). Наиболее адекватно воспроизводят ВАХ СЭС в усло-

виях частичной затененности двухдиодная математическая модель и с небольшим отличием эквивалентная однодиодная, данное отличие обусловлено наличием тока, протекающим через неидеальный  $p-n$ -переход.

Неучет изменения температуры в условиях частичной затененности приводит к погрешности вплоть до 18,31% при использовании однодиодной явной модели (табл. 2 и 3). Отличия эквивалентной однодиодной и двухдиодной моделей не столь значительны, однако при увеличении степени затененности СЭС увеличивается и погрешность расчета выходной мощности при использовании эквивалентной однодиодной модели вследствие неучета тока, протекающего в  $p-n$ -переходе, обусловленного неидеальностью диода.

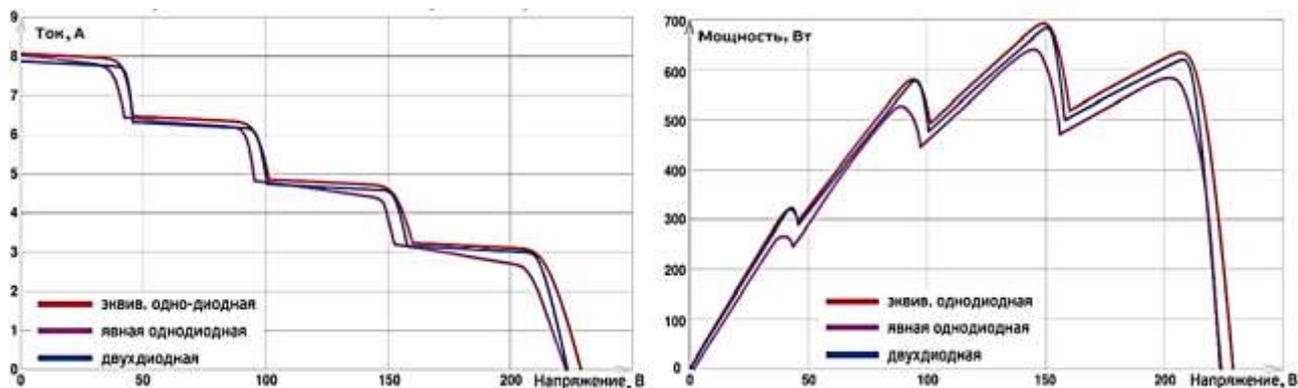
Таблица 1

Входные параметры для моделируемой солнечной электростанции

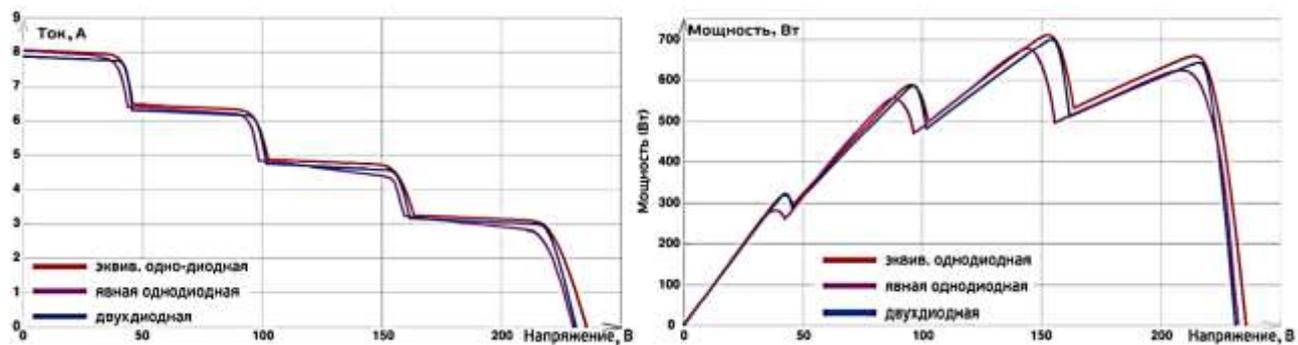
Table 1

Input parameters for a simulated solar power plant

Параметр	Солнечная инсоляция, $\text{Вт}/\text{м}^2$	Температура модулей	Температура окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$	Время остывания, мин
Значение	1000	60	35	0
	800	55		7
	600	50		16
	400	45		28



a



b

Рис. 7. Сравнение вольт-амперной характеристики математических моделей при частичной затененности: а – без изменения температуры затененных модулей; б – с изменением температуры затененных модулей

Fig. 7. Comparison of the V-I characteristic of mathematical models under partial shading: a – the temperature of shaded modules does not change; b – the temperature of shaded modules changes

Таблица 2

Выходные мощности

Table 2

Output power

Точка максимальной мощности, №	T = постоянная			T = переменная		
	Мощность P, Вт					
	Однодиодная явная модель	Однодиодная модель	Двухдиодная модель	Однодиодная явная модель	Однодиодная модель	Двухдиодная модель
1	273	319	323	284	319	323
2	523	580	579	558	598	587
3	641	692	683	683	719	701
4	584	635	621	619	665	643



Таблица 3

**Сравнение выходных мощностей реализованных математических моделей солнечных панелей**

Table 3

**Comparison of output power of implemented solar panel mathematical models**

Точка максимальной мощности, №	ΔP, %			ΔP <sub>T</sub> , %	
	Однодиодная явная модель	Однодиодная модель	Двухдиодная модель	Однодиодная явная модель	Однодиодная модель
1	4,03	0	0	18,31	1,25
2	6,69	1,38	1,38	12,24	1,87
3	6,55	2,75	2,65	9,36	2,56
4	5,99	3,62	3,54	10,1	3,42

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В подавляющем числе работ по моделированию выходных характеристик СП [3–15] используются все типы моделей, представленных ранее. Их выбор зависит от поставленной задачи и необходимой точности результата. При решении вопросов изучения частичного затенения на единичной СП успешно применяются как однодиодные, так и двухдиодные математические модели. Однако при моделировании мощных СЭС с целью получения выходных характеристик необходимо учитывать не

только изменение уровня освещенности отдельных участков под действием тени от облаков, но и соответствующее изменение их температуры, причем чем больше площадь СЭС, тем хаотичнее распределяется затененность, к тому же структура облаков не является однородной, что приводит к плавному изменению светового потока и температуры СП. Учитывая вышеизложенное, влияние изменения температуры на выходные характеристики СЭС тем больше, чем больше площадь СЭС, что приводит к необходимости учета изменения температуры.

### Библиографический список

1. Renewables 2019 Global Status Report // Ren21. Renewables now [Электронный ресурс]. URL: [https://www.ren21.net/gsr-2019/chapters/chapter\\_03/chapter\\_03/](https://www.ren21.net/gsr-2019/chapters/chapter_03/chapter_03/) (25.02.2020).
2. Eftekharnajad S., Vittal V., Heydt G.T., Keel B., Loehr J. Impact of Increased Penetration of Photovoltaic Generation on Power Systems // IEEE Transactions on Power Systems. 2013. Vol. 28. Issue 2. P. 893–901. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2216294>
3. Masmoudi F., Ben Salem F., Derbel N. Single and double diode models for conventional mono-crystalline solar cell with extraction of internal parameters // Signals & Devices: 13th International Multi-Conference on Systems. 2016. [Электронный ресурс]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7473725> (27.02.2020). <https://doi.org/10.1109/SSD.2016.7473725>
4. Abd Alrahim Shannan N.M., Yahaya N.Z., Singh B. Single-diode model and two-diode model of PV modules: A comparison // Control System, Computing and Engineering: International Conference. 2013. [Электронный ресурс]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6719960> (27.02.2020). <https://doi.org/10.1109/ICCSCE.2013.6719960>
5. Ishaque K., Salam Z., Taheri H. Accurate MATLAB Simulink PV System Simulator Based on a Two-Diode Model // Journal of Power Electronics. 2011. Vol. 11. Issue 2. P. 179–187. <https://doi.org/10.6113/JPE.2011.11.2.179>
6. Jumaat S.A., Liang O.W., Abdullah M.N., Radzi N.H., Hamdan R., Salimin S. Modeling of 185W of mono-crystalline solar panel using MATLAB/Simulink // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. 2019. Vol. 10. No. 3. P. 2005–2012. <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v10.i3.2005-2012>

7. Yonezawa R., Noda T., Fukushima K., Nakajima T., Sekiba Y., Utsunomiya K., et al. Development of detailed and averaged models of large-scale PV power generation systems for electromagnetic transient simulations under grid faults // *Innovative Smart Grid Technologies* (Melbourne, 28 November – 1 December 2016). Melbourne: IEEE, 2016. P. 98–104. <https://doi.org/10.1109/ISGT-Asia.2016.7796368>

8. Babu T.S., Ram P., Sangeetha K., Laudani A., Rajasekar N. Parameter extraction of two diode solar PV model using Fireworks algorithm // *Solar Energy*. 2016. Vol. 140. P. 265–276. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.10.044>

9. Soheyl S., Hossein Shafiei Mayam M., Mehrjooc M. Modeling a novel CCHP system including solar and wind renewable energy resources and sizing by a CC-MOPSO algorithm // *Applied Energy*. 2016. Vol. 184. P. 375–395. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.110>

10. Hooda N., Azad A.P., Panda P.K., Saurav K., Arya V., Petra M.I. PV power predictors for condition monitoring // *Smart Grid Communications: International Conference* (Sydney, 6 November 2016). Sydney: IEEE, 2016. P. 212–217. <https://doi.org/10.1109/SmartGridComm.2016.7778763>

11. Hamdi R.T.A. Solar cell system simulation using Matlab-Simulink // *Kurdistan Journal of Applied Research*. 2017. Vol. 2. Issue 1. P. 1–7. <https://doi.org/10.24017/science.2017.1.5>

12. Ba B., Kane M. Determination of polysilicon solar cell parameters using electrical short-circuit current Decay method // *Solid-State Electronics*. 1998. Vol. 42. No. 4. P. 541–545.

13. Nema S., Nema R.K., Agnihotri G. MATLAB/Simulink based study of photovoltaic cells / modules / array and their experimental verification // *International journal of Energy and Environment*. 2010. Vol. 1. No. 3. P. 487–500.

14. Tsai Huan-Liang, Tu Ci-Siang, Su Yi-Jie. Develop-

ment of generalized photovoltaic model using MATLAB/SIMULINK // *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science WCECS 2008* (San Francisco, 22–24 October 2008). San Francisco, 2008.

15. Hamdi R.T.A. Obtaining and analyzing the characteristics curves of a solar cell // *International Journal of Computation and Applied Sciences*. 2017. Vol. 2. No. 2. P. 94–98. <https://doi.org/10.24842/1611/0032>

16. Ishaque K., Salam Z., Taheri H. Simple, fast and accurate two-diode model for photovoltaic modules // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2011. Vol. 95. Issue 2. P. 586–594. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.09.023>

17. Khazzar R., Zereg M., Khezzar A. Comparative Study of Mathematical Methods for Parameters Calculation of Current-Voltage Characteristic of Photovoltaic Module // *International Conference on Electrical and Electronics Engineering*. 2009. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.researchgate.net/publication/224091422\\_Comparative\\_study\\_of\\_mathematical\\_methods\\_for\\_parameters\\_calculation\\_of\\_current-voltage\\_characteristic\\_of\\_photovoltaic\\_module](https://www.researchgate.net/publication/224091422_Comparative_study_of_mathematical_methods_for_parameters_calculation_of_current-voltage_characteristic_of_photovoltaic_module) (25.02.2020).

18. Salam Z., Ishaque K., Taheri H. An improved two-diode photovoltaic (PV) model for PV system // *Power Electronic Drives and Energy Systems for Industrial Growth: International Conference* (New Delhi, 20–23 December 2010). New Delhi: IEEE, 2010. <http://dx.doi.org/10.1109/pedes.2010.5712374>

19. Kyocera KC200GT Solar Panel // SOLAR ELECTRIC SUPPLY, INC [Электронный ресурс]. URL: <https://www.solarelectricsupply.com/kyocera-kc200gt-solar-panel-565> (25.02.2020).

20. Кондратьев Г.М. Регулярный тепловой режим. М.: Гостехиздат, 1954. 408 с.

## References

1. Renewables 2019 Global Status Report. *Ren21. Renewables Now*. Available from: [https://www.ren21.net/gsr-2019/chapters/chapter\\_03/chapter\\_03/](https://www.ren21.net/gsr-2019/chapters/chapter_03/chapter_03/) [Accessed 25th February 2020].

2. Eftekharijad S, Vittal V, Heydt GT, Keel B, Loehr J. Impact of Increased Penetration of Photovoltaic Generation on Power Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2013;28(2):893–901. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2216294>

3. Masmoudi F, Ben Salem F, Derbel N. Single and Double Diode Models for Conventional Mono-Crystalline Solar Cell with Extraction of Internal Parameters. In: *Signals & Devices: 13th International Multi-Conference on Systems*. 2016. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7473725> [Accessed 27th February 2020]. <https://doi.org/10.1109/SSD.2016.7473725>

4. Abd Alrahim Shannan NM, Yahaya NZ, Singh B. Single-Diode Model and Two-Diode Model of PV Modules: A Comparison. In: *Control System, Computing and Engineering: International Conference*. 2013. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6719960> [Accessed 27th February 2020]. <https://doi.org/10.1109/ICCSCE.2013.6719960>

5. Ishaque K, Salam Z, Taheri H. Accurate MATLAB Simulink PV System Simulator Based on a Two-Diode Model. *Journal of Power Electronics*. 2011;11(2):179–187. <https://doi.org/10.6113/JPE.2011.11.2.179>

6. Jumaat SA, Liang OW, Abdullah MN, Radzi NH, Hamdan R, Salimin S. Modeling of 185W of Mono-Crystalline Solar Panel using MATLAB/Simulink. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. 2019;10(3):2005–2012. <https://doi.org/10.11591/ijped.v10.i3.2005-2012>



7. Yonezawa R, Noda T, Fukushima K, Nakajima T, Sekiba Y, Utsunomiya K, et al. Development of Detailed and Averaged Models of Large-Scale PV Power Generation Systems for Electromagnetic Transient Simulations under Grid Faults. In: *Innovative Smart Grid Technologies*. 28 November – 1 December 2016, Melbourne. Melbourne: IEEE; 2016, p. 98–104. <https://doi.org/10.1109/ISGT-Asia.2016.7796368>
8. Babu TS, Ram P, Sangeetha K, Laudani A, Rajasekar N. Parameter Extraction of Two Diode Solar PV Model using Fireworks Algorithm. *Solar Energy*. 2016;140:265–276. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.10.044>
9. Soheyli S, Hossein Shafiei Mayam M, Mehrjooc M. Modeling a Novel CCHP System including Solar and Wind Renewable Energy Resources and Sizing by A CC-MOPSO Algorithm. *Applied Energy*. 2016;184:375–395. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.110>
10. Hooda N, Azad AP, Panda PK, Saurav K, Arya V, Petra MI. PV Power Predictors for Condition Monitoring. In: *Smart Grid Communications: International Conference*. 6 November 2016, Sydney. Sydney: IEEE; 2016, p. 212–217. <https://doi.org/10.1109/SmartGridComm.2016.7778763>
11. Hamdi RTA. Solar Cell System Simulation using Matlab-Simulink. *Kurdistan Journal of Applied Research*. 2017;2(1):1–7. <https://doi.org/10.24017/science.2017.1.5>
12. Ba B, Kane M. Determination of Polysilicon Solar Cell Parameters using Electrical Short-Circuit Current Decay Method. *Solid-State Electronics*. 1998;42(4):541–545.
13. Nema S, Nema RK, Agnihotri G. MATLAB/Simulink based Study of Photovoltaic Cells / Modules / Array and Their Experimental Verification. *International Journal of Energy and Environment*. 2010;1(3):487–500.
14. Tsai Huan-Liang, Tu Ci-Siang, Su Yi-Jie. Development of Generalized Photovoltaic Model using

- MATLAB/SIMULINK. In: *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science WCECS 2008*. 22–24 October 2008, San Francisco. San Francisco; 2008.
15. Hamdi RTA. Obtaining and Analyzing the Characteristics Curves of a Solar Cell. *International Journal of Computation and Applied Sciences*. 2017;2(2):94–98. <https://doi.org/10.24842/1611/0032>
16. Ishaque K, Salam Z, Taheri H. Simple, Fast and Accurate Two-Diode Model for Photovoltaic Modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2011;95(2):586–594. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.09.023>
17. Khazzar R, Zereg M, Khezzar A. Comparative Study of Mathematical Methods for Parameters Calculation of Current-Voltage Characteristic of Photovoltaic Module. In: *Electrical and Electronics Engineering: International Conference*. 2009. Available from: [https://www.researchgate.net/publication/224091422\\_Comparative\\_study\\_of\\_mathematical\\_methods\\_for\\_parameters\\_calculation\\_of\\_current-voltage\\_characteristic\\_of\\_photovoltaic\\_module](https://www.researchgate.net/publication/224091422_Comparative_study_of_mathematical_methods_for_parameters_calculation_of_current-voltage_characteristic_of_photovoltaic_module) [Accessed 25th February 2020].
18. Salam Z, Ishaque K, Taheri H. An Improved Two-Diode Photovoltaic (PV) Model for PV System. In: *Power Electronic Drives and Energy Systems for Industrial Growth: International Conference*. 20–23 December 2010, New Delhi. New Delhi: IEEE; 2010. <http://dx.doi.org/10.1109/pedes.2010.5712374>
19. Kyocera KC200GT Solar Panel // SOLAR ELECTRIC SUPPLY, INC. Available from: <https://www.solarelectricsupply.com/kyocera-kc200gt-solar-panel-565> [Accessed 25th February 2020].
20. Kondratiev GM. *Regular Thermal Conditions*. Moscow: Gosudarstvenoe izdatelstvo tehniko-teoreticheskoi literatury; 1954, 408 p. (In Russ.)

#### Критерии авторства

Киевец А.В., Бай Ю.Д., Суворов А.А., Аскаров А.Б., Ким А.А. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Киевец Антон Владимирович**,  
аспирант,  
Национальный исследовательский Томский  
политехнический университет,  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия;  
✉ e-mail: avk60@tpu.ru

#### Authorship criteria

Kievets A.V., Bay Y.D., Suvorov A.A., Askarov A.B., Kim A.A. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

#### Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

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

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Anton V. Kievets**,  
Postgraduate Student,  
National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin pr., Tomsk 634050, Russia;  
✉ e-mail: avk60@tpu.ru

**Бай Юлий Дмитриевич,**  
ассистент отделения электроэнергетики  
и электротехники,  
Инженерная школа энергетики,  
Национальный исследовательский Томский  
политехнический университет,  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия;  
e-mail: tbf@list.ru

**Суворов Алексей Александрович,**  
кандидат технических наук,  
ассистент отделения электроэнергетики  
и электротехники,  
Инженерная школа энергетики,  
Национальный исследовательский Томский  
политехнический университет,  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия;  
e-mail: suvorovaa@tpu.ru

**Аскарлов Алишер Бахрамжонович,**  
аспирант,  
Национальный исследовательский Томский  
политехнический университет,  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия;  
e-mail: aba7@tpu.ru

**Ким Андрей Анатольевич,**  
ассистент отделения электроэнергетики  
и электротехники,  
Инженерная школа энергетики,  
Национальный исследовательский Томский  
политехнический университет,  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия;  
e-mail: mrkim@tpu.ru

**Yuly D. Bay,**  
Assistant Professor of the Department of Power  
and Electrical Engineering,  
School of Energy and Power Engineering,  
National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin pr., Tomsk 634050, Russia;  
e-mail: tbf@list.ru

**Aleksey A. Suvorov,**  
Cand. Sci. (Eng.),  
Assistant Professor of the Department of Power  
and Electrical Engineering,  
School of Energy and Power Engineering,  
National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin pr., Tomsk 634050, Russia;  
e-mail: suvorovaa@tpu.ru

**Alisher B. Askarov,**  
Postgraduate Student,  
National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin pr., Tomsk 634050, Russia;  
e-mail: aba7@tpu.ru

**Andrey A. Kim,**  
Assistant Professor of the Department of Power  
and Electrical Engineering,  
School of Energy and Power Engineering,  
National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin pr., Tomsk 634050, Russia;  
e-mail: mrkim@tpu.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.182

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-639-648>

## Оценка шлакующих и загрязняющих свойств углей, сжигаемых на тепловой электростанции ПАО «Иркутскэнерго»

© Т.В. Коваль, А.Н. Кудряшов

*Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия*

**Резюме:** Цель – оценка влияния физико-химических свойств углей, сжигаемых на тепловых электростанциях Иркутской области, на эксплуатационные характеристики котельных агрегатов. Для прогнозирования использования в качестве топлива, ранее не используемых на тепловой электростанции ПАО «Иркутскэнерго» углей Мугунского и Ирбейского месторождений, применялись математические методы исследований с помощью программного комплекса «SAF», разработанного авторами на базе пакета Microsoft Excel. При анализе состава минеральной части угля Ирбейского месторождения было спрогнозировано, что в результате его сжигания в области температур выше 900°C можно ожидать шлакование экранных поверхностей нагрева и пароперегревателя (на примере котельных агрегатов Ново-Иркутской тепловой электростанции) из-за высокого содержания оксидов железа (III) в золе (16,2%). С помощью программного комплекса «SAF» выполнены расчеты показателей, определяющих шлакующие и загрязняющие свойства твердых топлив: склонность к образованию железистых, сульфатно-кальциевых отложений, отложений на базе активных щелочей; индексы шлакования топочной камеры и загрязнения ширм котельных агрегатов и др. Выявлено, что вновь используемые угли Мугунского и Ирбейского месторождений имеют высокую склонность к образованию железистых отложений – 0,683 о.е. и 0,678 о.е., соответственно. Кроме того, индекс шлакования топочной камеры остается также на высоком уровне (выше 0,75) при сжигании исследуемых углей. Предложено оснастить котельный агрегат БКЗ-420-140 более современными аппаратами водяной обдувки и ввести в эксплуатацию штатные глубоководные обдувочные аппараты для очистки пароперегревателя от золовых отложений. Предлагаемые мероприятия позволят уменьшить цикличность очистки поверхностей нагрева котельных агрегатов в 2–3 раза. Показана необходимость проведения экспертной оценки шлакующих и загрязняющих свойств ранее не сжигаемых на теплоэлектростанции топлив, для того, чтобы избежать аварийных ситуаций, приводящих к незапланированным остановкам котлов.

**Ключевые слова:** твердое топливо, шлакование, загрязнение поверхностей нагрева, котельный агрегат, эффективность сжигания углей, исследование свойств топлив

**Информация о статье:** Дата поступления 03 декабря 2019 г.; дата принятия к печати 02 марта 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 июня 2020 г.

**Для цитирования:** Коваль Т.В., Кудряшов А.Н. Оценка шлакующих и загрязняющих свойств углей, сжигаемых на тепловой электростанции ПАО «Иркутскэнерго». *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 3. С. 639–648. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-639-648>

## Assessment of slagging and polluting properties of coals burned at the Irkutskenergo Cogeneration Plant, JSC

Tatiana V. Koval, Alexander N. Kudryashov

*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

**Abstract:** The study is aimed at assessing the influence of the physical and chemical properties of coal burned at thermal power plants in the Irkutsk Region on the operational characteristics of boiler units. In order to forecast the application process for coal of the Mugunskoye and Irbeyskoye deposits in terms of fuel types not previously used at the PJSC Irkutskenergo thermal power plant, mathematical methods were used in the SAF software package developed by the authors on the basis of the Microsoft Excel. In analysing the mineral composition of the Irbeyskoye deposit coal, slagging of heating surfaces and superheaters (by the example of boiler units at the Novo-Irkutsk thermal power plant) as a result of its combustion in a temperature range above 900°C is anticipated due to the high content (16.2%) of iron (III) oxides in the ash. In the SAF software package, indicators calculated for determining the slagging and polluting properties of solid fuels included a tendency to ferriferous, sulphate-calcium and active alkali-based depositing, slagging indices of the combustion chamber, pollution of boiler unit screens, etc. Recently-used new coal types of the Mugunskoye and Irbeyskoye deposits were revealed to have a high tendency to form ferriferous deposits equal to 0.683 and 0.678 p.u.,

respectively. In addition, the slagging index of the combustion chamber remains at a high level (above 0.75) during the combustion of the studied coals. It was proposed to equip the BKZ-420-140 boiler unit with more modern water soot-blowers with the commission of the full-time long-retracting soot-blowers for cleaning the superheater from ash deposits. The proposed measures ensure an increase in the service life of boiler heating surfaces by 2-3 times. In order to avoid emergency situations leading to unplanned shutdowns of boilers, the need for expert assessment of the slagging and polluting properties of fuels previously unpractised at thermal power plant is demonstrated.

**Keywords:** solid fuel, slagging, heating surface contamination, boiler unit, coal combustion efficiency, study of fuel properties

**Information about the article:** Received December 03, 2019; accepted for publication March 02, 2020; available online June 30, 2020.

**For citation:** Koval TV, Kudryashov AN. Assessment of slagging and polluting properties of coals burned at the Irkutskenergo Cogeneration Plant, JSC. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(3):639–648. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-639-648>

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В процессе эксплуатации энергетического оборудования возникают аварийные ситуации, которые приводят к незапланированным аварийным остановам. Опыт эксплуатации оборудования на тепловых электростанциях (ТЭС) показывает, что около 30–40% отказов энергоблоков приходится на котлы и их вспомогательное оборудование [1]. Основной причиной отказов, после чего происходят внеплановые остановки котлов, являются повреждения поверхностей нагрева. Согласно статистике повреждений котельного оборудования, около 50% повреждений приходится на долю полурadiaционных и конвективных поверхностей нагрева, из них 70% – это повреждения ширмовых пароперегревателей. Данные, представленные на рис. 1, характерны для всех видов котельных агрегатов, сжигающих твердое топливо, преимущественно уголь [2]. Уголь – самое распространенное в мире и в России энергетическое топливо [3]. Согласно данным международного энергетического агентства [4], в настоящее время человечество сжигает больше угля, чем когда-либо за всю историю [5, 6]. Сегодня в мире уделяется большое внимание сжиганию твердого топлива [7–10]. Россия является одним из мировых лидеров по производству угля, на ее долю приходится примерно 4,5% мировой угледобычи. Лидирующие позиции по объемам угледобычи занимают Китай, США и Индия, Россия находится на шестом месте [11–13].

Кроме того, на ТЭС увеличивается

доля использования непроектных топлив, эффективность использования которых требует подробного изучения характеристик и минеральной составляющей [14].

Известно, что при эксплуатации котельных агрегатов, сжигающих твердое топливо, загрязнение поверхностей нагрева шлаковыми отложениями может приводить к снижению технико-экономических показателей их работы и увеличению выбросов в окружающую среду. Это влечет за собой повышение штрафных выплат, а также повышаются затраты на ремонт и расшлаковку котлов. Стоит отметить, что в настоящее время на ТЭС ведется активная работа по переходу к системе технологического нормирования негативных воздействий на окружающую среду с использованием наилучших доступных технологий [15].

Основной причиной отказов котлов, сжигающих уголь, является шлакование и загрязнение поверхностей нагрева (рис. 2), что способствует перегреву металла труб. Наиболее повреждаемыми элементами пылеугольных котлов являются полурadiaционные и конвективные поверхности нагрева.

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На территории Иркутской области действует 9 тепловых электроцентралей (ТЭЦ), работающих преимущественно на бурых углях, общее потребление которых составляет более 16 млн т в год. В последние годы качество проектных топлив, сжи-



Рис. 1. Статистика повреждений поверхностей нагрева пылеугольного котла  
Fig. 1. Statistics of damage of a pulverized coal-fired boiler heating surfaces



Рис. 2. Статистика причин повреждений поверхностей нагрева пылеугольного котла  
Fig. 2. Statistics of damage causes of a pulverized coal-fired boiler heating surfaces

гаемых на ТЭЦ, ухудшилось, что сказывается на надежности и экономичности работы электростанций в целом, в связи с этим на ТЭЦ возросла доля использования не-проектных топлив. Однако сжигание ранее не используемых топлив сопровождается рядом отрицательных моментов, которые были отмечены выше. Поэтому перед сжи-

ганием не-проектных топлив необходим детальный анализ с точки зрения возможности шлакования и загрязнения поверхностей нагрева котельных агрегатов.

Шлакующие и загрязняющие свойства углей возможно оценить, зная физико-химические характеристики топлива и состав его минеральной части. Эксперимен-

тально показатели шлакующих свойств определяются в опытах на котлах или огневых стендах [16].

Для оценки шлакующих и загрязняющих свойств углей существуют различные критерии и показатели как зарубежных, так и отечественных исследователей. Однако в данной работе будем использовать показатели, которые учитывают температурные условия начала образования шлаковых отложений и склонность угля к формированию различных отложений, разработанных ВТИ (Всероссийским теплотехническим институтом). В исследованиях и разработках УралВТИ (Уральской теплотехнической лаборатории) эти показатели были дополнены и детализированы [17–19].

Согласно исследованиям, представленным в [17, 18], оценка показателей шлакующих свойств энергетических топлив выполняется по следующим показателям:

- склонность топлива к образованию железистых отложений на топочных экранах (Fe-отл.);
- склонность топлива к шлакованию топочных экранов (ТЭ-шл.);
- склонность топлива к шлакованию полурадационных (ширмовых) поверхностей нагрева (ШП-шл.);
- максимально-допустимая температура газов на выходе из топки;
- температура начала шлакования;
- склонность топлива к образованию сульфатно-кальциевых отложений (Са-отл.) в конвективных поверхностях нагрева;
- склонность топлива к образованию отложений на базе активных щелочей (Na-отл.);
- комбинированный индекс склонности к шлакованию топки  $R_{sr}$ .

Значения показателей шлакующих и загрязняющих свойств зависят от физико-химических характеристик топлива и его минеральной части, а также от режима сжигания топлива в котельном агрегате. Склонность к образованию отложений и шлакованию поверхностей нагрева возрастает по мере увеличения значений безразмерных показателей и снижения температуры шлакования.

Расчетные формулы рейтинговых показателей шлакующих и загрязняющих параметров углей подробно изложены в [17, 18].

На практике для оценки шлакующих и загрязняющих свойств углей с использованием вышеперечисленных показателей применяют программу «Coral», разработанную ВТИ по алгоритму УралВТИ. На кафедре теплоэнергетики Иркутского национального исследовательского технического университета был разработан аналог данной программы для использования его в учебном процессе [20]. Программный комплекс «SAF» позволяет выполнять расчеты шлакующих и загрязняющих показателей при курсовом проектировании, после чего анализировать полученные результаты и разрабатывать рекомендации по обеспечению бесшлаковочной работы котла при переходе с одного вида топлива на другое.

### **3. РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ШЛАКОВАНИЯ И ЗАГРЯЗНЕНИЯ НЕПРОЕКТНЫХ ТОПЛИВ**

Проведем анализ качества топлива, а также расчет основных параметров шлакования и загрязнения неprojektных топлив, сжигаемых в котлах Ново-Иркутской ТЭЦ (Н-И ТЭЦ) ПАО «Иркутскэнерго», находящейся в пригороде г. Иркутск, в северо-западной его части на левом берегу р. Ангара. Н-И ТЭЦ предназначена для централизованного теплоснабжения г. Иркутск и покрытия электрических нагрузок системы ПАО «Иркутскэнерго». Установленная электрическая мощность – 705 МВт, паровая производительность – 4000 т/ч.

На электростанции установлено 8 котлоагрегатов, из них ст. № 1–4 БКЗ-420-140, ст. № 5–7 БКЗ-500-140, ст. № 8 БКЗ-820-140 (БКЗ – Барнаульский котельный завод).

В настоящее время на Н-И ТЭЦ используются проектные и неprojektные виды топлив: азейский, мугунский, переясловский и ирбейский бурые угли. Проектным топливом для котлов Н-И ТЭЦ являются



азейский и ирша-бородинский бурые угли. Структура израсходованного топлива на Н-И ТЭЦ за 2017–2019 гг. приведена в табл. 1. Состав и характеристика золы топлив приведены в табл. 2, 3 ( $W^r$  – влажность на рабочую массу;  $A^r$  – зольность на рабочую массу;  $C^r$  – содержание углерода на рабочую массу;  $H^r$  – содержание водорода на рабочую массу;  $S^r$  – содержание серы на рабочую массу;  $O^r$  – содержание кислоро-

да на рабочую массу;  $N^r$  – содержание азота на рабочую массу).

Согласно данным табл. 1, в качестве основных непроектных топлив на станции используются угли Мугунского и Ирбейского разрезов. Разрез «Мугунский» находится в Тулунском районе Иркутской области, добывает уголь марки ЗБ. Мугунский уголь добывается открытым способом с 3-х блоков (западного, центрального, восточного),

**Таблица 1**  
**Расход топлива на Ново-Иркутской тепловой электростанции за 2017–2019 гг.**

**Table 1**  
**Fuel consumption at Novo-Irkutsk cogeneration plant for the period from 2017 to 2019**

Топливо	Расход топлива, тыс. т/год (%)		
	2017 г.	2018 г.	2019 г.
Мугунский бурый уголь	1153 (53)	1113,5 (49)	1121 (52)
Ирбейский бурый уголь	232 (11)	484,1 (21)	390 (18)
Азейский бурый уголь	314 (14)	414,4 (18)	661 (30)
Бородинский бурый уголь	412 (19)	245,9 (11)	–
Переясловский бурый уголь	75 (3)	31,6 (1)	–

**Таблица 2**  
**Характеристики топлив, поставляемых на Ново-Иркутскую тепловую электростанцию**

**Table 2**  
**Characteristics of fuels supplied to Novo-Irkutsk cogeneration plant**

Уголь	Элементарный состав, %							Теплота сгорания, кДж/кг (ккал/кг) $Q_i^r$
	$W^r$	$A^r$	$C^r$	$H^r$	$S^r$	$O^r$	$N^r$	
Мугунский	22,0	15,6	46,0	3,6	0,9	11,0	0,9	17290,04 (4126,5)
Ирбейский	35,0	10,4	37,5	2,2	0,4	13,6	0,6	16990,00 (4055)
Азейский	25,0	16,5	42,7	3,1	0,5	11,3	0,9	15989,88 (3816,2)
Переясловский	28,6	5,0	49,5	3,4	0,2	12,6	0,7	16516,98 (3942)

**Таблица 3**  
**Характеристики золы топлив, поставляемых на Ново-Иркутскую тепловую электростанцию**

**Table 3**  
**Characteristics of ash of fuels supplied to Novo-Irkutsk cogeneration plant**

Уголь	Химический состав золы на бессульфатную массу, %								
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	
Мугунский	50,5	34,5	1,0	4,5	6,5	1,5	1,0	0,5	
Ирбейский	40,5	10,7	0,4	16,2	25,6	5,5	0,2	0,2	
Азейский	51,5	29,5	0,5	7,5	8,5	2,0	0,3	0,2	
Переясловский	36,0	12,0	0,5	18,0	18,0	4,0	0,2	0,2	

отгружается в железнодорожные вагоны, при этом в одном составе может быть уголь с разных участков. Разрез «Ирбейский» находится в Красноярском крае, добывает уголь марки 2Б, на разрезе отработываются два пласта: «Латынцевский» и «Спутник». Уголь автомобильным транспортом вывозится на склад готовой продукции, на складе, как правило, находится смесь углей разных пластов.

Бурые угли Мугунского разреза, как и другие угли Иркутского бассейна, высокозольные и высокосернистые. Зольный остаток мугунского угля представлен преимущественно алюмосиликатами, имеет высокие плавкостные характеристики и мало меняется по зольности. Бурые угли Ирбейского разреза, по сравнению с мугунским углем, характеризуются более высоким содержанием общей влаги, низкой зольностью, низким содержанием серы и меньшей низшей теплотой сгорания. Химический состав зольного остатка ирбейского угля по пласту «Спутник» мало чем отличается от состава зольного остатка мугунского угля. Основное отличие состоит в зольном остатке угля пласта «Спутник» – наличие повышенного содержания железа и пониженное содержание алюминия. Плавкостные характеристики зольного остатка этих двух углей близки.

В настоящее время уголь на ТЭЦ сжигается не в чистом виде, а в смесях разных пропорций, например, смесь мугунского и ирбейского углей в разных соотношениях.

Анализируя характеристики непроектных топлив, поставляемых на Н-И ТЭЦ, можно заключить, что при сжигании ирбейского угля можно ожидать шлакование экранных поверхностей нагрева и пароперегревателя из-за высокого содержания в их золе оксидов железа (III) (см. табл. 2, 3). Поскольку доля мугунского угля так же существенна в общей массе топлив, используемых на станции, и он отличается от проектного азейского более высоким содержанием серы, кроме того, содержание серы в этих углях увеличивается по мере углубления пласта, то возрастает вероят-

ность повреждения воздухоподогревателей низкотемпературной коррозией. В то же время высокая температура плавления золы мугунского угля гарантирует бесшлаковочную работу поверхностей нагрева.

Для более качественной оценки шлакующих и загрязняющих свойств углей выполним расчет с использованием программного комплекса «SAF». Расчет выполним для непроектных углей Мугунского и Ирбейского месторождений, физико-химические характеристики которых представлены в табл. 2, 3.

Расчет проведем для котлов первой очереди ст. № 1-4 БКЗ-420-140 Н-И ТЭЦ. Котельный агрегат БКЗ-420-140-6 однобабанный, вертикально-водотрубный с естественной циркуляцией предназначен для сжигания азейских бурых углей. Технические характеристики котельного агрегата БКЗ-420-140: паропроизводительность  $D_{к.а.} = 420$  т/ч; давление пара на выходе из пароперегревателя  $P_{пп} = 13,8$  МПа; температура перегретого пара  $t_{пп} = 550^\circ\text{C}$ ; температура питательной воды  $t_{пв} = 230^\circ\text{C}$ ; температура уходящих газов  $t_{yx} = 139^\circ\text{C}$ ; теоретическая температура горения  $\vartheta_a = 1884^\circ\text{C}$ .

Результаты расчета шлакующих и загрязняющих параметров мугунского и ирбейского углей сведены в табл. 4 и представлены в виде диаграмм на рис. 3. Ранжирование топлив проводилось в соответствии с рекомендациями, приведенными в [17–19].

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ

В соответствии с полученными данными показателей шлакующих свойств ирбейского и мугунского углей, можно сделать следующие выводы:

1. Высокий ранг склонности к образованию железистых отложений при сжигании исследуемых углей показывает, что отложения будут образовываться на значительной площади экранных поверхностей в топочном объеме в зоне активного горения и на поверхностях пароперегревателя (в области температур выше  $900^\circ\text{C}$ ). Поэтому



Таблица 4  
Результаты расчета шлакующих и загрязняющих параметров углей

Table 4

Calculation results of slagging and polluting parameters of coals

Показатель	Бурый уголь	
	Мугунский	Ирбейский
$\Sigma K/\Sigma O$	9,053	1,638
Температура начала шлакования, $T_{шл}$ , °С	1015,3	957,7
Склонность к образованию Fe-отл, $P_{Fe}$ , о.е.	0,683	0,678
<b>Ранг склонности к образованию железистых отложений</b>	<b>высокий</b>	<b>высокий</b>
Показатель склонности к образованию Са-отл., $P_{Ca}$ , о.е.	0,457	0,785
<b>Ранг склонности угля к образованию сульфатно-кальциевых отложений</b>	<b>средний</b>	<b>высокий</b>
Склонность к образованию отложений на базе Na-отл., $P_{Na}$ , о.е.	0,269	0,202
<b>Ранг склонности к образованию отложений на базе активных щелочей</b>	<b>средний</b>	<b>низкий</b>
Индекс шлакования топочной камеры, $R_{st}$	0,746	0,834
<b>Ранг склонности к шлакованию топки</b>	<b>высокий</b>	<b>высокий</b>
Индекс загрязнения ШП-шл., $R_F$	0,611	0,681
<b>Ранг склонности к склонности загрязнения ширм</b>	<b>высокий</b>	<b>высокий</b>
Значение допустимой температуры газов на выходе из топки, $\vartheta_T''$ , °С	1154,7	1135,8

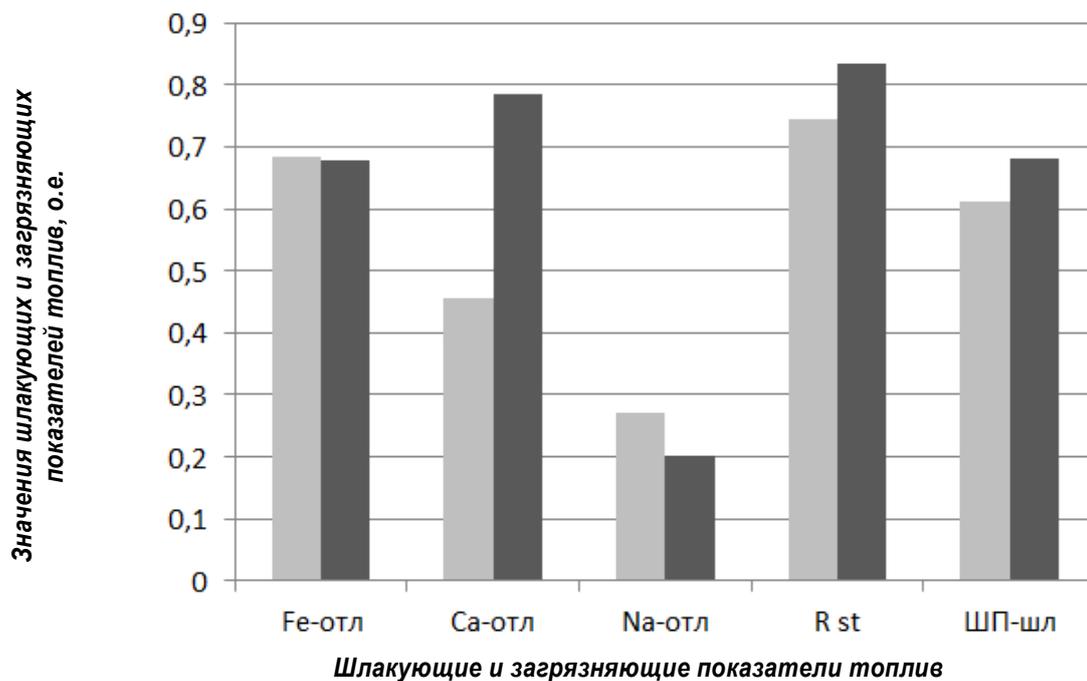


Рис. 3. Диаграмма шлакующих и загрязняющих показателей мугунского и ирбейского углей  
Fig. 3. Diagram of slagging and polluting indicators of Mugunsky and Irbeisky coals

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ

В соответствии с полученными данными показателей шлакующих свойств ирбейского и мугунского углей, можно сделать следующие выводы:

1. Высокий ранг склонности к образованию железистых отложений при сжигании исследуемых углей показывает, что отложения будут образовываться на значительной площади экранных поверхностей в топочном объеме в зоне активного горения и на поверхностях пароперегревателя (в области температур выше 900°C). Поэтому необходимо рассмотреть вариант установки более современных аппаратов водяной обдувки, что позволит увеличить длительность бесшлаковочной работы котлов. Кроме того, необходимо ввести в эксплуатацию штатные глубоководные обдувочные аппараты для очистки пароперегревателя от золовых отложений.

2. Склонность к образованию сульфатно-кальциевых отложений достаточно велика при сжигании мугунского угля, отложения будут наблюдаться на поверхностях нагрева в зоне температур более 800°C, а при сжигании ирбейского угля образование отложений возможно в конвективных поверхностях нагрева (на поверхности водяного экономайзера) в виде прочных сульфатно-связанных отложений, особенно в неочищаемых зонах. Поэтому для предотвращения ограничений нагрузки котла по условиям тяги необходимо оснастить

паровой обдувкой водяной экономайзер и использовать дробеочистку воздухоподогревателя.

3. Рассматриваемые угли имеют невысокую склонность к образованию отложений на базе активных щелочей, такого рода отложения могут быть на лобовых участках труб в зоне температур газов ниже 800°C в виде рыхлого налета.

#### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализируя полученные результаты, можно констатировать, что непроектные топлива, сжигаемые на ТЭЦ Иркутской области, могут заменить проектные топлива, однако для предотвращения интенсивного шлакования топок целесообразно выполнить настройку оптимальных зон очистки аппаратами водяной обдувки, т.к. при сжигании непроектных топлив существует опасность образования железистых и сульфатно-кальциевых отложений на поверхностях нагрева котлов. Предлагаемые мероприятия позволят уменьшить цикличность очистки поверхностей нагрева котельных агрегатов в 2–3 раза.

Таким образом, в заключении необходимо отметить, что при сжигании твердых топлив необходимо знать не только его технический анализ, но и выполнять детальную оценку с точки зрения возможности шлакования и загрязнения поверхностей нагрева, особенно перед использованием на ТЭЦ непроектных топлив.

#### Библиографический список

1. Вихрев Ю.В. Эксплуатационная надежность поверхностей нагрева паровых котлов // *Мировая энергетика*. 1997. № 4. С. 38–40.  
2. Янов С.Р., Бойко Е.А. Обоснование применения экспериментально-расчетного подхода к оценке тепловой эффективности полураспределенных и конвективных поверхностей нагрева котельных агрегатов // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2008. № 11–12. С. 3–12.  
3. Кузнецов А.В., Бутаков Е.Б. Исследование влияния механической активации на горение угольного топлива // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2016. Т. 327. № 6. С. 37–44.  
4. *Medium Term Coal Market Report 2016*. Paris: International Energy Agency, 2016. 141 p. [Электронный

ресурс]. URL: [https://www.oecd-ilibrary.org/energy/medium-term-coal-market-report-2016\\_mtrcoal-2016-en](https://www.oecd-ilibrary.org/energy/medium-term-coal-market-report-2016_mtrcoal-2016-en) (20.03.2020).  
<https://doi.org/10.1787/mtrcoal-2016-en>  
5. *Coal information: overview*. Paris: International Energy Agency, 2017. 8 p. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.oecd-ilibrary.org/energy/coal-information-2017\\_coal-2017-en](https://www.oecd-ilibrary.org/energy/coal-information-2017_coal-2017-en) (20.03.2020).  
<https://doi.org/10.1787/coal-2017-en>  
6. Курганкина М.А., Вершинина К.Ю., Озерова И.П., Медведев В.В. К вопросу о переходе тепловых электрических станций с традиционных топлив на органувольные топливные композиции // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2018. Т. 329. № 9. С. 72–82.  
7. Cai Lei, Zou Chun, Liu Yang, Zhou Kai, Han Qing-



song, Zheng Chuguang. Numerical and experimental studies on the ignition of pulverized coal in O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O atmospheres // *Fuel*. 2015. Vol. 139. P. 198–205. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.08.038>

8. Briceland C.L., Khinkis M., Waibel R.T. Combustion Characteristics of Fine-Ground Coal // *Combustion Diagnostics from Fuel Bunker to Stack: Proceedings International Symposium. Project 61052 quarterly technical report (Effect of particle size)*. 1982. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.osti.gov/biblio/6547443-combustion-characteristics-fine-ground-coal-project-quarterly-technical-report-march-may-effect-particle-size> (20.03.2020).

9. The US Coal Crash – Evidence for Structural Change. London: Carbon Tracker Initiative, 2015. 48 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://carbontracker.org/reports/the-us-coal-crash/> (20.03.2020).

10. Guttikunda S.K., Jawahar P. Atmospheric emissions and pollution from the coal-fired thermal power plants in India // *Atmospheric Environment*. 2014. Vol. 92. P. 449–460. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.04.057>

11. Яновский А.Б. Основные тенденции и перспективы развития угольной промышленности России // *Уголь*. 2017. № 8. С. 10–14. <http://doi.org/10.18796/0041-5790-2017-8-10-14>

12. Таразанов И.Г. Итоги работы угольной промышленности России за январь-декабрь 2017 года // *Уголь*. 2018. № 3. С. 58–73. <http://doi.org/10.18796/0041-5790-2018-3-58-73>

13. Глинина О.И. Угольная промышленность в России: 295 лет истории и новые возможности // *Уголь*. 2017. № 10. С. 4–11. [http://doi.org/10.18796/0041-](http://doi.org/10.18796/0041-5790-2017-10-4-10)

5790-2017-10-4-10

14. Табакаев Р.Б., Хаустов С.А., Черкашина Г.А., Казаков А.В. Низкосортное топливо Томской области: перспективы энергетического использования // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2015. Т. 326. № 9. С. 106–113.

15. Росляков П.В., Кондратьева О.Е., Головтеева А.Н., Сиваковский А.М. Алгоритм оптимального выбора наилучших доступных технологий для российских ТЭС // *Теплоэнергетика*. 2019. № 4. С. 60–72. <http://doi.org/10.1134/S0040363619040064>

16. Алехнович А.Н., Артемьева Н.В., Богомолов В.В. Результаты многолетних исследований шлакующих свойств на огневом стенде УралВТИ и задачи их изучения // *Энергетик*. 2014. № 10. С. 15–20.

17. Алехнович А.Н. Характеристики и свойства энергетических углей. Челябинск: Цицеро, 2012. 549 с.

18. Алехнович А.Н. Экспертная оценка и прогнозирование шлакующих свойств углей // *Электрические станции*. 2015. № 8. С. 7–17.

19. Вербовецкий Э.Х., Майданик М.Н. Компьютерная программа экспертной оценки влияния качества топлива на технико-экономические показатели оборудования пылеугольных станций // *Энергетик*. 2004. № 1. С. 15–17.

20. Коваль Т.В., Кудряшов А.Н., Кошкарёв П.А. Оценка шлакующих и загрязняющих свойств углей // *Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Иркутск, 24–28 апреля 2018 г.)*. Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2018. С. 168–171.

## References

1. Vkhrev YuV. Operational Reliability of Heating Surfaces of Steam Boilers. *Mirovaya energetika*. 1997;4:38–40. (In Russ.)

2. Yanov SR, Boiko EA. Justification of Application Experimentally - Rated the Approach to the Estimation of Thermal Efficiency. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki = Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2008;(11-12):3–12. (In Russ.)

3. Kuznetsov AV, Butakov EB. Investigation of Mechanical Activation Influence on Coal Fuel Combustion. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2016;327(6):37–44. (In Russ.)

4. *Medium Term Coal Market Report 2016*. Paris: International Energy Agency; 2016, 141 p. Available from: [https://www.oecd-ilibrary.org/energy/medium-term-coal-market-report-2016\\_mtrcoal-2016-en](https://www.oecd-ilibrary.org/energy/medium-term-coal-market-report-2016_mtrcoal-2016-en) [Accessed 20th March 2020]. <https://doi.org/10.1787/mtrcoal-2016-en>

5. Coal Information: Overview. Paris: International Energy Agency; 2017, 8 p. Available from: [https://www.oecd-ilibrary.org/energy/coal-information-2017\\_coal-2017-en](https://www.oecd-ilibrary.org/energy/coal-information-2017_coal-2017-en) [Accessed 20th March 2020]. <https://doi.org/10.1787/coal-2017-en>

6. Kurgankina MA, Vershinina KYu, Ozerova IP,

Medvedev VV. Thermal Power Plants Switching from Traditional Fuels to Coal Water Slurries Containing Petrochemicals. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2018;329(9):72–82. (In Russ.)

7. Cai Lei, Zou Chun, Liu Yang, Zhou Kai, Han Qingsong, Zheng Chuguang. Numerical and Experimental Studies on the Ignition of Pulverized Coal in O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O Atmospheres. *Fuel*. 2015;139:198–205. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.08.038>

8. Briceland CL, Khinkis M, Waibel RT. Combustion Characteristics of Fine-Ground Coal. In: *Combustion Diagnostics from Fuel Bunker to Stack: Proceedings International Symposium. Project 61052 quarterly technical report (Effect of particle size)*. 1982. Available from: <https://www.osti.gov/biblio/6547443-combustion-characteristics-fine-ground-coal-project-quarterly-technical-report-march-may-effect-particle-size> [Accessed 20th March 2020].

9. The US Coal Crash – Evidence for Structural Change. London: Carbon Tracker Initiative; 2015, 48 p. Available from: <https://carbontracker.org/reports/the-us-coal-crash/> [Accessed 20th March 2020].

10. Guttikunda SK, Jawahar P. Atmospheric Emissions and Pollution from the Coal-Fired Thermal Power Plants

in India. *Atmospheric Environment*. 2014;92:449–460. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.04.057>

11. Yanovskii AB. Main Trends and Prospects of the Coal Industry Development in Russia. *Ugol'*. 2017;8:10–14. (In Russ.) <http://doi.org/10.18796/0041-5790-2017-8-10-14>

12. Tarazanov IG. Russia's Coal Industry Performance for January - December, 2017. *Ugol'*. 2018;3:58–73. (In Russ.) <http://doi.org/10.18796/0041-5790-2018-3-58-73>

13. Glinina OI. The Coal Industry in Russia: 295 Years History and New Opportunities. *Ugol'*. 2017;10:4–11. (In Russ.) <http://doi.org/10.18796/0041-5790-2017-10-4-10>

14. Tabakaev RB, Khaustov SA, Cherkashina GA, Kazakov AV. Low-Grade Fuels of Tomsk Region: Prospects for Energy Use. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring geoesurov* = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2015;326(9):106–113. (In Russ.)

15. Roslyakov PV, Kondrat'eva OE, Golovteeva AN, Sivakovskii AM. Optimal Choice of the Best Available Technologies for Russian Thermal Power Plants. *Термоэнергетика* = Thermal Engineering. 2019;4:60–72. (In Russ.) <http://doi.org/10.1134/S0040363619040064>

16. Alekhovich AN, Artem'eva NV, Bogomolov VV. The Results of Multi-Year Study of Slag Properties on

UralVTI Fire Test Bench and Tasks of their Research. *Energetik*. 2014;10:15–20. (In Russ.)

17. Alekhovich AN. *Characteristics and Properties of Power Generating Coal*. Chelyabinsk: Tsitsero; 2012, 549 p. (In Russ.)

18. Alekhovich AN. Expert Appraisal and Prediction of Coal Slagging Properties. *Elektricheskiye stantsii* = Power Technology and Engineering. 2015;8:7–17. (In Russ.)

19. Verbovetskii EK, Maidanik MN. Computer Program for Expert Assessment of Fuel Quality Effect on Technical and Economic Indicators of Pulverized Coal Plant Equipment. *Energetik*. 2004;1:15–17. (In Russ.)

20. Koval TV, Kudryashov AN, Koshkarev PA. Estimation of Slag and Polluting Properties of Coal. In: *Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyah Sibiri: materialy Vserossiyskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem* = Improving efficiency of energy production and use in Siberia: Proceedings of All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation. 24–28 April 2018, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2018, p. 168–171. (In Russ.)

#### Критерии авторства

Коваль Т.В., Кудряшов А.Н. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Коваль Татьяна Валерьевна**,  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры теплоэнергетики,  
Иркутский национальный  
исследовательский технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;  
✉ e-mail: kovaltv@istu.edu

**Кудряшов Александр Николаевич**,  
кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры теплоэнергетики,  
Иркутский национальный  
исследовательский технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;  
e-mail: kan@istu.edu

#### Authorship criteria

Koval T.V., Kudryashov A.N. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

#### Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

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

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Tatiana V. Koval**,  
Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor of the Department  
of Heat Power Engineering,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;  
✉ e-mail: kovaltv@istu.edu

**Alexander N. Kudryashov**,  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department  
of Heat Power Engineering,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074 Russia;  
e-mail: kan@istu.edu



## State estimation of a three-phase four-wire secondary distribution network

Yana I. Kuzkina<sup>\*,\*\*\*</sup>, Irina I. Golub<sup>\*\*</sup>, Evgeniy V. Boloev<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Irkutskenergo Engineering Center LLC, Irkutsk, Russia

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

**Abstract:** A state estimation algorithm for assessing the state of a power delivery network according to the measurement information performed by smart meters is proposed and its efficient use in a real low-voltage three-phase four-wire secondary distribution network demonstrated. Nonlinear state estimation is performed by a method of simple iterations, at each step of which an overdetermined system of linear equations of measurements is solved by the method of weighted least squares. State estimation is performed independently for each phase and the neutral wire; phase voltage estimates relative to the neutral wire are determined according to estimates of the phase wire voltages and the neutral wire relative to the ground. Testing of the method is carried out on the example of a real 11-node main feeder, on the poles of which MIR S-04, MIR S-05 and MIR S-07 single-phase and three-phase meters of Russian production are installed. For the state estimation, information was used on the hourly average power of loads and voltage modules for 576 measurement sections taken from the protocols of an automated commercial electricity accounting system. The high accuracy of the obtained estimates is confirmed by no more than 1.2 V residues between the measured values of the variables and their estimates. Two methods for determining energy losses by estimating voltages – with respect to earth and a neutral wire, respectively – are presented. The possibility of balancing loads by moving single-phase loads of the most loaded phase to a less loaded phase is demonstrated. The calculations performed for a real network show the proximity of variables measured by smart meters to their estimates, confirming the effectiveness of the presented algorithm for assessing the state of the secondary distribution network with explicit consideration of the neutral wire.

**Keywords:** state estimation, three-phase four-wire secondary distribution network, simple iteration method, neutral wire, voltage phase wire (neutral wire) – earth, voltage phase wire – neutral wire

**Acknowledgements:** The research was carried out under State Assignment III.17.4.2 (reg. number AAAA-A117030310438-1) of the Fundamental Researches of the SB RAS. The authors express gratitude to the regional state unitary energy enterprise Oblkom-munenergo for the information provided for the study.

**Information about the article:** Received March 03, 2020; accepted for publication May 05, 2020; available online June 30, 2020.

**For citation:** Kuzkina Yal, Golub II, Boloev EV. State estimation of three phase four wire secondary distribution network. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(3):649–662. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-649-662>

УДК 621.311

## Оценивание состояния трехфазной четырехпроводной вторичной распределительной сети

© Я.И. Кузькина<sup>\*,\*\*\*</sup>, И.И. Голуб<sup>\*\*</sup>, Е.В. Болоев<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>ООО «Инженерный центр «Иркутскэнерго», г. Иркутск, Россия

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

**Резюме:** Цель – показать эффективность использования в реальной трехфазной четырехпроводной вторичной распределительной сети низкого напряжения предлагаемого в работе алгоритма оценивания состояния сети по информации об измерениях, выполняемых интеллектуальными счетчиками. Нелинейное оценивание состояния производится методом простых итераций, на каждом шаге которого переопределенная система линейных уравнений измерений решается методом взвешенных наименьших квадратов. Оценивание состояния выполняется для каждой фазы и нейтрального провода независимо, оценки фазных напряжений относительно нейтрального провода определяются по оценкам напряжений фазных проводов и нейтрального провода относительно земли. Тестирование метода проводится на примере реального 11-узлового магистрального фидера, на опорах которого

установлены однофазные и трехфазные счетчики МИР С-04, МИР С-05 и МИР С-07 российского производства. Для оценивания состояния использовалась информация о среднечасовых мощностях нагрузок и модулей напряжений для 576 срезов измерений, взятая из протоколов автоматизированной системы коммерческого учета электроэнергии. Высокую точность полученных оценок подтверждают не превышающие 1,2 В остатки между измеренными значениями переменных и их оценками. Представлены способы определения потерь энергии по оценкам напряжений как относительно земли, так и относительно нейтрального провода. Показана возможность симметрирования фазных нагрузок перемещением однофазных нагрузок наиболее нагруженной фазы в менее нагруженную. Проведенные для реальной сети расчеты показывают близость измеренных интеллектуальными счетчиками значений переменных к их оценкам, что подтверждает эффективность представленного алгоритма оценивания состояния вторичной распределительной сети с явным учетом нейтрального провода.

**Ключевые слова:** оценивание состояния, трехфазная четырехпроводная вторичная распределительная сеть, метод простых итераций, нейтральный провод, напряжение фазный провод (нейтральный провод) – земля, напряжение фазный провод – нейтральный провод

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках государственного задания III.17.4.2 (пер. № АААА-А17-117030310438-1) фундаментальных исследований СО РАН. Авторы выражают благодарность ОГУЭП «Облкоммунэнерго» за предоставленную для исследования информацию.

**Информация о статье:** Дата поступления 03 марта 2020 г.; дата принятия к печати 05 мая 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 июня 2020 г.

**Для цитирования:** Кузькина Я.И., Голуб И.И., Болоев Е.В. Оценивание состояния трехфазной четырехпроводной вторичной распределительной сети. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 3. С. 649–662. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-649-662>

## 1. INTRODUCTION

In recent years, there have been many works aimed at solving the problem of state estimation (SE) of primary distribution networks (DNs) of medium voltage, as well as secondary low voltage DN, illustrated by examples of test networks. Such examples of three-phase four-wire primary and secondary DN, containing information on the network topology, including equivalent circuit element and loads parameters, are given in [1]. Although four-wire primary DN are widely used in contemporary electricity distribution systems worldwide, Russian electricity networks rarely use a four-wire configuration. Test information about the secondary network parameters is important when developing programs for state estimation, calculating flow distribution and analysing DN modes.

The effectiveness of the developed algorithms can be proved by testing them on real networks combining network parameter information with carried-out measurements. In the present work, the SE of a real secondary three-phase four-wire DN according to smart meter measurements is illustrated by the example of a main feeder (Fig. 1), whose phases are connected to 24 private houses with single-phase and three-phase loads. The ac-

counting of domestic energy consumption at the properties is carried out by means of MIR S-04 and MIR S-05 smart three-phase and single-phase meters installed on the feeder poles, with the total energy entering the feeder measured by a MIR S-07 balanced three-phase meter [2]. In Fig. 1 the phases of connecting loads, determined according to the results of a special study, are indicated next to the house numbers [3–5]. In addition to energy measurements, MIR meters allow interval measurements of average active and reactive power values, as well as average values of voltage modules, to be carried out. The work used information obtained from the protocol of an automated system for commercial accounting of power consumption (ASCAPC) on hourly average measurements of capacities and voltage modules in the phases of the main feeder over a period of 24 days.

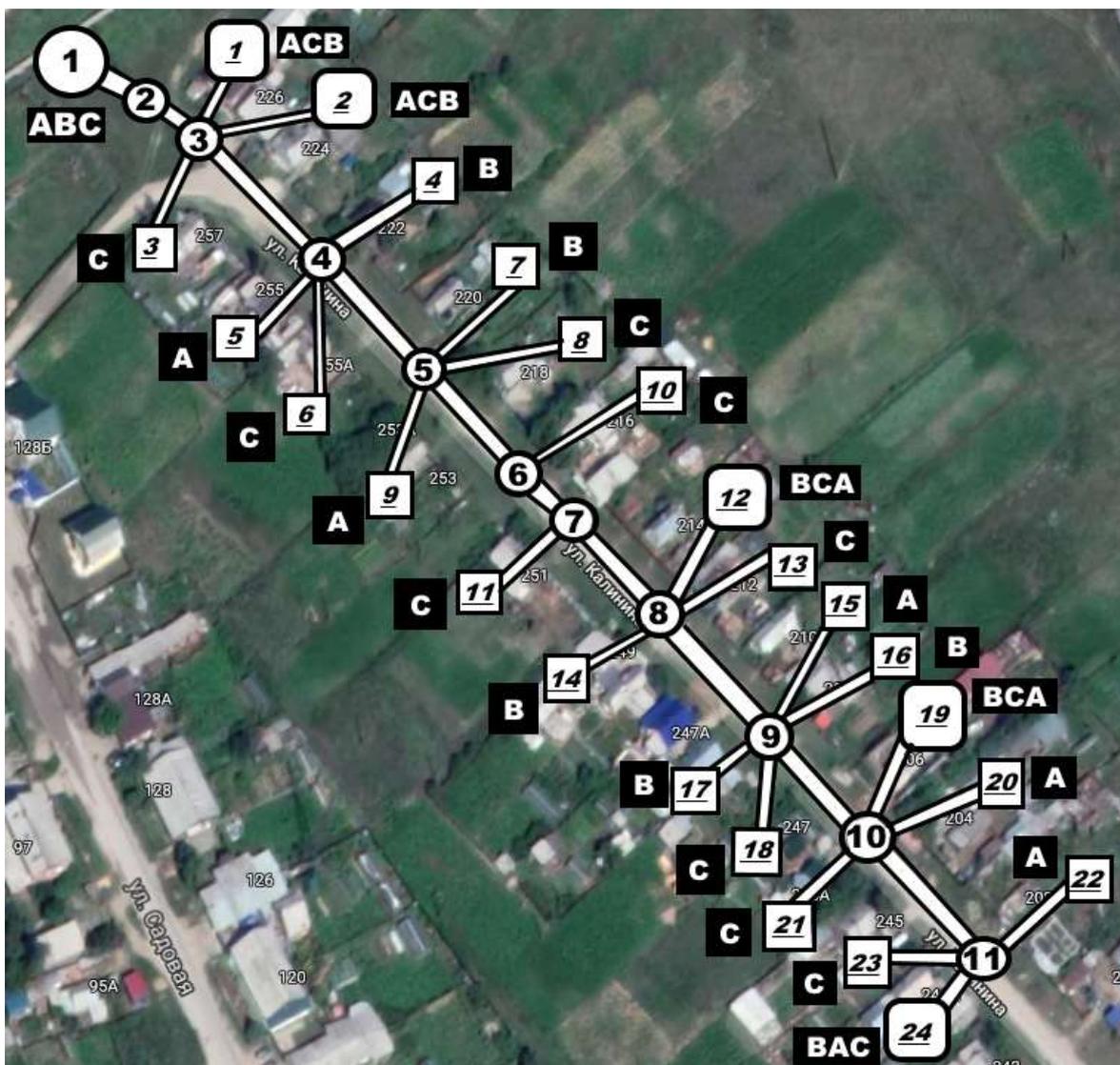
In contradistinction to high voltage networks, the most important distinguishing characteristics of a DN are as follows: operation of the network in radial mode; asymmetry due to imbalance of phase loads, which can be single-phase, two-phase and three-phase; excess of inductive resistances by active resistances of communication lines; equal degree of voltage dependence, both on active and reactive power. In order to take into ac-



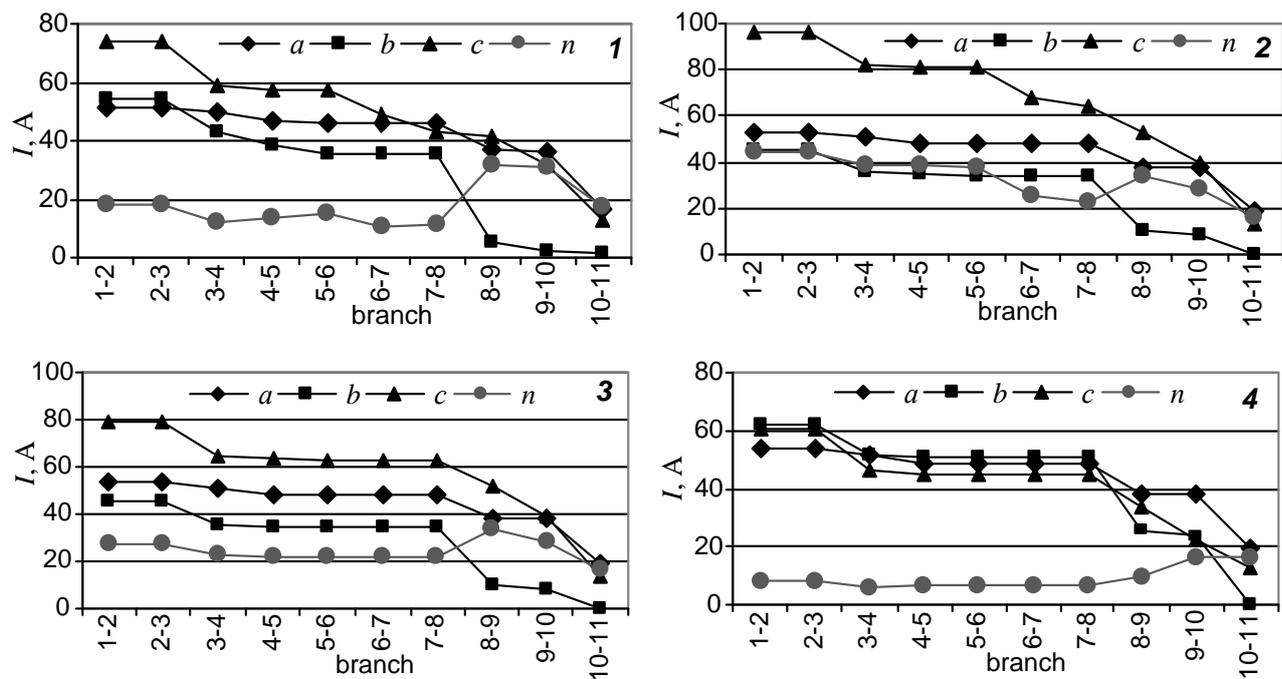
count the asymmetry of the secondary DN characteristics, a three-phase four-wire model is required.

One of the most complete models of a three-phase four-wire DN, referred to by many researchers, is presented in [6]: in addition to phase wires, this model includes an earth, a neutral wire and its grounding. The forward-backward method [7] used in [6] to calculate the flow distribution in such a network consists in calculating the mode when moving along the network graph, first from the hanging load nodes to the root power node of the network, and then from the root node in the direction of the hanging nodes. While this method is relatively easy to program and provides transpar-

ent results, the most significant limitation of the method is associated with the presence of contours in the network. A number of alternative methods have been proposed for calculating the load flow and SE of four-wire networks [8–10] that allow this limitation [7] to be overcome. The main drawback of these methods is the assumption of the presence of grounding in all nodes of the neutral wire, as a consequence of which the voltage in the neutral wire relative to earth is zero, allowing a four-wire network to be simulated as a three-wire equivalent. The simple iteration approach, used in [11] to calculate load flow in a test three-wire network, also pertains to such methods.



**Fig. 1. Main feeder of the secondary distribution network with branches to the houses**  
**Рис. 1. Магистральный фидер вторичной распределительной сети с ответвлениями к домам**



**Fig. 2. Current modules in sections of phase conductors *a*, *b*, *c* and neutral wire *n* of the 11-node main feeder: 1 and 2 – first and second modes; 3 and 4 – first and second stages of load balancing**  
**Рис. 2. Модули токов в секциях фазных проводов *a*, *b*, *c* и нейтрального провода *n* 11-узлового магистрального фидера: (1) и (2) – первый и второй режимы, (3) и (4) – первый и второй этапы симметрирования нагрузок**

In practice, the grounding impedances installed in the load nodes provide non-zero voltage values in the neutral wire. In [6, 12], it is shown that not only the grounding impedances, but also the earth resistance, affects the voltage in the neutral wire, and, consequently, the voltage in the phase wires relative to the neutral wire.

The effect of the imbalance of phase loads on currents and voltages in the neutral wire is illustrated by the example of a three-phase four-wire feeder with a neutral wire, grounded only at the power supply unit. The graphics in Fig. 2, 1 and 2, based on the calculation of the flow distribution for the two modes of the 11-node three-phase four-wire feeder [5], show that the current modules in the neutral wire will increase if the asymmetry of the respective currents rises in phases. The current module in the neutral wire can be equal to and greater than the currents in the phase wires that require its control.

In order to calculate the load flow in the network, a minimal set of measurements was used, including measurements of the active

and reactive power of the loads in phases and measurements of voltages that did not coincide in modules in the phases of the power supply unit; such voltage asymmetry, as follows from [13], arises with an asymmetric phase load in the «star-star with neutral terminal» transformers.

For the first mode, as evidenced by the lower value of the current in the neutral wire, the current asymmetry in the feeder section 1–8 is less than for the second mode. The large current in the neutral wire in the second mode is determined by the phase current *s*, which is comparable with the total phase current *a* and *b*. For both modes, an increase in current in the final three sections of the neutral wire is associated with a sharp decrease in the phase current *b* in them.

An obvious way to equalise phase currents is therefore either to move a single-phase load from a more loaded phase to a less loaded one, or to change it using the same principle of connecting a three-phase load to the phases. On the example of the second mode, it is demonstrated that load bal-

ancing leads to a decrease in the current in the neutral wire. In Fig. 2, 3 shows the currents obtained by load balancing when connecting single-phase loads of 10 and 11 houses instead of phase c, for phases b and a; Fig. 2, 4 shows currents following a further reduction in the load of phase c when switching the single-phase load of 23 houses from phase c to phase b.

Fig. 3 shows a vector diagram of currents and voltages for one of the nodes of the four-wire feeder; for simplicity of illustration, the phase voltage vectors relative to the ground and the phase node current vectors are shown to coincide with axes A, B, C of the diagram. Since the sum of phase current vectors that are not coincident in mode is equal to the nodal current  $I_n$  of the neutral wire, the voltage in the neutral wire relative to the ground  $U_{n0}$  can be calculated on this basis.

By analogy with the illustration in [14], the difference between the voltage vectors in phases relative to earth  $U_{a0}, U_{b0}, U_{c0}$  and the voltage vector in the neutral wire relative to

earth  $U_{n0}$  is equal to the voltage in the phase wires  $U_{an}, U_{bn}, U_{cn}$  relative to the neutral wire  $n$ . From the diagram it follows that phases a and b correspond to voltage modules with respect to the neutral wire smaller than the voltage modules relative to earth, while phase c, which has a minimal current, corresponds to a voltage exceeding the voltage relative to earth.

Fig. 4 presents graphs of voltage modules in phases for an 11-node feeder, comprising a neutral wire relative to earth and voltages in phases relative to the neutral wire. Particular attention is drawn to the behaviour of the voltage in phase b with respect to the neutral wire, increasing in the section 9-11 of the feeder, which is associated with a decrease in the phase current in this section, see Fig. 2. The load balancing discussed above, mainly due to an increase in the load of the phase b, allows not only the current in the neutral wire to be reduced, but also the voltage, see Fig. 4, and allowed us to approximate the voltage in phase b relative to the neutral wire to the voltage relative to earth, as shown in Fig. 4, 5.

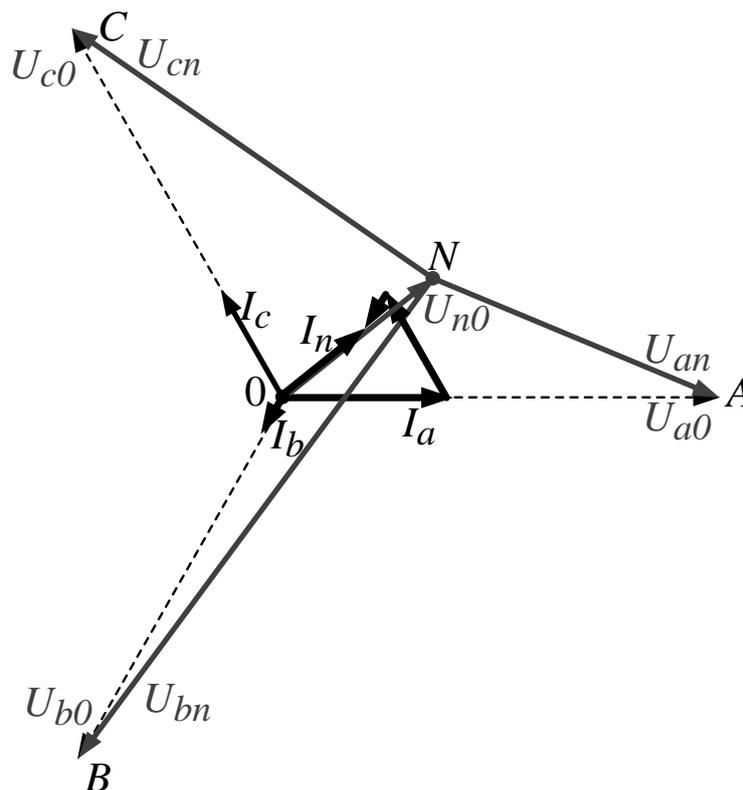


Fig. 3. Vector diagram of nodal currents and three-phase voltages of a four-wire network  
Рис. 3. Векторная диаграмма узловых токов и напряжений трехфазной четырехпроводной сети

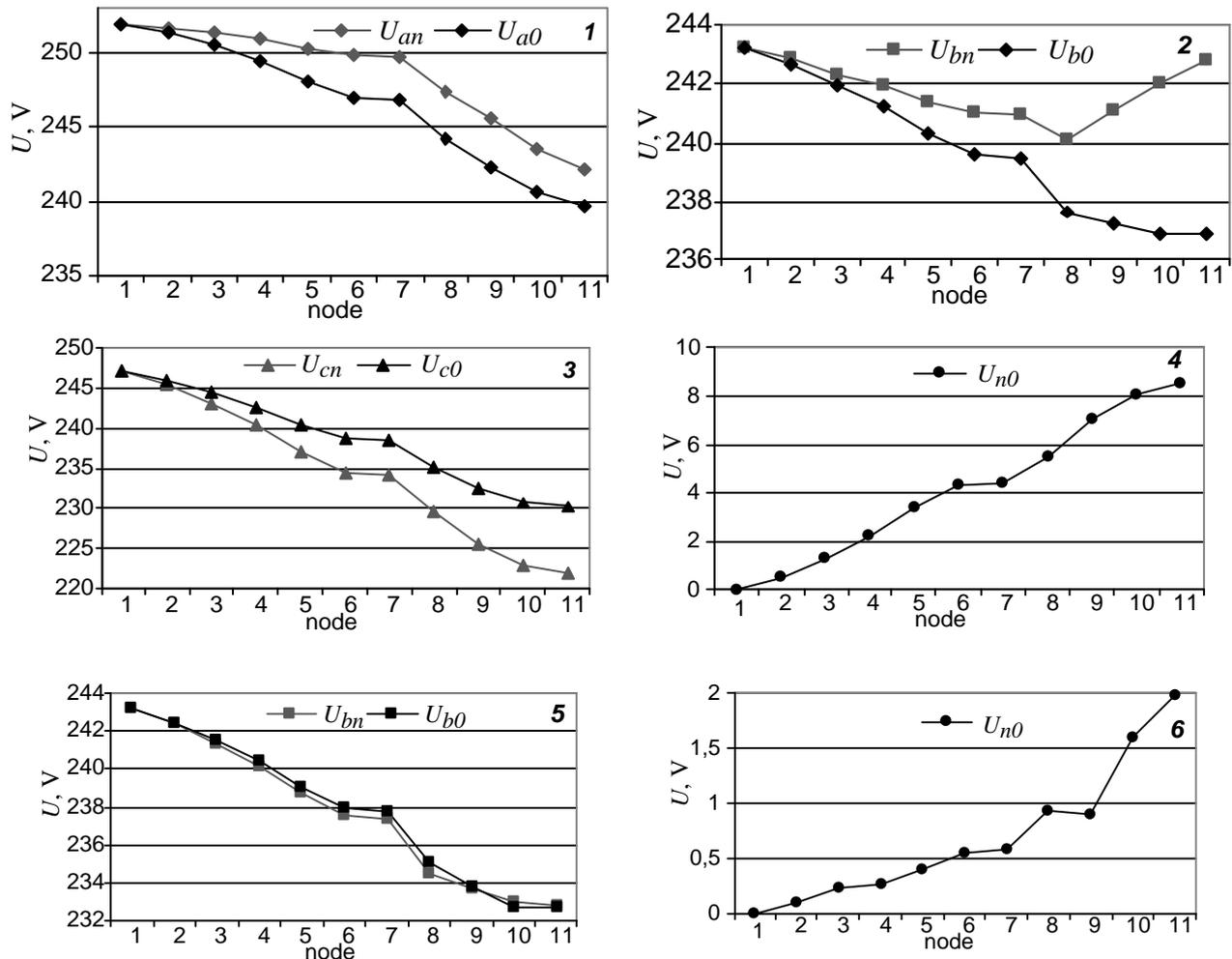


Fig. 4. Voltages in phases relative to earth  $U_{a0}$ ,  $U_{b0}$ ,  $U_{c0}$  in phases relative to the neutral wire  $U_{an}$ ,  $U_{bn}$  and  $U_{cn}$ , as well as in the neutral wire  $U_{n0}$  in relation to the earth (1–6)

Рис. 4. Напряжения в фазах относительно земли  $U_{a0}$ ,  $U_{b0}$ ,  $U_{c0}$ , в фазах относительно нейтрального провода  $U_{an}$ ,  $U_{bn}$ ,  $U_{cn}$  и в нейтральном проводе  $U_{n0}$  относительно земли

The monitoring of special cases of the behaviour of the three-phase four-wire DN mode variables can be carried out based on the measurements of power consumption and voltages coming from smart meters and stored in the ASCAPC protocols using SE programs.

Recently, a number of works have appeared [15–18] related to the SE of a primary three-phase four-wire DN operating system. A significant difference between the simulation of such a network and that of a secondary network, both when explicitly taking into account the neutral wire and its grounding, as well as in three-phase modelling, is the need to take into account the intrinsic and mutual resistances between the phase conductors, between the neutral wire and earth, as well as

the conductivities of the earth itself. The secondary network SE algorithm proposed below, which takes into account neither mutual resistances nor ground conductivities, allows the SE DN procedure to be performed for each phase and neutral wire independently.

## 2. STATE ESTIMATION OF A THREE-PHASE FOUR-WIRE DISTRIBUTION NETWORK

Here we consider the main stages of the SE procedure of a three-phase four-wire network using information on the network topology, parameters of the elements of its equivalent circuit, as well as measurements carried out by smart meters, including active



$\bar{z}_p^{a,b,c}$  and reactive  $\bar{z}_Q^{a,b,c}$  node power and voltage modules  $\bar{z}_U^{a,b,c}$ .

In each phase, the same number of nodes is specified, but the number of load nodes in the phases can differ; in transit nodes, zero values of active and reactive node powers are set.

We will write the SE task of a three-phase four-wire network similarly to [6], but without taking into account the current flow in the ground, which is true under the assumption that the neutral wire is grounded only at the power node; the system of measurement equations will be solved by simple iteration [11] consisting of two iteratively repeating steps.

At the first step of the first iteration  $k=1$ , in the nodes  $i$  of each phase  $a, b, c$  and the neutral wire  $n$  according to the measured values of the active  $\bar{z}_p^{a,b,c}$  and reactive  $\bar{z}_Q^{a,b,c}$  load capacities and the initial voltage values  $U_i^{a,b,c}$  equal to the rated voltage at the first iteration, [6] pseudo-measurements of  $\bar{z}J_i^{a,b,c,n} = \bar{z}_{Jai}^{a,b,c,n} + J\bar{z}_{Jpi}^{a,b,c,n}$  node currents are determined:

$$\begin{pmatrix} \bar{z}_{Jai}^a + J\bar{z}_{Jpi}^a \\ \bar{z}_{Jai}^b + J\bar{z}_{Jpi}^b \\ \bar{z}_{Jai}^c + J\bar{z}_{Jpi}^c \\ \bar{z}_{Jai}^n + J\bar{z}_{Jpi}^n \end{pmatrix}_k = \begin{pmatrix} (\bar{z}_p^a - J\bar{z}_Q^a)/U_i^a \\ (\bar{z}_p^b - J\bar{z}_Q^b)/U_i^b \\ (\bar{z}_p^c - J\bar{z}_Q^c)/U_i^c \\ -(\bar{z}J_i^a + \bar{z}J_i^b \cdot a2 + \bar{z}J_i^c \cdot a1) \end{pmatrix}_k, \quad (1)$$

where

$$\begin{aligned} a1 &= -1/2 + j\sqrt{3}/2; \\ a2 &= -1/2 - j\sqrt{3}/2. \end{aligned}$$

When writing equations (1), the capacitive conductivities of the phase wires and the neutral wires to the earth are assumed to be zero.

At the second step of each iteration, a

system of linear measurement equations is solved (2), whose coefficient matrix elements are  $g_i^{a,b,c}$  and  $b_i^{a,b,c}$  – under the matrices of active and reactive nodal conductivities;  $I^{a,b,c}$  and  $0^{a,b,c}$  – single and zero submatrices; the vector of unknowns, called the state vector, is formed by the longitudinal  $u_i'^{a,b,c}, u_i''^n$  and transverse  $u_i''^{a,b,c}, u_i''^n$  vector components of phase voltages and voltages in the neutral wire. The right-hand sides of the equations comprise the pseudo-measurements of the nodal currents and the longitudinal components of the nodal stresses, set at the first iteration to be equal to the measurements of the voltage modules.

The mutual resistance between the phase wires and the neutral wire is assumed to be zero, which is true for low-voltage networks, allowing equations (3) to be solved at iterations for each phase and neutral wire separately.

$$\begin{pmatrix} g_i^{a,b,c,n} & b_i^{a,b,c,n} \\ -b_i^{a,b,c,n} & g_i^{a,b,c,n} \\ I^{a,b,c,n} & 0^{a,b,c,n} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} u_i'^{a,b,c,n} \\ u_i''^{a,b,c,n} \end{pmatrix}_k = \begin{pmatrix} \bar{z}_{Jai}^{a,b,c,n} \\ \bar{z}_{Jpi}^{a,b,c,n} \\ \bar{z}_{U_i}^{a,b,c} \end{pmatrix}_k. \quad (2)$$

In general, system (2), which includes all DN nodes, can be represented in the form of four systems of linear equations written for each of the three phases and the neutral wire:

$$(R_v^{a,b,c})^{-1/2} H^{a,b,c} U_k^{a,b,c} = (R_v^{a,b,c})^{-1/2} \bar{Z}_k^{a,b,c}; \quad (3)$$

$$H^n U_k^n = \bar{Z}_k^n. \quad (4)$$

Since systems (3) are overdetermined, they are multiplied by weight coefficients in order to smooth out errors in individual measurements  $(R_v^{a,b,c})^{-1/2}$ .

Although there is no classical solution for overdetermined systems, the solution vec-

tor  $U_k^{a,b,c}$  can be calculated, allowing the distance between the vectors of the right and left sides to be minimised (3) using the criterion

$$J(U_k^{a,b,c}) = (\bar{Z}_k^{a,b,c} - H^{a,b,c}U_k^{a,b,c})^T \times (R_v^{a,b,c})^{-1} (\bar{Z}_k^{a,b,c} - H^{a,b,c}U_k^{a,b,c}). \quad (5)$$

This method is referred to as the method of weighted least squares; the solution  $U^{a,b,c}$  of the minimisation problem can be obtained from the normal system of equations (6) with a square matrix by means of the Gauss method.

$$\left( (H^{a,b,c})^T (R_v^{a,b,c})^{-1} H^{a,b,c} \right) U_k^{a,b,c} = (H^{a,b,c})^T (R_v^{a,b,c})^{-1} \bar{Z}_k^{a,b,c}. \quad (6)$$

Solution  $U_k^{a,b,c}$  provides estimates of the nodal stress vectors in each phase relative to the ground. The values of the nodal stress vectors in the neutral wire relative to the ground  $U_k^n$  can also be obtained using the Gauss method from a system of linear equations with a square matrix (4). An important advantage of this method, which significantly speeds up the SE procedure, is the constancy at the iterations of the structure and values of the elements of the normalised matrix used to determine the stress estimates of all phases.

Estimates of the nodal stress vectors in the phase wires relative to the neutral wire (7) can be defined as the difference between the voltage vectors in the phase wires relative to the ground and the nodal stress vectors in the neutral wire relative to the ground, as illustrated in Fig. 3, 4.

$$\left. \begin{aligned} U_{k+1}^a &= U_k^a - U_k^n; \\ U_{k+1}^b &= U_k^b - U_k^n \cdot a1; \\ U_{k+1}^c &= U_k^c - U_k^n \cdot a2. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

The iterative process ends when the maximum difference between the state variables obtained at adjacent iterations does not

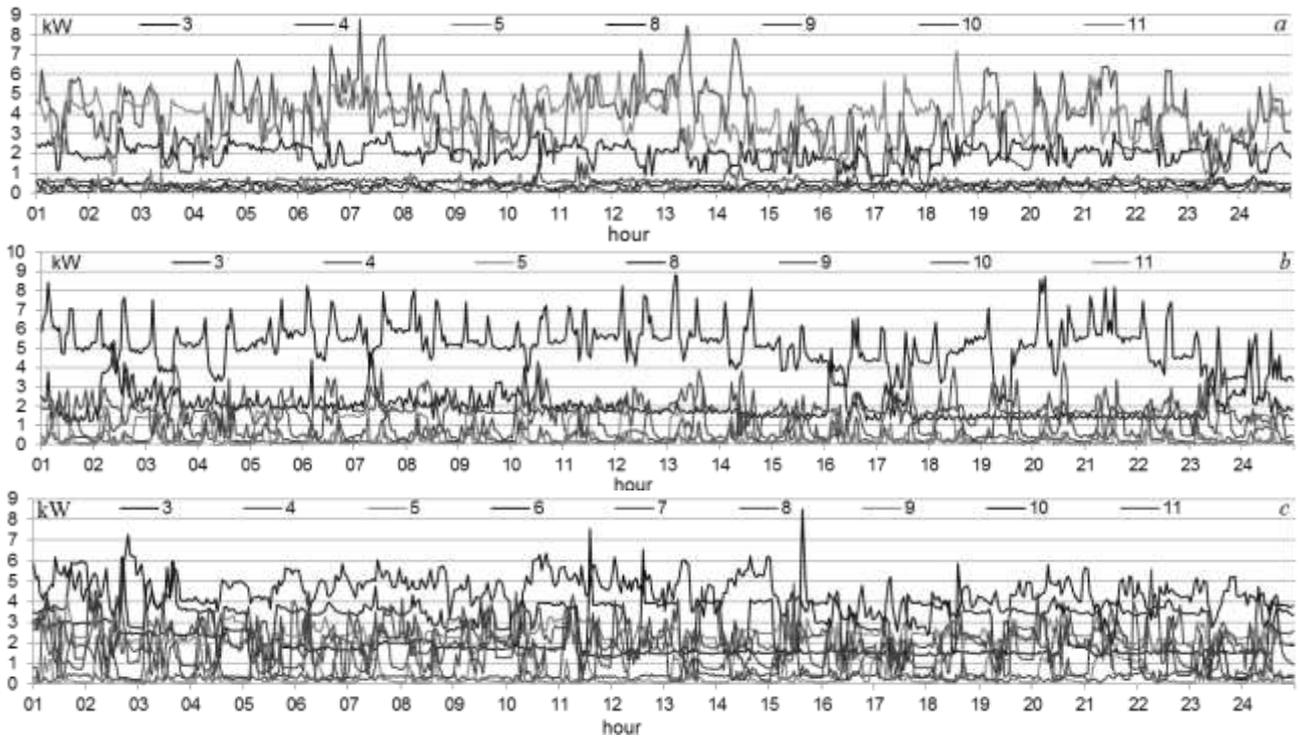
exceed the predetermined accuracy of the calculation. Let us designate the estimates of the nodal voltage vectors in the phases and the neutral wire relative to earth as calculated according to  $\hat{U}_{a0}, \hat{U}_{b0}, \hat{U}_{c0}, \hat{U}_{n0}$ , and the estimates of the voltages in the phase wires relative to the neutral wire as  $\hat{U}_{an}, \hat{U}_{bn}, \hat{U}_{cn}$ .

It should be noted that, for the equality to zero of the estimated currents in the transit nodes below, instead of minimising (5) when calculating vectors of nodal voltages in phases relative to the earth  $U_k^{a,b,c}$ , the SE of the real network is minimised by the Lagrangian function [19], including criterion (5), written for the pseudomeasurement of currents, and limits [20] at zero currents.

### 3. ILLUSTRATION OF THE EFFECTIVENESS OF THE PROPOSED METHOD FOR STATE ESTIMATION

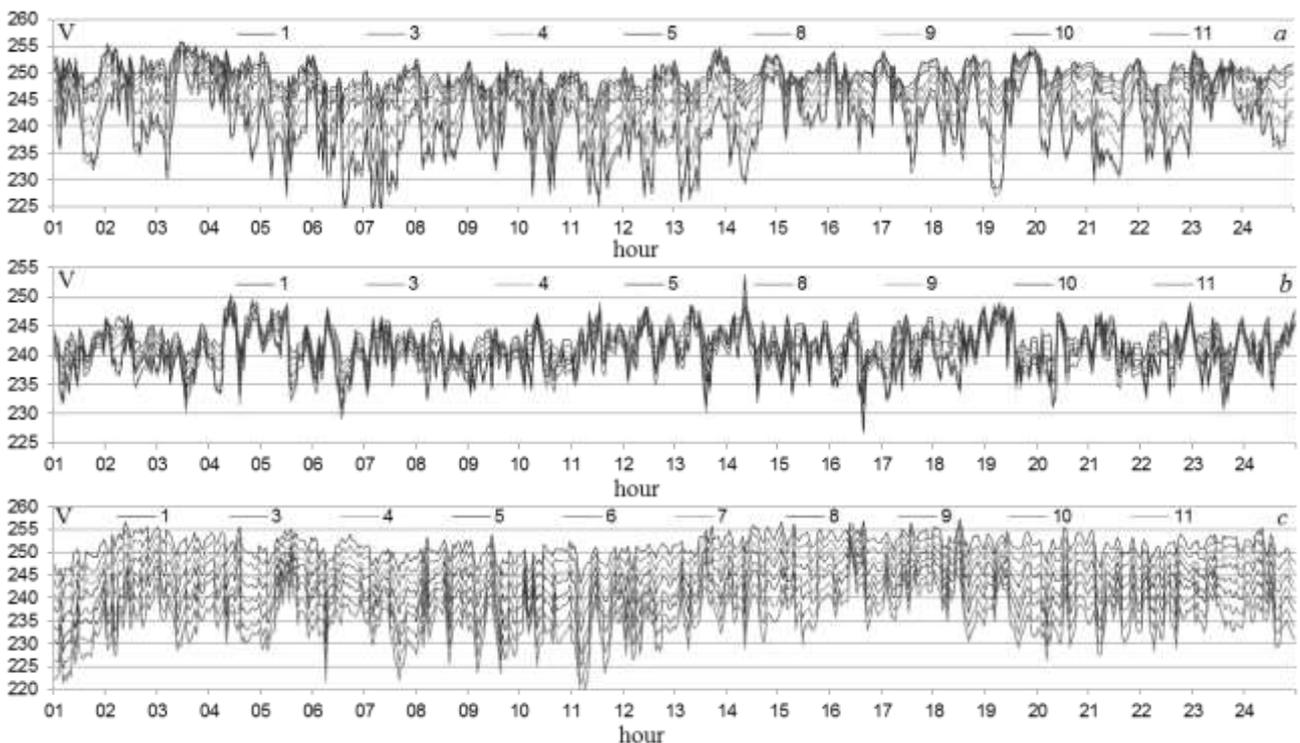
We illustrate the SE of the DN using the example of a real 11-node main feeder, in all phases of which node 1 is the supply and node 2 is the transit; in phases *a* and *b*, the transit nodes are 6 and 7. Thus, phases *a* and *b* each contain 7, while phase *C* contains 9 load nodes. Three counters are installed on poles 3–5 and 9–11 of the main feeder, two on each of poles 6 and 7, and four counters on pole 8; one three-phase meter is installed on poles 8, 10, 11 and two on pole 3; the remaining counters are single-phase (see Fig. 1). For meters installed in the same node, the average phase measurement values of active and reactive powers and voltage modules are calculated on an hourly basis.

Defined in this way in the 7 load nodes of phases *a* and *b* and the 9 nodes of phase *c*, 576 measurement sections of the hourly average values of the active power of the loads and voltage modules for 24 days, are shown on Fig. 5 and Fig. 6. Measurements of the hourly average reactive power of the loads not presented in the form of graphs are not large, as evidenced by the average power factor for the three phases equal to 0.934.



**Fig. 5. Measurements of the hourly average load capacities in the 7 nodes of phases a and b, as well as the 9 nodes of phase c for a 24-day period**

**Рис. 5. Измерения среднечасовых мощностей нагрузок в 7-ми узлах фаз а и b, и 9-ти узлах фазы с за 24-дневный период**



**Fig. 6. Measurements of the hourly average values of stress modules in the 7 load nodes of phases a and b, and the 9 nodes of phase c, carried out over 24 days**

**Рис. 6. Измерения среднечасовых значений модулей напряжений в 7-ми нагрузочных узлах фаз а и b, и 9 узлах фазы с, выполненные в течение 24 сут**

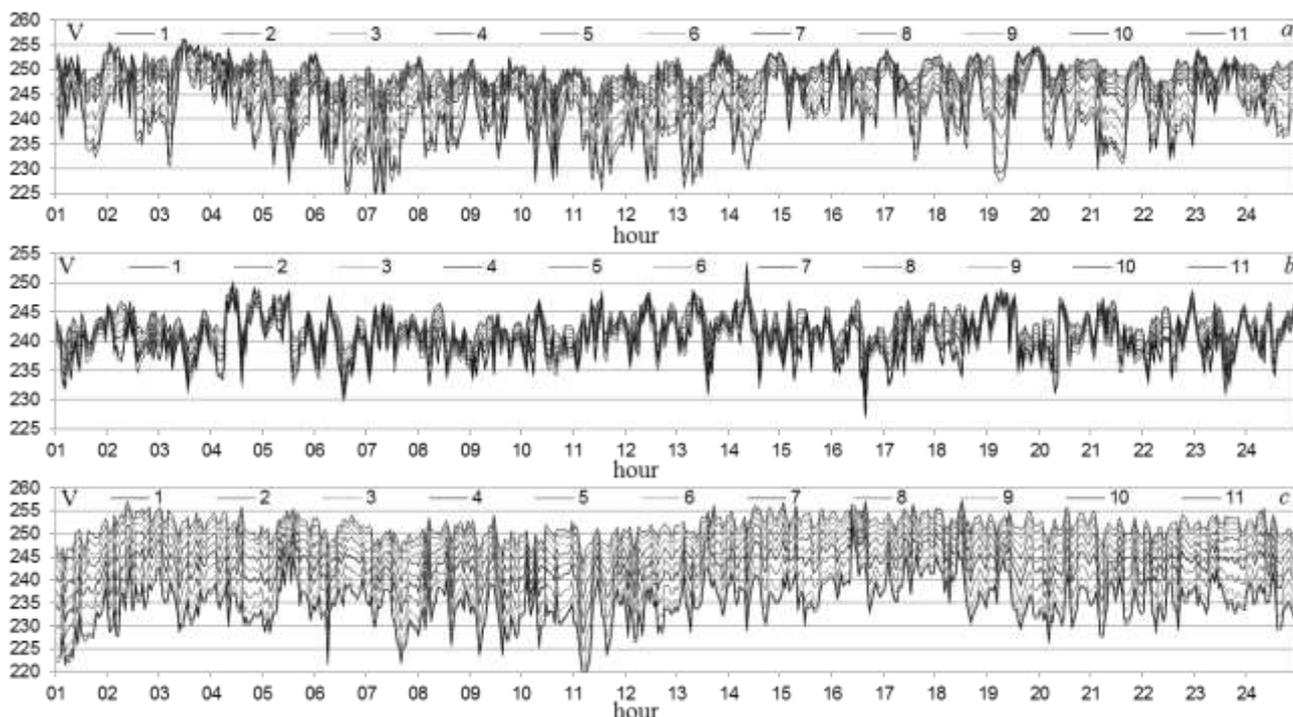


Fig. 7. Evaluation of voltage modules  $\hat{U}_{an}, \hat{U}_{bn}, \hat{U}_{cn}$  (a – c) with respect to the neutral wire in 11 nodes of the main feeder for 576 measurement sections

Рис. 7. Оценки модулей напряжений  $\hat{U}_{an}, \hat{U}_{bn}, \hat{U}_{cn}$  относительно нейтрального провода в 11-ти узлах магистрального фидера для 576 срезов измерений

The limits of change in average total values were determined by analysing the phase load graphs in Fig. 5; for phases a, b and c, these are 4.49–16.44 kW, 6.054–17.48 kW, 9.11–28.0 kW, respectively.

Fig. 7 shows the estimates of voltage modules with respect to the neutral wire  $\hat{U}_{an}, \hat{U}_{bn}, \hat{U}_{cn}$  in 11 nodes of the main feeder, obtained for 576 measurement sections in accordance with the three-phase four-wire network SE algorithm (1)–(7) and taking into account the restrictions on zero currents [20]. On average, for one SE measurement slice, 8 iterations were required for a given accuracy of

the estimates of stresses at adjacent iterations equal to  $10^{-3}$  V.

The high accuracy of the estimates is confirmed by not exceeding 1.2 V maximum absolute values of residuals equal to the difference between the estimated  $\hat{U}_{an}, \hat{U}_{bn}, \hat{U}_{cn}$  and measured  $\bar{U}_{an}, \bar{U}_{bn}, \bar{U}_{cn}$  values of the phase voltage modules relative to the neutral

$$\max \left[ \left| \hat{U}_{an} - \bar{U}_{an} \right|, \left| \hat{U}_{bn} - \bar{U}_{bn} \right|, \left| \hat{U}_{cn} - \bar{U}_{cn} \right| \right], \quad (8)$$

shown in Fig. 8.

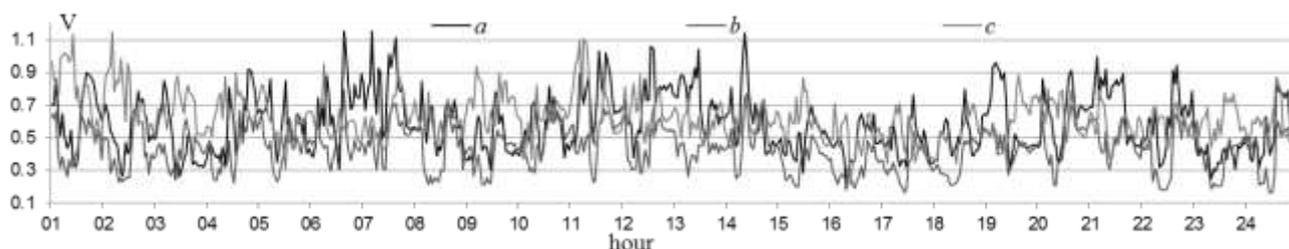


Fig. 8. Maximum absolute values of the residues for the three phases  
 Рис. 8. Максимальные абсолютные значения остатков для трех фаз



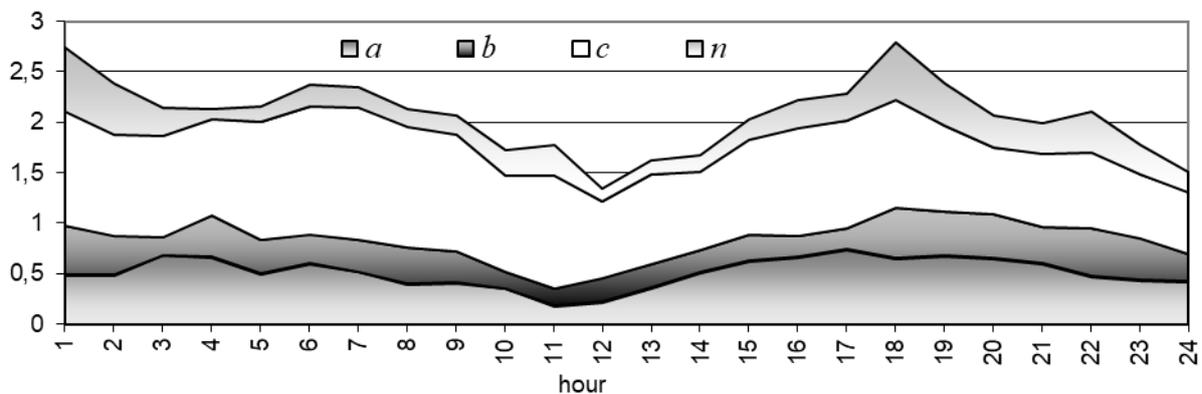
The SE results were used to determine the load energy losses in the phases and the neutral wire for each of the 576 modes, along with a comparison of two methods for determining the losses. According to the first method  $\Delta P^1$ , when calculating for each mode currents and power losses (energy losses per hour) in the feeder sections, voltage estimates relative to earth  $\hat{U}_{a0}, \hat{U}_{b0}, \hat{U}_{c0}, \hat{U}_{n0}$ , were used, while the second method  $\Delta P^2$  used voltage estimates for the neutral wire to determine currents and power losses  $\hat{U}_{an}, \hat{U}_{bn}, \hat{U}_{cn}$ .

The total losses for 576 modes, calculated by the first method, as the sum of the losses in the phase wires and the neutral wire, coincide with the losses obtained in the second way, as the sum of the losses in the phase wires:

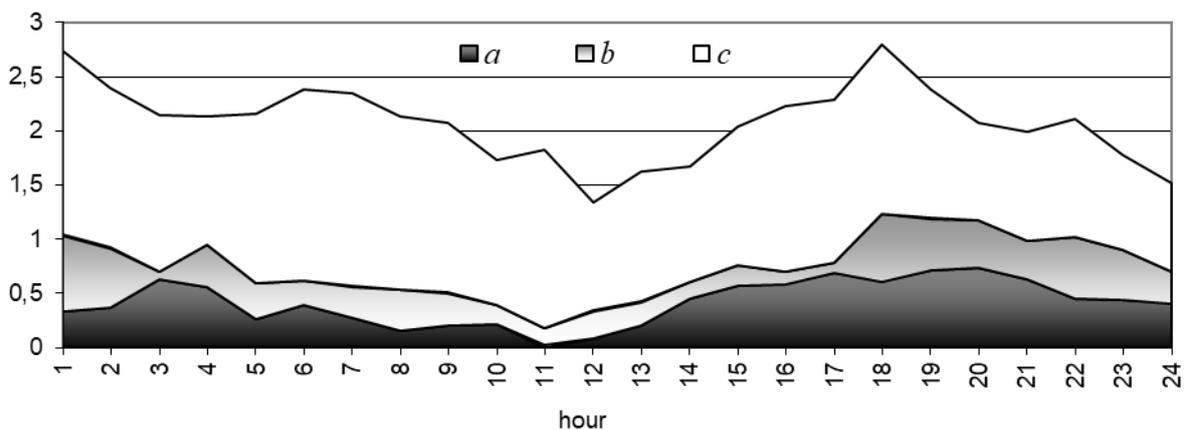
$$\begin{aligned} \Delta P^1 &= \Delta P_a^1 + \Delta P_b^1 + \Delta P_c^1 + \Delta P_n^1 = \\ &= 259.364 + 125.506 + 395.899 + 86.193 = \\ &= 866.962 \text{ kW} \cdot \text{h}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta P^2 &= \Delta P_a^2 + \Delta P_b^2 + \Delta P_c^2 = \\ &= 236.079 + 108.377 + 522.506 = \\ &= 866.962 \text{ kW} \cdot \text{h}. \end{aligned}$$

Another confirmation of the coincidence of the results of determining the hourly losses in two ways is shown in the Fig. 9 diagrams of areas having accumulation, which for each hour of the day demonstrate the contribution of both individual components of hourly energy losses, as well as their sum. As follows from Fig. 9, the upper graphs of both diagrams, which correspond to the total values of hourly energy losses, match exactly.



1



2

Fig. 9. Results of determining hourly energy losses over the course of a day: 1 –  $\Delta P^1$ ; 2 –  $\Delta P^2$   
Рис. 9. Результаты определения часовых потерь энергии в течение суток: 1 –  $\Delta P^1$ ; 2 –  $\Delta P^2$

## 4. CONCLUSION

A solution to the SE problem of a real secondary DN using hourly average measurements of loads and voltage modules over the course of 24 days is presented. Despite the forced averaging of measurements of the load powers and voltage modules over several meters, the high quality of the estimates obtained is confirmed by the residuals of the phase voltage estimates relative

to the neutral wire not exceeding 1.2 V.

It is shown that an effective way of balancing the loads, leading to a decrease in the current in the neutral wire and allowing the phase voltage to be estimated relative to the neutral wire to the phase voltage relative to the ground, is to move a single-phase load of the most loaded phase to a less loaded phase.

Two approaches to the determination of electrical energy losses in the secondary RS, giving the same results, are proposed.

## References

1. Kersting WH. Radial Distribution Test Feeders. *IEEE Transactions on Power Systems*. 1991;6(3):975–985. <https://doi.org/10.1109/59.119237>
2. Zhuravlev VV. New Format for Electric Grids. Meetings and Discussions. *Novosti Elektrotehniki = Electrical Engineering News*. 2018;5-6:20–29. (In Russ.)
3. Pappu SJ, Bhatt N, Pasumarthy R, Rajeswaran A. Identifying Topology of Low Voltage Distribution Networks based on Smart Meter Data. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2018;9(5):5113–5122. <https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2680542>
4. Olivier F, Ernst D, Fonteneau R. Automatic Phase Identification of Smart Meter Measurement Data. *CIGRE – Open Access Proceedings Journal*. 2017;1:1579–1583. <https://doi.org/10.1049/oap-cired.2017.1143>
5. Golub I, Boloev E, Kuzkina Y. Using Smart Meters for Checking the Topology and Power Flow Calculation of a Secondary Distribution Network. In: *Methodological Problems in Reliability Study of Large Energy Systems: E3S International Web of Conferences*. 2019;139:5. Available from: [https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/65/e3sconf\\_rses2019\\_01059/e3sconf\\_rses2019\\_01059.html](https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/65/e3sconf_rses2019_01059/e3sconf_rses2019_01059.html) [Accessed 4th February 2020]. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913901059>
6. Ciric RM, Feltrin AP, Ochoa LF. Power Flow in Four-Wire Distribution Networks – General Approach. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2003;18(4):1283–1290. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2003.818597>
7. Cheng CS, Shirmohammadi D. A Three-Phase Power Flow Method for Real-Time Distribution System Analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*. 1995;10(2):671–679. <https://doi.org/10.1109/59.387902>
8. Olival PC, Madureira AG, Matos M. Advanced Voltage Control for Smart Microgrids using Distributed Energy Resources. *Electric Power Systems Research*. 2017;146:132–140. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.01.027>
9. Waeresch D, Brandalik R, Wellssow WH, Jordan J, Bischler R, Schneider N. Linear State Estimation in Low Voltage Grids based on Smart Meter Data. *Eindhoven PowerTech*. 2015. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7232343> [Accessed 4th February 2020]. <https://doi.org/10.1109/PTC.2015.7232343>
10. Pau M, Patti E, Barbierato L, Estebsari A, Pons E, Ponci F, Monti A. Low Voltage System State Estimation based on Smart Metering Infrastructure. In: *International Workshop on Applied Measurements for Power Systems*. 28–30 September 2016, Aachen. Aachen: IEEE; 2016, p. 1–6. <https://doi.org/10.1109/AMPS.2016.7602804>
11. Boloev EV, Golub II, Fedchishin VV. Low Voltage Distribution Network State Estimation based on Smart Meter Readings. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(2):95–106. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-2-95-1069>
12. Chen Tsai-Hsiang, Yang Wen-Chih. Analysis of Multi-Grounded Four-Wire Distribution Systems considering the Neutral Grounding. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2001;16(4):710–717. <https://doi.org/10.1109/61.956760>
13. Chen Tsai-Hsiang, Chang Yung-Liang. Integrated Models of Distribution Transformers and Their Loads for Three-Phase Power Flow Analyses. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1996;11(1):507–513. <https://doi.org/10.1109/61.484135>
14. Baptidanov LN, Kozis VL, Neklepaev BN, Nechaev BV, Okolovich MN, Soldatkina LA, et al. *Electrical Networks and Power Plants*. Moscow: Gosenergoizdat; 1963, 464 p. (In Russ.)
15. Gao Yuanqi, Yu Nanpeng. State Estimation for Unbalanced Electric Power Distribution Systems using AMI Data. In: *Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference*. 2017. P. 1–5. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8085999> [Accessed 3rd February 2020]. <https://doi.org/10.1109/ISGT.2017.8085999>
16. Ni Fei, Nguyen Phuong Hong, Cobben JFG, Van den Brom HE, Zhao Dongsheng. Three-Phase State Estimation in the Medium-Voltage Network with Aggregated Smart Meter Data. *International Journal of Elec-*



*trical Power & Energy Systems*. 2018;98:463–473. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.12.033>

17. Liu Yikui, Li Jie, Wu Lei. State Estimation of Three-Phase Four-Conductor Distribution Systems with Real-Time Data from Selective Smart Meters. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2019;34(4):2632–2643. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2892726>

18. Penido DRR, De Araujo LR, Carneiro S, Pereira JLR, Garcia PAN. Three-Phase Power Flow based on Four-Conductor Current Injection Method for Unbalanced Distribution Networks. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2008;23(2):494–503. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2008.919423>

19. Aschmoneit FC, Peterson NM, Adrian EC. State

Estimation with Equality Constraints. In: *10th Power Industry Computer Application: Conference Proceedings*. May 1977, Toronto. Toronto; 1977, p. 427–430.

20. Golub I, Boloev E. Methods of Linear and Nonlinear State Estimation of Distribution Network. In: *Rudenko International Conference on Methodological Problems in Reliability Study of Large Energy Systems: E3S International Web of Conferences*. 2018;58:5. Available from: [https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2018/33/e3sconf\\_rses2018\\_03010/e3sconf\\_rses2018\\_03010.html](https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2018/33/e3sconf_rses2018_03010/e3sconf_rses2018_03010.html) [Accessed 3rd February 2020]. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185803010>

### Библиографический список

1. Kersting W.H. Radial distribution test feeders // *IEEE Transactions on Power Systems*. 1991. Vol. 6. Issue 3. P. 975–985. <https://doi.org/10.1109/59.119237>

2. Журавлев В.В. Электрические сети в новом формате. Деловые встречи и обсуждения // *Новости Электротехники*. 2018. № 5-6. С. 20–29.

3. Pappu S.J., Bhatt N., Pasumarthy R., Rajeswaran A. Identifying Topology of Low Voltage Distribution Networks Based on Smart Meter Data // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2018. Vol. 9. Issue 5. P. 5113–5122. <https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2680542>

4. Olivier F., Ernst D., Fonteneau R. Automatic phase identification of smart meter measurement data // *CIREN – Open Access Proceedings Journal*. 2017. Issue 1. P. 1579–1583. <https://doi.org/10.1049/oap-cired.2017.1143>

5. Golub I., Boloev E., Kuzkina Y. Using smart meters for checking the topology and power flow calculation of a secondary distribution Network // *Methodological Problems in Reliability Study of Large Energy Systems: International E3S Web Conference*. 2019. Vol. 139. 5 p. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/65/e3sconf\\_rses2019\\_01059/e3sconf\\_rses2019\\_01059.html](https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/65/e3sconf_rses2019_01059/e3sconf_rses2019_01059.html) (04.02.2020). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913901059>

6. Ciric R.M., Feltrin A.P., Ochoa L.F. Power flow in four-wire distribution networks-general approach // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2003. Vol. 18. Issue 4. P. 1283–1290. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2003.818597>

7. Cheng C.S., Shirmohammadi D. A three-phase power flow method for real-time distribution system analysis // *IEEE Transactions on Power Systems*. 1995. Vol. 10. Issue 2. P. 671–679. <https://doi.org/10.1109/59.387902>

8. Olival P.C., Madureira A.G., Matos M. Advanced voltage control for smart microgrids using distributed energy resources // *Electric Power Systems Research*. 2017. Vol. 146. P. 132–140. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.01.027>

9. Waeresch D., Brandalik R., Wellssow W.H., Jordan J., Bischler R., Schneider N. Linear state estimation in low voltage grids based on smart meter data // *Eindho-*

*ven PowerTech*. 2015. [Электронный ресурс]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7232343> (04.02.2020). <https://doi.org/10.1109/PTC.2015.7232343>

10. Pau M., Patti E., Barbierato L., Estebarsari A., Pons E., Ponci F., Monti A. Low voltage system state estimation based on smart metering infrastructure // *International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (Aachen, 28–30 September 2016)*. Aachen: IEEE, 2016. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/AMPS.2016.7602804>

11. Болоев Е.В., Голуб И.И., Федчишин В.В. Оценка состояния распределительной сети низкого напряжения по измерениям интеллектуальных счетчиков // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018. Т. 22. № 2. С. 95–106. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-2-95-106>

12. Chen Tsai-Hsiang, Yang Wen-Chih. Analysis of multi-grounded four-wire distribution systems considering the neutral grounding // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2001. Vol. 16. Issue 4. P. 710–717. <https://doi.org/10.1109/61.956760>

13. Chen Tsai-Hsiang, Chang Yung-Liang. Integrated models of distribution transformers and their loads for three-phase power flow analyses // *IEEE Transactions on Power delivery*. 1996. Vol. 11. Issue 1. P. 507–513. <https://doi.org/10.1109/61.484135>

14. Баптиданов Л.Н., Козис В.Л., Неклепаев Б.Н., Нечаев Б.В., Околович М.Н., Солдаткина Л.А. [и др.]. *Электрические сети и станции*. М.: Госэнергоиздат, 1963. 464 с.

15. Gao Yuanqi, Yu Nanpeng. State estimation for unbalanced electric power distribution systems using AMI data // *Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference*. 2017. P. 1–5. [Электронный ресурс]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8085999> (03.02.2020). <https://doi.org/10.1109/ISGT.2017.8085999>

16. Ni Fei, Nguyen Phuong Hong, Cobben J.F.G., Van den Brom H.E., Zhao Dongsheng. Three-phase state estimation in the medium-voltage network with aggregated smart meter data // *International Journal of Elec-*

trical Power & Energy Systems. 2018. Vol. 98. P. 463–473. <https://doi.org/10.1016/j.jpew.2017.12.033>

17. Liu Yikui, Li Jie, Wu Lei. State Estimation of Three-Phase Four-Conductor Distribution Systems With Real-Time Data From Selective Smart Meters // IEEE Transactions on Power Systems. 2019. Vol. 34. Issue 4. P. 2632–2643.

<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2892726>

18. Penido D.R.R., De Araujo L.R., Carneiro S., Pereira J.L.R., Garcia P.A.N. Three-phase power flow based on four-conductor current injection method for unbalanced distribution networks // IEEE Transactions on Power Systems. 2008. Vol. 23. Issue 2. P. 494–503. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2008.919423>

#### Authorship criteria

Kuzkina Ya.I., Golub I.I., Boloev E.V. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

#### Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

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

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

##### Yana I. Kuzkina,

First Category Engineer of the Design Sector, Relay Protection and Automation Service, Irkutskenergo Engineering Center LLC, 67, Ryabikov Blvd., Irkutsk 664043, Russia; Postgraduate Student, Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, 130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia; e-mail: yaigk@yandex.ru

##### Irina I. Golub,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Leading Researcher, Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, 130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia; ✉ e-mail: golub@isem.irk.ru

##### Evgeniy V. Boloev,

Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, 130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia; e-mail: boloev@isem.irk.ru

19. Aschmoneit F.C., Peterson N.M., Adrian E.C. State estimation with equality constraints // 10th Power Industry Computer Application: Conference Proceedings. May 1977, Toronto. Toronto, 1977. P. 427–430.

20. Golub I., Boloev E. Methods of linear and nonlinear state estimation of distribution network // Rudenko International Conference on Methodological Problems in Reliability Study of Large Energy Systems: E3S International Web of Conferences. 2018. Vol. 58. 5 p. [Электронный ресурс]. URL:

[https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2018/33/e3sconf\\_rses2018\\_03010/e3sconf\\_rses2018\\_03010.html](https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2018/33/e3sconf_rses2018_03010/e3sconf_rses2018_03010.html) (03.02.2020).

<https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185803010>

#### Критерии авторства

Кузькина Я.И., Голуб И.И., Болоев Е.В. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

##### Кузькина Яна Игоревна,

инженер 1 категории сектора проектирования, Служба релейной защиты и автоматики, ООО «Инженерный центр «Иркутскэнерго», 664043, г. Иркутск, бул. Рябикова, 67, Россия; аспирант, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия; e-mail: yaigk@yandex.ru

##### Голуб Ирина Ивановна,

доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия; ✉ e-mail: golub@isem.irk.ru

##### Болоев Евгений Викторович,

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия; e-mail: boloev@isem.irk.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.762.52

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-663-671>

## Повышение механических свойств композиционных алюминиевых сплавов при вводе карбида бора

© А.Л.А. Алаттар\*, В.Ю. Бажин\*, А.А. Власов\*\*

\*Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия.

\*\*Ассоциация «Молодежная площадка профессиональных металлургов», г. Красноярск, Россия

**Резюме:** Цель – получение металлического композиционного материала на основе сплава алюминия Al – 5%Cu с введением добавок карбида бора  $B_4C$  и изучение микроструктурных особенностей и механических свойств литых заготовок на его основе. Литые заготовки из алюминиевого сплава, содержащего 5% масс. Cu с различным (от 2 до 7% масс.) содержанием карбида бора, готовили в лабораторных машинах литья под давлением (частицы  $B_4C$  крупностью 5–7 мкм вводили в расплав при непрерывном перемешивании непосредственно перед литьем). Испытания образцов на растяжение при удлинении 0,1–0,5 мм осуществляли на разрывных машинах марки «Shimadzu» в соответствии со стандартами ASTM. Изучение микроструктуры экспериментальных образцов проводили методом сканирующей электронной микроскопии с помощью микроскопа INSPECT S50 (FEI, Нидерланды). При изучении микроструктуры образцов установлено, что при введении карбида бора в алюминиевую матрицу композит содержит включения промежуточной фазы кристаллизации  $Al_2Cu$  и распределенные по всему объему матрицы включения частиц  $B_4C$ ; имеются зоны пористости в виде слабого контакта матричного материала с встраиваемой поверхностью армированной частицы карбида бора, фиксируется высокий уровень смачивания матричным расплавом, что приводит к равномерному распределению частиц в объеме матрицы. Наилучшие показатели по твердости (113 HV) и пределу прочности на растяжение (~180 МПа) имеют образцы с добавкой карбида бора в количестве 5%: при данном содержании наблюдается низкая ликвация частиц в объеме матрицы Al–Cu и, как следствие, равномерная мелкозернистая структура заготовки для выбранного состава композита. По результатам исследований рекомендован в качестве материала для изготовления изделий с требуемыми твердостью и прочностью состав композита, получаемого литьем под давлением, на основе сплава Al – 5%Cu с добавкой частиц карбида бора 5%.

**Ключевые слова:** алюминиевые матричные композиты, сканирующая электронная микроскопия, карбид бора, литье под давлением, металлические композиционные материалы, механические свойства

**Информация о статье:** Дата поступления 09 января 2020 г.; дата принятия к печати 29 мая 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 июня 2020 г.

**Для цитирования:** Алаттар А.Л.А., Бажин В.Ю., Власов А.А. Повышение механических свойств композиционных алюминиевых сплавов при вводе карбида бора. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 3. С. 663–671. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-663-671>

## Investigation into the use of boron carbide to improve the mechanical properties of composite aluminium alloys

Aboelkhair A.L. Alattar\*, Vladimir Yu. Bazhin\*, Alexander A. Vlasov\*\*

\*St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia

\*\*Youth Platform of Professional Metallurgists Association, Krasnoyarsk, Russia

**Abstract:** The present work is aimed at obtaining a metal composite material based on Al – 5%Cu aluminium alloy by the addition of  $B_4C$  boron carbide and studying the microstructural features and mechanical properties of cast billets based on this material. Aluminium alloy cast billets containing 5%wt. of Cu with a boron carbide content varying from 2–7 wt% were prepared in laboratory die casting machines. Immediately prior to casting,  $B_4C$  particles with a size of 5–7  $\mu m$  were introduced into the melt under continuous stirring. A tensile test of the samples having an elongation of 0.1–0.5 mm was carried out by Shimadzu tensile testing machines in accordance with ASTM standards. The microstructure of the experimental samples was studied by scanning electron microscopy using an INSPECT S50 microscope (FEI, Netherlands). In terms of the aluminium matrix microstructure following the introduction of boron carbide, the composite was established to contain inclusions of the  $Al_2Cu$  intermediate crystallisation phase and  $B_4C$  particle inclusion matrices

distributed throughout the entire sample volume. Porosity zones were detected in the form of weak contact of the matrix material with the embedded surface of the boron carbide reinforced particle. A high level of wetting by the matrix melt was observed, leading to a uniform distribution of particles in the matrix. The best indicators of hardness (113 HV) and tensile strength (~180 MPa) are characteristic of the samples with the addition of boron carbide in an amount of 5%. At this content, due to the low observed particle segregation in the volume of the Al–Cu matrix, a uniform fine-grained billet structure for the selected composition of the alloy was obtained. According to the research results, the composition of the alloy obtained by die casting based on Al-5%Cu alloy with the addition of boron carbide in amount of 5% can be recommended as a suitable material for the manufacture of products with due to its attractive hardness and strength properties.

**Keywords:** aluminium matrix composites, scanning electron microscopy, boron carbide, die casting, metal composite materials, mechanical properties

**Information about the article:** Received January 09, 2020; accepted for publication May 29, 2020; available online June 30, 2020.

**For citation:** Alattar ALA, Bazhin VYu, Vlasov AA. Investigation into the use of boron carbide to improve the mechanical properties of composite aluminium alloys. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(3):663–671. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-663-671>

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Композиционные алюминиевые сплавы на современном этапе являются важной группой конструкционных материалов [1–8], которые содержат комбинацию из двух или более материалов с четкой границей между ними. Разработка и применение металлических композиционных материалов (МКМ), состоящих из матрицы и распределенных в ней армирующих элементов, и благодаря этому имеющих качественно новые, часто уникальные свойства, составляют одно из ключевых направлений развития современного материаловедения. В большинстве случаев только МКМ могут удовлетворить требования новых технологий, которые характеризуются ужесточением условий эксплуатации: повышенные нагрузки, значительные скорости, высокие температуры, агрессивность эксплуатируемой среды, снижение общей массы<sup>1</sup> [9].

Материал матрицы должен быть тщательно выбран в зависимости от его свойств и поведения при армировании частицами. Поскольку он является основным компонентом в МКМ, сплав матрицы следует выбирать только после тщательного анализа его химической совместимости с частицами, способности максимально сма-

чивать их поверхность, а также его собственных свойств и механических характеристик после литья заготовки [10].

Алюминиево-металлические матричные композиты приобрели широкое распространение благодаря своим улучшенным трибологическим свойствам, которые заменяют их монолитные аналоги в первую очередь в автомобильной, аэрокосмической и энергетической областях. МКМ на основе алюминия являются «легкими композитами» и не только обеспечивают высокий уровень пластичности, но и повышенную ударную вязкость, а также приобретают свойства, характерные для керамических изделий, такие как твердость, высокая прочность и хороший модуль упругости. Размер, объемная доля и распределение армированного элемента в алюминиевой матрице являются важными факторами, от которых зависят общие свойства МКМ. Чтобы иметь лучшие механические свойства, такие как прочность, твердость и стабильность размеров (коэффициент линейного расширения), армированный материал должен быть равномерно распределен, иметь минимальную ликвацию [11].

Армированные алюминием соединения могут быть получены дисперсным способом, твердофазными способами при

<sup>1</sup>Алюминиевые композиционные сплавы – сплавы будущего: учеб. пособ. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. 82 с.



получении порошков или жидкофазным способом [12]. Известные соединения алюминия [13], такие как спеченный алюминиевый порошок, в котором частицы оксида алюминия  $Al_2O_3$  выступают в качестве центров кристаллизации, получают путем спекания твердой фазы алюминиевых порошков, покрытых оксидной пленкой [14]. Среди известных способов получения композиционных литейных материалов можно выделить методы образования твердых примесей [15], инжекцию твердых частиц газом [16], сложных потоков [17] и плавление смеси порошков [18]. Однако эти методы не нашли широкого применения по причинам высокой себестоимости производства, необходимости длительной предварительной подготовки порошковых материалов, и проведения процесса при высоких температурах плавления компонентов. Кроме того, все эти способы связаны с оценкой сбора данных о распределении частиц в композите, но на практике фактически не контролируются.

Среди различных керамических частиц частицы  $B_4C$  являются одними из наиболее перспективных из-за их высокой прочности, низкой плотности, чрезвычайно высокой твердости и износостойкости, хорошей химической стабильности, способности поглощать нейтроны [19–21]. Кроме этого, частицы карбида бора имеют высокоразвитую поверхность, что обеспечивает хорошие смачиваемость и контакт в матричном сплаве.

После механического перемешивания при плавлении сплава  $Al - 5\%Cu$  снижается температура ликвидуса расплава, и дополнительный этап кристаллизации под давлением является эффективным средством для процессов восстановления газов и уменьшения пористости с последующей корректировкой зеренной структуры [22].

Преимуществом в использовании частиц карбида бора является их доступность и распространенность в природе.  $B_4C$  имеет высокий уровень твердости, облада-

ет низкой плотностью, химической стойкостью без взаимодействия с компонентами матрицы. Однако одним из недостатков карбида бора является его низкая теплопроводность<sup>2</sup> [23].

В работе изучаются и сравниваются микроструктурные особенности и механические свойства литых заготовок на основе стандартного сплава  $Al - 5\%Cu$  при изменении концентрации частиц  $B_4C$ , которые получены методом литья расплава в жидко-твердом состоянии под давлением.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Литые заготовки на основе алюминийсодержащего сплава готовили в специальных машинах литья под давлением. Частицы карбида бора крупностью 5–7 мкм вводили непосредственно в расплав при постоянном перемешивании перед литьем.

В ходе исследования проводили испытание 4 образцов размером 30x60 мм на растяжение, которое выполняли на разрывных машинах компании «АНАЛИТ» марки «Shimadzu» в соответствии со стандартами ASTM для разного состава композитов ( $Al - 5\%Cu$ ;  $Al - 5\%Cu - 2\%B_4C$ ;  $Al - 5\%Cu - 5\%B_4C$ ;  $Al - 5\%Cu - 7\%B_4C$ ).

Для каждого образца было выполнены измерения на растяжение, относительное удлинение, твердость (таблица).

Величина нагрузки на растяжение постепенно увеличивается с повышением содержания частиц  $B_4C$  в матрице. Свойства испытываемых композитов в основном зависят от % удлинения при разрыве отдельных образцов.

На рис. 1 показано изменение показателя прочности на растяжение при увеличении величины армирования матрицы карбидом бора (2%, 5% и 7%). Прочность образца композита  $Al - 5\%Cu$  с добавлением 2%  $B_4C$  ниже, чем прочность  $Al - 5\%Cu$  с добавлением 5%  $B_4C$ .

<sup>2</sup>Горшенков М.В. Высоконаполненные алюминиевые композиты, упрочненные борсодержащими частицами: структура и свойства: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.09. М., 2013. 199 с.

Результаты на удлинение образца  
 Results of sample elongation

№ образца	Состав композита	Величина удлинения, мм				
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
		Нагрузка, Н				
1	Al – 5%Cu	3544	4272	4882	5306	5492
2	Al – 5%Cu – 2%B <sub>4</sub> C	3917	4483	4973	5435	5630
3	Al – 5%Cu – 5%B <sub>4</sub> C	4072	4574	5098	5562	5745
4	Al – 5%Cu – 7%B <sub>4</sub> C	4187	4681	5167	5678	5897

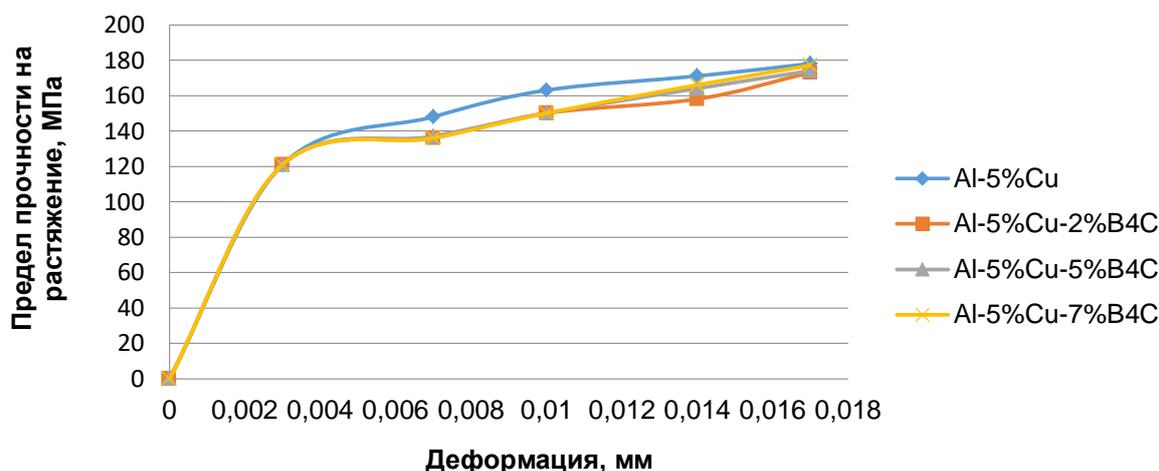


Рис. 1. Кривая зависимости напряжения от деформации для металлического матричного композита Al – 5%Cu с различным содержанием B<sub>4</sub>C  
 Fig. 1. Stress-strain curve for Al – 5%Cu metal matrix composite with different B<sub>4</sub>C contents

Видно, что при увеличении нагрузки прочность Al – 5%Cu с добавлением 2% B<sub>4</sub>C ниже, чем прочность Al – 5%Cu с содержанием 5% масс. B<sub>4</sub>C. Изменения показателя прочности соответствуют структурным изменениям, которые в нашем случае подтверждаются результатами микроструктурного анализа. Однако для всех испытуемых образцов сохраняется общая тенденция роста предела прочности на растяжение.

При изучении твердости полученных образцов установлено, что без добавки карбида бора образец имеет твердость 104 HV, а уже с содержанием 5% B<sub>4</sub>C – 113 HV.

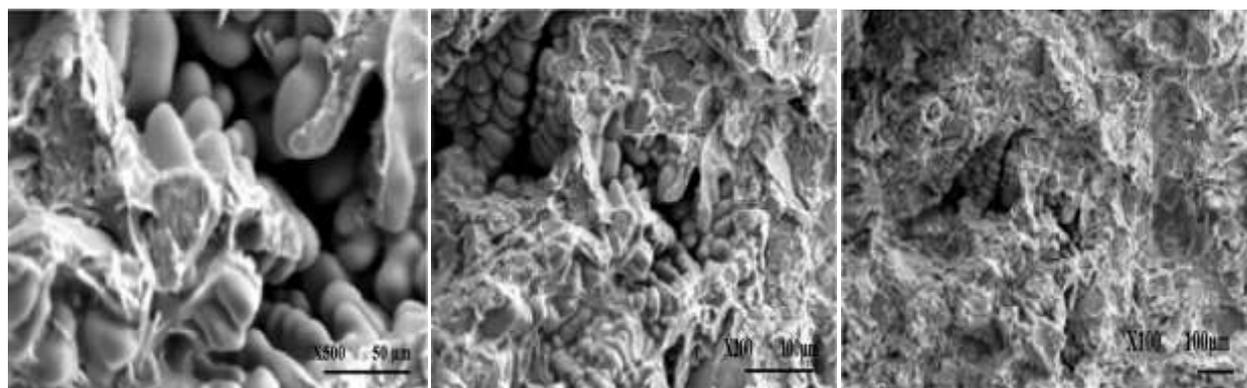
### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для изучения микроструктуры образцов с различным содержанием карбида бора, а в матрице алюминиевого сплава – с медью, использовали метод сканирующей

электронной микроскопии (СЭМ) с помощью микроскопа INSPECT S50 (FEI, Нидерланды); изученные образцы: сплав Al – 5%Cu с добавками B<sub>4</sub>C 2, 5, 7% масс.

Микроструктуры алюминиевого композита показаны на рис. 2–4. Хорошо видны участки зеренной структуры и их равномерное распределение по объему. Обозначены зоны точечной коррозии и пористости в виде низкого контакта матричного материала с встраиваемой поверхностью армированной частицы карбида.

На рис. 2–4 представлены микроструктуры композитов на основе сплава Al – 5%Cu с различным содержанием упрочняющих частиц B<sub>4</sub>C. Помимо твердого раствора алюминия, структуры содержат (яркий фон) включения промежуточной фазы кристаллизации Al<sub>2</sub>Cu и (темный фон) равномерно распределенные включения частиц B<sub>4</sub>C.



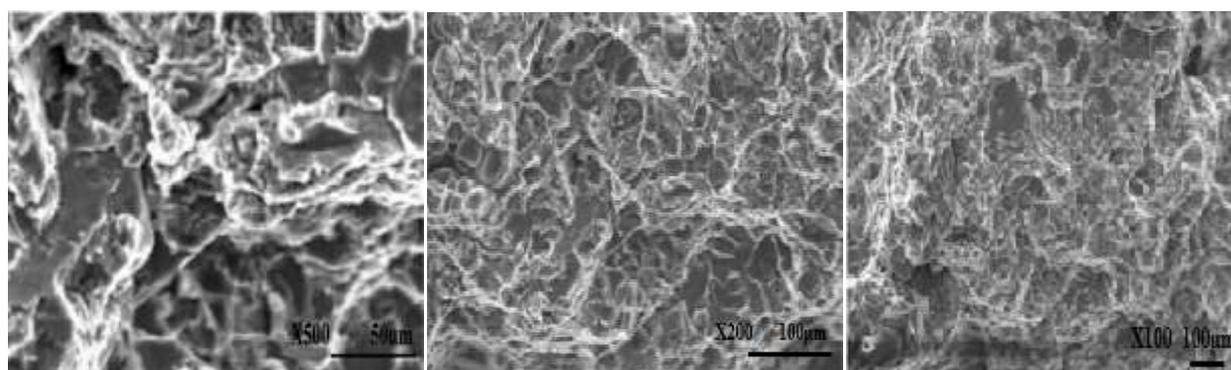
a

b

c

Рис. 2. Микрофотография (результат сканирующей электронной микроскопии) испытываемого на растяжение образца смеси Al – 5%Cu – 2%B<sub>4</sub>C при увеличении: а – х500; б – х200; с – х100

Fig. 2. Micrograph (SEM result) of the tensile test of a sample mixture Al – 5%Cu – 2%B<sub>4</sub>C at: a – 500x; b – 200x; c – 100x magnification



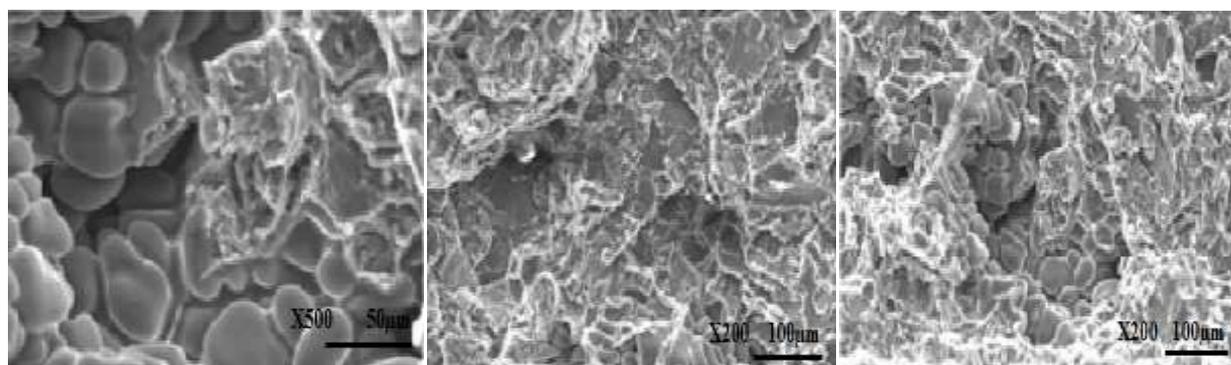
a

b

c

Рис. 3. Микрофотография (результат сканирующей электронной микроскопии) испытываемого на растяжение образца смеси Al – 5%Cu – 5%B<sub>4</sub>C при увеличении:  
а – х500; б – х200; с – х100

Fig. 3. Micrograph (SEM result) of the tensile test of a sample mixture Al – 5%Cu – 5%B<sub>4</sub>C at: a – 500x; b – 200x; c – 100x magnification



a

b

c

Рис. 4. Микрофотография (результат сканирующей электронной микроскопии) испытываемого на растяжение образца смеси Al – 5%Cu – 7%B<sub>4</sub>C при увеличении: а – х500; б – х200; с – х100

Fig. 4. Micrograph (SEM result) of the tensile test of a sample mixture Al – 5%Cu – 7%B<sub>4</sub>C at: a – 500x; b – 200x; c – 100x magnification

На рис. 3 можно четко обнаружить плоскую границу межфазного взаимодействия матрицы и частицы.

На рис. 4 видны границы раздела между матрицей и упрочняющими частицами. Обнаруженная локальная пористость связана с плохой смачиваемостью частиц карбида бора матричным материалом. Также можно увидеть диффузию бора в матрице и присутствие фазы  $Al_2Cu$  вокруг частицы. Хорошая межфазная связь армирующих частиц и матрицы помогает придать заготовке из композиционного сплава необходимые механические и физические свойства. Анализ результатов испытаний образцов показал, что при повышении содержания карбида бора пластичность материала снижается на 15–20%, что, в свою очередь, приводит к значительному увеличению твердости НВ. Исследования микроструктур методом сканирующей электронной микроскопии показали, что дисперсия частиц микронного размера более однородна, в то время как гибридные частицы приводили к агломерации частиц.

Необходимо отметить хорошую связь между частицами карбида бора и матрицей, где матрица плотно прикреплена к частице без пор и трещин на границе раздела.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последние годы композиционные материалы на основе алюминия и его сплавов стали перспективным материалом

высокого класса. Свойства и износ являются основными параметрами материала, необходимыми при проектировании и улучшении сложных конструкций. Композиты, армированные карбидом бора, экономичны и представляют собой очень перспективные материалы, особенно в области электроники и автомобилестроения. Добавка карбида бора придает материалам уникальные механические свойства, такие как твердость и прочность на растяжение. Матричные материалы, полученные литьем под давлением, на основе сплава  $Al - 5\%Cu$  с добавкой частиц  $B_4C$  до 5% имеют более высокие (по сравнению с сплавом, взятым за основу) показатели по твердости (113 V), пределу прочности на растяжение (~180 МПа) и равномерности распределения элементов в матрице, что доказывается микроскопическим исследованием структуры изучаемых образцов композита.

Результаты исследования показывают, что для производства композитов процесс литья под давлением имеет технологические и экономические преимущества. По сравнению с композитами, усиленными микрочастицами, по сравнению с композитами с гибридными частицами имеют оптимальную твердость и прочность. Сканирующие электронно-микроскопические исследования микроструктур образцов сплава показали, что дисперсия частиц микронного размера более однородна, в то время как гибридные частицы приводили к агломерации частиц.

#### Библиографический список

1. Shao Chenwei, Zhao Shuo, Wang Xuegang, Zhu Yankun, Zhang Zhefeng, Ritchie R.O. Architecture of high-strength aluminum–matrix composites processed by a novel microcasting technique // *NPG Asia Materials*. 2019. Vol. 11. No. 69. P. 148–150. <https://doi.org/10.1038/s41427-019-0174-2>
2. Joel J., Anthony Xavior M. Aluminium Alloy Composites and its Machinability studies; A Review // *PARIPEX - Indian Journal of Research*. 2018. Vol. 5. Issue. 5. Part. 2. P. 13556–13562. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.351>
3. Li Xin, Yan Hong, Wang Zhi-Wei, Li Ning, Liu Jian-Long, Nie Qiao. Effect of Heat Treatment on the Micro-

- structure and Mechanical Properties of a Composite Made of  $Al-Si-Cu-Mg$  Aluminum Alloy Reinforced with  $SiC$  Particles // *Metals*. 2019. Vol. 9. Issue 11. P. 1205. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mdpi.com/2075-4701/9/11/1205> (05.02.2019). <https://doi.org/10.3390/met911120>
4. Mavhungu S.T., Akinlabi E.T., Onitiri M.A., Varachia F.M. Aluminium Matrix Composites for Industrial Use: Advances and Trends // *Procedia Manufacturing*. 2017. Vol. 7. P. 178–182. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.12.045>
5. Thirumoorthy A., Arjunan T.V., Senthil Kumar K.L. Latest Research Development in Aluminum Matrix with



- Particulate Reinforcement Composites – A Review // *Materials Today Proceedings*. 2018. Vol. 5. No. 1. P. 1657–1665.
6. Ramnath B.V., Elanchezian C., Annamalai R.M., Aravind S., Atreya T.S.A., Vignesh V., et al. Aluminium Metal Matrix Composites – A Review // *Reviews on Advanced Materials Science*. 2014. Vol. 38. P. 55–60.
7. Достоева А.М., Смагулов Д.У., Немчинова Н.В. Расчет и экспериментальное исследование фазовых превращений в сплавах системы Al-Zr-Fe-Si // «Металлургия: технологии, инновации, качество» «Металлургия – 2017»: труды XX Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч. (г. Новокузнецк, 15–16 ноября 2017 г.). Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2017. Ч. 1. С. 39–44.
8. Гусева Е.А., Константинова М.В., Гусев А.О. Пути повышения надежности промышленного оборудования // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2013. № 10. С. 218–224.
9. Романов А.Д., Чернышов Е.А., Мильников В.В., Романова Е.А. Разработка технологии получения композиционного материала на основе алюминия // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2014. № 12. Ч. 2. С. 176–179. [Электронный ресурс]. URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=6292> (16.02.2019).
10. Левашов Е.А., Рогачев А.С., Юхвид В.И., Боровинская И.П. Физико-химические и технологические основы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. М.: Бином, 1999. 176 с.
11. Кнорозов Б.В., Усова Л.Ф., Третьяков А.В., Китаев Я.А., Филькин В.М., Шевченко А.А. [и др.]. Технология металлов и материаловедение. М.: Metallurgia, 1987. 800 с.
12. Teresiak A., Kubsch H. X-ray investigations of high energy ball milled transition metal carbides // *Nanostructured Materials*. 1995. Vol. 6. Issue. 5-8. P. 671–674. [https://doi.org/10.1016/0965-9773\(95\)00147-6](https://doi.org/10.1016/0965-9773(95)00147-6)
13. Попов В.А., Мармулев А.В., Кондратенков М.Ю. Теоретическая оценка возможности получения металлломатричных композитов с малым размером упрочняющих частиц // *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2005. № 1. С. 52–56.
14. Ahlatci H., Koçer T., Candan E., Çimenoğlu H. Wear behaviour of Al/(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+SiC<sub>p</sub>) hybrid composites // *Tribology International*. 2006. Vol. 39. No. 3. P. 213–220. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.01.029>
15. Bazhin V.Yu., Alattar A.L., Danilov I.V. Development of technologies for the production of multi-component ligatures Al-Cu-B-C with high thermal characteristics // *IOP Conference series: Material Science and Engineering*. 2019. Vol. 537. Issue 2. P. 134–142. [Электронный ресурс]. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/537/2/022037> (27.01.2019). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/537/2/022037>
16. Калашников И.Е., Болотова Л.К., Чернышова Т.А. Влияние наноразмерных тугоплавких добавок на кристаллизацию алюмоматричных композиционных материалов, произведенных в процессе in-situ // *Кинетика и механизм: тез. докладов VI Междунар. науч. конф. (г. Иваново, 21–24 сентября 2010 г.)*. Иваново, 2010. С. 182.
17. Шумихин В.С. Билецкий А.К., Щерецкий А.А. Композиционные сплавы на основе алюминия // *Литейное производство*. 1992. № 9. С. 13–14.
18. Абузин Ю.А. Неравновесные структуры в металлических композиционных материалах // *Металлургия машиностроения*. 2009. № 6. С. 32–35.
19. Robson J.D., Prangnell P.B. Modelling Al<sub>3</sub>Zr dispersoid precipitation in multicomponent aluminium alloys // *Materials Science and Engineering: A*. 2003. Vol. 352. Issue 1–2. P. 240–250. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00894-8](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00894-8)
20. Schöbel M., Pongratz P., Degischer H.P. Coherency loss of Al<sub>3</sub>(Sc, Zr) precipitates by deformation of an Al-Zn-Mg alloy // *Acta Materialia*. 2012. No. 60. Issue 10. P. 4247–4254. <http://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.04.011>
21. Canakci A., Arslan F., Varol T. Effect of volume fraction and size of B<sub>4</sub>C particles on production and microstructure properties of B<sub>4</sub>C reinforced aluminium alloy composites // *Materials Science and Technology*. 2013. Vol. 29. Issue 8. P. 954–950. <http://doi.org/10.1179/1743284713Y.0000000232>
22. Xing Hongwei, Cao Xiaoming, Hu Wanping, Zhao Longzhi, Zhang Jinsong. Interfacial reactions in 3D-SiC network reinforced Cu-matrix composites prepared by squeeze casting // *Materials Letters*. 2005. Vol. 59. Issue 12. P. 1563–1566. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2005.01.023>
23. Курбаткина Е.И., Белов Н.А., Горшенков М.В. Структура и фазовый состав композиционных гранул на основе термостойкого алюминиевого сплава АЛТЭК с борсодержащим наполнителем // *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2012. № 3. С. 33–36.

## References

1. Shao Chenwei, Zhao Shuo, Wang Xuegang, Zhu Yankun, Zhang Zhefeng, Ritchie RO. Architecture of High-Strength Aluminum–Matrix Composites Processed by a Novel Microcasting Technique. *NPG Asia Materials*. 2019;11(69):148–150. <https://doi.org/10.1038/s41427-019-0174-2>
2. Joel J, Anthony Xavier M. Aluminium Alloy Composites and its Machinability Studies; A Review. *PARIPEX - Indian Journal of Research*. 2018;5(2):13556–13562. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.351>
3. Li Xin, Yan Hong, Wang Zhi-Wei, Li Ning, Liu Jian-Long, Nie Qiao. Effect of Heat Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of a Composite Made of Al-Si-Cu-Mg Aluminum Alloy Reinforced with

- SiC Particles. *Metals*. 2019;9(11):1205. Available from: <https://www.mdpi.com/2075-4701/9/11/1205> [Accessed 5th February 2019]. <https://doi.org/10.3390/met9111204>
4. Mavhangu ST, Akinlabi ET, Onitiri MA, Varachia FM. Aluminum Matrix Composites for Industrial Use: Advances and Trends. *Procedia Manufacturing*. 2017;7:178–182. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.12.045>.
5. Thirumoorthy A, Arjunan TV, Senthil Kumar KL. Latest Research Development in Aluminum Matrix with Particulate Reinforcement Composites – A Review. *Materials Today Proceedings*. 2018;5(1):1657–1665.
6. Ramnath BV, Elanchezian C, Annamalai RM, Aravind S, Atreya TSA, Vignesh V, et al. Aluminium Metal Matrix Composites – A Review. *Reviews on Advanced Materials Science*. 2014;38:55–60.
7. Dostayeva AM, Smagulov DU, Nemchinova NV. Calculation and Pilot Study of Phase Transformations in Alloys of the Al-Zr-Fe-Si System. In: *Metallurgiya: tekhnologii, innovatsii, kachestvo "Metallurgiya – 2017": trudy XX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii – Metallurgy: Technology, Innovation, Quality "Metallurgy – 2017": Proceedings of XX International Scientific and Practical Conference*. 15–16 November 2017, Novokuznetsk. Novokuznetsk: Siberian State Industrial University; 2017, part 1, p. 39–44. (In Russ.)
8. Guseva EA, Konstantinova MV, Gusev AO. Ways to Improve Industrial Equipment Reliability. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2013;10:218–224. (In Russ.)
9. Romanov AD, Chernyshov EA, Mylnikov VV, Romanova EA. Development of Technology of Receiving Composite Material on the Basis of Aluminum. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy = International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2014;12:176–179. Available from: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=6292> [Accessed 16th February 2019]. (In Russ.)
10. Levashov EA, Rogachev AS, Yuhvid VI, Borovinskaya IP. *Physicochemical and Technological Fundamentals of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*. Moscow: Binom; 1999, 176 p. (In Russ.)
11. Knorozov BV, Usova LF, Tretyakov AV, Kitaev YA, Filkin VM, Shevchenko AA, et al. *Technology of Metals and Metal Science*. Moscow: Metallurgiya; 1987, 800 p. (In Russ.)
12. Teresiak A, Kubsch H. X-ray Investigations of High Energy Ball Milled Transition Metal Carbides. *Nanostructured Materials*. 1995;6(5-8):671–674. [https://doi.org/10.1016/0965-9773\(95\)00147-6](https://doi.org/10.1016/0965-9773(95)00147-6)
13. Popov VA, Marmulev AV, Kondratenkov MYu. A Theoretical Estimation of Possibility to Produce Metal-Matrix Composites with Small Particles. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya = Universities' Proceedings. Non-Ferrous Metallurgy*. 2005;1:52–56. (In Russ.)
14. Ahlatci H, Koçer T, Candan E, Çimenoglu H. Wear Behaviour of Al/(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+SiC<sub>p</sub>) Hybrid Composites. *Tribology International*. 2006;39(3):213–220. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.01.029>
15. Bazhin VYu, Alattar AL, Danilov IV. Development of Technologies for the Production of Multi-Component Ligatures Al-Cu-B-C with High Thermal Characteristics. In: *Material Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2019;537(2):134–142. Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/537/2/022037> [Accessed 27th January 2019]. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/537/2/022037>
16. Kalashnikov IE, Bolotova LK, Chernyshova TA. Effect of Nanoscale Refractory Additives on Crystallization of Aluminomatrix Composite Materials Produced In-Situ. In: *Kinetika i mehanizm: tezisy dokladov VI Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii = Kinetics and Mechanism: Abstracts of Reports of VI International Scientific Conference*. 21–24 September 2010, Ivanovo. Ivanovo; 2010, p. 182. (In Russ.)
17. Shumikhin VS, Biletsky AK. Aluminum-based Composite Alloys. *Liteinoye Proizvodstvo = Foundry. Technologies and Equipment*. 1992;9:13–14. (In Russ.)
18. Abuzin YA. Non-Equilibrium Structures in Metal Composites. *Metallurgiya mashinostroyeniya = Metallurgy of Machinery Building*. 2009;6:32–35. (In Russ.)
19. Robson JD, Prangnell PB. Modelling Al<sub>3</sub>Zr Dispersoid Precipitation in Multicomponent Aluminium Alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2003;352(1-2):240–250. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00894-8](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00894-8)
20. Schöbel M, Pongratz P, Degischer HP. Coherency Loss of Al<sub>3</sub>(Sc, Zr) Precipitates by Deformation of an Al-Zn-Mg Alloy. *Acta Materialia*. 2012;60(10):4247–4254. <http://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.04.011>
21. Canakci A, Arslan F, Varol T. Effect of Volume Fraction and Size of B<sub>4</sub>C Particles on Production and Microstructure Properties of B<sub>4</sub>C Reinforced Aluminium Alloy Composites. *Materials Science and Technology*. 2013;29(8):954–950. <http://doi.org/10.1179/1743284713Y.0000000232>
22. Xing Hongwei, Cao Xiaoming, Hu Wanping, Zhao Longzhi, Zhang Jinsong. Interfacial Reactions in 3D-SiC Network Reinforced Cu-Matrix Composites Prepared by Squeeze Casting. *Materials Letters*. 2005;59(12):1563–1566. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2005.01.023>
23. Kurbatkina EI, Belov NA, Gorshenkov MV. Structure and Phase Composition of Composite Pellet on the Basis of ALTEK Heat-Resistant Aluminum Alloy with Boron-Containing Filler. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nyye pokrytiya = Universities' Proceedings. Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2012;3:33–36. (In Russ.)



#### Критерии авторства

Алаттар А.Л.А., Бажин В.Ю., Власов А.А. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Алаттар Абоелкхайр Лоаи Абоелкхайр,**  
аспирант,  
Санкт-Петербургский горный университет,  
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2,  
Россия;  
✉ e-mail: aboelkhair.alattar@yahoo.com

**Бажин Владимир Юрьевич,**  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой автоматизации  
технологических процессов и производств,  
Санкт-Петербургский горный университет,  
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2,  
Россия;  
e-mail: bazhin-alfoil@mail.ru

**Власов Александр Анатольевич,**  
кандидат технических наук,  
директор,  
Ассоциация «Молодежная площадка  
профессиональных металлургов»,  
660075, г. Красноярск, ул. Маерчака, 43 Ж, Россия;  
e-mail: wlasow87@mail.ru

#### Authorship criteria

Alattar A.A.L., Bazhin V.Yu., Vlasov A.A. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

#### Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

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

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Aboelkhair L.A. Alattar,**  
Postgraduate student,  
Saint-Petersburg Mining University  
2, 21st Line, Vasilievsky Ostrov, St. Petersburg 199106,  
Russia;  
✉ e-mail: aboelkhair.alattar@yahoo.com

**Vladimir Yu. Bazhin,**  
Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Head of the Department of Automation of  
Technological Processes and Production,  
Saint-Petersburg Mining University  
2, 21st Line, Vasilievsky Ostrov, St. Petersburg 199106,  
Russia;  
e-mail: bazhin-alfoil@mail.ru

**Alexander A. Vlasov,**  
Cand. Sc. (Eng.),  
Director,  
Youth Platform of Professional Metallurgists  
Association,  
43 Ж, Maerchak St., Krasnoyarsk 660075, Russia;  
e-mail: wlasow87@mail.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 669.054.83

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-672-683>

## Оценка технико-экономической эффективности пирометаллургической технологии переработки пылей электросталеплавильного производства

© А.Е. Патрушов

*Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия*

**Резюме:** Цель – расчет технико-экономической эффективности ранее предложенной технологии переработки пылей электросталеплавильного производства пирометаллургическим способом. Технология заключается в восстановлении железа и цинка из их кислородосодержащих форм ( $ZnFe_2O_4$  и  $ZnO$ ) активными углеродосодержащими материалами. Для проведения экспериментов по переработке техногенной пыли ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» в лабораторной установке на базе высокотемпературной печи LHT 08/17 (Nabertherm, Германия) были использованы пробы с содержанием 26,02% масс.  $ZnO$  и 37,7% масс.  $Fe_2O_3$ ; в качестве углеродистого восстановителя – уголь марки «длиннопламенный орех мелкий»; известь и кварцевый песок служили источниками шлакообразующих компонентов. Получены товарные продукты в виде гранулированного чугуна (с содержанием 96,75% масс. Fe и 2,92% масс. C) и цинкоксидного продукта (с содержанием 90,21% масс.  $ZnO$ ). Извлечение железа в чугун составило 94,0%, цинка – 91,0%. В качестве основного технологического агрегата для промышленной реализации процесса рекомендована кольцевая печь с вращающимся подом. Предложена принципиальная технологическая схема, заключающаяся в дозировании сырьевых материалов, подготовке шихтовых брикетов, проведении восстановительной плавки, разделении продуктов плавки (чугуна и шлака) и улавливании цинкосодержащих возгонов. Для оценки технико-экономической эффективности разработанной технологии в промышленных масштабах в расчет приняты затраты на строительство завода с объемом переработки пылей электросталеплавильного производства 15 тыс. т в год с установкой 1 кольцевой печи со средним диаметром 12 м. Показано, что предложенная технология позволяет получать товарный гранулированный чугун и цинкоксидный продукт в объеме 33264 т/год и 4435 т/год, соответственно. Расчетные срок окупаемости с учетом инвестиционного периода составляет 34 мес., а ожидаемая чистая прибыль – 535,59 млн руб/год.

**Ключевые слова:** техногенное сырье, пыль электросталеплавильного производства, восстановительная плавка, технико-экономическая эффективность, гранулированный чугун, цинкоксидный продукт

**Информация о статье:** Дата поступления 03 февраля 2020 г.; дата принятия к печати 25 мая 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 июня 2020 г.

**Для цитирования:** Патрушов А.Е. Оценка технико-экономической эффективности пирометаллургической технологии переработки пылей электросталеплавильного производства. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 3. С. 672–683. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-672-683>

## Technical and economic efficiency evaluation of pyrometallurgical technology for processing dust from electric steel production

A.E. Patrushov

*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

**Abstract:** An evaluation of technical and economic efficiency parameters of a previously proposed technological solution for processing dust from electric steel production by the pyrometallurgical method is presented. The technological approach consists in the reduction of iron and zinc from their oxygen-containing forms ( $ZnFe_2O_4$  and  $ZnO$ ) by active carbon-containing materials. Experiments were carried out on samples with a 26.02 and 37.7%wt. of  $ZnO$  and  $Fe_2O_3$ , respectively, to evaluate the processing of industrial dust of PJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works in a laboratory facility based on the LHT 08/17 high-temperature furnace (Nabertherm, Germany). "Small long-flame nut" brand charcoal was applied as a carbon reducing agent, with lime and quartz sand serving as sources of slag-forming components. Commercial products were obtained in the form of granular cast iron (96.75 and 2.92%wt. of Fe and C, respectively) and a zinc oxide product (90.21%wt. of  $ZnO$ ). The extraction of iron and zinc in cast iron comprised the values of 94.0 and 91.0%, respectively. As a result, an annular hearth furnace is recommended as the main technological unit for the indus-

trial implementation of the process. The basic technological scheme is proposed including dosing raw materials, preparing charge briquettes, performing reduction smelting, separation of smelting products (cast iron and slag) and trapping zinc-containing sublimates. To assess the technical and economic efficiency of the developed technology on an industrial scale, the costs of building a dust processing plant involving one annular furnace with an average diameter of 12 m having a steel production capacity of 15 000 tonnes per year were taken into account. The proposed technology was shown to be capable of supporting commercial granular cast iron and zinc oxide products in the amount of 33264 and 4435 tonnes per year, respectively. Considering the investment period, the estimated payback period is determined to be 34 months with the expected net profit equal to 535.59 million rubles/year.

**Ключевые слова:** техногенное сырье, пыль электросталеплавильного производства, восстановительная плавка, технико-экономическая эффективность, гранулированный чугун, цинкооксидный продукт

**Keywords:** technogenic raw materials, dust from electric steel production, reduction smelting, technical and economic efficiency, granular cast iron, zinc oxide product

**Information about the article:** Received February 03, 2020; accepted for publication May 25, 2020; available online June 30, 2020.

**For citation:** Patrushov AE. Technical and economic efficiency evaluation of pyrometallurgical technology for processing dust from electric steel production. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(3):672–683. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-672-683>

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Металлургическая отрасль остается в нашей стране одной из передовых, определяющих развитие экономики в целом [1, 2]. В России ежегодно производят более 70 млн т стали, из них 22 млн т стали получают электротермическим способом<sup>1</sup> [3]. В результате работы электросталеплавильного производства образуется около 650 тыс. т в год техногенной пыли, которая в настоящее время не перерабатывается и почти полностью складывается в отвалах металлургических предприятий. Накоплены значительные объемы пыли электросталеплавильного производства (ЭСПП), которые занимают обширные территории [4, 5]. Содержание цинка в такой пыли колеблется в диапазоне 2–20%; также существуют пыли, содержание цинка в которых достигает 30–35%. Кроме того, в пыли содержится значительное количество оксидов железа (30–60%) и до 20% других оксидов (кремния, кальция и магния) [6–13]. Следствием складирования данного техногенного сырья являются потери ценных компонентов (железо, цинк и т.д.) и загрязнение окружающей среды. Длительное негатив-

ное воздействие, оказываемое отвалами пыли металлургического производства на окружающую среду, возникает в том числе и из-за ее мелкофракционной структуры. В связи с этим переработка техногенного сырья с целью извлечения и выделения ценных компонентов в самостоятельные товарные продукты приобретает актуальный характер.

Проведенный литературный анализ существующих технологий переработки электросталеплавильной пыли позволяет утверждать о большом количестве разработанных технологий [14]. Однако лишь небольшая часть из предложенных способов была внедрена в производство. Важнейшими критериями при определении целесообразности внедрения той или иной технологии переработки техногенного сырья являются экономические и экологические показатели. В России сдерживающим фактором внедрения технологий переработки техногенного сырья электросталеплавильного производства являются экономические основания. Но ужесточение законодательства в сфере хранения техногенных материалов подталкивает производителей к переработке данного вида сырья.

<sup>1</sup>Кудрин В.А. Теория и технология производства стали: учебник. М.: Мир, 2003. 527 с.



## 2. ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ ПЫЛЕЙ ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

По результатам проведенного анализа современных способов переработки пылей ЭСПП, была поставлена цель – разработать пирометаллургическую технологию переработки пылей ЭСПП, имеющую преимущество перед существующими современными технологиями.

В этой связи были проведены исследования по разработке пирометаллургической технологии, в результате которых была разработана математическая модель карботермического восстановления железа и цинка из пылей, с помощью данной модели были определены оптимальные условия для получения чугуна и цинкоксидного продукта [15]. Для проведения экспериментов использовалась лабораторная установка на базе высокотемпературной печи LHT 08/17 (Nabertherm, Германия). Пробы образцов пыли ЭСПП содержали 26,02% масс. ZnO и 37,7% масс. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, в этой связи для увеличения железа в перерабатываемом сырье в шихту добавляли окалину. В качестве углеродистого восстановителя в экспериментах использовали уголь марки «длиннопламенный орех мелкий» (ДОМ); известь и кварцевый песок служили источниками шлакообразующих компонентов. Восстановительную плавку шихты вели по температурному режиму, согласно которому температуру в печи поднимали с 1150°C до 1425°C со скоростью 15°C/мин. В результате проведенных экспериментов были получены товарные продукты в виде гранулированного чугуна (с содержанием 96,75% масс. Fe и 2,92% масс. C) и цинкоксидного продукта (с содержанием 90,21% масс. ZnO). Извлечение железа и цинка в готовые продукты составило 94,0% и 91,0%, соответственно. Основываясь на результатах лабораторных исследований, была предложена технологическая схема переработки пылей ЭСПП с получением гранулированного чугуна и цинкоксидного продукта (рис. 1) [14].

Предложенная технология перера-

ботки пылей ЭСПП заключается в восстановлении железа и цинка из кислородосодержащих форм активными углеродосодержащими материалами в кольцевой печи с вращающимся подом [16, 17] (рис. 2).

В состав брикетированной шихты входит окалина, пыль ЭСПП, уголь марки ДОМ, известь и песок формовочный.

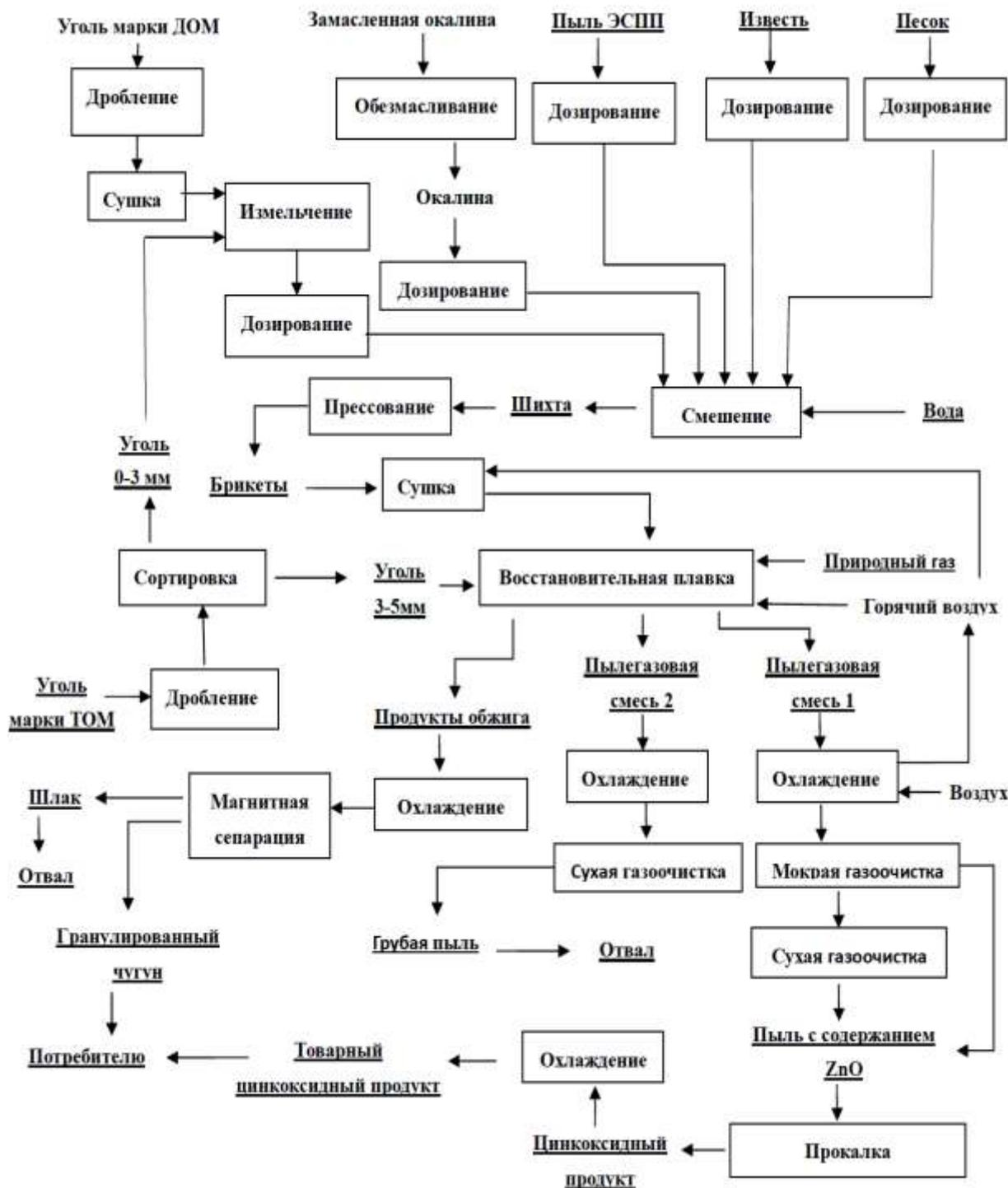
В ходе восстановительной плавки брикетов образуются ошлакованный гранулированный чугун и отходящие газы, в состав которых входят цинковые возгоны, которые улавливаются при очистке отходящих от кольцевой печи газов. Общая схема производства включает в себя следующие переделы:

- прием и подготовка сырья;
- получение сухих брикетов;
- получение гранулированного чугуна и улавливание цинковых возгонов;
- разделение чугуна и шлака;
- получение цинкоксидного продукта.

Сырьевые компоненты шихты (прокатная окалина и уголь) проходят предварительную подготовку, окалина – обезмасливание [18], уголь – измельчение и фракционирование. Пыль ЭСПП, окалина, измельченный уголь и флюсовые добавки (известь и песок) смешиваются в заданных пропорциях и брикетируются. Для удаления избыточной влаги и предварительного нагрева полученные брикеты поступают в сушилку, обогреваемой за счет тепловой энергии отходящих дымовых газов кольцевой печи. На подину печи через загрузочное устройство загружается углеродная подсыпка, которая равномерно распределяется слоем 3–5 см. В качестве углеродной подсыпки выступает измельченный уголь марки «тощий мелкий орех» (ТОМ). Вслед за подсыпкой через загрузочное устройство на подину укладываются подсушенные и нагретые до заданной температуры брикеты, которые равномерно распределяются по поду печи поверх подсыпки в 1 слой. По мере вращения пода «пирог» брикетов с подсыпкой последовательно проходит через несколько температурных зон печи: загрузки, нагрева, плавления, охлаждения, выгрузки. Длительность пол-

ного цикла восстановительной плавки брикетов в печи составляет 30 мин. Необходимая температура внутри печи обеспечивается путем сжигания в горелках печи смеси топливного газа и предварительно подогретого воздуха в теплообменнике. В ре-

зультате восстановительной плавки образуются ошлакованные гранулы чугуна и отходящие газы, в состав которых входят цинковые возгоны. Ошлакованные гранулы чугуна при помощи шнека снимаются с подины печи и по водоохлаждаемой течке



**Рис. 1. Технологическая схема переработки пылей электросталеплавильного производства  
 Fig. 1. Flow diagram of electric steelmaking dust processing**



*Рис. 2. Кольцевая печь с вращающимся подом*  
*Fig. 2. Rotary hearth furnace*

попадают в холодильник, в котором кроме процесса охлаждения ошлакованных гранул чугуна проходит и процесс дезинтеграции чугуна и шлака. При попадании ошлакованных гранул чугуна в воду происходит резкое охлаждение материала, сжатие гранул чугуна приводит к нарушению целостности, и шлаковая фаза отделяется от металлической фазы. Смесь чугуна и шлака конвейером направляется в магнитный сепаратор для извлечения магнитной части – гранулированного чугуна, который затем направляется на упаковку.

Восстановленный цинк покидает печь в газообразном состоянии вместе с отходящими печными газами и направляется в систему газоочистки. Газоочистное оборудование состоит из установки мокрого типа для очистки отходящих газов (скруббера), рукавного фильтра, рекуператора, дымососа и дымовой трубы. Основная часть цинковых возгонов улавливается в скруббере, работа которого основана на захвате каплями воды наиболее крупных частиц пыли, коагуляции этих частиц с последующим осаждением [19]. Не осаждаемый в скруббере оксид цинка улавливается в рукавном фильтре; уловленные в скруббере цинковые возгоны имеют избыточную влагу, которую удаляют при помощи

фильтр-пресса.

Уловленные цинковые возгоны имеют в своем составе галогены (Cl, иногда, при наличии в исходном сырье, и F) [20], для очистки от которых цинковые возгоны направляются на прокалку. Прокалка цинковых возгонов осуществляется в тарельчатой печи при температуре 1000°C, после чего полученный цинкоксидный продукт охлаждается в холодильнике и затаривается в биг-бэги.

### **3. РАСЧЕТ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПИРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ПЫЛЕЙ ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Технико-экономическая оценка эффективности внедрения предлагаемой технологии для переработки пыли ЭСПП произведена с учетом расхода основных материалов и энергоресурсов, стоимости строительства проектируемого завода, объемов производства, действующего налогообложения и месторасположения предполагаемого завода.

Расчеты выполнены с применением программы MS Excel, позволяющей осуще-

ставить расчет проект строительства завода по переработке пыли ЭСПП с получением экономического отчета [21, 22].

Для переработки пыли ЭСПП планируется использовать комплект технологического оборудования на основе кольцевой печи с вращающимся подом со средним диаметром 12 м. Годовой объем переработки техногенного сырья (пыль ЭСПП и окалина) составляет 59 тыс. т в год. Количество брикетированной шихты, загружаемой в данную печь, составляет 11,76 т/ч (93 тыс. т/год). В результате переработки пыли ЭСПП в кольцевой печи получают два готовых продукта:

– гранулированный чугун – 4,2 т/ч (33 264 т/год);

– цинкоксидный продукт – 0,56 т/ч (4 435,2 т/год).

Расчет численного состава персонала завода выполнен с учетом ведения технологического процесса производства, норм обслуживания оборудования, правил техники безопасности. Планируемая явочная численность персонала завода составляет 60 чел. Действительный годовой фонд времени работы оборудования принят 7920 ч. Инвестиционный период составляет 18 мес.

Для оценки инвестиционных затрат на строительство завода по переработке пыли ЭСПП был определен состав основного технологического оборудования для строительства и выявлена его стоимость. Цена оборудования определена на основании цен предприятий-изготовителей соответствующего оборудования. Для части нестандартного оборудования стоимость рассчитана ориентировочно на основании аналогичного оборудования, применяемого на других объектах. При расчете инвестиционных затрат применены «Методики

определения сметной стоимости» Госстроя России<sup>2</sup>, «Методические рекомендации» Министерства региона развития Российской Федерации<sup>3</sup> и «Сборник сметных норм и затрат на строительство временных зданий и сооружений»<sup>4</sup>. В результате расчетов инвестиционные затраты составили 497,15 млн руб.

Для определения экономического эффекта от внедрения технологии переработки пыли ЭСПП необходимо рассчитать себестоимость производства 1 т продукта. Для получения 1 т готовой продукции определены расходные коэффициенты сырья и энергоресурсов, а также цены на них. Расходные коэффициенты сырья и материалов определены на основании расчета материального баланса процесса переработки пыли ЭСПП.

В табл. 1 представлена калькуляция себестоимости 1 т готового продукта при переработке пыли ЭСПП.

Гранулированный чугун является компонентом шихты для производства стали электротермическим способом, поскольку обладает рядом необходимых для технологии получения стали качеств: высокой насыпной плотностью, минимальным содержанием серы и фосфора, отсутствием шлака из пустой породы и наличием углерода [23]. Потенциальными потребителями гранулированного чугуна являются металлургические предприятия неполного цикла, не имеющие собственного производства чугуна, но располагающие собственными сталеплавильными мощностями (электрометаллургическими печами), и машиностроительные предприятия, также имеющие собственные плавильные печи для выплавки стали. Динамика цен на переплавленный чугун представлена на рис. 3.

<sup>2</sup>Об утверждении и введении в действие Методики определения стоимости строительной продукции на территории Российской Федерации: постановление Госстроя России № 15/1 от 05.03.2004, изм. 16.06.2014.

<sup>3</sup>Об утверждении Методических рекомендаций по применению государственных сметных нормативов - укрупненных нормативов цены строительства различных видов объектов капитального строительства непроизводственного назначения и инженерной инфраструктуры: приказ Министерства регионального развития Российской Федерации № 481 от 04.10.2011.

<sup>4</sup>ГСН 81-05-01-2001. Сборник сметных норм затрат на строительство временных зданий и сооружений. Введ. постановлением Госстроя России № 45 от 15.05.2001. М., 2001. 8 с.



Таблица 1

Калькуляция себестоимости 1 т готовой продукции при переработке  
пыли электросталеплавильного производства

Table 1

Costing of 1 ton of finished products when electric steelmaking dust processing

№ п/п	Показатели	Ед. изм.	Кол-во на ед.	Цена, руб/ед.	Сумма, руб.
	Объем производства (гранулированный чугун + ZnO продукт)	т/год	–	–	37699
1	Сырье и материалы:		–	–	8657,9
1.1	Окалина	т	1,168	2500,0	2920,0
1.2	Пыль ЭСПП	т	0,397	350,0	139,0
1.3	Уголь марки ДОМ	т	0,477	877,1	418,4
1.4	Уголь марки ТОМ	т	0,302	4237,3	1279,7
1.5	Песок формовочный	т	0,168	2176,0	365,6
1.6	Известь	т	0,225	4203,0	945,7
1.7	Природный газ	тыс.м <sup>3</sup>	0,136	3700,2	503,2
1.8	Транспортные расходы	руб/т	2086	1,0	2086,4
2	Энергоресурсы покупные:	–	–	–	790,8
2.1	Электроэнергия	тыс. кВт·ч	266,800	3,0	789,7
2.2	Вода	м <sup>3</sup>	0,235	4,8	1,1
3	Трудовые ресурсы:	–	–	–	829,5
3.1	Заработная плата	–	–	–	637,1
3.2	Начисления на заработную плату (ЕСН* и страхование от несчастных случаев)	–	–	–	192,4
4	Амортизационные отчисления	–	–	–	1283,0
5	Прочие общепроизводственные расходы	–	–	–	414,7
	Себестоимость	–	–	–	11975,9

\*Примечание. ЕСН – единый социальный налог.

На конец 2019 г. цена на переделный чугун составила 340 долл/т [24]. При курсе доллара 63,72 руб. за 1 долл цена 1 т переделного чугуна составила 21664,8 руб. (без НДС).

Получаемый цинкоксидный продукт с содержанием основного компонента не менее 86% (в пересчете на чистый цинк в получаемом продукте цинка содержится не менее 69%) является полуфабрикатом, который можно направить для дальнейшей переработки с получением металлического (рафинированного) металла [18] или для получения оксида цинка с более высоким процентным содержанием основного соединения.

Цена на цинксоодержащее сырье, в соответствии с принятой в мире практикой, формируется на основе котировальных цен на цинк на Лондонской бирже металлов (ЛБМ) с учетом содержания цинка в цинксоодержащем сырье. Цена, устанавливаемая на ЛБМ, выступает в качестве исходной цены для цинксоодержащего сырья. Вместе с тем цена, как правило, составляет 85% от содержащегося металла в сырье [25]. Это связано с тем, что предприятия, производящие цинк при закупках цинксоодержащего сырья, учитывают стоимость переработки. Динамика цен на цинк представлена на рис. 4.

Цена цинка на Лондонской бирже металлов составляет 2255,0 долл/т [26].

Цена, долл.



Рис. 3. Динамика цен на передельный чугун [24]  
Fig. 3. Dynamics of pig iron prices [24]

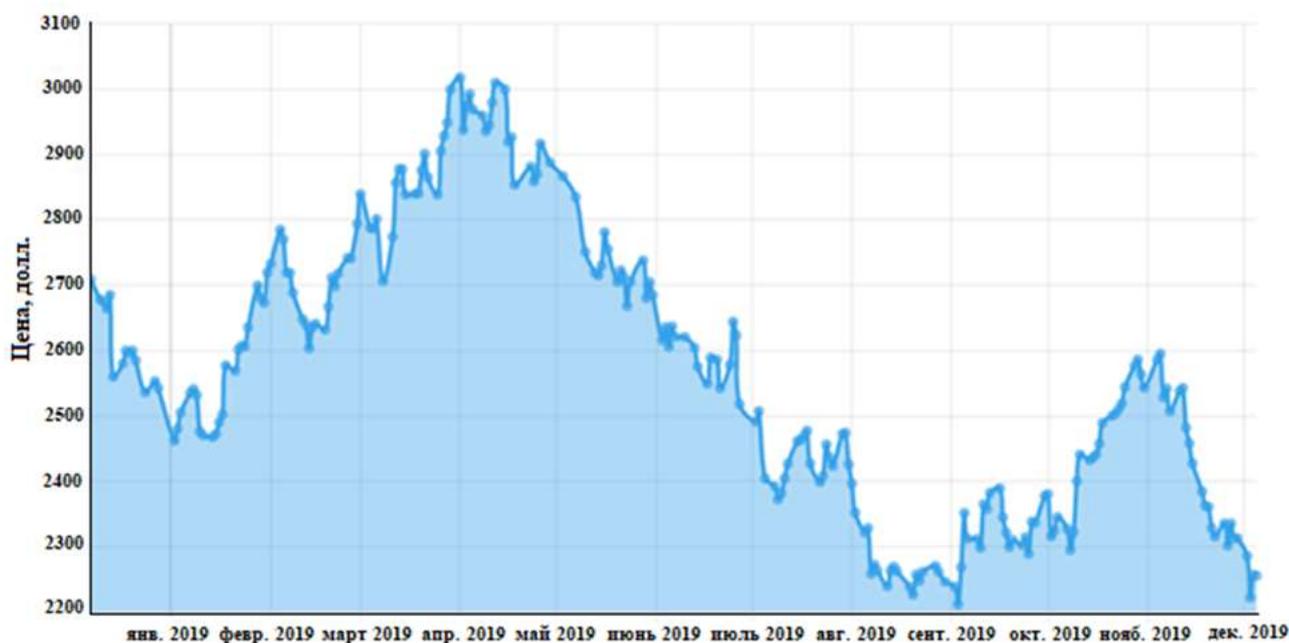


Рис. 4. Динамика цен на цинк [26]  
Fig. 4. Dynamics of zinc prices [26]



Таблица 2

Основные технико-экономические показатели проекта завода  
по переработке пыли электросталеплавильного производства

Table 2

Main technical and economic indicators of the factory project  
for electric furnace steelmaking dust processing

Наименование показателя	Ед. измер.	Значение
Капиталовложения с учетом НДС	млн руб.	497,149
Ежегодный доход от реализации продукции с НДС всего, в том числе:	млн руб.	1094,55
– гранулированный чугун	млн руб.	720,66
– цинксодержащий продукт	млн руб.	373,89
Себестоимость реализуемой продукции	млн руб.	451,48
Средневзвешенная цена реализуемой продукции с НДС:		
– гранулированный чугун	руб/т	21664,8
– цинкоксидный продукт	долл/т	1322,99
Валовая прибыль	млн руб.	723,684
Чистая операционная прибыль после вычета нало- гов	млн руб.	535,592
Инвестиционный период	мес.	18
Ставка дисконтирования	%	11,32
Срок окупаемости (с инвестиционным периодом, составляющим 18 мес.)	мес.	34
Дисконтированный срок окупаемости (с инвестиционным периодом, составляющим 18 мес.)	мес.	35
Чистый приведенный доход	млн руб.	1903,024
Индекс доходности инвестиции		6,1
Внутренняя норма рентабельности	%	169

Примечание: период расчета интегральных показателей – 120 мес.

При курсе доллара 63,72 руб. за 1 долл цена 1 т цинкоксидного продукта составит 84301,5 руб.

Годовой доход от реализации товарных продуктов рассчитывается как произведение цены за единицу продукции и объема продукции, произведенного за год:

$$33264 \cdot 21664,8 = 720,66 \text{ млн руб/год}$$

– доход от реализации гранулированного чугуна;

$$4435,2 \cdot 84\,301,5 = 373,89 \text{ млн руб/год}$$

– доход от реализации цинкоксидного продукта.

Чистая операционная прибыль по-

сле вычета налогов в результате расчетов составила 535,59 млн руб/год (табл. 2).

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для расчета технико-экономических показателей было принято строительство завода с годовым объемом переработки пыли ЭСПП 15 тыс. т. К установке принята 1 кольцевая печь с вращающимся подом со средним диаметром 12 м. В результате переработки техногенного сырья по предлагаемой технологии будет получено, согласно расчетам, 33264 т/год гранулированного

чугуна и 4435 т/год цинкоксидного продукта.

Проведенные технико-экономические расчеты показали, что в результате реализации проекта по строительству завода по пирометаллургической переработке пылей ЭСПП в кольцевой печи срок окупаемости с учетом инвестиционного периода составит 34 мес., внутрен-

няя норма прибыльности – 169%, а чистый приведенный доход за расчетный период – 1903,02 млн руб. Данные технико-экономические показатели указывают на высокую экономическую эффективность переработки пыли ЭСПП по предлагаемой технологии.

#### **Библиографический список**

1. Буданов И.А. Экономические условия перспективного развития металлургии в России // Проблемы прогнозирования. 2011. № 5. С. 48–64.
2. Сизяков В.М., Власов А.А., Бажин В.Ю. Стратегические задачи металлургического комплекса России // Цветные металлы. 2016. № 1. С. 32–38. <https://doi.org/10.17580/tsm.2016.01.05>
3. Бигеев А.М., Бигеев В.А. Металлургия стали. Теория и технология плавки стали: монография. Изд. 3-е, перераб. и доп. Магнитогорск: Изд-во МГТУ им. Г.И. Носова, 2000. 544 с.
4. Леонтьев Л.И., Дюбанов В.Г. Техногенные отходы черной и цветной металлургии и проблемы окружающей среды // Экология и промышленность России. 2011. № 4. С. 32–35.
5. Лисин В.С., Юсфин Ю.С. Ресурсо-экологические проблемы XXI века в металлургии: монография. М.: Высш. школа, 1998. 446 с.
6. Popielska-Ostrowska P., Siwka J., Sorek A. Dust arising during steelmaking processes // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. 2012. Vol. 55. No. 2. P. 772–776.
7. Alencastro de Araújo J., Schalch V. Recycling of electric arc furnace (EAF) dust for use in steel making process // Journal of Materials Research and Technology. 2014. Vol. 3. Issue 3. P. 274–279. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2014.06.003>
8. Simonyan L.M., Alpatova A.A., Demidova N.V. The EAF dust chemical and phase composition research techniques // Journal of Materials Research and Technology. 2019. Vol. 8. Issue 2. P. 1601–1607. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.11.005>
9. Kukurugya F., Havlik T., Kekki A., Forsen O. Chemical and structural characterization of different steelmaking dusts from stainless steel production // Kammell's Quo Vadis Hydrometallurgy. 2012. Vol. 6. P. 93–101.
10. Da Silva Machado J.G.M., Brehm F.A., Mendes Moraes C.A., Dos Santos C.A., Faria Vilela A.C. Characterization study of electric arc furnace dust phases // Materials Research. 2016. Vol. 9. No. 1. P. 41–45. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392006000100009>
11. Omran M., Fabritius T. Effect of steelmaking dust characteristics on suitable recycling process determining: Ferrochrome converter (CRC) and electric arc furnace (EAF) dusts // Powder Technology. 2017. Vol. 308. P. 47–60. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.11.049>
12. Song Hai-yan, Niu Jian-gang, Cui Bao-xia. Comprehensive evaluation of solid waste utilization benefit in Iron and Steel industry // Iron and Steel. 2017. Vol. 52. No. 2. P. 85–90. <https://doi.org/10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20160180>
13. Suetens T., Guo Muxing, Van Acker Karel, Blanpain B. Formation of the ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> phase in an electric arc furnace off-gas treatment system // Journal of Hazardous Materials. 2015. Vol. 287. P. 180–187. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.01.050>
14. Патрушов А.Е., Немчинова Н.В., Черных В.Е., Тютрин А.А. Современные методы переработки техногенного сырья электросталеплавильного производства // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 4. С. 183–190. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-4-183-190>
15. Патрушов А.Е., Немчинова Н.В., Тютрин А.А., Чувашов Д.Н. Исследование методами математического моделирования процесса восстановления железа и цинка из пылей электросталеплавильного производства // Переработка природного и техногенного сырья: сб. науч. трудов. Иркутск: Изд-во ИРНТУ. 2018. С. 114–116.
16. Пат. № 2626371, Российская Федерация, С22В 7/02, С21В 11/06, С22В 19/38. Способ переработки отходов металлургического производства / С.Ю. Одегов, И.Б. Федосов, А.П. Баранов, В.Е. Черных, А.Е. Патрушов; заявитель и патентообладатель ООО «Урал-рециклинг». Заявл. 05.09.2016; опубл. 26.07.2017. Бюл. № 21.
17. Nemchinova N.V., Chernykh V.E., Tyutrin A.A., Patrushov A.E. Extraction of Zinc and Iron from Electrosmelting Dust // Steel in Translation. 2016. Vol. 46. No. 5. P. 368–372. <https://doi.org/10.3103/S0967091216050090>
18. Подковыркин Е.Г., Жуков Ю.С., Коршунова Н.Г., Баков А.В., Витков О.А. Опыт эксплуатации промышленных установок огневого обезвреживания железосодержащих техногенных материалов // Сталь. 2010. № 3. С. 115–117.
19. Булаев В.А., Коверкина Е.В., Кочетов О.С. Параметры скруббера Вентури для очистки газов от пыли и химических вредных веществ // Наука, образование и инновации: сб. науч. трудов Междунар. науч.-



техн. конф. (г. Волгоград, 5 марта 2017 г.). Волгоград, 2017. Т. 3. С. 28–30.

20. Журавлев В.В., Кобелев В.А. Анализ существующих технологий переработки сталеплавильной цинксодержащей пыли и направления дальнейших исследований // *Черная металлургия*. 2012. № 10. С. 80–83.

21. Ковалев В.В., Уланов В.А. Курс финансовых вычислений. Изд. 4-е, доп. М.: Изд-во «Проспект», 2015. 560 с.

22. Беннинга Ш. Основы финансов с примерами в Excel / пер. с англ. М.: Изд. д. «Вильямс», 2007. 592 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://book.cc/book/2704930/7ce6b1> (17.04.2019).

23. Стеблов А.Б. Эффективность работы электроду-

говой плавильной печи от качества шихты // *Литье и металлургия*. 2016. № 3. С. 58–62.

24. Металлургический бюллетень // *Metaltorg.ru* [Электронный ресурс]. URL: [https://www.metaltorg.ru/metal\\_catalog/metallurgicheskoye\\_syrye\\_i\\_polufabrikaty/chugun/chugun\\_peredelnyi](https://www.metaltorg.ru/metal_catalog/metallurgicheskoye_syrye_i_polufabrikaty/chugun/chugun_peredelnyi) (07.03.2020).

25. Аналитический отчет о состоянии конкуренции на рынке цинкового концентрата // Федеральная антимонопольная служба, управление контроля промышленности [Электронный ресурс]. URL: <https://fas.gov.ru/documents/685773> (07.03.2020).

26. Котировки на цинк лондонской биржи металлов // *Oelec.ru* [Электронный ресурс]. URL: <https://www.elec.ru/lme/zinc/> (07.03.2020).

### References

1. Budanov IA. Economic Conditions of the Prospective Development of Metallurgy in Russia. *Problems of Forecasting*. 2011;5:48–64. (In Russ.)

2. Sizyakov VM, Vlasov AA, Bazhin VYu. Strategy Tasks of the Russian Metallurgical Complex. *Tsvetnye Metally*. 2016;1:32–38. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/tsm.2016.01.05>

3. Bigeev AM, Bigeev VA. *Metallurgy of Steel. Theory and Technology of Melting Steel*: Monograph. Magnitogorsk, Magnitogorsk State Technical University of GI Nosov; 2000, 554 P. (In Russ.)

4. Leontyev LI, Dyubanov VG. Technogenic Waste Products of Ferrous and Nonferrous Metallurgy, and Environmental Issues. *Ekologiya i promyshlennost Rossii = Ecology and Industry of Russia*. 2011;4:32–35. (In Russ.)

5. Lisin VS, Yusfin YS. *Resource and Environmental Problems of the XXI Century in Metallurgy*: Monograph. Moscow: Vysshaya shkola; 1998, 446 p. (In Russ.)

6. Popielska-Ostrowska P, Siwka J, Sorek A. Dust Arising during Steelmaking Processes. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2012;55(2):772–776.

7. Alencastro de Araújo J, Schalch V. Recycling of Electric Arc Furnace (EAF) Dust for Use in Steel Making Process. *Journal of Materials Research and Technology*. 2014;3(3):274–279. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2014.06.003>

8. Simonyan LM, Alpatova AA, Demidova NV. The EAF Dust Chemical and Phase Composition Research Techniques. *Journal of Materials Research and Technology*. 2019;8(2):1601–1607. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.11.005>

9. Kukurugya F, Havlik T, Kekki A, Forsen O. Chemical and Structural Characterization of Different Steelmaking Dusts from Stainless Steel Production. *Kammell's Quo Vadis Hydrometallurgy*. 2012;6:93–101.

10. Da Silva Machado JGM, Brehm FA, Mendes Moraes CA, Dos Santos CA, Faria Vilela AC. Characterization Study of Electric Arc Furnace Dust Phases. *Materials Research*. 2016;9(1):41–45. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392006000100009>

11. Omran M, Fabritius T. Effect of Steelmaking Dust Characteristics on Suitable Recycling Process Determining: Ferrochrome Converter (CRC) and Electric Arc Furnace (EAF) Dusts. *Powder Technology*. 2017;308:47–60.

<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.11.049>

12. Song Hai-yan, Niu Jian-gang, Cui Bao-xia. Comprehensive Evaluation of Solid Waste Utilization Benefit in Iron and Steel Industry. *Iron and Steel*. 2017;52(2):85–90.

<https://doi.org/10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20160180>

13. Suetens T, Guo Muxing, Van Acker Karel, Blanpain B. Formation of the ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Phase in an Electric Arc Furnace Off-Gas Treatment System. *Journal of Hazardous Materials*. 2015; 287:180–187. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.01.050>

14. Patrushov AE, Nemchinova NV, Chernykh VE, Tyutrin AA. Modern Processing Methods of Technogenic Raw Materials of Electric Furnace Steelmaking. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(4):183–190. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-4-183-190>

15. Patrushov AE, Nemchinova NV, Tyutrin AA, Chuvashov DN. Research of Iron and Zinc Reduction from Electric Steel Production Dust by Mathematical Modeling. *Pererabotka prirodnogo i tekhnogennogo syr'ya: sbornik nauchnyh trudov = Processing of Natural and Technogenic Raw Materials: Collected Scientific Articles*. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2018, p. 114–116. (In Russ.)

16. Odegov SY, Fedosov IB, Baranov AP, Chernykh VE, Patrushov AE. *Processing Method of Metallurgical Production Waste*. Patent RF, no. 2626371; 2017. (In Russ.)

17. Nemchinova NV, Chernykh VE, Tyutrin AA, Patrushov AE. Extraction of Zinc and Iron from Electromelting Dust. *Steel in Translation*. 2016;46(5):368–372. <https://doi.org/10.3103/S0967091216050090>

18. Podkovyrkin EG, Zhukov YS, Korshunova NG, Bakov AV, Vitkov OA. Operational Experience of Industrial

Installations for Fire Neutralization of Iron-Containing Technogenic Materials. *Stal'*. 2010;3:115–117. (In Russ.)

19. Bulaev VA, Koverkina EV, Kochetov OS. Venturi Scrubber Parameters for Cleaning Gases from Dust and Chemical Hazards. In: *Nauka, obrazovanie i innovacii: trudy Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii* = Science, Education and Innovation: Collected Articles of the International Scientific and Technical Conference. 5 March 2017, Volgograd. Volgograd; 2017;3:28–30. (In Russ.)

20. Zhuravlev VV., Kobelev VA. Analysis of Existing Technologies of Steel-Smelting Zinc-Containing Dust Processing and Directions of Further Research. *Chernaya Metallurgiya* = Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economical Information. 2012;10:80–83. (In Russ.)

21. Kovalev VV, Ulanov VA. *The Course of Financial Computing*. 4th ed. Moscow: Prospect; 2015, 560 p. (In Russ.)

#### **Критерии авторства**

Патрушов А.Е. получил и оформил научные результаты и несет ответственность за плагиат.

#### **Конфликт интересов**

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ**

**Патрушов Алексей Евгеньевич**,  
аспирант,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;  
✉ e-mail: alex.m.u@mail.ru

22. Benninga S. *Principles of Finance with Excel*. 2nd edition. Moscow: Williams; 2007, 592 p. Available from: <https://b-ok.cc/book/2704930/7ce6b1> [Accessed 17th April 2019]. (In Russ.)

23. Steblov AB. Overall Performance of the Electric Arc Melting Furnace Depending on Quality of Furnace Charge. *Lit'e i metallurgiya* = Foundry Production and Metallurgy. 2016;3:58–62. (In Russ.)

24. Metallurgical Bulletin. *Metaltorg.ru*. Available from: [https://www.metaltorg.ru/metal\\_catalog/metallurgichesk\\_oye\\_syrye\\_i\\_polufabrikaty/chugun/chugun\\_peredelnyi](https://www.metaltorg.ru/metal_catalog/metallurgichesk_oye_syrye_i_polufabrikaty/chugun/chugun_peredelnyi) [Accessed 7th March 2020]. (In Russ.)

25. Analytical Report on the State of Competition in the Zinc Concentrate Market. *Federal Antimonopoly Service: Department of Industrial Control*. Available from: <https://fas.gov.ru/documents/685773> [Accessed 7th March 2020]. (In Russ.)

26. Zinc Quotations of London Metal Exchange// *Oelec.ru* Available from: <https://www.elec.ru/lme/zinc/> [Accessed 7th March 2020]. (In Russ.)

#### **Authorship criteria**

Patrushov A.E. has obtained and formalized the scientific results and bears the responsibility for plagiarism.

#### **Conflict of interests**

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

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

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHOR**

**Aleksey E. Patrushov**,  
Postgraduate Student,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;  
✉ e-mail: alex.m.u@mail.ru



## Calculation of magnetohydrodynamic electrolyser parameters with various types of cathode shell

Evgeniy Yu. Radionov

RUSAL Engineering and Technological Center LLC, Krasnoyarsk, Russia

**Abstract:** The aim of the research was to analyse the influence of cathode casing design on electrolytic cells with self-baking anodes taking the following magnetohydrodynamic characteristics into account: magnetic field, speed and circulation direction of cathode metal, margin of magnetohydrodynamic stability. The most common type of electrolysers having a Söderberg anode and S-8BM top current lead, for which both counterforce and cradle cathode shell types were used, was taken as an object of study. To simulate the magnetohydrodynamic phenomena occurring in the electrolyser, we used the specialised Blums v5.07 computer program. The following settings were identical for both versions of the models: type of bus, anode assembly parameters, cathode material properties, formation features of the anode mass sintering cone and form of the working space. The calculation of the magnetic field of the electrolyser was carried out using an analytical research method based on the integration of the Poisson (for regions occupied by current) and Laplace (for regions not occupied by current) equations. According to calculations of the speeds and directions of movement of the cathode metal, both types of cathode casing of the electrolyser were shown to be characterised by a four-circuit circulation system, determined by the corresponding location of the anode risers at the inlet and outlet ends of the electrolyser. The results of mathematical modelling show that for electrolysers with a cathode shell of the cradle type, the transverse and vertical components of the magnetic field are less compensated than for cells having a counterforce shell, which affects the average speeds of the cathode metal: circulation speeds will be 0.02 cm / s below. However, the margin of magnetohydrodynamic stability is almost identical for both cathode shell designs. With the same shape of the working space, as well as interpolar distance (41 mm) and metal level (34 cm), the calculated margin of magneto-hydrodynamic stability was 360–380 mV.

**Keywords:** electrolyser, mathematical modeling, magnetohydrodynamic parameters, cathode shell, magnetic field, interpolar distances, circulation speeds of the cathode metal

**Information about the article:** Received January 09, 2020; accepted for publication May 19, 2020; available online June 30, 2020.

**For citation:** Radionov EYu. Calculation of magnetohydrodynamic electrolyser parameters with various types of cathode shell. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(3):684–693. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-684-693>

УДК 669.713

## Расчет магнитогидродинамических параметров работы электролизеров с различным типом катодного кожуха

© Е.Ю. Радионов

ООО «РУСАЛ Инженерно-технологический центр», г. Красноярск, Россия

**Резюме:** Цель – проанализировать особенность влияния конструкции катодного кожуха на электролизерах с самообжигающимися анодами на следующие магнитогидродинамические характеристики: магнитное поле, скорости и направления циркуляции катодного металла, запас магнитогидродинамической стабильности. В качестве объекта исследования был взят наиболее распространенный тип электролизеров с анодом Содерберга и верхним токоподводом – С-8БМ, для которого приняты контрфорсный и шпангоутный типы катодного кожуха. Для моделирования магнитогидродинамических явлений, происходящих в электролизере, использовалась специализированная компьютерная программа Blums v5.07. Тип ошиновки, параметры анодного узла, свойства материалов катодного устройства, особенности формирования конуса спекания анодной массы, а также форма рабочего пространства для обоих вариантов моделей задавались одинаковыми. Расчет магнитного поля электролизера выполнялся с использованием аналитического метода исследования, основанного на интегрировании уравнений Пуассона (для областей, занятых током) и Лапласа (для областей, не занятых током). Согласно расчетам скоростей и направлений движения катодного металла установлено, что для обоих типов катодных кожухов электро-

лизера характерна четырехконтурная система циркуляции, определяемая соответствующим расположением анодных стояков на входном и выходном торцах электролизера. По результатам математического моделирования было установлено, что для электролизеров с катодным кожухом шпангоутного типа поперечная и вертикальная составляющие магнитного поля менее скомпенсированы, чем на ваннах с контрфорсным кожухом, что отражается на средних скоростях движения катодного металла: скорости циркуляции будут на 0,02 см/с ниже. Однако запас магнитогиродинамической стабильности практически идентичен для обеих конструкций катодного кожуха. При одинаковой форме рабочего пространства, а также значении межполюсного расстояния (41 мм) и уровне металла (34 см) рассчитанный запас магнитогиродинамической стабильности составил 360–380 мВ.

**Ключевые слова:** электролизер, математическое моделирование, магнитогиродинамические параметры, катодный кожух, магнитное поле, межполюсное расстояние, скорость циркуляции катодного металла

**Информация о статье:** Дата поступления 09 января 2020 г.; дата принятия к печати 19 мая 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 июня 2020 г.

**Для цитирования:** Радионо́в Е.Ю. Расчет магнито́гидродинамических параметров работы электролизеров с различным типом катодного кожуха. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 3. С. 684–693. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-684-693>

## 1. INTRODUCTION

Russia is currently the second largest producer of primary aluminium in the world. The main tasks facing the domestic aluminium industry<sup>1</sup> [1] are connected with solving complex problems aimed at obtaining new solutions for minimising the environmental burden on the environment [2–6], improving the raw material base [7, 8], expanding the range of manufactured alloys [9], as well as increasing the profitability of products by reducing production costs.

In the context of a global decline in aluminium prices at all plants engaged in its production, the solution to the issue of reducing production costs has become not just relevant, but also the chief determinant of the continuing existence of such plants. The pricing of aluminium obtained by electrolysis of a cryolite-alumina melt directly depends on the indicator of electricity price. The contribution of this expense item to the cost of a unit of production makes up about 20–40% of the entire production cost for aluminium metal. One of the main reasons for the increase in energy losses in the electrolyser [10] and consequent

decrease in current efficiency is directly related to the complex magnetohydrodynamic (MHD) processes taking place in the bath, which are formed in the melt as a result of the interaction of electric and magnetic fields<sup>2</sup>. Magnetohydrodynamics plays a crucial role in cathode metal circulation and deformation, leading to the reverse transition of the aluminium already obtained at the cathode into the melt with the formation of its oxide. Therefore, when developing new electrolysers and improving existing designs, special attention is paid to optimising their MHD characteristics.

Features of MHD phenomena in aluminium electrolysers are associated with the formation of a magnetic field by the distribution of currents inside a melt [11, 12], the presence of many different phases associated with the molten metal [13], as well as the configurations of anode and cathode assemblies [14, 15].

The MHD parameters of the operation of the electrolyser are determined on the basis of an analysis of the compensation of magnetic fields, the nature of current distribution, the type of motion and shape of cathode metal deformation, as well as the MHD stability margin ( $\Delta U$ ) of the electrolyser [16].

<sup>1</sup>Galevsky GV, Kulagin NM, Mintsis MYa, Sirazutdinov GA. Metallurgy of aluminium: technology, electricity, automation: textbook. 3rd Ed., Revised and corrected. Moscow. Flinta; Nauka, 2008. 572 p. / Галевский Г.В., Кулагин Н.М., Минцис М.Я., Сиразутдинов Г.А. *Металлургия алюминия: технология, электроснабжение, автоматизация: учеб. пособие*. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Флинта: Наука, 2008. 527 с.

<sup>2</sup>Vetyukov MM, Tsyplakov AM, Shkolnikov SN. Electrometallurgy of aluminium and magnesium: textbook for higher education. Moscow. Metallurgy, 1987. 360 p. / Ветюков М.М., Цыплаков А.М., Школьников С.Н. *Электрометаллургия алюминия и магния: учебник для вузов*. М.: Metallurgy, 1987. 320 с.



## 2. RESEARCH METHODS

The direct study of MHD processes in existing aluminium electrolyzers implies measurements and subsequent analysis of various direct and indirect parameters affecting MHD processes in the electrolyser: the shape of the working space, current distribution via the main current-carrying elements, magnetic induction fields, cathode metal circulation velocity and deformation, as well as its MHD stability margin. These measurement methods are described in more detail in [14, 17].

However, when designing new electrolyzers or predicting the operation of existing baths with altered technical parameters, possible risks can be optimally minimised using a mathematical model as the object under study [18–20].

To date, there are a number of specific narrowly targeted programs for calculating the MHD characteristics of an electrolyser [12, 14, 21, 22], as well as more universal solutions for calculating various associated physical processes [23].

In order to study the influence of the design of the cathode casing, we selected the Blums v5.07 program, which has been tested on many different types of electrolyzers [14, 22]. This program is a domestic software product which, during its period of research and development, brought together the input of various institutions, such as the All-Union Aluminium-Magnesium Institute (St. Petersburg), Kirensky Institute of Physics (Krasnoyarsk), Institute of Physics, Academy of Sciences of the Latvian SSR (Riga). Advanced RUSAL electrolyzers, such as RA-300, RA-400 and RA-550, were designed at various times using different versions of this program [1, 2].

Using the program, it is possible to calculate the magnetic field in the molten metal, determine the speed and direction of its movement, as well as to predict the supply of MHD stability of the electrolytic cell at different metallic levels and interpolar distances (ID).

Fig. 1 shows the models of both counterforce and cradle cathode shell types for the Söderberg S-8BM electrolyser [3, 10–12, 14, 15, 22, 23].

## 3. SIMULATION RESULTS AND DISCUSSION

When comparing the two studied mathematical models, it should be noted that the only design element that underwent changes was the cathode shell itself. In the first case, the cathode shell was made according to a counterforce design; in the second, a cradle approach was used. All other parameters remained unchanged, namely: the type and properties of materials, bus arrangement, as well as anode and cathode assembly design.

It should also be noted that during the modelling process the following assumptions were made:

- calculation of the magnetic field induction and, accordingly, the resulting values of the Lorentz forces taking place at the boundary of the metal and electrolyte phases;
- when calculating the speeds and directions of motion of the cathode metal, as well as the MHD stability maps, the influence of gas-hydrodynamic processes in the electrolyser was not taken into account.

The analysis of the calculation results involved a comparison of the obtained magnetic field induction data, velocities and directions of metal motion, as well as MHD stability maps.

**The magnetic field** of the electrolyser comprises both external and internal fields. An external magnetic field is created by the surrounding bus arrangement, anode pins and blooms, adjacent electrolyzers, cases and ferromagnetic masses (anode and cathode casing, collector beam on baths with calcined anodes, collector beam supports, sheets, automatic point feeding systems, closely located technological cranes, equipment, etc.). The internal magnetic field, on the other hand, is generated by currents flowing in the melt [21, 24].

Table 1 presents the results of calculating the electrolytic magnetic field for three components:  $B_x$  (longitudinal),  $B_y$  (transverse),  $B_z$  (vertical).

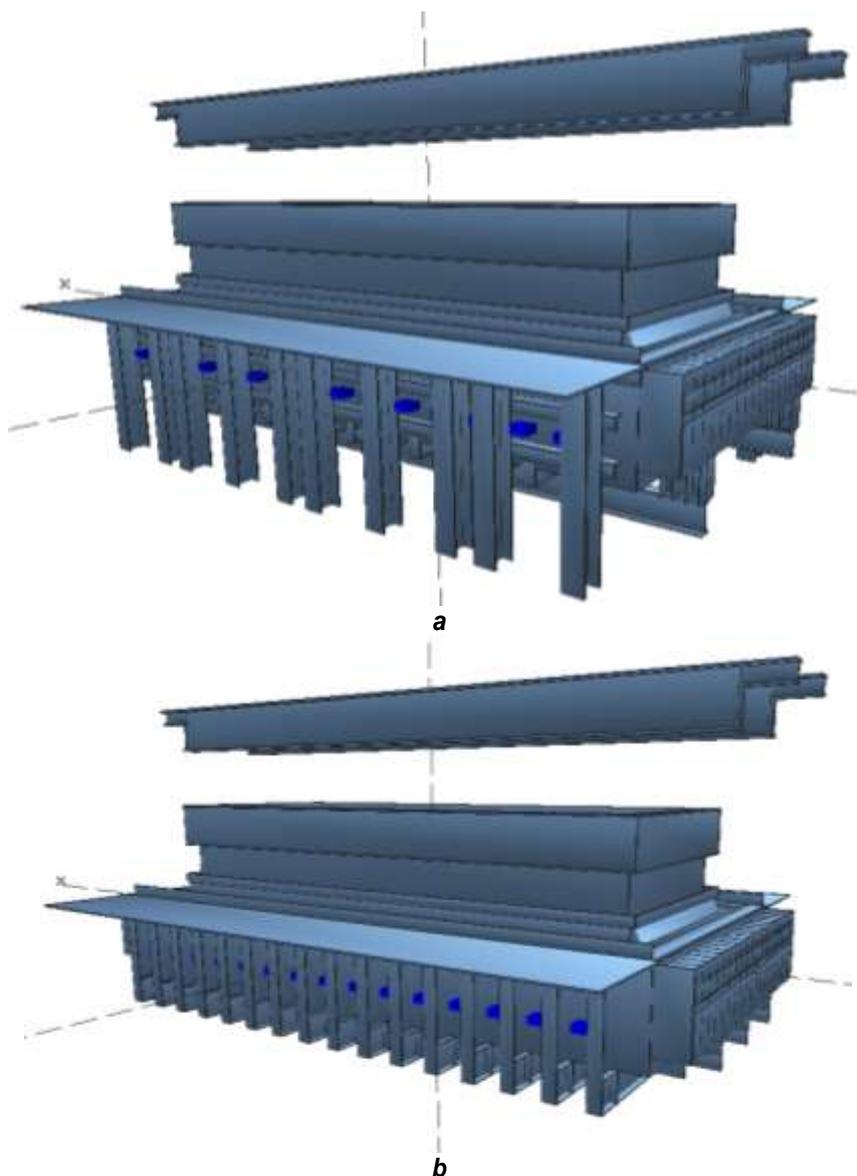
As can be seen from the data in Table 1, for electrolyzers with a cradle cathode shell,

the transverse and vertical components of the magnetic field are less compensated than for baths having a counterforce casing. In turn, this is reflected both in the values of the average and maximum cathode metal velocities, as well as in the magnitude of the MHD stability margin.

**Metal circulation.** One of the resulting actions of electromagnetic forces formed as a result of the interaction of the magnetic field and currents in the melt is the movement of the cathode metal – or, in other words, its circulation.

The circulation of the metal affects the change in the shape of the side ledge and the scull, which participates in heat and mass transfer. The constant movement of the metal causes erosion of the lining of the cell, ultimately determining its lifespan. In the ideal case, the movement of the metal should consist in many small multidirectional contours that cancel each other out.

The results of calculating the speeds and directions of the cathode metal motion are presented in Fig. 2.



**Fig. 1. Models of cathode shells for an electrolyser having a Söderberg anode: a – counterforce, b – cradle**  
**Рис. 1. Модели катодных кожухов электролизера с анодом Содерберга:**  
**а – контрфорсного, б – шпангоутного**



Table 1

*Analysis of the results of the magnetic field calculation*

Таблица 1

*Анализ результатов расчета магнитного поля*

Parameter, mT	Bx			By		
	Counterforce	Cradle	$\Delta$	Counterforce	Cradle	$\Delta$
Maximum value	9.896	9.669	0.227	12.577	12.931	-0.354
Minimum value	-9.83	-9.209	-0.621	-11.205	-12.094	0.889
Absolute modulo value*	5.088	4.999	0.089	4.928	5.114	-0.186

\*Calculated as the average of a group of numbers taken for each modulo.

As can be seen from the data in Table 1, for electrolyzers with a cradle cathode shell, the transverse and vertical components of the magnetic field are less compensated than for baths having a counterforce casing. In turn, this is reflected both in the values of the average and maximum cathode metal velocities, as well as in the magnitude of the MHD stability margin.

**Metal circulation.** One of the resulting actions of electromagnetic forces formed as a result of the interaction of the magnetic field and currents in the melt is the movement of the cathode metal – or, in other words, its circulation.

The circulation of the metal affects the change in the shape of the side ledge and the scull, which participates in heat and mass transfer. The constant movement of the metal causes erosion of the lining of the cell, ultimately determining its lifespan. In the ideal case, the movement of the metal should consist in many small multidirectional contours that cancel each other out.

The results of calculating the speeds and directions of the cathode metal motion are presented in Fig. 2.

According to the data presented in Fig. 2, it is clear that both types of cathode casing are characterised by a four-circuit circulation system, determined by the corresponding location of the anode risers at the inlet and outlet ends of the electrolyser. Locations with maximum and minimum values coincide in both cases, both with regard to the circulation velocities as well as the directions of the ve-

locities.

It should be noted that the difference between the average and maximum values for both cases is insignificant, differing by hundredths of a cm/s. However, if we take this figure as an indicator, then for baths with a counterforce cathode shell the average circulation speeds will be 0.02 cm/s lower, while the maximum difference will be 0.18 cm/s.

**Magnetohydrodynamic stability margin.** The interaction between the Lorentz forces and gravitational waves at the metal-electrolyte interface causes the formation of interphase waves, which are referred to in terms of "MHD instability". In [21, 25], MHD instability was considered as the result of a complex process, including interactions between the motion of the phase boundary, electric currents, melt flow and magnetic fields.

The determination of  $\Delta U$  was performed for an electrolyser having a fixed current strength of 175 kA with a change in the values of the interpolar distance and metal level.

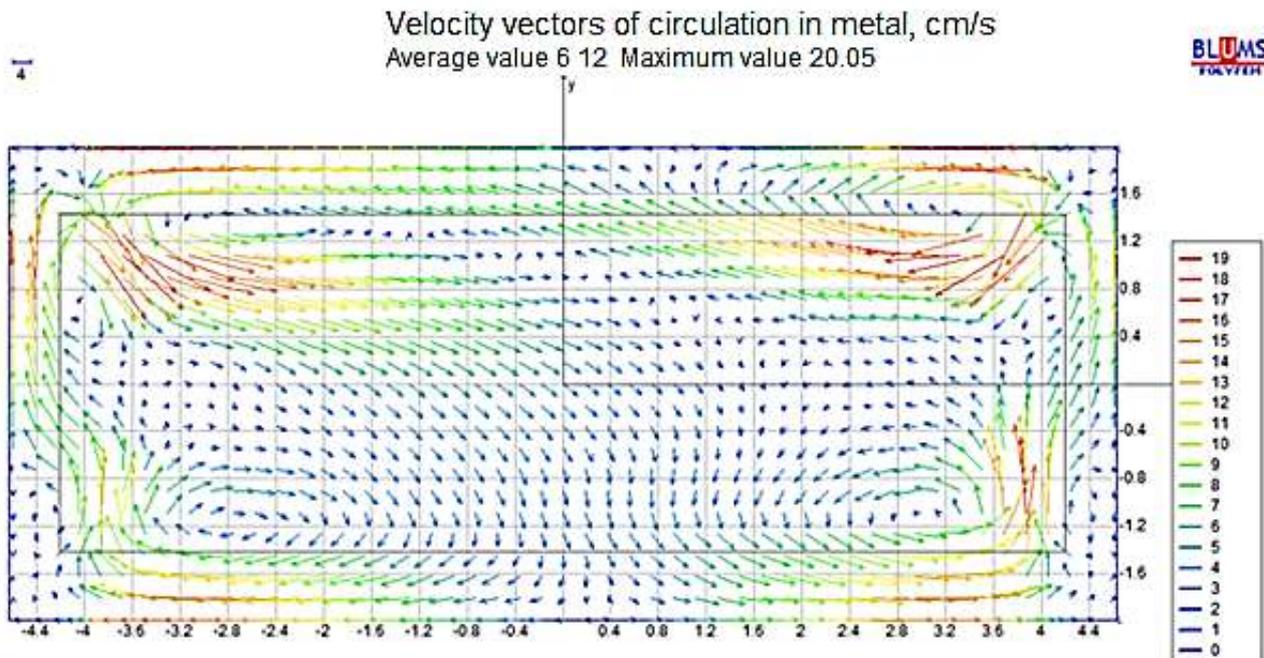
The margin of MHD stability was calculated as the difference between the operating voltage of the electrolyser in the normal technological mode of operation of the bath and the voltage when MHD instability occurs, i.e. the state of the cell in which the change in time of the operating voltage can be characterised (with some approximation) as harmonic with an oscillation amplitude of  $\sim 50 \div 100$  mV and a frequency of the order of  $\sim 0.3 \div 0.6$  Hz (Tables 2, 3). In Tables 2 and 3, the following colour indications apply: white colour –

damped metal vibrations, black colour – undamped metal vibrations; grey colour – waves decay only at a small perturbation amplitude.

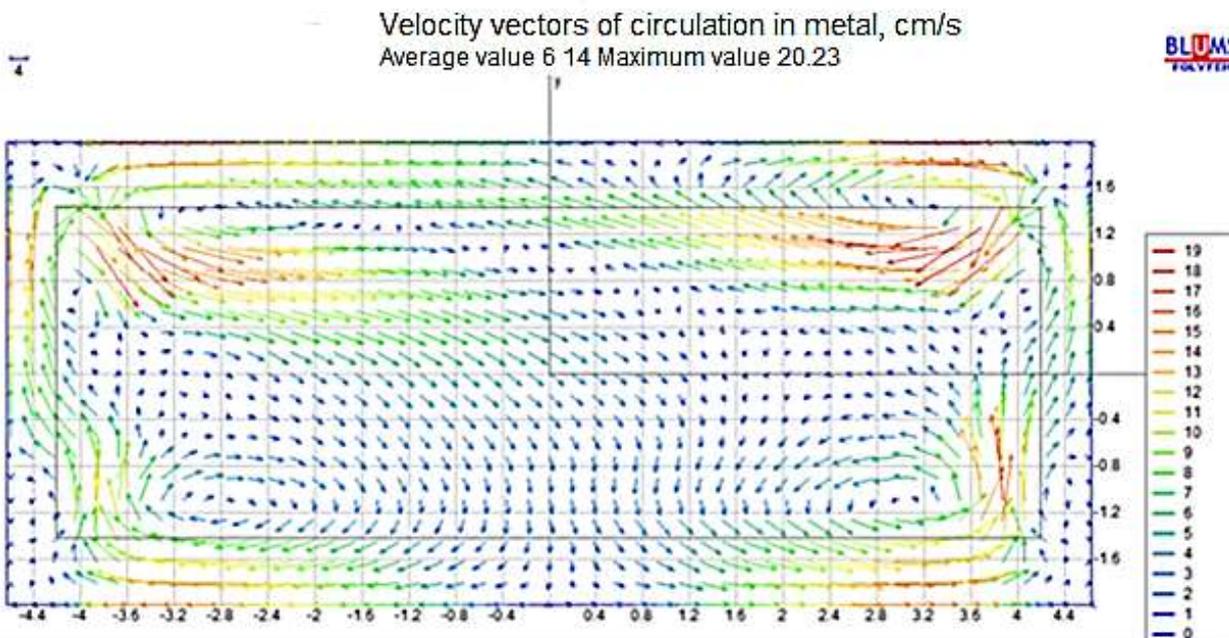
As can be seen from the data in Table 2, for an electrolyser having a buttress cath-

ode casing at a metal level of 34 cm, the margin  $\Delta U$  was 360 mV ( $4.49 - 4.15 = 0.36$  V).

As can be seen from the data in Table 3, for an electrolyser having a cradle cathode shell  $\Delta U$  was 380 mV ( $4.49 - 4.11 = 0.38$  V).



**a**



**b**

**Fig. 2. Speeds and directions of metal movement: a – counterforce shell, b – cradle shell**  
**Рис. 2. Скорости и направления движения металла: а – контрфорсный кожух, б – шпангоутный кожух**



**Table 2**  
**Magnetohydrodynamic stability margin for a bath with a counterforce cathode shell**  
**Таблица 2**

**Запас магнитогидродинамической стабильности для ванны с контрфорсным катодным кожухом**

ID, cm (Voltage, V)	Metal level, cm				
	33	34	35	36	37
3.8 (4.11)					
3.85 (4.13)					
3.9 (4.15)					
3.95 (4.16)					
4 (4.18)					
4.4 (4.30)					
4.7 (4.40)					
5 (4.49)					

**Table 3**  
**Magnetohydrodynamic stability margin for a bath with a cradle cathode shell**  
**Таблица 3**

**Запас магнитогидродинамической стабильности для ванны со шпангоутным катодным кожухом**

ID, cm (Voltage, V)	Metal level, cm				
	33	34	35	36	37
3.8 (4.11)					
4.1 (4.21)					
4.4 (4.30)					
4.7 (4.40)					
5 (4.49)					

#### 4. CONCLUSION

Magnetohydrodynamics plays a crucial role in cathode metal circulation and deformation, leading to a reverse transition of aluminium already obtained at the cathode into

the melt with the formation of oxide. Features of MHD phenomena in aluminium electrolyzers are associated with the formation of a magnetic field by the distribution of currents inside a melt, the presence of many different phases associated with the molten metal, as

well as the configurations of anode and cathode assemblies.

The MHD parameters of the mathematical modelling of the electrolyser operation with cradle and counterforce cathode shells are estimated based on an analysis of the compensation of magnetic fields, the nature of current distribution, the speed and direction of motion and the shape of the cathode metal deformation, as well as the MHD stability margin of the electrolyser.

In comparison to the counterforce

cathode shell design, the cradle design leads to a slight increase in the average and maximum circulation speeds of the cathode metal, as well as a decrease in the MHD stability margin of the electrolyser by 20 mV.

In order to clarify the results of calculations of the magnetic field and circulation speeds, it is necessary to verify the mathematical models using the magnetic field measurement data and circulation speeds of the cathode metal on electrolysers with various cathode shell designs.

### References

1. Mann V, Buzunov V, Pitertsev N, Chesnyak V, Polyakov P. Reduction in Power Consumption at UC RUSAL's Smelters 2012–2014. *Light Metals*. 2015;757–762. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-48248-4\\_128](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48248-4_128)
2. Mann V, Buzunov V, Pingin V, Zherdev A, Grigoriev V. Environmental Aspects of UC RUSAL's Aluminum Smelters Sustainable Development. *Light Metals*. 2019;553–563. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-05864-7\\_70](https://doi.org/10.1007/978-3-030-05864-7_70)
3. Buzunov V, Mann V, Chichuk E, Frizorger V, Pinaev A, Nikitin E. The First Results of the Industrial Application of the EcoSoderberg Technology at the Krasnoyarsk Aluminium Smelter. *Light Metals*. 2013;573–576. <https://doi.org/10.1002/9781118663189.ch98>
4. Mann V, Pingin V, Zherdev A, Bogdanov Y, Pavlov S, Somov V. SPL Recycling and Re-processing. *Light metals*. 2017;571–578. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-51541-0\\_71](https://doi.org/10.1007/978-3-319-51541-0_71)
5. Nemchinova NV, Tyutrin AA, Somov VV. Determination of Optimal Fluorine Leaching Parameters from the Coal Part of the Waste Lining of Dismantled Electrolytic Cells for Aluminum Production. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2019;239:544–549. (In Russ.) <https://doi.org/10.31897/PMI.2019.5.544>
6. Storozhev Yul, Zlobin VS. Perspective Solutions of Environmental Problems of Aluminum Plants. *Èkologija i promyšlennost' Rossii = Ecology and Industry of Russia*. 2018;22(12):10–13. (In Russ.) <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2018-12-10-13>
7. Sakhachev AY, Shepelev II, Zhukov EI, Nemchinova NV, Dashkevich RYa, Golovnykh NV, Zhyzhaev AM, Aleksandrov AV. Prospects of Application of the Technogenic Raw Additives in Alumina Production. In: *Tsvetnye metally i mineraly-2018: Trudy Desyatogo mezhdunarodnogo kongressa = Non-Ferrous Metals and Minerals-2018: Book of Papers of the Tenth International Congress*. 10–14 September 2018, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk; 2018, p. 136–140. (In Russ.)
8. Dubovikov OA, Brichkin VN, Ris AD, Sundurov AV. Thermochemical Activation of Hydrated Aluminosilicates and its Importance for Alumina Production. *Non-ferrous Metals*. 2018;2:11–16. <https://doi.org/10.17580/nfm.2018.02.02>
9. Ilyin AA, Soldatov SV, Belousova NV. Minimising Shrinkage Defects in Aluminium Alloy Ingots with the Help of Computer Modelling. *Tsvetnye metally*. 2019;9:75–79. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.09.12>
10. Arkhipov GV, Pingin VV, Shaydulín ER, Mukhametchin RKh, Zaykov YuP, Tolmacheva OYu. Improvement of Energy Efficiency of Aluminum Cells at RUSAL. In: *Tsvetnye metally i mineraly-2018: Trudy Desyatogo mezhdunarodnogo kongressa = Non-Ferrous Metals and Minerals-2018: Book of Papers of the Tenth International Congress*. 10–14 September 2018, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk; 2018, p. 361–364. (In Russ.)
11. Nemchinova NV, Radionov EYu, Somov VV. Studying Working Space Form Effect on Electrolyzer MHD Parameters at Aluminum Production. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(1):169–178. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-1-169-178>
12. Somov VV, Nemchinova NV, Radionov EYu. Mathematical Modeling in Thermoelectric Analysis of Electrolytic Cell Operation. In: *Perspektivy razvitiya tekhnologii pererabotki uglevodorodnyh i mineral'nyh resursov: materialy VII Vserossijskoj nauchno-praktičeskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem = Development Prospects of Hydrocarbon and Mineral Resource Processing Technology: Proceedings of VII All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation*. 19–20 April 2017, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2017, p. 29–31. (In Russ.)
13. Begunov AI. *Gas-Hydrodynamics and Metal Losses in Aluminum Electrolysis Cells*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 1992, 286 p. (In Russ.)
14. Radionov EYu, Tretyakov YaA, Nemchinova NV. Influence of Anode Frame Position on Magnetic-Hydrodynamic Parameters of S-8BME Electrolytic Cell. *Tekhnologiya metallov*. 2018;4:31–38. (In Russ.)
15. Pingin VV, Tret'jakov YaA, Radionov EYu, Gubin AA. *A Servicing Method of an Aluminium Electrolytic Cell with a Self-Baking Anode*. Patent RF, no. 2517623;



2014. (In Russ.)
16. Bojarevics V, Sira S. MHD Stability for Irregular and Disturbed Aluminum Reduction Cells. *Light Metals*. 2014:685–690.
17. Bojarevics V, Radionov E, Tretyakov Y. Anode Bottom Burnout Shape and Velocity Field Investigation in a High Amperage Electrolysis Cell. *Light metals*. 2018:551–556. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-72284-9\\_72](https://doi.org/10.1007/978-3-319-72284-9_72)
18. Arkhipov A, Alzarooni A, Jasmi AAI, Potocnik V. Improving the Understanding of Busbar Design and Cell MHD Performance. *Light Metals*. 2017:671–677. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-51541-0\\_82](https://doi.org/10.1007/978-3-319-51541-0_82)
19. He Zhi-yuan, Xia Tongsheng, Xiong Wenjun, Shen Qiyu, Li Bingfeng. Mathematical Models for the Novel Cathode Convexes in a Reduction Cell. *Journal of Metallurgy*. 2013. Available from: <http://downloads.hindawi.com/archive/2013/196891.pdf> [Accessed 25th November 2019]. <https://doi.org/10.1155/2013/196891>
20. Wang Fuqiang, Zhang Qinsong, Liu Wei, Yang Youjian, Wang Zhaowen. Impact of Local Cathode Electrical Cut-Off on Bath–Metal Two-Phase Flow in an Aluminum Reduction Cell. *Metals*. 2020;10(1). Available from: <https://www.mdpi.com/2075-4701/10/1/110> [Accessed 25th November 2019]. <https://doi.org/10.3390/met10010110>
21. Bojarevics V, Romerio MV. Long Wave Instability of Liquid Metal-Electrolyte Interface in Aluminium Electrolysis Cells. A Generation of Sele's Criterion. *European Journal of Mechanics – B/Fluids*. 1994;13(1):33–56.
22. Pingin VV, Tretyakov YaA, Radionov EYu, Nemchinova NV. Busbar Modernization Prospects for electrolysis cell S-8BM(S-8B)/(C-8BM (C-8B)). *Tsvetnyye metall*. 2016;3:35–41. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/tsm.2016.03.06>
23. Pingin VV, Platonov VV, Radionov EYu. *Aluminum Electrolysis Cell Busbar*. Patent RF, no. 2505626;2014. (In Russ.)
24. Dupuis M, Bojarevics V, Freibergs J. Demonstration Thermo-Electric and MHD Mathematical Models of a 500 kA Aluminum Electrolysis Cell. *Light Metals*. 2004:453–459.
25. Gjotheim K, Welch B. *Aluminium Smelter Technology*. Dusseldorf: Aluminium Verlag; 1993. 260 p.

#### Библиографический список

1. Mann V., Buzunov V., Pitertsev N., Chesnyak V., Polyakov P. Reduction in Power Consumption at UC RUSAL's Smelters 2012–2014 // *Light Metals*. 2015. P. 757–762. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-48248-4\\_128](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48248-4_128)
2. Mann V., Buzunov V., Pingin V., Zherdev A., Grigoriev V. Environmental Aspects of UC RUSAL's Aluminum Smelters Sustainable Development // *Light Metals*. 2019. P. 553–563. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-05864-7\\_70](https://doi.org/10.1007/978-3-030-05864-7_70)
3. Buzunov V., Mann V., Chichuk E., Frizorger V., Pinaev A., Nikitin E. The First Results of the Industrial Application of the EcoSoderberg Technology at the Krasnoyarsk Aluminium Smelter // *Light Metals*. 2013. P. 573–576. <https://doi.org/10.1002/9781118663189.ch98>
4. Mann V., Pingin V., Zherdev A., Bogdanov Y., Pavlov S., Somov V. SPL Recycling and Re-processing // *Light metals*. 2017. P. 571–578. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-51541-0\\_71](https://doi.org/10.1007/978-3-319-51541-0_71)
5. Немчинова Н.В., Тютрин А.А., Сомов В.В. Определение оптимальных параметров выщелачивания фтора из угольной части отработанной футеровки демонтированных электролизеров производства алюминия // *Записки Горного института*. 2019. Vol. 239. С. 544–549. <https://doi.org/10.31897/PMI.2019.5.544>
6. Сторожев Ю.И., Злобин В.С. Перспективные решения экологических проблем алюминиевых заводов // *Экология и промышленность России*. 2018. Т. 22. № 12. С. 10–13. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2018-12-10-13>
7. Сахачев А.Ю., Шепелев И.И., Жуков Е.И., Немчинова Н.В., Дашкевич Р.Я., Головных Н.В. [и др.] Перспективы применения техногенных сырьевых добавок в глиноземном производстве // *Цветные металлы и минералы-2018: сб. докл. Десятого международного конгресса (г. Красноярск, 10–14 сентября 2018 г.)*. Красноярск, 2018. С. 136–140.
8. Dubovikov O.A., Brichkin V.N., Ris A.D., Sundurov A.V. Thermochemical activation of hydrated aluminosilicates and its importance for alumina production // *Non-ferrous Metals*. 2018. No. 2. P. 11–16. <https://doi.org/10.17580/nfm.2018.02.02>
9. Ильин А.А., Солдатов С.В., Белоусова Н.В. Снижение количества усадочных дефектов при литье чушки из алюминиевых сплавов с использованием компьютерного моделирования // *Цветные металлы*. 2019. № 9. С. 75–79. <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.09.12>
10. Архипов Г.В., Пингин В.В., Шайдудлин Е.П., Мухаметчин Р.Х., Зайков Ю.П., Толмачева О.Ю. Повышение энергоэффективности электролизеров РУ-САЛа // *Цветные металлы и минералы-2018: сб. докл. Десятого международного конгресса (г. Красноярск, 10–14 сентября 2018 г.)*. Красноярск, 2018. С. 361–364.
11. Немчинова Н.В., Радионов Е.Ю., Сомов В.В. Исследование влияния формы рабочего пространства на МГД-параметры работы электролизера производства алюминия // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т. 23. № 1. С. 169–178. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-1-169-178>
12. Сомов В.В., Немчинова Н.В., Радионов Е.Ю. Математическое моделирование в термоэлектрическом анализе работы электролизера // *Перспективы развития технологии переработки углеводородных и*

минеральных ресурсов: материалы VII Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Иркутск, 19–20 апреля 2017 г.). Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2017. С. 29–31.

13. Бегунов А.И. Газогидродинамика и потери металла в алюминиевых электролизерах. Иркутск: Изд-во Иркутского ун-та, 1992. 288 с.

14. Радионо́в Е.Ю., Третьяков Я.А., Немчинова Н.В. Влияние положения анодной рамы на магнито́гидродинамические параметры электролизера С-8БМЭ // *Технология металлов*. 2018. № 4. С. 31–38.

15. Пат. № 2517623, Российская Федерация, С25С 3/12. Способ обслуживания алюминиевого электролизера с самообжигающимся анодом / В.В. Пингин, Я.А. Третьяков, А.А. Губин, Е.Ю. Радионо́в; заявитель и патентообладатель ООО «Объединенная Компания РУСАЛ Инженерно-технологический центр». Заявл. 29.12.2012; опубл. 27.05.2014.

16. Bojarevics V., Sira S. MHD stability for irregular and disturbed aluminum reduction cells // *Light Metals*. 2014. P. 685–690.

17. Bojarevics V., Radionov E., and Tretiyakov Y. Anode Bottom Burnout Shape and Velocity Field Investigation in a High Amperage Electrolysis Cell // *Light metals*. 2018. P. 551–556. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-72284-9\\_72](https://doi.org/10.1007/978-3-319-72284-9_72)

18. Arkhipov A., Alzarooni A., Jasmi A.A.I., Potocnik V. Improving the Understanding of Busbar Design and Cell MHD Performance // *Light Metals*. 2017. P. 671–677. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-51541-0\\_82](https://doi.org/10.1007/978-3-319-51541-0_82)

19. He Zhi-yuan, Xia Tongsheng, Xiong Wenjun, Shen Qiyu, Li Bingfeng. Mathematical models for the novel cathode convexes in a reduction cell // *Journal of Metal-*

*lurgy*. 2013. [Электронный ресурс]. URL: <http://downloads.hindawi.com/archive/2013/196891.pdf> (25.11.2019). <https://doi.org/10.1155/2013/196891>

20. Wang Fuqiang, Zhang Qinsong, Liu Wei, Yang Youjian, Wang Zhaowen. Impact of Local Cathode Electrical Cut-Off on Bath–Metal Two-Phase Flow in an Aluminum Reduction Cell // *Metals*. 2020. Vol. 10. Issue 1. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mdpi.com/2075-4701/10/1/110>

(25.11.2019). <https://doi.org/10.3390/met10010110>

21. Bojarevics V. and Romerio M.V. Long wave instability of liquid metal-electrolyte interface in aluminium electrolysis cells a generation of Sele's criterion // *European Journal of Mechanics – B/Fluids*. 1994. Vol. 13. Issue 1. P. 33–56.

22. Пингин В.В., Третьяков Я.А., Радионо́в Е.Ю., Немчинова Н.В. Перспективы модернизации ошиновки электролизера С-8БМ(С-8Б) // *Цветные металлы*. 2016. № 3. С. 35–41. <https://doi.org/10.17580/tsm.2016.03.06>

23. Пат. № 2505626, Российская Федерация, С25С 3/16. Ошиновка электролизера для получения алюминия / В.В. Пингин, В.В. Платонов, Е.Ю. Радионо́в; заявитель и патентообладатель ООО «Объединенная Компания РУСАЛ Инженерно-технологический центр». Заявл. 25.10.2012; опубл. 27.01.2014. Бюл. № 3.

24. Dupuis M., Bojarevics V., Freibergs J. Demonstration Thermo-Electric and MHD Mathematical Models of a 500 kA Aluminum Electrolysis Cell // *Light Metals*. 2004. P. 453–459.

25. Grjotheim K., Welch B. *Aluminium Smelter Technology*. Dusseldorf: Aluminium Verlag, 1993. 260 p.

#### Authorship criteria

Radionov E.Yu. has obtained and formalized the scientific results and bears the responsibility for plagiarism.

#### Conflict of interests

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

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

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

##### **Evgeniy Yu. Radionov,**

Cand. Sci. (Eng.),

Chief specialist of the Department of Mathematical Modeling and Measurements,

RUSAL Engineering and Technology Center LLC,

37/1, Pogranichnikov St., Krasnoyarsk 660111, Russia;

✉ e-mail: EYRadionov1983@gmail.ru

#### Критерии авторства

Радионо́в Е.Ю. получил и оформил научные результаты и несет ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Радионо́в Евгений Юрьевич,

кандидат технических наук,

главный специалист отдела математического

моделирования и измерений,

ООО «РУСАЛ Инженерно-технологический центр»,

660111, г. Красноярск, ул. Пограничников, 37/1,

Россия;

✉ e-mail: EYRadionov1983@gmail.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 669.712; 669.054.8

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-694-708>

## Применение оперативного метода контроля и управления на основе компьютерного физико-химического моделирования в процессах спекания глиноземной шихты

© И.И. Шепелев\*, Н.В. Головных\*\*, К.В. Чудненко\*\*, А.Ю. Сахачев\*\*\*

\*ООО «ЭКО-Инжиниринг», г. Ачинск, Россия

\*\*Институт геохимии им. А.П. Виноградова, г. Иркутск, Россия

\*\*\*АО «РУСАЛ Ачинск», г. Ачинск, Россия

**Резюме:** Цель – разработка компьютерного (на основе физико-химического моделирования) метода контроля и управления процессами минералообразования и выбросов вредных соединений при переработке нефелиновой руды методом спекания в трубчатых вращающихся печах. Используются технологические, математические и минералогические методы исследований, а также методы физико-химического моделирования с помощью программного комплекса «Селектор». Разработанная физико-химическая модель, в соответствии с технологическими этапами получения спека (сушка, дегидратация, декарбонизация, оплавление, спекание, охлаждение), условно разделена на шесть термодинамических резервуаров (зон печи), между которыми имитируется обмен веществом и энергией. Согласование результатов моделирования с производственно-статистическими данными АО «РУСАЛ Ачинск» осуществлено на основе анализа работы печи с объемом переработки 120 т шихты/ч. Показано, что при переработке нефелиновой шихты с получением глинозема и содопродуктов (при точности стандартных методов анализа 1–5%) отклонение производственных показателей по извлечению  $Al_2O_3$  от прогнозируемых результатов составляет при физико-химическом моделировании 0,1–0,6%, а при контроле теплофизических полей – 1,5–2,1%. Применение моделирования при процессе спекания с помощью программного комплекса «Селектор» позволяет значительно повысить степень контроля и управления циклом переработки сырья. Показано, что предложенный метод термодинамического анализа обеспечивает высокоточный контроль процессов минералообразования по технологическим зонам в печи спекания глиноземсодержащей шихты и гарантирует отклонение содержания  $Al_2O_3$  в спеке от прогнозируемых данных не более 0,1–0,6%. При этом степень извлечения  $Al_2O_3$  в раствор, рассчитанная с помощью физико-химического моделирования, составляет 85,8%, имеющая значение, согласно производственным данным, в среднем 85,7%.

**Ключевые слова:** производство глинозема, процесс спекания, физико-химическое моделирование, нефелиново-известняковая шихта, минимизация свободной энергии Гиббса, содопродукт

**Информация о статье:** Дата поступления 09 января 2020 г.; дата принятия к печати 27 мая 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 июня 2020 г.

**Для цитирования:** Шепелев И.И., Головных Н.В., Чудненко К.В., Сахачев А.Ю. Применение оперативного метода контроля и управления на основе компьютерного физико-химического моделирования в процессах спекания глиноземной шихты. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 3. С. 694–708. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-694-708>

## Application of an operational method for control and management based on computer physical and chemical modelling of alumina charge sintering

Igor I. Shepelev\*, Nikolay V. Golovnykh\*\*,  
Konstantin V. Chudnenko\*\*, Aleksey Yu. Sakhachev\*\*\*

\*ECO-Engineering LLC, Achinsk, Russia

\*\*Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk, Russia

\*\*\*RUSAL Achinsk JSCo, Achinsk, Russia

**Abstract:** The present study is aimed at the development of a method for computer control and management of mineral formation and emissions of hazardous compounds during processing of nepheline ore by sintering in tubular rotary kilns.

Technological, mathematical and mineralogical research approaches taken when developing the method included physical and chemical modelling using the Selector software package. In accordance with the technological stages of obtaining sintered mass (drying, dehydration, decarbonisation, reflow, sintering and cooling), the developed physical and chemical model is conventionally divided into six thermodynamic tanks (furnace zones) with simulation of mutual mass and energy transfer. Coordination of the simulation results with the production and statistical data of RUSAL Achinsk JSC was carried out by analysing a furnace operation with a processing volume of 120 tons of charge per hour. During the processing of nepheline charge with the production of alumina and sodium products (having a standard analysis methodical accuracy of 1–5%), the deviation of production indices for the extraction of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  from the predicted results was shown to comprise 0.1–0.6 and 1.5–2.1% for physical and chemical modelling and thermophysical field controlling, respectively. The applied sintering process modelling using the Selector software package provides for a significant increase in the degree of control and management of the raw material processing cycle. The proposed method of the thermodynamic analysis is shown to provide high-precision control of the mineral formation processes in technological zones of the alumina charge sintering furnace and to guarantee a deviation of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  content in the sintering mass from the predicted data of no more than 0.1–0.6%. The 85.8% rate of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  extraction calculated using the physical and chemical modelling corresponds closely with the average value of 85.7% according to production data.

**Keywords:** alumina production, sintering, physico-chemical modelling, nepheline and limestone charge, minimization of Gibbs free energy, sodium product

**Information about the article:** Received January 09, 2020; accepted for publication May 27, 2020; available online June 30, 2020.

**For citation:** Shepelev II, Golovnykh NV, Chudnenko KV, Sakhachev AYu. Application of an operational method for control and management based on computer physical and chemical modelling of alumina charge sintering. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2020;24(3):694–708. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-694-708>

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Разработка компьютерных методов контроля и управления, направленных на ресурсосбережение и экономию имеющихся запасов алюминиевого сырья, прежде всего нефелиновых руд с одновременным решением экологических проблем путем вовлечения альтернативных и малоотходных видов сырья, в том числе вторичных техногенных продуктов, является сегодня наиболее актуальной проблемой для российских глиноземных предприятий [1–5].

Используемые в системах производственного опробования<sup>1</sup> [6–9] показатели химического анализа технологических материалов и полученных продуктов глиноземного производства представлены важнейшими оксидами ( $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_3$ ), а также модульными соотношениями ( $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Однако этого бывает недостаточно, чтобы вести полный количественный контроль конденсированных и газообразных соединений технологических процес-

сов глиноземного производства. Особенно это касается примесей и «малых» компонентов, с которыми теряется при синтезе и переработке спеков существенное количество недоизвлекаемых и выбрасываемых с аэрозолями, шламами и стоками ценных компонентов ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_3$ ).

Применяемые при производственном контроле методы анализа – рентгено-спектральный и рентгенофлуоресцентный – имеют, как правило, чувствительность в пределах 3–5% от массы анализируемого вещества (пробы), поэтому они не способны количественно оценивать «побочные» минералы, и, следовательно, анализировать высокоточное количественное распределение химических элементов по фазам и продуктам. Привлечение сложных расчетов согласно производственным методикам [8–13] также не способствует получению более точной информации о степени протекания физико-химических процессов и составе контролируемых компонентов и продуктов.

В условиях промышленного произ-

<sup>1</sup> Лайнер А.И., Еремин Н.И., Лайнер Ю.А., Певзнер И.З. Производство глинозема: учеб. пособ. М.: Metallurgy, 1978. 344 с.



водства, когда результаты химических анализов запаздывают на период выработки всей партии сырья, применение компьютерной модели в системах управления процессами приготовления шихты дает возможность априорно рассчитывать и контролировать физико-химические характеристики технологических процессов и материалов. На основе компьютерного термодинамического анализа возможен баланс распределения химических элементов по фазам и продуктам с высокой точностью, поскольку каждому компоненту (элементу) количественно соответствует определенное значение его термодинамического (химического) потенциала. Это позволяет, предвидя заранее долю компонентов, теряемых с труднорастворимыми минералами, прогнозировать и более эффективно контролировать процессы шихтоподготовки и спекания и, следовательно, вносить необходимые коррективы и повышать на последующих этапах глиноземного производства степень извлечения ценных компонентов – оксидов алюминия и натрия.

## 2. ПРЕДМЕТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Суть спекания заключается в том, чтобы термохимическим путем взломать структуру алюмосиликата – нефелина  $\text{NaAlSiO}_4$  – и одновременно с помощью вспомогательных процессов (добавляя известняк и соду) связать кремнезем в кристаллическую решетку наиболее прочного из силикатов кальция (среди которых выделяется двухкальциевый ортосиликат –  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ). При этом нерастворимая форма глинозема переходит в растворимое соединение – алюминат натрия  $\text{NaAlO}_2$ . Данный передел осуществляется благодаря значительному снижению свободной энергии всей системы, и поэтому сопровождающие технологические процессы могут контролироваться на основе физико-химической модели.

В основу компьютерной модели, разработанной с помощью программного комплекса «Селектор», положен процесс

синтеза продукта спекания из компонентов глиноземной шихты, осуществляемый в трубчатой вращающейся печи и носящий в целом сложный и неравновесный характер. Однако данный процесс может быть структурно имитирован с помощью расчета ряда последовательных частичных равновесий – отдельных моделей (подмоделей) с учетом кинетических параметров, динамики массопереноса и образования метастабильных фаз. Протекание физико-химических процессов в отдельно взятой модели имитируется за счет перехода от модельного состава сырья (исходных компонентов) к равновесному составу компонентов, участвующих в модельных реакциях и превращениях. Модельные расчеты осуществляются с помощью алгоритма минимизации свободной энергии Гиббса одновременно во всех отдельных моделях (процессах). Алгоритм минимизации производит итерационный расчет поправок для искомым векторов (физико-математических координат), что обеспечивает движение к минимуму свободной энергии и достижение термодинамического баланса между расчетным количеством модельных компонентов и химических потенциалов геохимических элементов.

Компоненты модельной шихты, а также природных и техногенных видов сырья и топлива представлены модельной системой геохимических элементов, которая позволяет в изобарно-изотермических условиях прогнозировать модельный синтез новых минералов, расплавов и отходящих газов. При подготовке списка модельных компонентов учитываются данные о составе технологических веществ и материалов, полученные методом рентгенофазового и химико-минералогического анализа, а также сведения о процессах глиноземного производства<sup>1</sup> [1, 2, 7, 10–12]. При выполнении модельных расчетов используются термодинамические и другие физико-химические свойства компонентов, взятые из баз компьютерного обеспечения и программных средств [13–18].

В соответствии с технологическими этапами получения спека (сушка, дегидра-

тация, декарбонизация, оплавление, спекание, охлаждение) физико-химическая модель (ФХМ) условно разделена на шесть термодинамических резервуаров – подмоделей (рис. 1).

Каждый термодинамический резервуар соответствует определенной технологической зоне. Между резервуарами имитируется обмен веществом и энергией, что позволяет создать динамическую модель в целом неравновесного процесса. В каждую условную единицу времени (расчетном цикле) определяется фазовый состав во всех резервуарах. Образовавшиеся фазы и компоненты перемещаются в последующие технологические зоны. При каждом цикле в первый резервуар поступает новая порция шихты, после чего циклы повторяются до расходования запаса сырья. Одновременно в факельную зону подается порция смеси топлива и окислителя (воздуха), которая, сгорая, поддерживается печью в разогре-

том состоянии. После каждого цикла из последнего резервуара выгружается порция спека, а в систему газоочистки выводятся отходящие газы, движущиеся в противоположном направлении по отношению к движению шихты.

При ФХМ погрешность определения отдельных фаз достигает  $n \cdot 10^{-3}\%$ , а точность распределения по фазам отдельного компонента (элемента) –  $m \cdot 10^{-16}\%$  массы пробы. Отсюда следует, что более полный и точный контроль минералообразования при внедрении методов физико-химического моделирования имеет несомненные преимущества и позволяет в совокупности с известными способами на протяжении всего производственно-технологического цикла оперативно контролировать и вносить коррективы в процессы синтеза и переработки глиноземной шихты и спека.

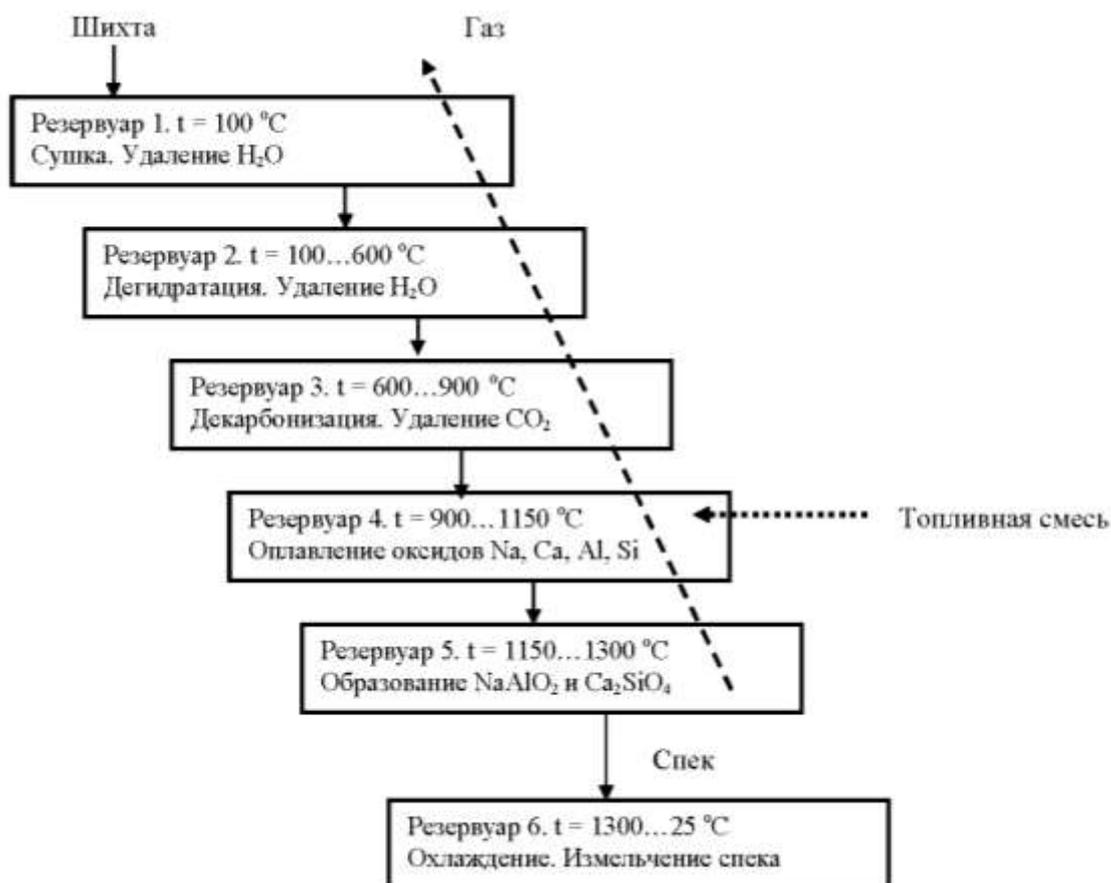


Рис. 1. Блок-схема термодинамических резервуаров процесса спекания сырьевой нефелиновой шихты  
 Fig. 1. Block diagram of thermodynamic reservoirs of raw nepheline charge sintering



Сопоставительный анализ с ближайшими модельными способами контроля позволяет сделать вывод о том, что метод физико-химического моделирования процесса спекания глиноземной шихты отличается тем, что моделирование осуществляется на основе термодинамического расчета процессов последовательного преобразования сырьевых компонентов с использованием системы термодинамических резервуаров, каждый из которых контролирует определенную технологическую зону. В каждой модельной зоне производится процедура минимизации свободной энергии как суммы произведений термодинамических (химических) потенциалов на векторное количество искоемых компонентов. При этом значения термодинамических (химических) потенциалов и соответствующие композиции продуктов спекания рассчитываются с учетом состава шихты и топлива, температуры нагрева и динамики перемещения материалов, а также получения расплава, синтеза и охлаждения спека. Минимизация свободной энергии завершается в точке физико-математического минимума, при этом достигается баланс между суммой химических потенциалов химических элементов (исходных веществ) и суммой термодинамических потенциалов равновесных компонентов – продуктов физико-химических превращений.

В ходе минимизации свободной энергии по результатам компьютерных термодинамических расчетов уточняются все химические реакции, отвечающие за процессы спекания и последующей переработки спека, а также стехиометрические (мольные) соотношения компонентов, участвующих в физико-химических превращениях.

Таким образом, применение компьютерной модели в системах управления обеспечивает получение адекватной и оперативной модели процесса спекания. Полнота и достоверность полученных данных о протекании процессов в непрерывно изменяющихся технологических условиях позволяют с высокой точностью прогнозировать степень извлечения ценных компонен-

тов. Принимая оперативные решения по корректировке процесса спекания всей партии шихты, можно повысить степень образования алюминатов ( $\text{NaAlO}_2$ ,  $\text{KAlO}_2$ ) и сульфата  $\text{K}_2\text{SO}_4$ , и этим обеспечить высокое извлечение соединений алюминия и содопродуктов в ходе гидрохимической переработки спека.

### 3. КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССА СПЕКАНИЯ НА ОСНОВЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Основное полезное свойство компьютерной модели заключается в способности корректно уточнять распределение основных химических элементов глиноземной шихты по минеральным фазам полученного спека. Согласно разработанному модельному регламенту спекания шихты, полезные для глиноземного производства компоненты – натрий и алюминий – трансформируются в наибольшей степени в растворимую фазу – алюминат  $\text{NaAlO}_2$ . Калий, которого обычно меньше натрия, распределяется между алюминатом  $\text{KAlO}_2$  и сульфатом  $\text{K}_2\text{SO}_4$ . Основным элементом, связывающим кремний, служит вводимый с известняком кальций, который при спекании переходит в нерастворимые фазы – двухкальциевый силикат  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$  и частично в анортит  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$  и гроссуляр  $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$  (ортосиликаты), и также незначительно в геленит  $\text{CaAl}_2\text{SiO}_7$  (метасиликат). В случае анортита, гроссуляра и геленита происходит потеря алюминия, который при выщелачивании спека остается в нерастворимом шламе. При использовании модельного способа в составе минеральных фаз спека контролируются главные химические соединения ( $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ,  $\text{NaAlO}_2$ ,  $\text{NaFeO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ), обеспечивающие максимальный вклад в минимизацию свободной энергии термодинамической системы при спекании сырьевых компонентов и добавок глиноземной шихты. Присутствующие в шихте в незначительном количестве примеси (Mg, Ti, Cr, V и др.) обладают низким значением химических потенциалов, и поэтому, не имея возможности образовать

самостоятельную фазу, изоморфно перераспределяются между ограниченным числом основных равновесных фаз спека. При моделировании все физико-химические превращения, имитируемые путем минимизации свободной энергии, завершаются расчетом равновесного состава полученного продукта. Поэтому из списка потенциальных модельных компонентов, взятых из баз программного обеспечения (более 1000 соединений), остается в решении в точно рассчитанных соотношениях не более 60 равновесных фаз и компонентов (включая газы и примеси), соответствующих реальному процессу спекания глиноземной шихты.

В ходе тестирования модельного метода контроля физико-химических превращений при спекании шихтовых материалов была проведена верификация подго-

товленной компьютерной модели по представленным АО «РУСАЛ Ачинск» данным. Согласование результатов моделирования с производственно-статистическими данными осуществлено на основе анализа работы печи с объемом переработки 120 т шихты/ч (рис. 2).

Согласно рис. 2 характерный вид расчетного количества конденсированных и газообразных веществ объясняется их движением во взаимно-противоположных направлениях, а также изменением их состава по мере протекания физико-химических превращений в технологических зонах печи (резервуарах). Таким образом, количество твердых фаз непрерывно убывает от первого до четвертого резервуара за счет процессов сушки, дегидратации и карбонизации материала шихты. В пятом

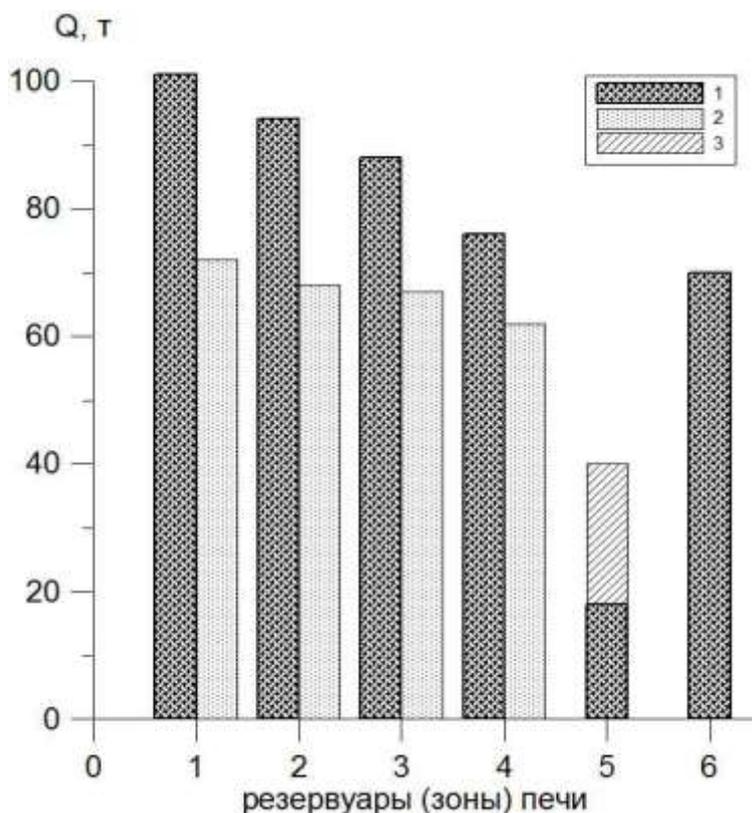


Рис. 2. Гистограмма распределения количества ( $Q, т$ ) минеральных фаз (1), газов (2) и расплава (3) по резервуарам (зонам) печи спекания: 1 – сушка, 2 – дегидратация; 3 – декарбонизация, 4 – оплавление оксидов; 5 – образование малой (первичной) порции алюмината и двухкальциевого силиката; 6 – охлаждение и кристаллизация спека. Модельный коэффициент масштабного перехода 1:100000 (в модели 1 г равен 1 т производственной шихты)

Fig. 2. Quantity ( $Q, t$ ) distribution histogram of mineral phases (1), gases (2) and melt (3) by sintering furnace reservoirs (zones): 1 – drying, 2 – dehydration; 3 – decarbonization, 4 – oxide sintering; 5 – formation of a small (initial) portion of aluminat and dicalcium silicate; 6 – cooling and crystallization of sintering product. Modeling scale-up factor is 1:100000 (1 g in the model is equal to 1 t of industrial charge)



резервуаре частично оплавленный материал претерпевает активное превращение в синтезированный продукт (спек), и далее, не задерживаясь, переходит в зону кристаллизации и охлаждения (шестой резервуар). Образование газов за счет сжигания топливной смеси, а также выделение газов из материала шихты возрастает, начиная от четвертого резервуара и быстро двигаясь к первому резервуару, где газы скапливаются, и затем отводятся в систему газотосоа и газоочистки.

Модельные расчеты показали, что для поддержания необходимого баланса в процессе спекания требуется каждый час подавать в печь 121 т шихты (при влажности ~ 40%) и 18 т топливно-воздушной смеси. Общее количество перерабатываемого материала, находящегося одновременно в горячих зонах печи, составляет 335 т, отводящих газов – 257 т, получаемого спека – 109 т. Снижение потерь ценных компонентов, составляющее 17 т (2% от загрузки шихты и топлива), достигается за счет улавливания пыли.

В дальнейшем с помощью разработанной компьютерной модели проведен расчет оптимальных составов исходной шихты глиноземного производства с использованием в процессе спекания ценных компонентов, содержащихся в разных видах сырья и модульных добавках. По результатам моделирования получены важные качественные изменения в составе продуктов спекания, которые могут происходить при подмешивании к нефелиновому

сырью бокситов одного из российских месторождений (табл. 1).

Результаты моделирования процессов спекания глиноземных шихт, представленные в табл. 1, показывают, что ввод ценного компонента в виде оптимизирующей добавки может улучшить фазовый состав спека, а именно – повышать в нем содержание наиболее растворимых фаз (алюминатов и сульфатов), но при этом снижать содержание шламовой породы (ортосиликатов, шпинелидов, метасиликатов). Однако при этом соотношение сопутствующих балластных минералов (шпинелидов, силикатов и др.) и технологических основных фаз ( $\text{NaAlO}_2$  и  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ) следует ограничить в оптимальных пределах:  $\leq 1:(5-6)\%$  масс. Исходя из результатов моделирования, было принято решение ограничивать в шихте содержание отдельных элементов и примесей, которые могут взаимодействовать с минералами Al и Na (K) и препятствовать образованию растворимых алюминатов и сульфатов, загрязняя технологические растворы (% от массы шихты):

- Fe не более 4,5–5,5%;
- Ti не более 0,3–0,5%;
- Cr в пределах 0,02–0,03%.

По этой причине подмешивание высокожелезистых и низкокачественных бокситов в нефелиновую шихту считается нецелесообразным.

Следовательно, применение метода компьютерного моделирования в производственных системах контроля и управления позволяет:

**Таблица 1**  
**Расчетный состав основных продуктов спекания сырьевых глиноземных шихт**  
**Table 1**

**Estimated composition of main sintering products of raw alumina mixtures**

Т, °С	Состав, % масс.				
	Алюминаты	Ортосиликаты	Шпинелиды	Метасиликаты	Сульфаты
Нефелиновая шихта					
1300	13,34	35,43	13,56	4,75	1,38
Шихта нефелин : боксит = 8:1					
1300	14,87	34,15	13,03	4,82	1,52
Шихта нефелин : боксит = 4:1					
1300	16,39	32,86	12,49	4,89	1,65

1) осуществлять точный прогноз и текущий контроль происходящих при спекании физико-химических изменений в составе шихтовых материалов и полученном спеке при переработке конкретной партии сырья и видов топлива;

2) получать более оперативные и точные сведения о протекании технологических процессов спекания, включая подачу и продвижение нагреваемой шихты в зонах печи, а также охлаждение и кристаллизацию синтезированного спека;

3) корректировать и оптимизировать компонентный состав шихтовых пульп на основе сравнения модельных и экспериментальных данных о параметрах продуктов спекания, что позволяет снизить расход сырья, модульных добавок и топлива;

4) минимизировать влияние негативных факторов, в т.ч. низкое качество сырья и добавок, недостаток избытка воздуха при сжигании топливной смеси и охлаждении спека, и добиваться повышения содержания в спеке извлекаемых оксидов алюминия и натрия;

5) прогнозировать по результатам моделирования процессов спекания результаты выщелачивания спека, получения и переработки алюминатных растворов;

6) принимать и вносить на основе данных моделирования коррективы в процессы шихтоподготовки и спекания, а также передавать по общезаводской компьютерной сети контроля и управления необходимые сведения в гидрохимический цех переработки спека.

#### **4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СПЕКАНИЯ И ПЕРЕРАБОТКИ ОПЫТНЫХ ШИХТ**

В связи с ухудшением качества нефелиновой руды на АО «РУСАЛ Ачинск» было проведено опробование в лабораторном масштабе: введение в глиноземную шихту техногенной добавки – шлака ферротитанового производства [19–23]. В ходе опробования наряду с экспериментальными исследованиями проводилось компьютерное моделирование процессов спекания

опытных шихт глиноземного производства с добавками шлака.

Опытные шихты для спекания составлялись на основе нефелиновой руды Кия-Шалтырского месторождения, известняка Мазульского месторождения, белого шлама, образующегося в процессе обескремнивания алюминатных растворов. Дозировка белого шлама составляла 10% от веса рудной смеси по сухим материалам. В качестве корректирующей добавки использовалась химически чистая сода. Химический состав исходных материалов, использованных для спекания лабораторных глиноземных шихт с добавками шлака ферротитанового производства, приведен в табл. 2.

При подшихтовке было принято во внимание, что шлак ферротитанового производства характеризуется широким спектром химико-минералогического состава, микроструктуры и физико-химических свойств [20, 21]. В настоящее время колебание среднего содержания  $Al_2O_3$  в шлаке составляет от 56 до 70%. Анализ изменения химического состава за последние два десятилетия показал, что глиноземистый шлак имеет непостоянный состав. Это обусловлено прежде всего использованием нового вида сырья, а именно – переходом с ильменита Кусинского месторождения на лейкоксеновый концентрат Иршанского ГОКа [22]. Данное обстоятельство требует опытной проверки для определения оптимальной дозировки шлака в шихты, а также тестирования добавки с помощью методов моделирования.

Приготовление опытной шихты осуществляли следующим образом. Исходные материалы измельчали до крупности 0,08 мм и затем смешивали в необходимых пропорциях. Готовые шихты увлажняли и прессовали в брикеты цилиндрической формы  $D = 20$  мм и  $H = 50-60$  мм. Брикеты высушивали на воздухе в течение суток и спекали в муфельной печи ПЛ-5-14 при температурах 1200°C, 1225°C, 1250°C, 1275°C. Режим спекания предусматривал скорость нагрева от 0 до 1000°C – 17 град/мин, от 1000°C до заданной температуры – 3–5°C/мин, выдержку при заданной



температуре – 15 мин. Степень оплавления спека оценивали по величине диаметальной усадки брикетов. Оценку качества спека производили по величине химического извлечения  $Al_2O_3$  и щелочей в раствор по методикам технологического и стандартного выщелачивания (приведены в табл. 3) [23].

В ходе лабораторных и промышленных исследований было установлено, что при добавках шлака ферротитанового про-

изводства (при максимально допустимой дозировке 2,3% от массы руды) в шихту происходит расшихтовка по известняковому и щелочному модулям (задаваемые молекулярные соотношения  $CaO/SiO_2 = 1,92$ ;  $(Na_2O+K_2O)/Al_2O_3 = 1,07$ ) материала, подаваемого в печь. Это приводило к ухудшению качества спека и, как следствие, снижению степени извлечения  $Al_2O_3$  и  $(Na_2O+K_2O)$  при выщелачивании спека.

Таблица 2

**Химический состав исходных материалов при спекании глиноземной шихты**

Table 2

**Chemical composition of starting materials at alumina mixture sintering**

Материал	Содержание основных компонентов в пересчете на оксиды, % масс.										
	$Al_2O_3$	$SiO_2$	$CaO$	$Na_2O$	$K_2O$	$Fe_2O_3$	$MgO$	$TiO_2$	$SO_3$	$Cr_2O_3$	ППП*
Нефелиновая руда	26,08	40,60	8,61	10,63	2,71	4,90	1,33	–	0,17	–	4,41
Известняк	0,60	1,89	53,20	–	–	0,50	1,03	–	0,40	–	42,40
Белый шлак	21,09	12,69	26,28	9,62	2,27	0,93	0,67	–	2,00	–	23,83
Шлак Fe-Ti	56,84	1,07	14,72	0,26	0,14	1,06	2,02	23,00	0,3	0,06	–

Примечание: \*ппп» – потери при прокаливании.

Таблица 3

**Условия выщелачивания спеков**

Table 3

**Sintering product leaching conditions**

Показатель	Единицы измерения	Стандартное выщелачивание
Крупность спека	мм	-1
Навеска спека	г	25
Количество раствора	мл	100
Содержание щелочи в исходном растворе: – каустической щелочи ( $Na_2O_{ку}$ ) – общей щелочи ( $Na_2O_{об}$ )	г/дм <sup>3</sup>	7
	г/дм <sup>3</sup>	28
Температура выщелачивания	°С	75
Продолжительность выщелачивания	мин	15
Объем горячей воды для промывки (75°С)	мл	300
Концентрация компонентов в алюминатном растворе после выщелачивания: $Al_2O_3$ $R_2O = (Na_2O + K_2O)$	г/дм <sup>3</sup>	32–36
		55–58

Согласно результатам моделирования причиной недоизвлечения ценных компонентов служит повышенное содержание в спеке примесных фаз – геленита  $\text{CaAl}_2\text{SiO}_7$  и анортита  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$  (в сумме до 5%). В связи с этим методами решения обратных физико-химических задач «состав шихты – свойство спека» был уточнен удельный расход сырьевых компонентов и добавок в шихту с учетом зольности топлива и солевого остатка содового раствора. Было установлено, что при добавках в шихту ферро-титанового шлака в пределах 1–1,2% от массы руды расшихтовка подаваемого в печь материала по известняковому и щелочному модулю материала существенно снижается. В результате оперативной корректировки модульных параметров производственной шихты содержание в спеке алюмината натрия  $\text{NaAlO}_2$  и двухкальциевого силиката  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$  достигает уровня проектных показателей.

Оценка эффективности применения компьютерного метода физико-химического моделирования была выполнена в сравнении с известным методом моделирования

теплофизических полей ANSYS CFX. Соответствующие технологические показатели глиноземного производства, полученные в результате контроля процессов спекания нефелиновой шихты и переработки спека с получением глинозема и содопродуктов в АО «РУСАЛ Ачинск» на основании метода ANSYS CFX и метода ФХМ, приведены в табл. 4.

Сравнение методов моделирования процесса спекания показывает, что по своим прогнозным данным физико-химическое моделирование наиболее близко к производственным показателям переработки нефелиновой шихты. Так, отклонение от производственных показателей по содержанию глинозема в спеке, рассчитанного по методу ФХМ, составляет 0,6%, а соответствующее отклонение, рассчитанное на основе теплофизических полей, равно 2,1%. При извлечении глинозема в раствор, при стандартном выщелачивании модельное отклонение от производственных показателей, рассчитанное на основе ANSYS CFX, составило 1,5%, а по методу ФХМ это отклонение не превышает 0,1%.

**Таблица 4**

**Сравнение результатов моделирования и производственных показателей переработки сырьевой нефелиновой шихты**

**Table 4**

**Comparison of modeling results and industrial indicators of raw nepheline charge processing**

Условия проведения компьютерного моделирования и производственные данные по спеканию нефелиновой шихты	Температура спекания шихты, °С	Содержание $\text{Al}_2\text{O}_3^*$ в спеке, %	Степень извлечения $\text{Al}_2\text{O}_3$ в раствор**, %
1. Моделирование с применением программы ANSYS CFX (моделирование теплофизических полей)	1278	15,6*	84,5**
2. Физико-химическое моделирование с применением термодинамического анализа (физико-химическая модель)	1237	16,25*	85,8**
3. Производственные показатели переработки нефелиновой шихты в АО «РУСАЛ Ачинск»	1240	16,14	85,7

*Примечание.* Степень извлечения  $\text{Al}_2\text{O}_3^{**}$  в раствор определялась по серии экспериментов по выщелачиванию спеков с содержанием глинозема, соответствующего модельному содержанию  $\text{Al}_2\text{O}_3^*$ , рассчитанному на основании методов ANSYS CFX и ФХМ.



Применение моделирования процесса спекания нефелиновой шихты с использованием программного обеспечения ANSYS CFX не может с достаточной точностью учесть все физико-химические превращения, которые происходят в данной системе при нагревании ее до 1300°C. Недоучет связан с вводом в шихту дополнительных сырьевых компонентов и примесей, влияющих на процессы минералообразования, а также с изменением по технологическим зонам печи фазового и химического состава компонентов. Поэтому при моделировании на основе теплофизических полей отмечаются значительные расхождения данных, рассчитанных по этой модели (содержание оксида алюминия в спеке 15,6%) с реальными производственными показателями по содержанию  $Al_2O_3$  в спеке 16,14%.

Отсюда следует, что наиболее целесообразной и адекватной к производственным условиям глиноземного производства считается модель, полученная на основе ФХМ, т.к. данная модель процесса спекания нефелиновой шихты обеспечивает получение более достоверных данных о протекании физико-химических реакций в зонах спекания и получение более качественных продуктов в процессе гидрохимической переработки спека.

Таким образом, результаты моделирования позволяют производить корректировку режимов технологического процесса шихтоподготовки и спекания сырьевой шихты синхронно с производственным контролем. На основе сопоставительного анализа результатов моделирования и экспериментальных данных может быть осуществлен метод расчета более точной дозировки сырьевых компонентов и корректирующих добавок.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, методика ФХМ, основанная на компьютерных средствах минимизации свободной энергии, позволяет в процессе нагрева и спекания нефелиновой шихты связать при разных температурах в

единый физико-математический алгоритм химические потенциалы исходных элементов шихты и топлива с термодинамическими потенциалами равновесных соединений и фаз расплава и спека. Это дает возможность с высокой точностью рассчитывать состав полученных продуктов и отходящих газов, а также уточнять химические реакции и их стехиометрические параметры.

Компьютерное моделирование процесса спекания шихты с помощью системы термодинамических резервуаров позволяет:

- 1) прогнозировать и контролировать в разных зонах печи физико-химические превращения, приводящие к формированию минеральных фаз и выделению газов;
- 2) определять основные этапы и степень протекания физико-химических процессов в печи с высокой степенью соответствия производственным показателям.

На основании компьютерных расчетов определены оптимальные значения технологических параметров, в том числе:

- 1) расход сырья и добавок, состав и соотношение компонентов шихты;
- 2) состав и расход топлива, энерго-технологические условия ведения процессов;
- 3) выход, технологическое и экологическое качество продукта;
- 4) состав и количество отходов (выбросов, сбросов).

Степень извлечения  $Al_2O_3$  в раствор, рассчитанная с помощью физико-химического моделирования, составила 85,8%, для сравнения, согласно производственным данным, она имела значение 85,7%. Эти результаты подтверждают высокую степень сходимости компьютерного физико-химического моделирования и реального производственного процесса переработки нефелиновой руды. Отклонение производственных показателей по извлечению  $Al_2O_3$  от прогнозируемых данных, полученных с помощью физико-химического моделирования, не превышает 0,6%.

Имея более точные и оперативные сведения о протекании технологических

процессов во всех зонах печи, а также при охлаждении и кристаллизации спека, можно производить расчет и корректировку измеряемого количества шихтовых компонентов и добавок в процессе шихтоподготовки с высокой точностью. Физико-химический контроль процессов минералообразования и газоотделения на протяжении технологического цикла получения и переработки глиноземного спека является тотальным и оперативным, это дает возможность про-

гнозировать результаты выщелачивания спека и получения алюминатных растворов. На основе полученных данных моделирования вносятся коррективы в процессы шихтоподготовки, спекания и гидрохимической переработки спека. Компьютерные модели могут быть использованы как инструмент расчета и согласования технологических данных в качестве компонента программного обеспечения в системах управления.

### Библиографический список

1. Арлюк Б.И., Лайнер Ю.А., Пивнев А.И. Комплексная переработка щелочного алюминийсодержащего сырья. М.: Металлургия, 1994. 384 с.
2. Bazhin V.Yu., Brichkin V.N., Sizyakov V.M., Cherkasova M.V. Pyrometallurgical Treatment of a Nepheline Charge Using Additives of Natural and Technogenic Origin // *Metallurgist*. 2017. Vol. 61. Issue 1-2. P. 147–154. <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0468-y>
3. Шепелев И.И., Сахачев А.Ю., Александров А.В., Головных Н.В., Стыглиц И.С., Жижаев А.М. Альтернативные направления переработки некондиционного нефелинового сырья // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: сб. материалов XXII Междунар. науч.-техн. конф. (г. Екатеринбург, 19–20 апреля 2017 г.). Екатеринбург: Изд-во «Форт Диалог-Исеть», 2017. С. 244–249.
4. Сахачев А.Ю., Шепелев И.И., Жуков Е.И., Немчинова Н.В., Дашкевич Р.Я., Головных Н.В. Перспективы применения техногенных сырьевых добавок в глиноземном производстве // Цветные металлы и минералы–2018: сб. докладов X Междунар. конгресса и выставки (г. Красноярск, 10–14 сентября 2018 г.). Красноярск: Легкие металлы, 2018. С. 136–141.
5. Шепелев И.И., Головных Н.В., Сахачев А.Ю., Жижаев А.М., Котлягин А.Г. улучшение качества спека известняково-нефелиновой шихты путем ввода в нее гипсоангидритового техногенного сырья // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 5. С. 225–239. <http://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-5-225-239>
6. Сизыков В.М., Корнеев В.И., Андреев В.В. Повышение качества глинозема и попутной продукции при переработке нефелинов. М.: Металлургия, 1986. 115 с.
7. Перепелицын В.А., Коротеев В.А., Рытвин В.М., Григорьев В.Г. Минеральный состав и применение высокоглиноземистого техногенного сырья // Труды Института геологии и геохимии им. акад. А.Н. Заварицкого. 2011. Вып. 158. С. 173–178.
8. Александров А.В., Немчинова Н.В., Володькина А.А. Методы контроля качества нефелинового спека // Перспективы развития технологии переработки углеводородных и минеральных ресурсов: матер. VII Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Иркутск, 19–20 апреля 2017 г.). Иркутск: Изд-во ИрНТУ, 2017. С. 9–10.
9. Dubovikov O.A., Brichkin V.N., Ris A.D., Sundurov A.V. Thermochemical activation of hydrated aluminosilicates and its importance for alumina production // *Nonferrous Metals*. 2018. No. 2. P. 11–16. <https://doi.org/10.17580/nfm.2018.02.02>
10. O'Connor D.J. Alumina extraction from nonbauxitic materials. Dusseldorf: Aluminium-Verlag, 1988. 234 p.
11. Li Wang Xing. Alumina production theory and technology. Changsha: Central South University, 2010. 411 p.
12. Aleksandrov A.V., Nemchinova N.V., Mineev G.G., Yakovleva A.A. Evaluation of the Effect of Nepheline Sinter Structure on Hydration Activity During Alumina Production // *Metallurgist*. 2018. Vol. 61. No. 11-12. P. 1016–1022. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0601-6>
13. Головных Н.В., Бычинский В.А., Шепелев И.И., Тупицын А.А. Физико-химическое обоснование экологически безопасных технологий производства глинозема при переработке алюминиевого сырья по способу спекания // Цветная металлургия. 2005. № 8. С. 15–24.
14. Шепелев И.И., Головных Н.В., Чудненко К.В., Сахачев А.Ю. Физико-химическое моделирование процессов глиноземного производства при использовании техногенных добавок // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: материалы XXIII Междунар. науч.-техн. конф., проводимой в рамках XVI Уральской горнопромышленной декады (г. Екатеринбург, 10–13 апреля 2018 г.). Екатеринбург: Изд-во «Форт Диалог-Исеть», 2018. С. 213–217.
15. Чудненко К.В. Термодинамическое моделирование в геохимии: теория, алгоритмы, программное обеспечение, приложения. Новосибирск: Изд-во «Гео», 2010. 287 с.
16. Holland T.J.B., Powell R. An enlarged and updated internally consistent thermodynamic data set with uncertainties and correlations: the system  $K_2O-Na_2O-CaO-MgO-MnO-FeO-Fe_2O_3-Al_2O_3-TiO_2-SiO_2-C-H_2O_2$  //



Journal of Metamorphic Geology. 1990. Vol. 8. P. 89–124. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1990.tb00458.x>

17. Robie R.A., Hemingway B.S. Thermodynamic properties of minerals and related substances at 298.15 K and 1 bar ( $10^5$  pascals) pressure and at higher temperatures // USGS. Science for a changing world [Электронный ресурс]. URL: <https://pubs.er.usgs.gov/metrics/publication/b2131/> (17.02.2020). <https://doi.org/10.3133/b2131>

18. Johnson J.W., Oelkers E.H., Helgeson H.C. SUPCRT92: A software package for calculating the standard molal thermodynamic properties of mineral gases, aqueous species, and reactions from 1 to 5000 bars and 0 to 1000°C // Computers and Geosciences. 1992. Vol. 18. Issue 7. P. 899–947. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(92\)90029-Q](https://doi.org/10.1016/0098-3004(92)90029-Q)

19. Тужилин А.С., Лайнер Ю.А., Сурова Л.М. Физико-химические основы переработки литейных шлаков с получением глинозема, коагулянтов и стройматериалов // *Металлургия легких металлов. Проблемы и перспективы: докл. Междунар. науч.-практ. конф.* (г.

Москва, 4–9 октября 2006 г.). М.: МИСиС, 2006. С. 484–486.

20. Смирнов Л.А., Сорокин Ю.В., Снятинская Н.М., Данилов Н.И., Ерёмин А.Ю. Переработка техногенных отходов. Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2012. 607 с.

21. Перепелицын В.А., Рытвин В.М., Коротеев В.А., Макаров А.Б., Григорьев В.Т., Гильварг С.И. [и др.]. Техногенное минеральное сырье Урала. Екатеринбург: УрО РАН, 2013. 332 с.

22. Перепелицын В.А., Рытвин В.М., Гильварг С.И. Ферросплавные алюмотермические шлаки. Екатеринбург: Уральский рабочий, 2014. 368 с.

23. Шепелев И.И., Сахачев А.Ю., Кожевников В.А., Дашкевич Р.Я., Головных Н.В. Утилизация шлаков ферротитанового производства с целью доизвлечения из них ценных компонентов // *Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: сб. докл. XIX Междунар. науч.-техн. конф.* (г. Екатеринбург, 23–24 апреля 2014 г.). Екатеринбург: УГГУ, Изд-во «Таилс КО», 2014. С. 159–162.

## References

1. Arlyuk BI, Layner JA, Pivnev AI. *Complex Processing of Alkaline Aluminium Containing Materials*. Moscow: Metallurgiya; 1994, 384 p. (In Russ.)

2. Bazhin VYu, Brichkin VN, Sizyakov VM, Cherkasova MV. Pyrometallurgical Treatment of a Nepheline Charge Using Additives of Natural and Technogenic Origin. *Metallurgist*. 2017;61(1-2):147–154. <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0468-y>

3. Shepelev II, Sakhachev AYu, Alexandrov AV, Golovnyh NV, Styglic IS, Zhizhaev AM. Alternative Directions of Substandard Nepheline Raw Materials Processing. In: *Naychnie osnovi i praktika pererabotki nekondizionnogo nefelinovogo siria: sbornik materialov XXII mezhdunarodnoy nauuchno-tehnicheskoy konferentsii = Scientific Bases and Processing Practice of Technogenic Raw Material Ores: Proceedings of XXII International Scientific and Technical Conference*. 19–20 April 2017, Ekaterinburg. Ekaterinburg: Fort Dialog-Iset'; 2017, p. 244–249. (In Russ.)

4. Sakhachev AY, Shepelev II, Zhukov EI, Nemchinova NV, Dashkevich RYa, Golovnyh NV, Zhyzhaev AM, Aleksandrov AV. Prospects of Application of the Technogenic Raw Additives in Alumina Production. In: *Tsvetnie metally i mineraly–2018: Sbornik dokladov X megdunarodnogo kongressa = Non-Ferrous Metals and Minerals-2018: Collected Reports of X International Congress*. 10–14 September 2018, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk: Light Metals; 2018, p. 136–141. (In Russ.)

5. Shepelev II, Golovnyh NV, Sakhachev AYu, Zhizhaev AM, Kotlyagin AG. Improving Limestone-Nepheline Charge Sinter Quality by Gypsum Anhydrate Technogenic Raw Material Introduction. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta*

= Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018;22(5):225–239. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-5-225-239>

6. Sizyakov VM, Korneev VI, Andreev VV. *Improving Quality of Alumina and By-Products under Nepheline Processing*. Moscow: Metallurgiya; 1986, 115 p. (In Russ.)

7. Perepelitsyn VA, Koroteev VA, Rytvin VM. Mineral Composition and Use of High Alumina Technogenic Raw Materials. *Trudy Instituta geologii i geohimii imeni akademika A.N. Zavarickogo*. 2011;158:173–178. (In Russ.)

8. Aleksandrov AV, Nemchinova NV, Volod'kina AA. Methods of Nepheline Cake Quality Control. In: *Perspektivy razvitiya tehnologii pererabotki uglevodorodnyh i mineral'nyh resursov: materialy VII Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem = Development Prospects of Processing Technology of Hydrocarbon and Mineral Resources: Proceedings of VII All-Russian scientific and practical conference with international participation*. 19–20 April 2017, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2017, p. 9–10. (In Russ.)

9. Dubovikov OA, Brichkin VN, Ris AD, Sundurov AV. Thermochemical activation of hydrated aluminosilicates and its importance for alumina production. *Non-ferrous Metals*. 2018;2:11–16. <https://doi.org/10.17580/nfm.2018.02.02>

10. O'Connor DJ. *Alumina Extraction from Nonbauxitic Materials*. Dusseldorf: Aluminium-Verlag; 1988, 234 p.

11. Li Wang Xing. *Alumina Production Theory and Technology*. Changsha: Central South University; 2010, 411 p.

12. Aleksandrov AV, Nemchinova NV, Mineev GG, Yakovleva AA. Evaluation of the Effect of Nepheline Sinter Structure on Hydration Activity During Alumina Production. *Metallurgist*. 2018;61(11-12):1016–1022. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0601-6>
13. Golovnykh NV, Bychinsky VA, Shepelev II, Tupitsyn AA. Physico-Chemical Substantiation of Environmentally Friendly Technologies of Alumina Production during Aluminum Raw Material Processing by the Method of Sintering. *Tsvetnaya metallurgiya*. 2005;8:15–24. (In Russ.)
14. Shepelev II, Golovnykh NV, Chudnenko KV, Sahachev AYu. Physical and Chemical Modelling of Processes of Aluminous Manufacture at Use of Technogenic Additives. In: *Naychnie osnovy i praktika pereraborki rudy i technogennoro siria: Materiali XXIII mejdunarodnoi naychnotenicheskoi konferenzii, provodimoj v ramkah XVI Ural'skoj gornopromyshlennoj dekady* = Scientific Bases and Processing Practice of Ores and Technogenic Raw Materials: Proceedings of XXIII International Scientific and Technical Conference held within the Framework of XVI Ural Mining Decade. 10–13 April 2018, Ekaterinburg. Ekaterinburg: Fort Dialog-Iset'; 2018, p. 213–217. (In Russ.)
15. Chudnenko KV. *Thermodynamic Modeling in Geochemistry: Theory, Algorithms, Software*. Novosibirsk: Geo; 2010, 287 p. (In Russ.)
16. Holland TJB, Powell R. An Enlarged and Updated Internally Consistent Thermodynamic Data Set with Uncertainties and Correlations: The System  $K_2O-Na_2O-CaO-MgO-MnO-FeO-Fe_2O_3-Al_2O_3-TiO_2-SiO_2-C-H_2-O_2$ . *Journal of Metamorphic Geology*. 1990;8:89–124. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1990.tb00458.x>
17. Robie RA, Hemingway BS. Thermodynamic Properties of Minerals and Related Substances at 298.15 K and 1 Bar ( $10^5$  Pascals) Pressure and at Higher Temperatures. USGS. *Science for a Changing World*. Available from: <https://pubs.er.usgs.gov/metrics/publication/b2131/> [Accessed 17th February 2020]. <https://doi.org/10.3133/b2131>
18. Johnson J, Oelkers EH, Helgeson HC. SUPCRT92: A Software Package for Calculating the Standard Molal Thermodynamic Properties of Mineral Gases, Aqueous Species, and Reactions from 1 to 5000 Bars and 0 to 1000 °C. *Computers and Geosciences*. 1992;18(7):899–947. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(92\)90029-Q](https://doi.org/10.1016/0098-3004(92)90029-Q)
19. Tuzhilin AS, Layner YuA, Surova LM. *Physicochemical Fundamentals of Foundry Slag Processing for Alumina, Coagulants and Building Materials Production*. In: *Metallurgiya legkih metallov. Problemy i perspektivy: doklady Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoi konferencii* = Reports of the International Scientific and Practical Conference. Metallurgy of Light Metals. Problems and Prospects. 4–9 October 2006, Moscow. Moscow; MISIS; 2006, p. 484–486. (In Russ.)
20. Smirnov LA, Sorokin YuV, Snyatinovskaya NM, Danilov NI, Yeremin AYu. *Recycling of Technogenic Waste*. Ekaterinburg: UIPTS; 2012, 607 p. (In Russ.)
21. Perepelitsyn VA, Rytvin VM, Koroteev VA, Makarov AB, Grigoryev VT, Gilvarg SI, et al. *Technogenic Mineral Raw Materials of the Urals*. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 2013, 332 p. (In Russ.)
22. Perepelitsyn VA, Rytvin VM, Gilvarg SI. *Alumino-thermic Ferroalloy Slags*. Ekaterinburg: Ural'skiy rabochiy; 2014, 368 p.
23. Shepelev II, Sahachev AYu, Kozhevnikov VA, Dashkevich RYa, Golovnykh NV. Ferro-titanium Production Slag Recycling for Complete Extraction of their Valuable Components. In: *Naychnie osnovy i praktika pereraborki rudy i texnogennogo siria: Sbornik dokladov XIX mejdunarodnoi nauchno-techicheskoi konferenzii* = Scientific Bases and Processing Practice of Technogenic Raw Material Ores: Proceedings of XIX International Scientific and Technical Conference. 23–24 April 2014, Ekaterinburg. Ekaterinburg: Tails Co; 2014, p. 159–162. (In Russ.)

#### Критерии авторства

Шепелев И.И., Головных Н.В., Чудненко К.В., Сахачев А.Ю. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

#### Authorship criteria

Shepelev I.I., Golovnykh N.V., Chudnenko K.V., Sahachev A.Yu. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

#### Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

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



СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Шепелев Игорь Иннокентьевич,**

доктор технических наук,  
директор,  
ООО «ЭКО-Инжиниринг»,  
662150, г. Ачинск, Южная Промзона, 1, Россия;  
✉ e-mail: ekoing@mail.ru

**Головных Николай Витальевич,**

кандидат химических наук,  
ведущий инженер,  
Институт геохимии им. А.П. Виноградова,  
664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1/А, Россия;  
e-mail: Golovnyh@igc.irk.ru

**Чудненко Константин Вадимович,**

доктор геолого-минералогических наук,  
старший научный сотрудник,  
заведующий лабораторией,  
Институт геохимии им. А.П. Виноградова,  
664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1/А, Россия;  
e-mail: chud@igc.irk.ru

**Сахачев Алексей Юрьевич,**

кандидат технических наук,  
директор по обеспечению производства,  
АО «РУСАЛ Ачинск»,  
662150, г. Ачинск, Южная Промзона, 1, Россия;  
e-mail: Sakhachev\_Aleks@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Igor I. Shepelev,**

Dr. Sci. (Eng.),  
Director of ECO-Engineering LLC,  
1, Yuzhnaya Promzona, Achinsk 662150, Russia;  
✉ e-mail: ekoing@mail.ru

**Nikolay V. Golovnykh,**

Cand. Sci. (Chemistry),  
Leading Engineer,  
Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS,  
1/A, Favorsky St., Irkutsk 664033, Russia;  
e-mail: Golovnyh@igc.irk.ru

**Konstantin V. Chudnenko,**

Dr. Sci. (Geology and Mineralogy),  
Senior Researcher, Head of Laboratory,  
Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS,  
1/A, Favorsky St., Irkutsk 664033, Russia;  
e-mail: chud@igc.irk.ru

**Aleksey Yu. Sakhachev,**

Cand. Sci. (Eng.),  
Production Support Director,  
RUSAL Achinsk JSCo,  
1, Yuzhnaya Promzona, Achinsk 662150, Russia;  
e-mail: Sakhachev\_Aleks@mail.ru

Уважаемые коллеги!

**Мы приглашаем Вас к участию в нашем журнале в качестве авторов, рекламодателей и читателей и сообщаем требования к статьям, принимаемым к публикации**

I. Статья представляется **в электронном и распечатанном видах**. Рекомендуемый объем статьи не менее 10 000 знаков.

К статье прилагаются:

1. Экспертное заключение.
2. Название рубрики, в которой должна быть размещена Ваша статья; УДК; название статьи; реферат (аннотация), количество слов в реферате – не менее 200; ключевые слова (4-5); сведения об авторах: название учреждения, его адрес; фамилия, имя, отчество (полностью); ученая степень; звание и должность; контактный телефон и e-mail (**вся информация предоставляется одним файлом**).
3. Статья должна иметь личную подпись автора; на статьях адъюнктов и аспирантов должна стоять также подпись научного руководителя.

II. **Текст статьи, сведения об авторах, реферат, ключевые слова, адрес учреждения, контактный телефон и E-mail** должны быть также представлены по электронной почте: [pgp@istu.edu](mailto:pgp@istu.edu) **в виде файла с расширением \*.DOC** – документа, построенного средствами Microsoft Word 97 или последующих версий.

При наборе статьи в Microsoft Word рекомендуются следующие установки:

- 1) параметры **страницы** и абзаца: отступы сверху и снизу – **2 см**; слева и справа – **2 см**; **табуляция – 2 см**; ориентация – книжная;
- 2) шрифт – **Times New Roman**, размер – **12**, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;
- 3) при вставке формул использовать **Microsoft Equation 3** при установках: элементы формулы выполняются **курсивом**; для греческих букв и символов назначать шрифт **Symbol**, для остальных элементов – **Times New Roman**. Размер символов: обычный – 12 пт, крупный индекс – 7 пт, мелкий индекс – 5 пт, крупный символ – 18 пт, мелкий символ – 12 пт. Все экспликации элементов формул необходимо также выполнять в виде формул;
- 4) **рисунки**, вставленные в текст, должны быть выполнены с разрешением 300 dpi, B&W – для черно-белых иллюстраций, Grayscale – для полутонов, максимальный размер рисунка с надписью: ширина 150 мм, высота 245 мм и представлены в виде файла с расширением \*.BMP, \*.TIFF, \*.JPG, должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. **Схемы, графики** выполняются во встроенной программе **MS Word** или в **MS Excel**, с **приложением файлов (представляемые иллюстрации должны быть четкими и ясными во всех элементах)**;
- 5) библиографические ссылки должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ Р 7.05 2008.

**Внимание! Публикация статьи является бесплатной.**

Стоимость журнала – 500 руб. (без стоимости почтовых расходов).

«Вестник ИрГТУ» включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, в DOAJ, международный каталог периодических изданий «UlrichsPeriodicals Directory», EBSCO, в Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU), представлен в Научной электронной библиотеке «КиберЛенинка» (CYBERLENINKA), рассылается в Российскую книжную палату, ВИНТИ РАН.

**Статьи, опубликованные в журнале «Вестник ИрГТУ», 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.

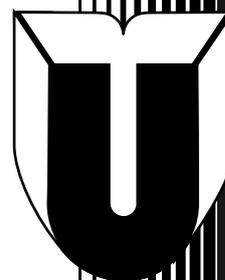
Телефон: **(3952) 40-57-56** – Привалова Галина Петровна, ответственный за выпуск.

Факс: **(3952) 405-100**, e-mail: [pgp@istu.edu](mailto:pgp@istu.edu)

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

# ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета



Научный журнал  
№ 3 (152) 2020

12+

Редактор Я.В. Макшанцева  
Художественный редактор Е.В. Хохрин  
Ответственный за выпуск Г.П. Привалова  
Перевод на английский язык В.В. Батицкой  
Верстка Н.П. Дзюндзя

Выход в свет 30.06.2020 г. Формат 60x90/8.  
Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 30.  
Тираж 500 экз. Заказ 145. Поз. плана 3н.

Издание распространяется **бесплатно**

Иркутский национальный исследовательский технический университет  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Отпечатано в типографии Издательства  
ФГБОУ ВО "Иркутский национальный  
исследовательский технический университет"

664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

ИЗДАТЕЛЬСТВО



Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета, 2020

